

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΘΗΝΩΝ

*ΠΜΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ*

Ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση των
στραγγισμάτων από τα απορρίμματα του
Χ.Υ.Τ.Α. Άνω Λιοσίων



Βιδάλη Ελένη

Γεωπόνος, Γ.Π.Α.

Αθήνα, 2011

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΠΜΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Μεταπτυχιακή διατριβή με θέμα:

«Ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των
στραγγισμάτων από τα απορρίμματα του
Χ.Υ.Τ.Α. Άνω Λιοσίων»

Επιβλέπων: Ιωάννης Αργυροκαστρίτης

Επιτροπή: Μαρία Ψυχογιού

Χρίστος Καραβίτης

Βιδάλη Ελένη

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ιωάννη Αργυροκαστρίτη, για τη πολύτιμη βοήθεια του και τη στήριξή του, επιστημονική και ηθική, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μου. Οι παρατηρήσεις και οι συμβουλές του αποτέλεσαν για εμένα σημαντικά εφόδια για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στη Λέκτορα κ. Μαρία Ψυχογιού, για τη βοήθειά της στο εργαστηριακό τμήμα της εργασίας μου, καθώς και για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις της στην ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος. Παράλληλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή, κ. Χρίστο Καραβίτη, για τη στήριξη και τη βοήθειά του για την εκπόνηση της διατριβής μου.

Ευχαριστίες επίσης απευθύνονται προς τα μέλη ΕΕΔΙΠ κ. Νατάσα Σγουμποπούλου και τον κ. Σπύρο Ρίζο, για τη βοήθειά τους, τις παρατηρήσεις τους και το ενδιαφέρον τους για τη σωστή εκτέλεση του πειράματος.

Ακόμη, ευχαριστώ θερμά τον Δρ. κ. Σίμο Μαλαμή και την ερευνητική ομάδα της Καθηγήτριας κ. Μαρίας Λοϊζίδου στο τμήμα Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για τη παραχώρηση του εργαστηρίου τους για την εκτέλεση μέρους των αναλύσεων και τη στήριξη της προσπάθειάς μου.

Επίσης, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον κ. Μιχάλη Κρητικάκο, υπεύθυνο του Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων Άνω Λιοσίων, για τη βοήθειά του στη λήψη του δείγματος απορριμμάτων που απαιτήθηκαν για το πείραμα, καθώς και για τις πληροφορίες που μας παραχώρησε και για τη ξενάγηση στον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων.

Ευχαριστίες εκφράζονται επίσης στη μεταπτυχιακή φοιτήτρια του διατμηματικού ΠΜΣ «Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος» του Ε.Μ.Π. με το Πα.Πει., Αθηνά Σκυριανού, με την οποία εκτελέσαμε το πείραμα καθώς και τις αναλύσεις των στραγγισμάτων που προέκυψαν από αυτό.

Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τους συμφοιτητές μου, Δημήτρη Σταματάκο, Δημήτρη Τσεσμελή και Γιώργο Στάμου για τη βοήθειά τους στη λήψη των δειγμάτων από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων.

Τέλος, τις βαθύτερες ευχαριστίες μου εκφράζω στην οικογένειά μου για τη στήριξή της, ηθική και οικονομική, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Σε αυτήν αφιερώνω τη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή με ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η εκτίμηση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των στραγγισμάτων που προκύπτουν από την αποδόμηση των απορριμμάτων από τον Χώρο Υγειονομικής Ταφής των Απορριμμάτων Άνω Λιοσίων. Απώτερος στόχος αυτής της μελέτης είναι η εκτίμηση της ενδεχόμενης μόλυνσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων από τυχόν ατυχία κατασκευής της στεγάνωσης του πυθμένα του ΧΥΤΑ από τα στραγγίσματα, τα οποία αποτελούν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα που προκύπτει από τους χώρους αυτούς.

Για την εκτέλεση του πειράματος απαιτήθηκε η πλήρωση δυο λυσιμέτρων με απορρίμματα που ελήφθησαν από βάθος 30 μέτρων από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων και η εφαρμογή σε αυτά βροχόπτωσης με τη μορφή κατάκλισης. Τα δυο λυσίμετρα ήταν σε λειτουργία για 16 και 19 ημέρες αντίστοιχα και η λήψη των στραγγισμάτων γινόταν σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η σύσταση των απορριμμάτων και κατά συνέπεια η ποσότητα και η ποιότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία. Τα ελληνικά απορρίμματα, σύμφωνα με την ΕΕΔΣΑ αλλά και με τις μέχρι τώρα μελέτες, αποτελούνται από μεγάλο ποσοστό ζυμώσιμων υλικών, πράγμα το οποίο τους αποφέρει μεγάλη αρχική περιεχόμενη υγρασία. Συνεπώς η συμπεριφορά τους είναι διαφορετική από την αντίστοιχη άλλων ευρωπαϊκών χωρών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, πράγμα το οποίο επιβεβαιώθηκε στη πορεία της εκτέλεσης του πειράματος.

Τα απορρίμματα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμά μας βρίσκονταν, όπως αποδείχθηκε, στη φάση της μεθανογένεσης όπου το pH και η αγωγιμότητα κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα, ενώ τα βαρέα μέταλλα βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Αναλύσεις έγιναν επίσης για τις συγκεντρώσεις των ιόντων νατρίου, καλίου, χλωρίου, των θειικών ιόντων και των αμμωνιακών ιόντων. Σύμφωνα με τις αναλύσεις καθ όλη τη διάρκεια του πειράματος, διαπιστώσαμε πως τα στοιχεία αυτά υπόκεινται στο φαινόμενο της έκπλυσης.

Η κίνηση του νερού και των παραγόμενων στραγγισμάτων μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων ήταν άλλο ένα θέμα προς εξέταση. Με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος διαπιστώσαμε πως η κίνηση του νερού μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων γίνεται με βάση την οριζόντια διήθηση.

Τέλος, έγινε χρήση του μοντέλου Υδρολογικής Αξιολόγησης των Επιδόσεων των ΧΥΤΑ (HELP), το οποίο σχεδιάστηκε για να βοηθήσει στη βέλτιστη κατασκευή των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων για την αποφυγή διαρροών των

στραγγισμάτων στον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα, απ' όπου προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα.

Abstract

The purpose of the present study is to evaluate the quantitative and qualitative characteristics of leachate, generated from waste decomposition in the landfill of Ano Liosia. The ultimate goal of this study was to evaluate the possible contamination of surface and groundwater from any misfortune construction of waterproofing the bottom of the landfill from leachate, which consists the biggest environmental problem resulting from these places.

For the experiment two lysimeters filled with waste taken from a depth of 30 meters from the landfill of Ano Liosia were used. In these two lysimeters we had to apply the mean rainfall height in the form of flooding. The lysimeters were operated for 16 and 19 days respectively and the leachate of both lysimeters was collected at regular intervals.

According to the literature, the waste composition and therefore the quantity and quality of leachate produced, depends on several factors such as humidity and temperature. The waste generated in Greece, according to HSWMA and the studies so far, consist of a large percentage of fermentable material, which gives them a big initial moisture content. Thus, their behavior is different from those of European countries reported in the literature. This characteristic was confirmed also, during the execution of our experiment.

The waste used in our experiment was, as demonstrated, in the phase of methanogenesis. During this phase, the pH and the electrical conductivity are in high level, while heavy metals are found in low concentration. Analyses were also made for the concentration of sodium ions, potassium, chloride, sulphates and ammonium ions. We observed that these elements are leached too.

The movement of water and leachate generated through the mass of waste was another subject we studied. Based on the results of the experiment, we found that the movement of water through the waste mass has a behavior similar to the one of horizontal infiltration for porous media.

Finally, we used the Hydrological Evaluation of Landfill Performance Model (HELP), which was designed to help in the optimization of the construction of landfills in order to prevent leakage of leachate to the underlying aquifer. Useful conclusions are reached.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1.....	9
Εισαγωγή.....	12
1.1. Αναγνώριση του προβλήματος.....	12
1.2. Αντικείμενο της έρευνας.....	13
1.3. Μεθοδολογία.....	13
1.4. Σκοπός της έρευνας.....	14
1.5. Διάρθρωση.....	14
Κεφάλαιο 2.....	16
Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας.....	16
1.1. Ιστορία της επεξεργασίας και διάθεσης αποβλήτων.....	16
1.2. Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων.....	19
1.3. Κυριότερες μέθοδοι διάθεσης απορριμμάτων.....	24
1.4. Χαρακτηριστικά μιας χωματερής.....	33
1.5. Στραγγίσματα από τους ΧΥΤΑ.....	34
1.6. Οικοσύστημα μιας χωματερής.....	39
1.7. Σύνθεση απορριμμάτων.....	43
1.8. Φυσικοχημικές διαδικασίες σε μια χωματερή.....	44
1.9. Φάσεις αποδόμησης απορριμμάτων.....	45
1.10. Ποιότητα στραγγισμάτων.....	47
1.11. Μέθοδοι επιτάχυνσης των διαδικασιών αποδόμησης σε μια χωματερή.....	53
Κεφάλαιο 3.....	60
Προσομοίωση των συνθηκών που λαμβάνουν χώρα στον ΧΥΤΑ με τη χρήση μοντέλων- χρήση μοντέλου HELP.....	60
1.1. Εισαγωγή.....	60
1.2. Το μοντέλο HELP.....	61
1.5. Προεπιλεγμένα χαρακτηριστικά του εδάφους και των απορριμμάτων.....	73
1.7. Χρήση βοηθητικών μοντέλων από το HELP.....	75
Κεφάλαιο 4.....	78
Συμπεράσματα από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας.....	78
Κεφάλαιο 5.....	80
Σύγκριση στραγγισμάτων από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων και των στραγγισμάτων που προέκυψαν από το πείραμα στο εργαστήριο.....	80
5.1. Εισαγωγή.....	80
5.2. Ιστορικό και περιγραφή της χωματερής.....	80

5.3. Σύσταση των απορριμμάτων	88
5.4. Ανάλυση στραγγισμάτων από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων	89
Κεφάλαιο 6	92
Εργαστηριακή προσομοίωση	92
5.1. Εισαγωγή	92
5.2. Πειραματική εγκατάσταση	92
5.3. Κατασκευή πειραματικής διάταξης	93
5.4. Πειραματική διαδικασία	95
5.5. Πρόγραμμα αναλύσεων	97
5.6. Αποδόμηση των απορριμμάτων- παραγωγή στραγγισμάτων	99
Κεφάλαιο 7	127
Εκτέλεση του μοντέλου HELP	127
7.1. Εισαγωγή	127
Κεφάλαιο 8	131
Συμπεράσματα	131
Βιβλιογραφία	134
Παράρτημα Α	140
Περιγραφή αναλυτικών μεθόδων ελέγχου των χαρακτηριστικών των στραγγισμάτων .	140

Πίνακας διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Κατανομή της κατά κεφαλήν παραγωγής αποβλήτων το χρόνο ανά τον κόσμο (European Environment Agency).....	22
Διάγραμμα 2. Κατανομή στερεών αποβλήτων στην Ε.Ε. τα έτη 1992-1997 (European Environment Agency)	22
Διάγραμμα 3. Μέση ποιοτική σύσταση αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα (ΕΕΔΣΑ, 2003) ...	23
Διάγραμμα 4. Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος κομποστοποίησης	26
Διάγραμμα 5. Ετήσια συνεισφορά στη παραγωγή μεθανίου από τα επιμέρους συστατικά των αποβλήτων στο Ηνωμένο Βασίλειο.....	32
Διάγραμμα 6. Διαχρονική εξέλιξη των ποιοτικών παραμέτρων των στραγγισμάτων από τους ΧΥΤΑ.....	36
Διάγραμμα 7. Στάδια της διαδικασίας βιοαποδόμησης	42
Διάγραμμα 8. Κύρια βήματα κατά τη διάρκεια της αναερόβιας φάσης αποσύνθεσης	46
Διάγραμμα 9. Ποσότητα στραγγισμάτων σε συνάρτηση με τη πάροδο του χρόνου για το πρώτο λυσίμετρο.....	100
Διάγραμμα 10. Ποσότητα στραγγισμάτων σε συνάρτηση με τη πάροδο του χρόνου για το δεύτερο λυσίμετρο.....	100
Διάγραμμα 11. Αθροιστική διήθηση για το πρώτο λυσίμετρο	101
Διάγραμμα 12. αθροιστική διήθηση για το δεύτερο λυσίμετρο	102
Διάγραμμα 13. Ταχύτητα διήθησης για το πρώτο λυσίμετρο	102
Διάγραμμα 14. Ταχύτητα διήθησης για το δεύτερο λυσίμετρο	103
Διάγραμμα 15. Κατανομή μεταβολής του συνολικού οργανικού άνθρακα του πρώτου λυσιμέτρου	104
Διάγραμμα 16. Κατανομή μεταβολής του συνολικού οργανικού άνθρακα του δεύτερου λυσιμέτρου	104
Διάγραμμα 17. Διακύμανση του pH στα στραγγίσματα από το πρώτο λυσίμετρο	105
Διάγραμμα 18. Διακύμανση του pH στα στραγγίσματα από το δεύτερο λυσίμετρο	106
Διάγραμμα 19. Κατανομή της αγωγιμότητας στο πρώτο λυσίμετρο	107
Διάγραμμα 20. Κατανομή της αγωγιμότητας στο δεύτερο λυσίμετρο	107
Διάγραμμα 21. Κατανομή ιόντων Cl ⁻ στο πρώτο λυσίμετρο.....	108
Διάγραμμα 22. Κατανομή ιόντων Cl ⁻ στο δεύτερο λυσίμετρο	109
Διάγραμμα 23. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ιόντων Χλωρίου στο πρώτο λυσίμετρο	109
Διάγραμμα 24. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ιόντων Χλωρίου στο δεύτερο λυσίμετρο	110
Διάγραμμα 25. Κατανομή SO ₄ ⁻² στο πρώτο λυσίμετρο	111
Διάγραμμα 26. Κατανομή SO ₄ ⁻² στο δεύτερο λυσίμετρο	111
Διάγραμμα 27. Κατανομή των ιόντων Νατρίου στο πρώτο λυσίμετρο	112
Διάγραμμα 28. Κατανομή των ιόντων Νατρίου στο δεύτερο λυσίμετρο	112
Διάγραμμα 29. Κατανομή των ιόντων Καλίου στο πρώτο λυσίμετρο.....	113
Διάγραμμα 30. Κατανομή των ιόντων Καλίου στο δεύτερο λυσίμετρο.....	113
Διάγραμμα 31. Εκθετική μείωση της συγκέντρωσης των ιόντων Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ και SO ₄ ⁻² στο πρώτο λυσίμετρο, με αρχική συγκέντρωση C ₀ την αρχική συγκέντρωση των στραγγισμάτων	114

Διάγραμμα 32. Εκθετική μείωση της συγκέντρωσης των ιόντων Cl^- , Na^+ , K^+ και SO_4^{2-} στο δεύτερο λυσίμετρο, με αρχική συγκέντρωση C_0 την αρχική συγκέντρωση των στραγγισμάτων	115
Διάγραμμα 33. Σύγκριση έκπλυσης των ιόντων χλωρίου και από τα δυο λυσίμετρα.....	115
Διάγραμμα 34. Σύγκριση έκπλυσης των ιόντων νατρίου και από τα δυο λυσίμετρα	116
Διάγραμμα 35. Σύγκριση έκπλυσης των ιόντων καλίου και από τα δυο λυσίμετρα	116
Διάγραμμα 36. Σύγκριση έκπλυσης των νιτρικών ιόντων και από τα δυο λυσίμετρα	117
Διάγραμμα 37. Κατανομή NH_4^+ στο πρώτο λυσίμετρο	118
Διάγραμμα 38. Κατανομή NH_4^+ στο δεύτερο λυσίμετρο	118
Διάγραμμα 39. Κατανομή του χαλκού στο πρώτο λυσίμετρο.....	120
Διάγραμμα 40. Κατανομή του μαγγανίου στο πρώτο λυσίμετρο	121
Διάγραμμα 41. Κατανομή του σιδήρου στο πρώτο λυσίμετρο.....	121
Διάγραμμα 42. κατανομή του νικελίου στο πρώτο λυσίμετρο	122
Διάγραμμα 43. Κατανομή του καδμίου στο πρώτο λυσίμετρο.....	122
Διάγραμμα 44. Κατανομή του ψευδαργύρου στο πρώτο λυσίμετρο	123
Διάγραμμα 45. Συνολική κατανομή όλων των ανιχνεύσιμων βαρέων μετάλλων στο πρώτο λυσίμετρο	123
Διάγραμμα 46. Κατανομή του χαλκού στο δεύτερο λυσίμετρο.....	124
Διάγραμμα 47. Κατανομή του μαγγανίου στο δεύτερο λυσίμετρο	124
Διάγραμμα 48. Κατανομή του σιδήρου στο δεύτερο λυσίμετρο.....	125
Διάγραμμα 49. Κατανομή του νικελίου στο δεύτερο λυσίμετρο.....	125
Διάγραμμα 50. Κατανομή του ψευδαργύρου στο δεύτερο λυσίμετρο	126
Διάγραμμα 51. Συνολική κατανομή των ανιχνεύσιμων βαρέων μετάλλων στο δεύτερο λυσίμετρο	126
Διάγραμμα 52. Μεταβολή της βροχόπτωσης και της απορροής σε σχέση με τον χρόνο.....	129
Διάγραμμα 53. Παραγωγή στραγγισμάτων σε σχέση με τη βροχόπτωση και διέλευση των στραγγισμάτων από το τελευταίο στρώμα εδάφους (που λειτουργεί ως φράγμα) και από τον πυθμένα του κυτάρου	130

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1. Διαδικασία κομποστοποίησης σε σειράδια	27
Εικόνα 2. Κίνηση- δημιουργία στραγγισμάτων μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων.....	34
Εικόνα 3. Τομή ΧΥΤΑ.....	35
Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση του υπόγειου προφίλ ενός Χώρου Υγειονομικής Ταφής επικίνδυνων Απορριμμάτων	66
Εικόνα 5. Σχέση μεταξύ των παραμέτρων διατήρησης της υγρασίας και των διαφόρων ειδών εδάφους	71
Εικόνα 6. Αεροφωτογραφία του ΧΥΤΑ Δυτικής Αττικής.....	81
Εικόνα 7. Σχηματική μηκοτομή ΧΥΤΑ Δυτικής Αττικής	82
Εικόνα 8. Διατομή διπλής στεγάνωσης πυθμένα, Διατομή διπλής στεγάνωσης πρανών.....	84
Εικόνα 9. Κατασκευή άνω αργιλικού φραγμού στον πυθμένα της Φάσης Ι	85
Εικόνα 10. Τοποθέτηση γεωσυνθετικών στα πρανή της Φάσης Ι	85
Εικόνα 11. Σχηματική τομή διαμόρφωσης πυθμένα.....	86
Εικόνα 12. Πυθμένας του λυσιμέτρου μετά τη προσθήκη της γεωμεμβράνης	93
Εικόνα 13. Συσκευή Mariotte	94
Εικόνα 14. Πιλοτική εγκατάσταση στο εργαστήριο	95
Εικόνα 15. Περατόμετρο μεταβλητού φορτίου.....	96
Εικόνα 16. Τρόπος συλλογής στραγγισμάτων, αποθήκευση στραγγισμάτων	98

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1. Σύγκριση της σύστασης Απορριμμάτων μεταξύ της Κίνας, της Ινδίας, της Κορέας, της Σιγκαπούρης, του Ηνωμένου Βασιλείου και των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής που παρήχθησαν το 2000.....	24
Πίνακας 2. Βέλτιστες τιμές παραμέτρων του προς ζύμωση υλικού	26
Πίνακας 3. Μέσα μηνιαία υδρολογικά δεδομένα (πηγή: EMY).....	96
Πίνακας 4. Υγρασία κατά μάζα και κατ' όγκο των απορριμμάτων των 2 λυσιμέτρων	97
Πίνακας 5. Συντελεστής αγωγιμότητας για διάφορα ιόντα (Tchobanoglous and Schroeder, 1897).....	107
Πίνακας 6. Μέσα μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης (πηγή: EMY) και θερμοκρασίας (πηγή: FAO).....	128
Πίνακας 7. Διαστρωμάτωση ενός κυττάρου για την εκτέλεση του προγράμματος HELP	128

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Αναγνώριση του προβλήματος

Η περιβαλλοντικά ορθή διαχείριση και διάθεση των αστικών στερεών αποβλήτων αποτελεί ένα από τα κυρίαρχα ζητήματα που απασχολούν τις σύγχρονες κοινωνίες. Ο πληθυσμός στα αστικά κέντρα αυξάνεται διαρκώς, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση των παραγόμενων απορριμμάτων. Παράλληλα όμως, αυξάνεται και η ευαισθητοποίηση τόσο της πολιτείας όσο και των πολιτών για την ανακύκλωση και συνεπώς τη μείωση των παραγόμενων αποβλήτων στη πηγή παραγωγής των.

Προς αυτή τη κατεύθυνση γίνονται διαρκώς προσπάθειες για την εξεύρεση εναλλακτικών λύσεων, όπως είναι η καύση, η λιπασματοποίηση κ.α.. Παρ'όλα αυτά, η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται παγκοσμίως, και ως επί το πλείστον στην Ελλάδα, αποτελεί η υγειονομική ταφή απορριμμάτων. Η μέθοδος αυτή αποτελεί τη πιο οικονομική και απλή λύση.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας ρύπανσης από τους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων αποτελεί η παραγωγή των στραγγισμάτων. Τα στραγγίσματα παράγονται ως αποτέλεσμα της διέλευσης του νερού μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων καθώς και της αποδόμησης αυτών. Τα στραγγίσματα είναι πλούσια σε οργανικά και ανόργανα συστατικά και συνιστούν τη κύρια αιτία μόλυνσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών της γύρω από τον ΧΥΤΑ περιοχής.

Παράλληλα, η αποδόμηση των απορριμμάτων μέσα στους ΧΥΤΑ αποτελεί μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία, γεγονός που καθυστερεί την επανένταξη του χώρου στο φυσικό περιβάλλον.

Όλα τα παραπάνω οδηγούν στην επιτακτική ανάγκη του καθορισμού τόσο νέων τρόπων διάθεσης των απορριμμάτων όσο και της βελτιστοποίησης του συγκεκριμένου τρόπου διάθεσης- ΧΥΤΑ- για τη διαφύλαξη του περιβάλλοντος. Προκειμένου να επιτευχθεί η προφύλαξη του περιβάλλοντος θα πρέπει να γνωρίζουμε την διαδικασία αποδόμησης των απορριμμάτων καθώς και τη ποσότητα και τη ποιότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει εξαρχής καλύτερη στεγάνωση του πυθμένα του Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων και να πραγματοποιείται η βέλτιστη επεξεργασία των συλλεγμένων στραγγισμάτων. Σπουδαία εργαλεία που βοηθούν στην εκτίμηση του παραγόμενου όγκου των στραγγισμάτων αποτελούν τα διάφορα μοντέλα, όπως είναι το υδρολογικό μοντέλο HELP που χρησιμοποιήσαμε στη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή.

1.2. Αντικείμενο της έρευνας

Τα αντικείμενα που ερευνήθηκαν ήταν:

- Η παραγωγή των στραγγισμάτων σε σχέση με τη βροχόπτωση
- Η ταχύτητα διήθησης της βροχόπτωσης μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων
- Η ποιότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων
- Η χρήση του υδρολογικού μοντέλου HELP για την εκτίμηση του παραγόμενου όγκου απορριμμάτων σε επίπεδο κυττάρου του ΧΥΤΑ

1.3. Μεθοδολογία

Για τη λήψη των δειγμάτων μας χρειάστηκε να μεταβούμε στη χωματερή Άνω Λιοσίων Αττικής, η οποία αποτελεί τη μεγαλύτερη της Ελλάδος. Τα δείγματα των απορριμμάτων που χρησιμοποιήσαμε για την εκτέλεση του πειράματος ελήφθησαν από βάθος 30 μέτρων και αφού είχαν εξαχθεί από γεωτρύπανο. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε σακούλες έτσι ώστε να διατηρηθεί η περιεχόμενη στα απορρίμματα υγρασία και μεταφέρθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, στο τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Προκειμένου να εκτελεσθεί το πείραμα, έπρεπε να δημιουργηθεί μια πιλοτική εγκατάσταση πειραματικών λυσιμέτρων. Έτσι, δημιουργήθηκαν δυο λυσίμετρα, ύψους 1 m και διαμέτρου 20 cm, τα οποία πληρώθηκαν με τα απόβλητα που είχαν ληφθεί από τη χωματερή των Άνω Λιοσίων. Στα λυσίμετρα αυτά εφαρμόσαμε κατάκλιση και παρακολουθήσαμε την ταχύτητα διήθησης του νερού μέσα από το δείγμα μας και τη ποσότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων. Η κατάκλιση που εφαρμόστηκε ήταν αντίστοιχη της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης από το 1951 έως το 2008, σύμφωνα με τα στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας για τον σταθμό της Ελευσίνας. Στη συνέχεια, τα παραγόμενα στραγγίσματα αναλύθηκαν ποιοτικά.

Παράλληλα, έγινε χρήση του προγράμματος Υδρολογικής Αξιολόγησης των Επιδόσεων των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance - HELP), το οποίο έχει σχεδιαστεί προκειμένου να αξιολογήσει τις υδρολογικές αποδόσεις ενός Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων. Η χρήση του μοντέλου αυτού έγινε για ένα συγκεκριμένο κύτταρο της χωματερής Άνω Λιοσίων, με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά που μας δόθηκαν από τους υπεύθυνους της χωματερής.

1.4. Σκοπός της έρευνας

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η εκτίμηση της ποιότητας και της ποσότητας των παραγόμενων στραγγισμάτων από τα ελληνικά απορρίμματα. Τα απορρίμματα που παράγονται στη χώρα μας έχουν την ιδιομορφία να έχουν μεγαλύτερη αρχική υγρασία σε σχέση με τα απορρίμματα άλλων χωρών, λόγω της μεγάλης περιεκτικότητάς τους σε ζυμώσιμα υλικά. Παράλληλα, η χρήση ενός μοντέλου που εκτιμά τον παραγόμενο όγκο των στραγγισμάτων, πιστεύουμε πως αποτελεί ένα από τα ισχυρότερα εργαλεία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους κατασκευαστές των ΧΥΤΑ, καθώς φαίνεται να αποτελούν τον μοναδικό μέχρι στιγμής τρόπο διάθεσης απορριμμάτων. Η προστασία του περιβάλλοντος άλλωστε αποτελεί μείζον ζήτημα στις μέρες μας.

1.5. Διάρθρωση

Κεφάλαιο 1: Αποτελεί την εισαγωγή της μελέτης και τη συνοπτική περιγραφή της.

Κεφάλαιο 2: Γίνεται η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για τα αστικά στερεά απόβλητα τόσο παγκοσμίως όσο και ειδικότερα για τα ελληνικά απορρίμματα. Αναφέρονται εκτενώς οι τρόποι διάθεσης των απορριμμάτων, η διαδικασία αποδόμησης αυτών μέσα στα κύτταρα της χωματερής και η ποιότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων.

Κεφάλαιο 3: Αναλύεται η χρήση και η εφαρμογή του Υδρολογικού μοντέλου HELP, οι παράμετροι που απαιτούνται για την εκτέλεσή του και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν.

Κεφάλαιο 4: Γίνεται μια συνοπτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και εξάγονται βασικότερα συμπεράσματα από αυτήν.

Κεφάλαιο 5: Γίνεται περιγραφή του Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων Άνω Λιοσίων Αττικής και παρουσιάζονται οι ποιοτικές αναλύσεις που μας δόθηκαν από τους υπευθύνους του χώρου, οι οποίες προκύπτουν από την ανάλυση δείγματος στραγγισμάτων που προκύπτουν από τη χωματερή.

Κεφάλαιο 6: Περιγράφεται η προσομοίωση του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων στο εργαστήριο, η κατασκευή, η πλήρωση και η λειτουργία των δυο λυσιμέτρων. Επίσης, παρουσιάζεται ο ρυθμός παραγωγής των στραγγισμάτων, η ποσότητα παραγωγής αυτών, η ταχύτητα διήθησης του νερού μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων καθώς και όλες οι ποιοτικές αναλύσεις που έγιναν για τα στραγγίσματα που προέκυψαν από τη πειραματική διάταξη.

Κεφάλαιο 7: Αναλύεται η εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου HELP και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του.

Κεφάλαιο 8: Αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία.

Κεφάλαιο 2

Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

1.1. Ιστορία της επεξεργασίας και διάθεσης αποβλήτων

Η ιστορική ανάπτυξη της επεξεργασίας και διάθεσης αποβλήτων είχε ως κίνητρο την ανησυχία για τη δημόσια υγεία. Η βιομηχανική επανάσταση μεταξύ του 1750 και του 1850 οδήγησε πολλούς ανθρώπους να μετακινηθούν από τις αγροτικές περιοχές στις αστικές, με αποτέλεσμα μια ογκώδη αύξηση του πληθυσμού που ζει στις πόλεις και μια επακόλουθη αύξηση του όγκου των αποβλήτων που παράγονται. Η αυξανόμενη παραγωγή των οικιακών αποβλήτων αντισταθμίστηκε από την αύξηση των βιομηχανικών αποβλήτων από τις διαρκώς αναπτυσσόμενες διεργασίες παραγωγής. Τα απόβλητα που δημιουργήθηκαν, περιείχαν μια σειρά από υλικά, όπως είναι σπασμένα γυαλιά, σκουριασμένα μέταλλα, υπολείμματα φαγητού και ανθρώπινα απόβλητα, ενώ ήταν επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, προσέλκυαν μύγες, ποντίκια και άλλα τρωκτικά, που με τη σειρά τους αποτελούσαν δυνητικές απειλές επειδή μπορούσαν να μεταφέρουν ασθένειες. Αυτό οδήγησε σε μια αύξηση της ευαισθητοποίησης για τη σχέση μεταξύ της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος.

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι δυνητικές απειλές για τη δημόσια υγεία, δημιουργήθηκε νομοθεσία σε πολλές χώρες, τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Για παράδειγμα, στη Μεγάλη Βρετανία, καθ'όλο το δεύτερο μισό του 19^{ου} αι., εισήχθησαν μια σειρά ενεργειών για την Απομάκρυνση των Οχλήσεων και τη Πρόληψη των Ασθενειών. Οι τοπικοί αρμόδιοι για αυτές τις ενέργειες έπρεπε να δημιουργήσουν ομάδες επιθεωρητών για την αντιμετώπιση των επιθέσεων και τον έλεγχο της μόλυνσης εντός των ορίων της πόλης. Αυτές οι ενέργειες ενισχύθηκαν από τις Δράσεις για τη Δημόσια Υγεία το 1875 και το 1936, οι οποίες καλύφθηκαν από μια σειρά μέτρων, κάποια από τα οποία είναι συνιφασμένα με τη διαχείριση και τη διάθεση των αποβλήτων. Η Δράση του 1875 όρισε τους τοπικούς αρμόδιους ως υπεύθυνους για τη διευθέτηση της μετακίνησης και διάθεσης των αποβλήτων. Η Δράση του 1936 εισήγαγε μια ρύθμιση για τον έλεγχο της διάθεσης των αποβλήτων στο νερό και όρισε έναν νόμο για τις οχλήσεις που συνδέονταν με οποιαδήποτε εμπορική, επιχειρηματική, κατασκευαστική κίνηση ή διαδικασία η οποία θα οδηγούσε στην υποβάθμιση της υγείας ή της συνοικίας (British Medical Association 1991; Clapp 1994; Reeds 1994). Στις ΗΠΑ, η αρχική νομοθεσία συμπεριλάμβανε έναν νόμο, το 1795, που δημιουργήθηκε από τις δημοτικές αρχές της Georgetown και της Washington, DC, ο οποίος απαγόρευε τη διάθεση των αποβλήτων στους δρόμους και υποχρέωνε τους ιδιώτες να απομακρύνουν τα απόβλητα από μόνοι τους ή να απευθύνονται σε ιδιωτικές εταιρίες, αρμόδιες γι' αυτό. Το 1856, ο Washington είχε δημιουργήσει σε πολλές πόλεις ένα ευρύ σύστημα συλλογής

αποβλήτων το οποίο υποστηριζόταν από τους φόρους. Ακόμη, μέχρι το 1915, το 50% των πόλεων των Ηνωμένων Πολιτειών είχαν σύστημα συλλογής αποβλήτων ενώ μέχρι το 1930 τέτοιου είδους συστήματα είχαν υιοθετηθεί από το 100% των πόλεων (Neal and Schubel 1987; McBean et al 1995).

Στα τέλη του 19^{ου} αι. ένα από τα κύρια συστατικά των οικιακών αποβλήτων που προερχόταν από τη καύση αυτών, ήταν η στάχτη και η τέφρα, οι οποίες αποτελούσαν μια πολύ χρήσιμη πηγή ενέργειας. Τα απόβλητα επίσης συμπεριλάμβαναν και ανακυκλώσιμα υλικά, όπως παλιά πήλινα σκεύη, χαρτιά, κουρέλια, γυαλιά, σιδερένια και χάλκινα αντικείμενα, τα οποία συνήθως απομακρύνονταν με το χέρι από ιδιωτικούς φορείς ή από ρακοσυλλέκτες οι οποίοι απομάκρυναν τα χρήσιμα κομμάτια. Τα περισσότερα από τα οικιακά απόβλητα, μπορούσαν επίσης να καούν στο σπίτι, ως «δωρεάν καύσιμο», ως συμπλήρωμα στο ήδη υπάρχον. Αυτά τα συστατικά των αποβλήτων που χρησιμοποιούνται ως καύσιμο, έχουν αναγνωρισθεί ως μια δυναμική πηγή φθηνής ενέργειας για τη κοινωνία σε σύνολο, ενώ η απομάκρυνση των αποβλήτων από τους ιδιωτικούς φορείς για τα απόβλητα προς τους δημόσιους οργανισμούς συλλογής αποβλήτων οδήγησε σε μια αύξηση της αποτέφρωσης. Η δημιουργία δημόσιων αποτεφρωτήρων εισήχθη στη Μεγάλη Βρετανία στα τέλη του 1870 και μέχρι το 1912 υπήρχαν πάνω από 300 αποτεφρωτήρες αποβλήτων, από τους οποίους οι 76 μπορούσαν να παράγουν ενέργεια (Van Santen 1993). Ένας από τους πρώτους δημόσιους αποτεφρωτήρες που λειτούργησε στις Ηνωμένες Πολιτείες ήταν το 1885 στην πόλη Allegheny, της Pennyslavia (Neal and Schubel 1987). Ωστόσο, πολλοί από τους αποτεφρωτήρες είχαν μικρό μέγεθος, ήταν χειροκίνητοι, πρόχειρα σχεδιασμένοι και χωρίς ιδιαίτερο κατασκευαστικό κόστος.

Ωστόσο, η αύξηση των αποτεφρωτήρων ερχόταν δεύτερη σε σχέση με τον κύριο τρόπο διάθεσης των αποβλήτων, τους σκουπιδότοπους, οι οποίοι ήταν είτε νόμιμοι είτε παράνομοι. Η ευκολία της διάθεσης των αποβλήτων σε κομμάτια γης και της συγκεντρωτικής διαχείρισής τους ανά πόλη ή ανά δήμο, οδήγησε στην όλο και αυξανόμενη προτίμηση αυτής της μεθόδου διάθεσης των αποβλήτων, ιδιαίτερα όταν οι μονάδες αποτέφρωσης ήταν δύσκολες και ακριβές στη διατήρηση. Καθώς ο χρόνος ζωής μιας μονάδας αποτέφρωσης έφθανε στο τέλος του, αυτές έπρεπε να διατεθούν για διάλυση και υγειονομική ταφή. Οι σκουπιδότοποι παρόλα αυτά όμως ήταν φτωχά κατασκευασμένοι, με ανοιχτά άκρα, πολλά παράσιτα και αποτελούσαν συχνές αιτίες πυρκαγιών. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από έναν απλό σκουπιδότοπο στον οποίο τα σκουπίδια ήταν εκτεθειμένα στην επιφάνεια της γης έγιναν γρήγορα αντιληπτές, με αποτέλεσμα να αρχίσει το θάψιμο των σκουπιδιών. Το θάψιμο των σκουπιδιών είχε το πλεονέκτημα της μείωσης των οσμών και της απομάκρυνσης των ποντικών και άλλων τρωκτικών, ενώ σύντομα αυτός ο τρόπος διάθεσης αποβλήτων έγινε λιγότερο επικίνδυνος για την υγεία. Κατά το πρώτο μισό του 20^{ου} αι. έγιναν κάποιες βελτιώσεις στους χώρους υγειονομικής ταφής

απορριμμάτων με βελτίωση του σχεδιασμού αυτών αλλά και της διαχείρισής τους. Όμως, αυτό δεν εφαρμόστηκε σε όλες τις περιοχές και πολλοί τέτοιοι δημοτικοί χώροι είχαν την ελάχιστη τεχνολογική ανάπτυξη, ενώ οι ανοιχτές χωματερές ήταν ακόμα πολύ κοινές. Όταν οι χώροι αυτοί γέμιζαν, καλύπτονταν με ένα λεπτό στρώμα εδάφους, ενώ υπήρχε η ελάχιστη προσοχή για τις επιπτώσεις των μολυσμένων στραγγισμάτων ή των αερίων από τους χώρους αυτούς (Mc Bean et al 1995).

Κατά τη διάρκεια του δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, η επεξεργασία και η διάθεση των αποβλήτων δεν αποτελούσε κύριο περιβαλλοντικό ζήτημα τόσο από τους πολίτες όσο και από τη νομοθεσία και λίγοι ήταν αυτοί οι οποίοι ρύθμιζαν τη διάθεση των αποβλήτων. Όμως, μια σειρά από γεγονότα στα τέλη του 1960 και του 1970, φωτογράφησαν τα απόβλητα ως τη κύρια αιτία της περιβαλλοντικής μόλυνσης. Ένας αριθμός περιπτώσεων χημικών, τοξικών θαμμένων αποβλήτων οδήγησαν στην ευαισθητοποίηση για τη διαχείριση των αποβλήτων και την ανάγκη για ένα αυστηρότερο νομοθετικό σύστημα ελέγχου των αποβλήτων. Ανάμεσα στα πιο σημαντικά γεγονότα, ήταν η ανακάλυψη το 1972, βαρελιών με τοξικό κυάνιο θαμμένα σε μια περιοχή η οποία χρησιμοποιούταν ως παιδική χαρά κοντά στο Nuneaton στο Ηνωμένο Βασίλειο, η διαρροή διηθημάτων και τοξικών ατμών σε κατοικίες στο Love Canal site, New York το 1977, το θάψιμο 3000 τόνων αποβλήτων αρσενικού και κυανίου μέσα σε λίμνη στη Γερμανία το 1971 και η διαρροή πολυχλωριωμένων διφαινυλίων (PCBs) μέσα σε ρύζι στην Ιαπωνία το 1968, το γνωστό ατύχημα «Yusho» (British Medical Association 1991).

Η μαζική αρνητική δημοσιότητα καθώς και η δημόσια κατακραυγή οδήγησαν στη πίεση για πιο αυστηρό έλεγχο από τη νομοθεσία του προβλήματος της διάθεσης των αποβλήτων. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, ως άμεσο αποτέλεσμα του περιστατικού του θαμμένου κυανίου στο Nuneaton, δημιουργήθηκε επείγουσα νομοθεσία με τη μορφή της Δράσης για την Εναπόθεση Δηλητηριωδών Αποβλήτων, το 1972. Η Δράση αυτή θεωρούσε ως αδίκημα την εναπόθεση αποβλήτων τα οποία ήταν δηλητηριώδη, επιβλαβή ή μπορούσαν να προκαλέσουν μόλυνση και υπεύθυνα για να δημιουργήσουν μια περιβαλλοντική καταστροφή. Περισσότερη νομοθεσία για την επεξεργασία και τη διάθεση των αποβλήτων ακολούθησε το 1974 με τη Δράση για τον Έλεγχο της Ρύπανσης, η οποία έλεγχε τη διάθεση των αποβλήτων στη γη μέσω ενός αδειοδοτημένου συστήματος παρακολούθησης διάθεσης των απορριμμάτων. Στις ΗΠΑ, παρόμοια νομοθεσία που καλύπτει τη διάθεση των απορριμμάτων στις χωματερές, αναπτύχθηκε με τις Δράσεις των Πόρων, της Διατήρησης και της Αποκατάστασης το 1976, οι οποίες ξεκίνησαν το διαχωρισμό μεταξύ των επιβλαβών και μη επιβλαβών αποβλήτων και τις ξεχωριστές προϋποθέσεις για τη διάθεση τους.

Η αναγνώριση της ανάγκης για περιβαλλοντικά αποδεκτά μέσα για τη διάθεση των απορριμμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τα περιστατικά παράνομης ταφής τους, οδήγησε στην αναβίωση του ενδιαφέροντος για την αποτέφρωση. Μεταξύ του 1969 και του 1981, τριάντα νέοι δημοτικοί αποτεφρωτήρες λειτούργησαν στο Ηνωμένο Βασίλειο, με μια συνολική δυνατότητα αποτέφρωσης 2.7 εκατομμυρίων τόνων. Αυτή η δυνατότητα ήταν, ωστόσο, λιγότερη από το 10% των δημοτικών αποβλήτων που παράγονταν το χρόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο. Τα κατάλοιπα παρέμεναν στους χώρους υγειονομικής ταφής ενώ η πλειονότητα των εργοστασίων δε μπορούσαν να προβούν σε ανάκτηση ενέργειας για να αντισταθμίσουν το κόστος διάθεσης. Η αναβίωση των αποτεφρωτήρων για τα δημοτικά απόβλητα είχε μικρή διάρκεια ζωής, καθώς το κεφάλαιο και τα λειτουργικά κόστη των εγκαταστάσεων έπρεπε να συναγωνιστεί τα πολύ χαμηλότερα κόστη της διάθεσης των αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής, και οι τοπικές αρχές λόγω των υψηλών πιέσεων για τον προϋπολογισμό, διάλεξαν τη φθηνότερη μέθοδο. Επιπλέον, η νομοθεσία για τον περιορισμό των εκπομπών από έναν αποτεφρωτήρα είχε ως αποτέλεσμα το κλείσιμο πολλών μονάδων αποτέφρωσης.

1.2. Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Η περιβαλλοντικά ορθή διαχείριση των αυξανόμενων ποσών των δύσκολα επεξεργάσιμων ή οργανικών αποβλήτων αποτελεί ένα από τα κύρια θέματα μείζονος σημασίας για τις περισσότερες πόλεις. Το λογικό σημείο εκκίνησης για τη διαχείριση των αστικών αποβλήτων είναι η επίτευξη της μείωσης των ποσοστών παραγωγής αυτών και η μετάβαση στη σωστή διάθεσή τους. Στην Ατζέντα 21, στη συμφωνία που επιτεύχθηκε μεταξύ των συμμετεχόντων κρατών στο πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη στο Ρίο ντε Τζανέιρο το 1992, επισημαίνεται στο κεφάλαιο 21, ότι η μείωση των αποβλήτων και η μεγιστοποίηση της περιβαλλοντικά ορθής επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης πρέπει να αποτελούν τα πρώτα βήματα για τη διαχείριση αυτών.

Ως «Στερεά Απόβλητα», νοούνται οι ουσίες ή τα αντικείμενα που εμφανίζονται κυρίως σε στερεά φυσική κατάσταση και από τις οποίες ο κάτοχός τους θέλει ή υποχρεούται να απαλλαγεί ενώ παράλληλα δε περιλαμβάνονται στον κατάλογο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σε αυτή τη κατηγορία περιλαμβάνονται όλα τα απόβλητα, με εξαίρεση αυτά που βρίσκονται σε υγρή φάση και δεν έχουν αξιόλογο ποσό αιωρούμενων στερεών καθώς και οι αέριοι ρύποι.

Τα Στερεά Απόβλητα ομαδοποιούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Στα Αστικά Απόβλητα και στα Ειδικά Απόβλητα, τα οποία με τη σειρά τους ομαδοποιούνται στα Επικίνδυνα Απόβλητα, στα Μη Επικίνδυνα Ειδικά και στα Ιατρικά Απόβλητα. Πιο αναλυτικά, στα Σ.Α περιλαμβάνονται:

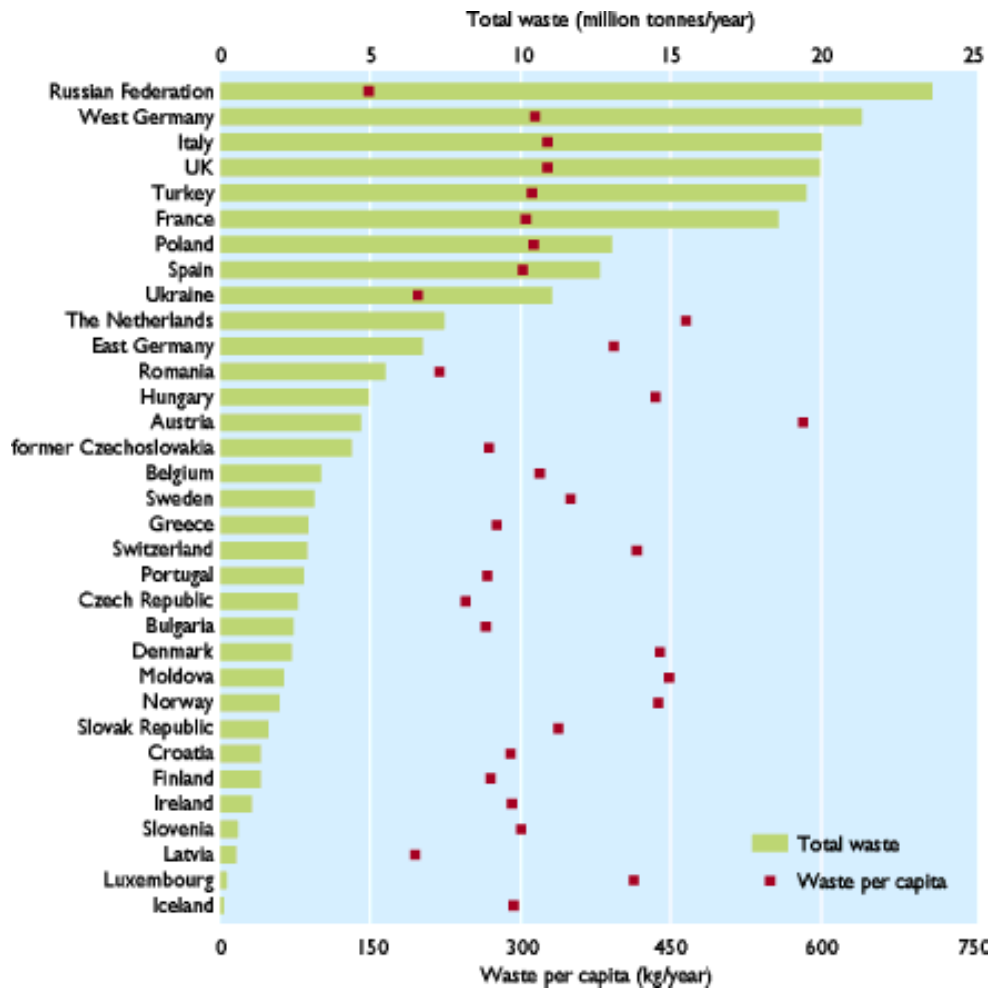
- Αστικά απορρίμματα (οικιακά, βιοτεχνικά, εμπορικά, οδοκαθαρισμού κλπ.).
- Στερεά ή υδαρή απόβλητα με αξιόλογο ποσοστό αιωρούμενων ουσιών, τα οποία όμως δε μπορούν να διατεθούν μαζί με τα οικιακά. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν ορισμένα βιομηχανικά, τοξικά ή αδρανή καθώς και απόβλητα από τη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας.
- Πετρελαιοειδή απόβλητα, δηλαδή απόβλητα που προέρχονται από την επεξεργασία του πετρελαίου, τα διυλιστήρια, τα χημικά εργοστάσια τα ναυπηγεία κλπ.
- Απόβλητα γεωργικών και κτηνοτροφικών δραστηριοτήτων.
- Απόβλητα ορυχείων και μεταλλείων.
- Απόβλητα εκσκαφών (από ξηρά και από θάλασσα).

Ωστόσο, στη παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε με τα Αστικά Στερεά Απόβλητα, τα οποία αποτελούνται από ένα ιδιαιτέρως ανομοιογενές μίγμα υλικών. Η ποιοτική ανάλυσή τους συμβάλλει στον προσδιορισμό των βασικών ποσοστιαίων κατηγοριών σε αυτά, έτσι ώστε να προσδιορισθεί η απαραίτητη πληροφορία για τη κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης, επεξεργασίας, αποθήκευσης, και διάθεσης αυτών. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency- ΕΕΑ) τα οικιακά απόβλητα ορίζονται ως τα στερεά απόβλητα που αποτελούνται από τα απορρίμματα τα οποία παράγονται από τα νοικοκυριά (ΕΕΑ 2003a). Τα παρόμοια με τα οικιακά απόβλητα είναι εκείνα που προέρχονται από άλλες πηγές παρά από την οικογένεια, όπως γραφεία και καταστήματα, και συλλέγονται και διατίθενται με τον ίδιο τρόπο όπως τα οικιακά απόβλητα. Η Ελληνική Εταιρία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΕΕΔΣΑ), στον όρο «Αστικά Στερεά Απόβλητα» περιλαμβάνει, εκτός των οικιακών αποβλήτων και των παρόμοιων με αυτά, τα ογκώδη απόβλητα (στρώματα, έπιπλα κλπ), τα απόβλητα από τη συντήρηση των κήπων, τα φύλλα, τα κλαδιά καθώς και τα απόβλητα από τον καθαρισμό των δρόμων.

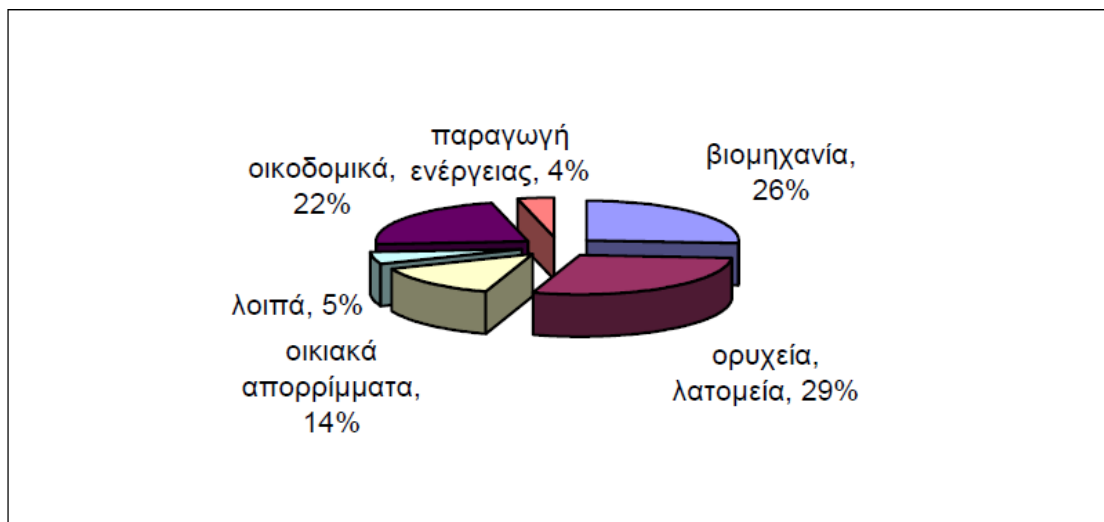
Η σύσταση των αστικών στερεών αποβλήτων διαφέρει από χώρα σε χώρα και από περιοχή σε περιοχή. Οι βασικοί παράγοντες που την επηρεάζουν είναι κοινωνικοοικονομικοί καθώς και χρονικοί (ανάλογα με την εποχή του χρόνου). Χαρακτηριστικά είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το ερευνητικό πρόγραμμα «Προσδιορισμός Φυσικοχημικών Παραμέτρων και Ποιοτικής Σύστασης Απορριμμάτων Λεκανοπεδίου Αττικής» το οποίο πραγματοποιήθηκε μεταξύ του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και του Πανεπιστημίου Δρέσδης, τη χρονική περίοδο Ιανουαρίου 2006- Μαρτίου 2008. Σύμφωνα με το παραπάνω πρόγραμμα, το Λεκανοπέδιο Αττικής ομαδοποιήθηκε σε τρεις Ζώνες βάσει συγκεκριμένων κοινωνικοοικονομικών κριτηρίων τα οποία ήταν ο οικονομικά ενεργός ή μη πληθυσμός, το επίπεδο μόρφωσης και η απασχόληση (εργοδότες και εργαζόμενοι). Στη πρώτη Ζώνη το ποσοστό του ενεργού πληθυσμού, του επιπέδου μόρφωσης και

των εργοδοτών και εργαζομένων (ελεύθεροι επαγγελματίες) ήταν υψηλά, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα της δεύτερης ζώνης που ήταν μεσαία και της τρίτης που ήταν χαμηλά. Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των τριών Ζωνών ήταν εμφανείς. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το ποσοστό των οργανικών και των χάρτινων απορριμμάτων το καλοκαίρι ήταν μεγαλύτερο στη πρώτη Ζώνη (49%), έναντι των άλλων δύο (44%, 44%). Αντίθετα η πρώτη Ζώνη εμφάνισε τα μικρότερα ποσοστά σε αδρανή (1,5% έναντι 2,8% και 2,1%), υφάσματα (2,3% έναντι 4,8% και 3,8%) και λεπτόκοκκα (1,8% έναντι 3,4% και 4,3%).

Σύμφωνα με την N.W.M.P. (National Waste Management Planning) (2003), στην Ελλάδα παράγονταν 4,6 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων τον χρόνο, με το 39% αυτών να παράγεται στην Αττική ενώ ένα μεγάλο ποσοστό αυτών (16%) παράχθηκε στη Περιφέρεια της Κεντρικής Μακεδονίας. Το 1997 η μέση παραγωγή ανερχόταν σε 0,97 kg/ κάτοικο/ ημέρα ενώ το 2001 η παραγωγή αυξήθηκε στο 1,14 kg/ κάτοικο/ ημέρα. Τα πρόσφατα στοιχεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής δείχνουν πως η παραγωγή για το 2007 έφθασε το 1,27 kg/ κάτοικο/ ημέρα, παραμένοντας όμως κάτω από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο (EU – 15) (ΥΠΕΚΑ, 2010). Οι προβλέψεις για το 2020 δείχνουν αύξηση του ρυθμού παραγωγής που ενδέχεται να φτάσει τα 1,469 kg/ κάτοικο/ ημέρα, ενώ παράλληλα δείχνουν μείωση στην τελική ποσότητα απορριμμάτων που θα καταλήγουν στους ΧΥΤΑ, κυρίως λόγω αύξησης του ποσοστού ανακύκλωσης.



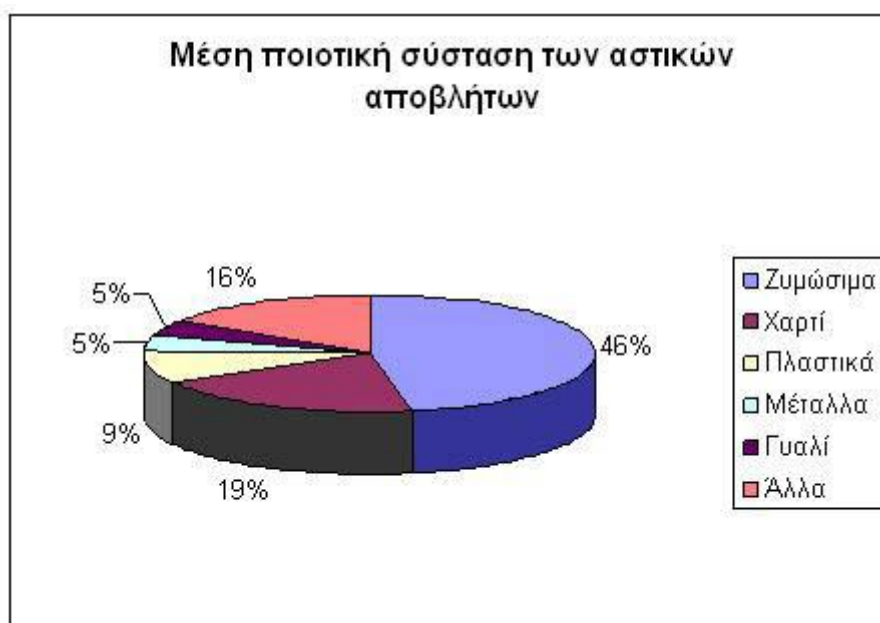
Διάγραμμα 1. Κατανομή της κατά κεφαλήν παραγωγής αποβλήτων το χρόνο ανά τον κόσμο (European Environment Agency)



Διάγραμμα 2. Κατανομή στερεών αποβλήτων στην Ε.Ε. τα έτη 1992-1997 (European Environment Agency)

Τα τελευταία χρόνια λόγω της ανάπτυξης των μεγάλων αστικών κέντρων, της συνεχούς αύξησης του τουριστικού ρεύματος, της ανόδου του βιοτικού επιπέδου και κατ' επέκταση της αλλαγής των καταναλωτικών συνηθειών παρατηρείται μια τάση σημαντικής αύξησης της παραγωγής των αστικών απορριμμάτων, με ταυτόχρονη αλλαγή της ποιοτικής τους σύστασης (αύξηση των επικίνδυνων και τοξικών απορριμμάτων, εμφάνιση σύνθετων υλικών συσκευασίας, κλπ). Δεδομένου ότι η ελληνική πολιτική για τη διαχείριση των αποβλήτων μόλις πρόσφατα άρχισε να λαμβάνει μέτρα για την ελαχιστοποίησή τους μέσω της οικιακής κομποστοποίησης και της πολιτικής «ο ρυπαίνων πληρώνει», το ποσοστό παραγωγής των αποβλήτων αναμένεται να παραμείνει και στο μέλλον στα σημερινά επίπεδα ή ακόμα και να αυξηθεί. Επιπλέον, η αναμενόμενη αύξηση του πληθυσμού (Eurostat 2009) θα συμπαρασύρει την αύξηση των απορριμμάτων, αν δε ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα και δε γίνει η σωστή διαχείρισή τους.

Σύμφωνα με την ΕΕΔΣΑ, η σύσταση των αποβλήτων στη χώρα μας κυμαίνεται ως εξής:



Διάγραμμα 3. Μέση ποιοτική σύσταση αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα (ΕΕΔΣΑ, 2003)

Country	Food, vegetable	Dust, cinder	Paper	Plastic, textile, wood, rubber	Metal, Glass	Others
China	43.6	23.1	6.7	16.7	3.4	6.5
India	41.8	40.3	5.7	8.2	4	0
Korea	24.6	NA	25.8	NA	13.5	NA
Singapore	23.5	17.1	21.6	11.1	24	2.7
UK	20	12	34	21	15	0
USA	15.3	10.9	29.8	29.4	12.7	1.9

Πίνακας 1. Σύγκριση της σύστασης Απορριμμάτων μεταξύ της Κίνας, της Ινδίας, της Κορέας, της Σιγκαπούρης, του Ηνωμένου Βασιλείου και των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής που παρήχθησαν το 2000

Σημειώσεις: Κίνα- δεδομένα από Chinese Research Academy of Environmental Science (2003); Ινδία- δεδομένα από Sharholly et al. (2007); Κορέα- δεδομένα από το Υπουργείο Περιβάλλοντος (2003); Σιγκαπούρη- δεδομένα από το Υπουργείο Περιβάλλοντος της Σιγκαπούρης; Ηνωμένο Βασίλειο- δεδομένα από Watts et al. (2002); Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής- δεδομένα από US EPA (2005)

1.3. Κυριότερες μέθοδοι διάθεσης απορριμμάτων

Ένα από τα πλέον δυσεπίλυτα προβλήματα της εποχής μας αποτελεί, και είναι αναγνωρισμένο παγκοσμίως, η συσσώρευση απορριμμάτων. Ειδικότερα στην Ελλάδα, θεωρείται ίσως το σοβαρότερο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Η αναπόφευκτη παραγωγή αποβλήτων δημιουργεί την ανάγκη για την ασφαλή επιφανειακή ή υπόγεια διάθεσή τους. Πάρα την εξέλιξη της τεχνολογίας αλλά και της νομοθεσίας, πολλές είναι οι χώρες, ανάμεσά τους και η χώρα μας, που επιμένουν στους παλαιούς τρόπους επεξεργασίας των αποβλήτων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αλληλεπίδραση πολλών παραμέτρων, όπως οικονομικοί, ενεργειακοί, περιβαλλοντικοί και πολιτικοκοινωνικοί παράμετροι. Έτσι, οι σπουδαιότερες μέθοδοι σήμερα για τη διάθεση των αστικών στερεών αποβλήτων αποτελεί η λιπασματοποίηση, η αποτέφρωση, η υγειονομική ταφή και η ανακύκλωση, η οποία θα έπρεπε να αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι σε όλες τις παραπάνω μεθόδους, εάν θέλουμε να μιλάμε για μια σωστά ολοκληρωμένη διαχείριση απορριμμάτων.

1.3.1. Λιπασματοποίηση ή κομποστοποίηση

Λιπασματοποίηση είναι η αερόβια βιολογική αποδόμηση του βιοαποικοδομήσιμου οργανικού τμήματος των αποβλήτων (απόβλητα κήπων και νοικοκυριών) από τους

μικροοργανισμούς, τελικό προϊόν της οποίας είναι μια ουσία με χουμική δομή που χρησιμοποιείται κυρίως ως εδαφοβελτιωτικό.

Η επίτευξη της παραπάνω διαδικασίας με τον βέλτιστο τρόπο εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι οι αερόβιες συνθήκες, η υγρασία, η σχέση άνθρακα προς άζωτο (C/N), το μέγεθος των τεμαχιδίων του προς ζύμωση υλικού, το pH και η θερμοκρασία ζύμωσης.

Ο περιοδικός αερισμός του υλικού είναι απαραίτητος, έτσι ώστε να παρέχεται στους μικροοργανισμούς η απαραίτητη ποσότητα οξυγόνου. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν η περιεκτικότητα σε οξυγόνο πέσει κάτω από 5%, η διαδικασία επιβραδύνεται, αρχίζουν να επικρατούν αναερόβιες συνθήκες και εκλύονται δύσσομα αέρια.

Η περιεχόμενη υγρασία στο ζυμούμενο υλικό είναι απαραίτητη για τη δράση των μικροοργανισμών. Η ποσότητα εκείνη που κρίνεται απαραίτητη για την ομαλή πορεία της ζύμωσης εξαρτάται από τη φύση του υλικού και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 50% και 60% σε υγρή φάση.

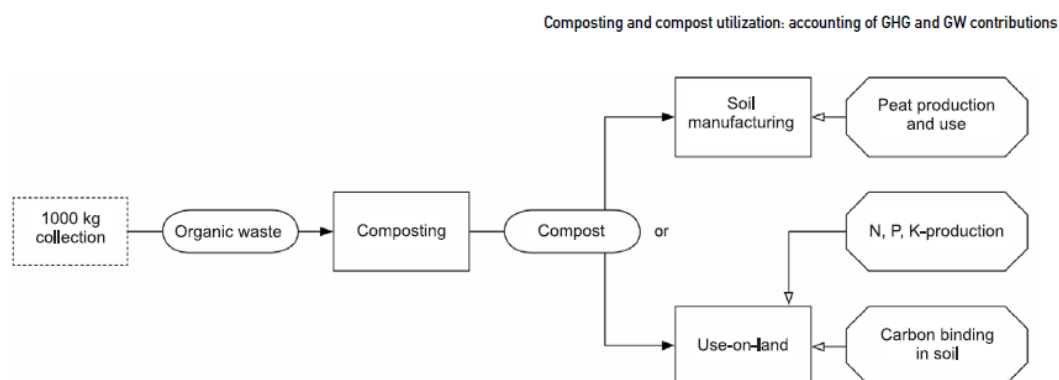
Η ταχύτητα της βιολογικής αποδόμησης του υλικού, επηρεάζεται από τη σχέση C/N, διότι από τη διαθέσιμη ποσότητα του βασικού στοιχείου των μικροοργανισμών (N) εξαρτάται η ταχύτητα της αποδόμησης των οργανικών ενώσεων του C. Έτσι, η άριστη σχέση C/N υπολογίζεται περίπου στο 30:1, εάν λάβουμε υπόψη την περιεκτικότητα του μικροβιακού κυττάρου σε C και N, καθώς και το γεγονός ότι μόνο το 1/3 του μεταβολιζόμενου C χρησιμοποιείται από τους μικροοργανισμούς. Ωστόσο, τα απορρίμματα συνήθως έχουν δυσμενή λόγο θρεπτικών συστατικών (C/N μέχρι 60:1), που μπορεί όμως να βελτιωθεί με τη προσθήκη ιλύος.

Το μέγεθος των τεμαχιδίων του προς ζύμωση υλικού καθορίζει τη ποσότητα νερού και αέρα που αυτό μπορεί να συγκρατήσει, αλλά και την επιφάνεια στην οποία μπορούν να δράσουν οι μικροοργανισμοί. Έχει υπολογισθεί ότι η κατάλληλη κοκκομετρική σύσταση είναι λίγα χιλιοστά έως περίπου πέντε χιλιοστά.

Η θερμοκρασία της ζύμωσης του υλικού εξασφαλίζει την ανάπτυξη των μικροοργανισμών αλλά και τη θανάτωση των παθογόνων και επιβλαβών, ενώ το pH στην αρχή κυμαίνεται σε όξινα επίπεδα και στη συνέχεια σε αλκαλικά.

Μέγεθος σωματιδίων	25- 75 mm
Λόγος C/N	< 30:1
Υγρασία	50- 60% (ή 45-55%)
Θερμοκρασία	50- 55° C τις πρώτες μέρες 55- 60° C τις υπόλοιπες
pH	7- 7,5
Έλεγχος παθογόνων οργανισμών	Παραμονή στους 60- 70° C για 24 ώρες

Πίνακας 2. Βέλτιστες τιμές παραμέτρων του προς ζύμωση υλικού



Διάγραμμα 4. Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος κομποστοποίησης

Θεωρητικά, κάθε είδος βιοαποδομήσιμων αποβλήτων μπορεί να γίνει λίπασμα. Πρακτικά όμως, μόνο λίγα κλάσματα μπορούν να δώσουν ικανοποιητικές ποσότητες λιπάσματος. Τα συστήματα κομποστοποίησης βασίζονται σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών, με μεμονωμένες τεχνολογίες ειδικά προσαρμοσμένες στα προσοδοφόρα αυτά κλάσματα. Η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να είναι μια σημαντική τεχνολογία στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου τα απόβλητα έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε υγρά οργανικά υλικά. Ωστόσο, μπορεί να αναπτυχθεί και στις αναπτυγμένες χώρες για την επεξεργασία των βιολογικών αποβλήτων. Για παράδειγμα, στην Ολλανδία, το 97% των βιολογικών αποβλήτων που έχουν διαχωρισθεί στη πηγή, επεξεργάζονται με τη μέθοδο της λιπασματοποίησης (Brinkmann et al. 2004). Μια σειρά από τεχνολογίες εφαρμόζονται ανά τον κόσμο, από ανεξέλεγκτους στατικούς σωρούς μέχρι συστήματα υψηλής τεχνολογίας με αυτόματη περιστροφή του υλικού και επεξεργασία των εκλυόμενων αερίων μέσω βιολογικών φίλτρων.

Η διαδικασία της κομποστοποίησης μπορεί να χωριστεί σε δυο φάσεις, αυτή της θερμόφιλης σταθεροποίησης (thermophilic stabilization) και αυτή της ωρίμανσης (curing). Κατά τη φάση της θερμόφιλης σταθεροποίησης, τα στερεά απόβλητα

διατάσσονται σε επιμήκεις κομποστοσωρούς. Στο στάδιο αυτό επικρατούν μεσόφιλοι οργανισμοί οι οποίοι παράγοντας οργανικά οξέα, ρίχνουν το pH του υλικού. Με την άνοδο όμως της θερμοκρασίας, επικρατούν οι θεرمόφιλοι μικροοργανισμοί οι οποίοι αυξάνουν το pH λόγω της βιοαποικοδόμησης των οργανικών οξέων. Στο στάδιο αυτό, γίνεται αναμόχλευση του υλικού για επαναερισμό και αν είναι απαραίτητο και διαβροχή αυτού. Στη φάση της ωρίμανσης, το υλικό αφήνεται να ωριμάσει χωρίς πολλές αναμοχλεύσεις, προκειμένου να απαλλαγεί από τις φυτοτοξικές ουσίες που σχηματίστηκαν κατά το προηγούμενο στάδιο. Μετά το τέλος της θερμοφιλής φάσης κατά τη διαδικασία ωρίμανσης το προϊόν θεωρείται σταθεροποιημένο, αλλά για να καταστεί ώριμο θα πρέπει να γίνουν πολλές δοκιμές φυτοτοξικότητας.



Εικόνα 1. Διαδικασία κομποστοποίησης σε σειράδια

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η εξυγίανση, αφού οι παθογόνοι μικροοργανισμοί και οι σπόροι ζιζανίων θανατώνονται κατά τη διαδικασία, η μείωση του όγκου και του βάρους, αφού λόγω μεταβολισμού του οργανικού άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα το αρχικό υλικό χάνει όγκο και βάρος, η εξοικονόμηση ενέργειας, αφού μειώνεται η ανάγκη χρήσης λιπασμάτων, η υποκατάσταση της τύρφης, η μείωση των κινδύνων ρύπανσης στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και τέλος ο εμπλουτισμός του εδάφους σε οργανική ουσία. Αντίθετα, τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι οι οσμές που εκλύονται κατά τη διαδικασία κομποστοποίησης σε σειράδια, η μεγάλη απαιτούμενη έκταση καθώς και η μακρά διάρκεια παραμονής του υλικού.

1.3.2. Αποτέφρωση

Η διαδικασία της αποτέφρωσης που καταστρέφει τα τοξικά και επικίνδυνα οργανικά απόβλητα, διαφέρει από την αποτέφρωση για τα αστικά στερεά απόβλητα, από την οποία συνήθως παράγεται ενέργεια. Γενικά, και οι χαμηλής θερμοκρασίας αποτεφρωτήρες (πάνω από 850° C) και οι υψηλής θερμοκρασίας (περίπου 1200° C), χρησιμοποιούν ενέργεια για να οξειδώσουν τον άνθρακα, και νερό από αυτό που περιέχεται στα απόβλητα, για να το μετατρέψουν σε ατμούς CO₂ και H₂O. Ωστόσο, κάποιοι αποτεφρωτήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγές θερμότητας- ενέργειας, ειδικά εάν χρησιμοποιούνται πετρελαϊκά απόβλητα ως καύσιμα. Βέβαια, αυτοί οι αποτεφρωτήρες πρέπει να έχουν αυστηρότερα όρια εκπομπών. Οι αποδόσεις της αποτέφρωσης πρέπει να βρίσκονται μέσα στα όρια των κανονισμών και η καταστροφή των οργανικών συστατικών πρέπει να ξεπερνά το 99,99%.

Η αποτέφρωση δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε απόβλητα που έχουν υψηλή συγκέντρωση νερού και μη εύφλεκτων υλικών, όπως επίσης και για ραδιενεργά απόβλητα. Επιπλέον, οι αποτεφρωτήρες είναι πολύ ακριβοί στο να κατασκευασθούν και να συντηρηθούν. Έτσι, αυτή η τεχνολογία περιορίζεται κυρίως σε χαμηλού όγκου απόβλητα. Τέλος, οι αποτεφρωτήρες παράγουν μικρούς όγκους στάχτης με υψηλή περιεκτικότητα σε τοξικά μέταλλα, η οποία στη συνέχεια διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Συνεπώς, δε μπορούμε να ισχυριστούμε ότι αυτή η τεχνολογία εξαλείφει το πρόβλημα της μόλυνσης του περιβάλλοντος από τα μέταλλα.

Μια εγκατάσταση αποτέφρωσης αποτελείται από τη μονάδα απόθεσης των απορριμμάτων, από τη μονάδα προεπεξεργασίας αυτών, από τη χοάνη τροφοδοσίας, την εστία καύσης, τον λέβητα, καθώς και από γεραμούς μεταφοράς των απορριμμάτων.

Η διαδικασία της αποτέφρωσης έχει κατά καιρούς συζητηθεί ιδιαίτερα, αλλά αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική λύση για τη διάθεση των αποβλήτων και έχει σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Ο όγκος και η μάζα των αποβλήτων μειώνονται κατά ένα ποσοστό 85- 90%.
- Η μείωση του όγκου των αποβλήτων είναι άμεση και δεν εξαρτάται από τον χρόνο των βιολογικών αντιδράσεων.
- Οι εγκαταστάσεις μια μονάδας αποτέφρωσης μπορούν να βρίσκονται κοντά στη πηγή παραγωγής των αποβλήτων ή στα σημεία συλλογής, μειώνοντας έτσι το κόστος μεταφοράς αυτών.
- Το κόστος της εγκατάστασης μπορεί να αντισταθμιστεί από τη πώληση της ενέργειας που προκύπτει κατά τη διαδικασία της αποτέφρωσης.
- Οι εκλύσεις αερίων προς το περιβάλλον μπορούν να ελεγχθούν και να συμβαδίζουν με τα όρια των νομοθετικά περιβαλλοντικών τιμών.

Ωστόσο, αυτή η διαδικασία παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα και κατά συνέπεια οι επικριτές της αναφέρονται στα εξής:

- Ορισμένα υλικά δεν πρέπει να αποτεφρώνονται, επειδή είναι πιο χρήσιμα στην ανακύκλωση, δεν είναι εύφλεκτα ή τα υποπροϊόντα τους μπορεί να προκαλέσουν εκπομπές επικίνδυνων αερίων.
- Λανθασμένες πρακτικές λειτουργίας, καθώς και η παρουσία του χλωρίου στα αστικά στερεά απόβλητα, μπορεί να οδηγήσουν σε εξαιρετικά επικίνδυνες εκπομπές που περιέχουν τοξικές διοξίνες και φουράνια.
- Ο έλεγχος των εκπομπών μετάλλων καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολος σε ανόργανα απόβλητα που περιέχουν βαρέα μέταλλα, όπως το αρσενικό, το κάδμιο, το χρώμιο, ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το νικέλιο κλπ.
- Οι αποτεφρωτήρες απαιτούν υψηλό κεφάλαιο και εξειδικευμένους χειριστές, συνεπώς υψηλό λειτουργικό κόστος.
- Απαιτούνται συμπληρωματικά καύσιμα για την επίτευξη των αναγκών υψηλών θερμοκρασιών.

Στην Ελλάδα σήμερα δε βρίσκεται σε λειτουργία καμία μονάδα αποτέφρωσης. Οι μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων για μια μονάδα στο νησί της Ρόδου και μια στη Περιφέρεια της Πελοποννήσου βρίσκονται σε εξέλιξη. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η έκδοση άδειας λειτουργίας είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, δεν αναμένεται να λειτουργήσουν πριν το 2013.

1.3.3. Υγειονομική Ταφή Απορριμμάτων

Σύμφωνα με την πρόσφατα ενημερωμένη πολιτική για τη διαχείριση των αποβλήτων στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η υγειονομική ταφή απορριμμάτων αποτελεί τη τέταρτη και λιγότερο προτιμώμενη από τις εναλλακτικές λύσεις επιλογή για τη διάθεση των αστικών αποβλήτων (Hjelmar et al, 1995). Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αυτή αναμένεται να συνεχίσει να εφαρμόζεται, τουλάχιστον για τη διάθεση των μη ανακυκλώσιμων αστικών υλικών, ή για τα κατάλοιπα της αποτέφρωσης.

Η ταφή των απορριμμάτων στο έδαφος διακρίνεται σε ανεξέλεγκτη και ελεγχόμενη. Μιλώντας για ανεξέλεγκτη χωματερή (ΧΑΔΑ), εννοούμε τους χώρους εκείνους στους οποίους γίνεται διάθεση των απορριμμάτων χωρίς άδεια και χωρίς κανέναν έλεγχο για τις επιπτώσεις μιας τέτοιας διαδικασίας στο περιβάλλον. Βέβαια, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από μια ανεξέλεγκτη χωματερή συνδέονται στενά με τη σύσταση και τη ποσότητα των προς διάθεση αποβλήτων, καθώς και με τις βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτή. Αντίθετα, η ελεγχόμενη διάθεση αποτελεί μια διαδικασία η οποία θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τη διασφάλιση των συνθηκών ευστάθειας, να διαθέτει

σύστημα αντιπυρικής προστασίας, δίκτυο απορροής όμβριων υδάτων και σύστημα διαχείρισης των στραγγισμάτων, σύστημα μόνωσης και στεγανοποίησης για την αποφυγή ρύπανσης των υπογείων υδάτων, σύστημα αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου και σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης του ΧΥΤΑ και τέλος, να συνοδεύεται από μελέτη για την επανένταξη του χώρου στο φυσικό περιβάλλον.

Μέχρι τα μέσα του 1980 τα απόβλητα θάβονταν ή καταβυθίζονταν τυχαία στο έδαφος, και καλύπτονταν στο πάνω μέρος τους από μια στρώση εδάφους. Δεν υπήρχαν κανονισμοί για την υγειονομική ταφή, όπως επίσης δεν υπήρχαν μηχανισμοί προστασίας για τη πρόληψη ή την ελαχιστοποίηση των εκλύσεων από αυτούς τους χώρους. Οι περισσότεροι κρατικοί και ομοσπονδιακοί κανονισμοί επιτρέπουν στους χώρους υγειονομικής ταφής να συμπεριλαμβάνουν και τα επικίνδυνα και τα μη επικίνδυνα απόβλητα, αλλά περισσότερο από το 95% των χώρων αυτών περιλαμβάνουν μόνο τα αστικά απόβλητα.

Ο Εθνικός Σχεδιασμός του 2000 για την Ελλάδα (Κ.Υ.Α. 14312/1302 ΦΕΚ 723 Β'/9.6.2000 και 26469/1501/Ε103 ΦΕΚ 864 Β'/1.7.2003), που διαμορφώθηκε από τη σύνθεση των νομαρχιακών, προέβλεπε τη δημιουργία 124 ΧΥΤΑ (70 στην Ηπειρωτική Ελλάδα, 11 στην Κρήτη και 43 στα υπόλοιπα νησιά). Σύμφωνα όμως με τα στοιχεία της Ε.Σ.Υ.Ε. σήμερα στη χώρα μας λειτουργούν 63 ΧΥΤΑ (τελευταία ενημέρωση 5/6/2009), 32 κατασκευάζονται και 41 βρίσκονται υπό μελέτη, ενώ σύμφωνα με την τελευταία έκθεση του ΥΠΕΧΩΔΕ οι ΧΑΔΑ που υπάρχουν στη χώρα φθάνουν τους 2626, με ενεργούς τους 1453.

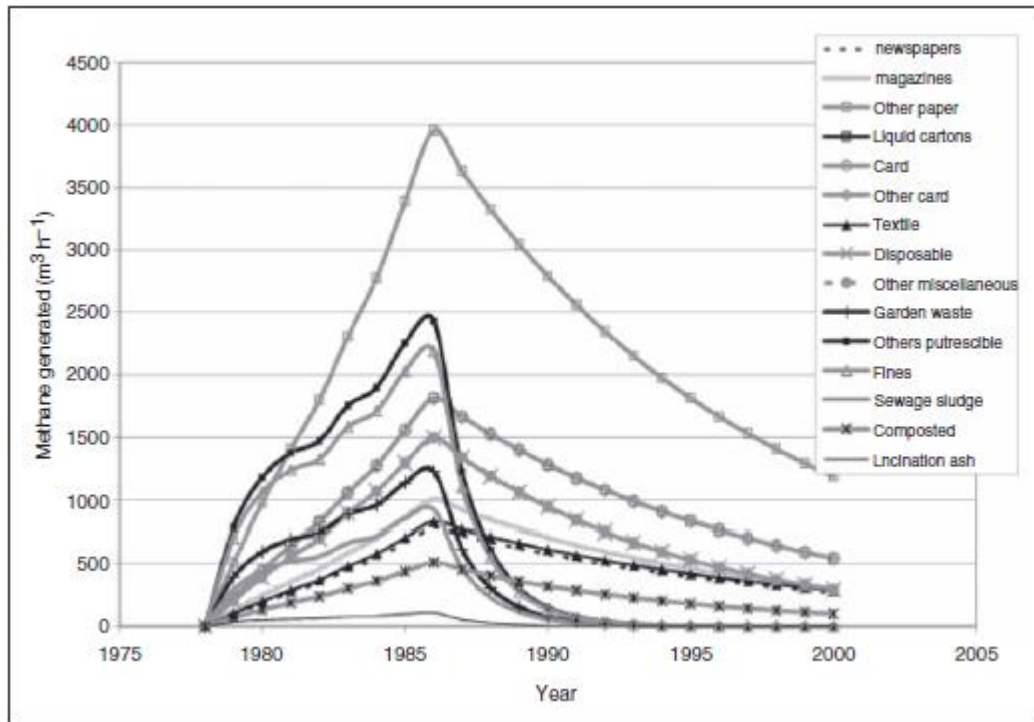
Η υγειονομική ταφή προτιμάται στις περισσότερες περιπτώσεις λόγω του χαμηλού κόστους, της διαθεσιμότητάς της καθώς και της εφαρμογής σε αυτή μιας ευρείας γκάμας αποβλήτων. Ακόμα, θεωρείται σαν μια φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος διάθεσης απορριμμάτων. Οι κύριοι λόγοι για την ευρεία αποδοχή και χρήση των υγειονομικών χώρων ταφής σε πολλά μέρη του κόσμου, συμπεριλαμβανομένων και της πλειονότητας των Μεσογειακών χωρών, είναι οι ακόλουθοι: (i) συγκριτικές μελέτες, οι οποίες διεξήχθησαν σε διάφορες χώρες, μεταξύ των εναλλακτικών μεθόδων διάθεσης των αστικών αποβλήτων, έδειξαν ότι αυτή η επιλογή είναι η πιο οικονομική (Lema et al., 1998), και (ii) εκτός των οικονομικών πλεονεκτημάτων, οι υγειονομικοί χώροι ταφής επιτρέπουν σε περισσότερα στερεά απόβλητα να αποσυντεθούν κάτω από λιγότερο ή περισσότερο ελεγχόμενες συνθήκες, μέχρι την ενδεχόμενη μετατροπή τους σε σχετικά αδρανή, σταθεροποιημένα υλικά.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των υγειονομικών χώρων ταφής απορριμμάτων, παράγονται στραγγίσματα, κυρίως λόγω της διήθησης του νερού της βροχής διαμέσου αυτών. Η παραγωγή και η διαχείριση των στραγγισμάτων έχει αναγνωρισθεί ως ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που συνδέονται με τη περιβαλλοντικά ορθή λειτουργία αυτών των χώρων, διότι αυτά τα υγρά απόβλητα μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα ρύπανσης όταν έρθουν σε επαφή

με το έδαφος, τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά και ως εκ τούτου θεωρούνται ότι αποτελούν μείζον πρόβλημα κινδύνου αν δε ληφθούν προληπτικά μέτρα (Baccini et al., 1987). Το πρόβλημα των στραγγισμάτων επιδεινώνεται από το γεγονός ότι πολλοί ΧΥΤΑ εξακολουθούν να λειτουργούν χωρίς το κατάλληλο στεγανωτικό πυθμένα ή δε μεταβαίνουν σε αποτελεσματική συλλογή και επεξεργασία των στραγγισμάτων (Lema et al., 1988).

Επιπλέον, ιδιαίτερες ανησυχίες έχουν εκφραστεί από τους φορείς διαχείρισης των χώρων υγειονομικής ταφής για την ικανότητα σύλληψης του αέριου μεθανίου που εκπέμπεται από αυτούς. Οι ανησυχίες αυτές έγκεινται στο γεγονός ότι κατά τα πρώτα στάδια της υγειονομικής ταφής όπου διατίθενται τα ανεπεξέργαστα απόβλητα, παράγονται μεγάλες ποσότητες αερίων, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν σημαντική πηγή εσόδων αφού τα παραγόμενα αέρια μπορούν να αξιοποιηθούν ως ενέργεια. Ακόμα, οι οδηγίες για την υγειονομική ταφή απαιτούν τη συλλογή και τη χρησιμοποίηση των εκπεμπόμενων αερίων από τους ΧΥΤΑ, όπου αυτό είναι δυνατόν. Στη περίπτωση όμως που οι εκπομπές παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα για μακρό χρονικό διάστημα, χάνεται μια σημαντική οικονομική συνεισφορά στην εγκατάσταση.

Η παραγωγή αερίων από τους χώρους υγειονομικής ταφής είναι αποτέλεσμα της μικροβιακής αναερόβιας αποδόμησης του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων που διατίθενται σε αυτούς. Τα βιοαποδομήσιμα οργανικά υλικά των αποβλήτων ως επί των πλείστων είναι το χαρτί, τα ζωικά και φυτικά απόβλητα καθώς και τα απόβλητα των κήπων. Τα κύρια στοιχεία αυτών των αερίων είναι το μεθάνιο, σε αναλογία 55- 60% v/v και το διοξείδιο του άνθρακα σε αναλογία 40- 45% v/v. Η παραγωγή αυτών των αερίων προκύπτει μέσω τριών αρχικών διαδοχικών φάσεων και ακολουθείται από τη φάση σταθερής παραγωγής CH_4 και CO_2 . Η τελευταία εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια αποδόμησης του οργανικού τμήματος των αποβλήτων και μπορεί να διαρκέσει χρόνια.



Διάγραμμα 5. Ετήσια συνεισφορά στη παραγωγή μεθανίου από τα επιμέρους συστατικά των αποβλήτων στο Ηνωμένο Βασίλειο

Ένας μοντέρνος ΧΥΤΑ σχεδιάζεται με βάση ακριβείς προδιαγραφές όσο αφορά τη συγκράτηση όλων των υλικών, συμπεριλαμβανομένων και των στραγγισμάτων και των αερίων. Οι καινούργιες σχεδιαστικές προδιαγραφές έχουν αφιερωθεί στην ελαχιστοποίηση των επιδράσεων στο περιβάλλον, και βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, με ειδικότερη έμφαση στη προστασία των υπόγειων υδροφόρων οριζώντων. Η επιλογή των χώρων υγειονομικής ταφής βασίζεται στη γεωλογία και στον τύπο του εδάφους καθώς και στην εξέταση των υπογείων νερών, του βάθους δηλαδή του υδροφόρου οριζοντα και της χρήσης αυτού.

Η κατασκευή των νέων ΧΥΤΑ σήμερα κοστίζει πάνω από 1 εκατομμύριο δολάρια το εκτάριο. Επιπρόσθετα, απαιτείται μόνιμη παρακολούθηση- ιδιαίτερα δαπανηρή λειτουργία- για πιθανή μόλυνση από τις εκπλύσεις στο κοντινό περιβάλλον. Έτσι, πολλές κοινωνίες έρχονται αντιμέτωπες με διαφορετικές αποφάσεις για τη διάθεση των αστικών στερεών αποβλήτων, παρά το γεγονός ότι ο σχεδιασμός των ΧΥΤΑ έχει βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με τη πρόληψη της ρύπανσης και οι καινοτόμες στρατηγικές έχουν μειώσει το ποσοστό των παραγόμενων αστικών στερεών αποβλήτων.

Βέβαια, υπάρχουν και άλλα προβλήματα. Πιθανόν το πιο δύσκολο πρόβλημα να σχετίζεται με την κατασκευή των νέων ΧΥΤΑ, για το που θα βρίσκονται ή για το που θα τοποθετηθούν αυτοί. Κανένας δεν θέλει να μένει κοντά σε μια χωματερή, ακόμα

και αν αυτή αποτελεί χώρο υγειονομικής ταφής. Οι πραγματικές ή οι υποθετικές ανησυχίες των τοπικών κοινωνιών για τις επιπτώσεις του να ζεις κοντά σε μια χωματερή στην ανθρώπινη υγεία μπορεί να προκαλέσει αντιπαραθέσεις με αποτέλεσμα να καθυστερεί η «τοποθέτηση» του ΧΥΤΑ για μήνες ακόμα και για χρόνια.

1.4. Χαρακτηριστικά μιας χωματερής

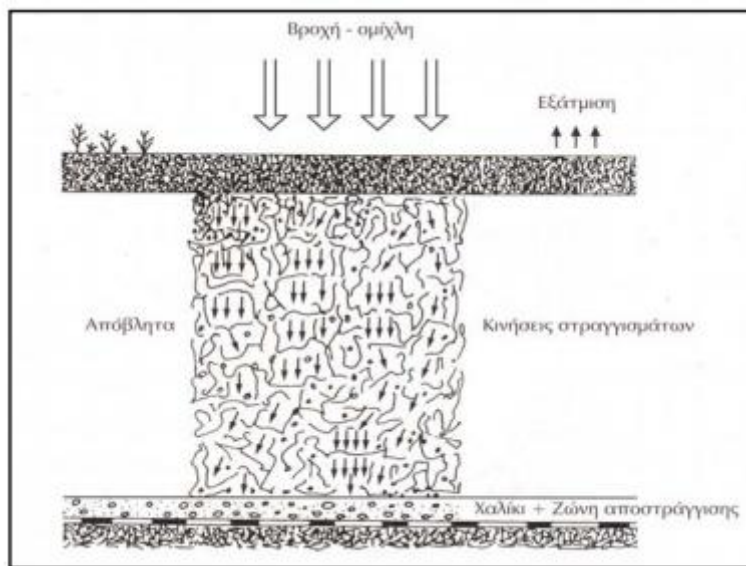
Όπως κάθε σύστημα, έτσι και ένας Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων χαρακτηρίζεται από διάφορες μεταβλητές. Η παραγωγή των στραγγισμάτων και των αερίων, τα οποία λαμβάνουν υψίστης σημασίας και επεξεργασίας προκειμένου να μη προκαλέσουν σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, είναι αποτέλεσμα των φυσικοχημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρο μέσα στη μάζα των απορριμμάτων.

Η διάρκεια ζωής μιας χωματερής προσδιορίζεται από τη παραγωγή των στραγγισμάτων, των αερίων και τη συμπεριφορά των αποβλήτων όσο αφορά τη καθίζηση αυτών. Έτσι, ο επιθυμητός χρόνος ζωής είναι αυτός που δε θα προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω της εκπομπής αερίων και στραγγισμάτων, ή λόγω καθίζησης στο χώρο της χωματερής, που μπορεί να προκαλέσει κίνδυνο για την υγεία ή ζημιές σε κοντινά κτήρια. Για το λόγο αυτό λαμβάνονται διάφορα τεχνικά μέτρα, όπως είναι η επεξεργασία των στραγγισμάτων. Η διάρκεια ζωής αυτών των μέτρων εξαρτάται από το σχεδιασμό και την κατασκευή της χωματερής, τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τον τύπο των αποβλήτων που διατίθενται σε αυτή, τη συμμόρφωση με τα πρότυπα και το αίσθημα ευθύνης των διαχειριστών της χωματερής. Μόνο η γεωλογία και η υδρογεωλογία μπορούν να θεωρηθούν σταθερές με τη πάροδο των χρόνων.

Η λειτουργία των σημερινών ΧΥΤΑ μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα εάν δε γίνεται σωστή διαχείριση και λειτουργία. Τα εν λόγω περιβαλλοντικά προβλήματα μπορεί να είναι η ανεξέλεγκτη παραγωγή και απελευθέρωση τοξικών αερίων, η μετακίνηση των εύφλεκτων αερίων, που σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν σε πυρκαγιές ή εκρήξεις και η μόλυνση του εδάφους και των υδροφόρων οριζόντων από την έκπλυση των οργανικών και ανόργανων ρύπων. Συνεπώς, για τη κατασκευή ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων ο οποίος θα τηρεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές, θα πρέπει να συνυπολογίσουμε πολλούς παράγοντες και φυσικά να κατανοήσουμε τη λειτουργία του.

1.5. Στραγγίσματα από τους ΧΥΤΑ

Τα στραγγίσματα από τους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων αντιπροσωπεύουν το νερό το οποίο διηθείται διαμέσου των αποβλήτων και τα υγρά που παράγονται μέσα στο κύτταρο της χωματερής, και αποτελείται από ένα υγρό που περιέχει αιωρούμενα στερεά, διαλυτά συστατικά των αποβλήτων και τα προϊόντα της αποικοδόμησης των αποβλήτων από διάφορους μικροοργανισμούς. Η σύσταση των στραγγισμάτων εξαρτάται από την ετερογένεια και τη σύσταση των αποβλήτων, από την ανάμειξη ή όχι με βιομηχανικά ή επικίνδυνα απόβλητα, από το στάδιο της βιοαποικοδόμησης στο οποίο φθάνουν τα απορρίμματα, στη περιεχόμενη υγρασία και στις διαχειριστικές πρακτικές. Ακόμα, ο ρυθμός αποσύνθεσης των αποβλήτων εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους, όπως είναι το pH, η θερμοκρασία, η ηλικία της χωματερής, οι αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες και τα είδη των μικροοργανισμών που συναντώνται. Επιπλέον, με τα στραγγίσματα συνδέεται και μια δύσοσμη μυρωδιά, κυρίως λόγω της παρουσίας των οργανικών οξέων.

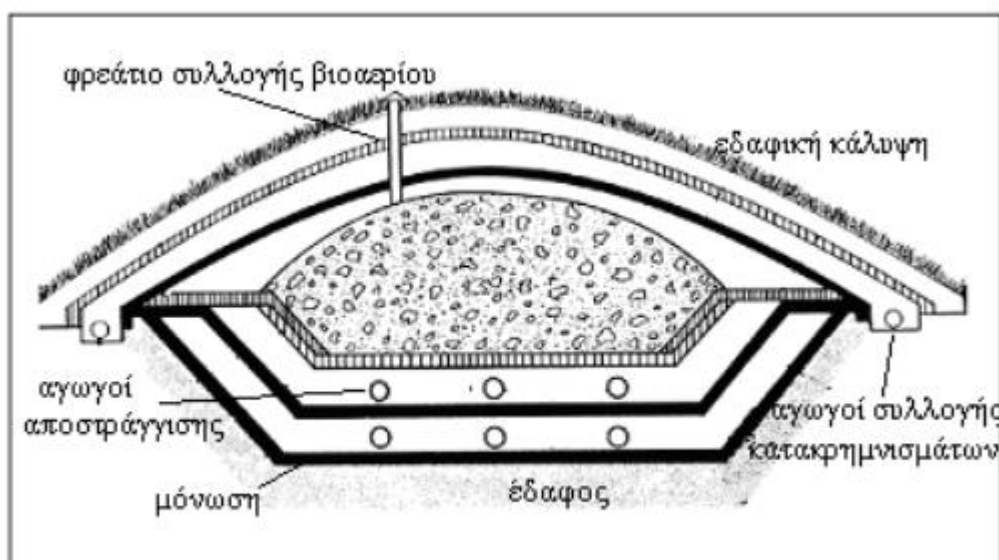


Εικόνα 2. Κίνηση- δημιουργία στραγγισμάτων μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων

Τα στραγγίσματα από τις χωματερές φαίνεται να περιέχουν μια μεγάλη ποικιλία τοξικών και μολυσματικών συστατικών. Η διαχείριση των απορριμμάτων και ένα σύστημα επεξεργασίας αυτών κρίνονται απαραίτητα, έτσι ώστε να συλλέγονται τα στραγγίσματα που απορρέουν από τη μάζα των αποβλήτων και να επεξεργάζονται προτού απορριφθούν. Το ποσοστό παραγωγής των στραγγισμάτων εκτιμάται ότι βασίζεται σε πολλούς παράγοντες, όπως είναι το ύψος βροχόπτωσης, το ποσοστό της βροχόπτωσης το οποίο διηθείται μέσα στα απόβλητα, η απορροφητική

ικανότητα των αποβλήτων, η προσθήκη αναμειγμένων υγρών αποβλήτων, το βάρος που αποκτούν τα απόβλητα καθώς και οι απώλειες από τη διαρροή ή τη διήθηση των υγρών.

Ένα σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων απαρτίζεται από ένα σύστημα αποστράγγισης, ένα συλλογής και ένα επεξεργασίας αυτών. Η αποστράγγιση των στραγγισμάτων γίνεται λόγω βαρύτητας δια μέσου διόδων, οι οποίες συνίστανται από ένα διαπερατό κοκκώδες στρώμα στο οποίο περιέχονται διάτρητες σωλήνες, που καταλήγουν σε φρεάτια συλλογής τα οποία βρίσκονται στον πυθμένα του κυττάρου. Τα στραγγίσματα που συλλέγονται στα φρεάτια είτε αντλούνται είτε κυλούν λόγω κλίσης σε περιμετρικά σημεία συλλογής.

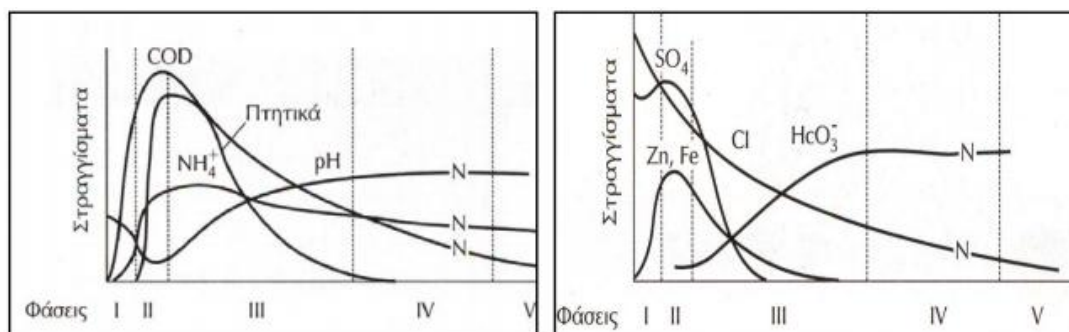


Εικόνα 3. Τομή ΧΥΤΑ

Τα στραγγίσματα που παράγονται σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής ποικίλλουν στον όγκο και στη σύσταση, ενώ σύμφωνα με μελέτες, εξαρτώνται από την ηλικία του ΧΥΤΑ αλλά και από το στάδιο της βιοαποικοδόμησης το οποίο έχει επέλθει. Γενικά, η συγκέντρωση των συστατικών των στραγγισμάτων μειώνεται όσο η ηλικία του χώρου υγειονομικής ταφής αυξάνεται. Παρ' όλα αυτά, κάποια συστατικά των αποβλήτων μπορούν να εκχυλιστούν ακόμα και μετά από πολλά χρόνια από το κλείσιμο της χωματερής. Εξαιτίας των αλλαγών στη σύσταση λόγω του χρόνου, τα συστήματα παρακολούθησης των στραγγισμάτων πρέπει να προσαρμοστούν σε αυτές τις αλλαγές. Παρακάτω, στο διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ανάπτυξης των στραγγισμάτων σε έναν Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων. Σύμφωνα με μελέτες, η συγκέντρωση των οργανικών ουσιών φαίνεται να μειώνεται

καθώς αυξάνεται η ηλικία της χωματερής. Τα ανόργανα στοιχεία χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την εξέλιξη της συγκέντρωσής τους:

- Παράμετροι με διαχρονική εξέλιξη συγκέντρωσης (Fe, Ca, Mg, Mn, Zn).
- Παράμετροι με μακροπρόθεσμα ελαφρά αυξανόμενη συγκέντρωση (Cl, K, Na).
- Παράμετροι με τυχαίες διακυμάνσεις συγκεντρώσεων (NO_x, P και βαρέα μέταλλα Pb, Ni, As, Cu, Cd, Cr, Co).



Διάγραμμα 6. Διαχρονική εξέλιξη των ποιοτικών παραμέτρων των στραγγισμάτων από τους ΧΥΤΑ

Η επεξεργασία των στραγγισμάτων γίνεται προκειμένου αυτά να απαλλαγούν από οποιαδήποτε μολυσματικά συστατικά και να είναι κατάλληλα για διάθεση σε εδαφικούς και υδάτινους αποδέκτες. Πριν τη διάθεση, πρέπει να έχει γίνει συμφωνία με τους αρμόδιους της τοπικής κοινωνίας που μεριμνούν για τη διαχείριση των υδάτων ή με την ΕΡΑ. Η συμφωνία αυτή θα περιλαμβάνει μια ποικιλία από δείκτες οι οποίοι θα πρέπει να βρίσκονται κάτω από συγκεκριμένα όρια. Τέτοιοι δείκτες είναι το pH, η συγκέντρωση των οργανικών συστατικών, της αμμωνίας και του νατρίου, των αιωρούμενων στερεών καθώς και η περιεκτικότητα σε μέταλλα.

Το κύριο μέλημα για τα στραγγίσματα των χώρων υγειονομικής ταφής είναι η ποσότητα των οργανικών συστατικών σε αυτά. Στη μάζα των απορριμμάτων, οι κυριότερες οργανικές ουσίες υφίστανται υδρόλυση. Τα βακτήρια μετατρέπουν τα προϊόντα της υδρόλυσης αμέσως ή μέσω άλλων ενδιάμεσων αντιδράσεων, σε απλά λιπαρά οξέα, και στη συνέχεια παράγουν μεθάνιο για πολλά χρόνια, έως ότου επικρατήσουν αερόβιες συνθήκες.

Οι ιδιότητες των στραγγισμάτων επηρεάζονται από τη φάση σχηματισμού των οξέων και από τη φάση παραγωγής του μεθανίου. Η βιολογική ζήτηση οξυγόνου (BOD), η χημική ζήτηση οξυγόνου (COD) και η συγκέντρωση του αζώτου (και ως αμμωνία και ως οργανικό άζωτο) είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για τον σχεδιασμό των συστημάτων επεξεργασίας των στραγγισμάτων.

Ισχυρά προγνωστικά εργαλεία για τον υπολογισμό της ποσότητας των στραγγισμάτων που παράγονται σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής, αποτελούν τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία έχουν δημιουργηθεί προκειμένου να προσομοιώσουν τη παραγωγή και τη μεταφορά των στραγγισμάτων στους χώρους αυτούς (Straub and Lynch 1982a, b; Demetracopoulos et al.1986a, b, Blakey, 1989, Lu and Bai 1991, Schroeder et al.1994, El-Fadel et al. 1996, 1997, Kouzeli-Katsiri et al. 1999, Suk et al. 2000). Το πρόγραμμα HELP (Hydrology Evaluation Leachate Performance) (U.S. EPA 1984), FULLFILL (Noble 1991) και το SOILINER (Johnson 1986) είναι δύο από τα πιο σύνηθες. Όλα τα προγράμματα βασίζονται στη μέθοδο του υδατικού ισοζυγίου (WBM), η οποία στηρίζεται στην αρχή διατήρησης της μάζας, και αναπτύχθηκαν από την Environment Protection Agency των Η.Π.Α. (Fenn et al. 1975).

Το κάθε μοντέλο παρέχει μια μονοδιάστατη λύση και χρησιμοποιεί διαφορετικά εργαλεία προκειμένου να φθάσει σε αυτή. Όμως, κατά την εφαρμογή των μοντέλων διακρίνονται κάποιοι περιορισμοί, οι οποίοι είναι:

- Για τον υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη μόνο ένα ενιαίο επίπεδο αποβλήτων χωρίς να εξετάζονται οι αλλαγές που υπέστη το υλικό στην επιφάνεια ή οι διαφοροποιήσεις σε αυτό καθώς το ύψος των αποβλήτων στο κύτταρο αυξανόταν. Η αυξανόμενη πίεση μπορεί να καταστήσει τα κατώτερα στρώματα των απορριμμάτων λιγότερα διαπερατά από το νερό, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η παραγωγή στραγγισμάτων σε αυτές τις στρώσεις και να μη γίνεται ομοιόμορφα η κατανομή της υγρασίας σε όλη τη μάζα των αποβλήτων. Αυτό με τη σειρά του επηρεάζει τη σύνθεση των στραγγισμάτων που εξέρχονται από τον ΧΥΤΑ.
- Τα κύτταρα δεν έχουν κατασκευασθεί, ούτε πληρώνονται την ίδια χρονική περίοδο (El-Fadel et al. 1997)
- Δε λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεπιδράσεις που προκαλούνται από τη κατασκευή των παρακείμενων κυττάρων.
- Αδυνατούν να προσομοιώσουν τη παραγωγή των στραγγισμάτων στο χώρο και στον χρόνο, τόσο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του χώρου υγειονομικής ταφής όσο και μετά το κλείσιμο του κάθε κυττάρου.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση των στραγγισμάτων που παράγονται από έναν χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων είναι η μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου. Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου που χρησιμοποιείται κατά τη διαχείριση ενός ΧΥΤΑ, είναι:

$$P - ETR - R_1 = L + DE + R_2$$

Όπου, L = όγκος των παραγόμενων στραγγισμάτων

P = κατακρημνίσματα/ βροχόπτωση

R_1 = επιφανειακή απορροή από την επιφάνεια της χωματερής

R_2 = επιφανειακή απορροή από τις γύρω περιοχές

DE = κατακράτηση νερού

ETP = πραγματική εξατμισοδιαπνοή

Ως κατακρημνίσματα νοείται κάθε μορφή ύδατος που καταλήγει στον χώρο διάθεσης των απορριμμάτων από την ατμόσφαιρα, όπως είναι η βροχή, το χιόνι και το χαλάζι. Η ποσότητα της βροχόπτωσης που δέχεται μια χωματερή εξαρτάται από τη γεωγραφία της περιοχής και την εποχή, συνεπώς η πιο αξιόλογη πηγή ανάκτηση αυτών των δεδομένων αποτελεί ο κοντινός στη περιοχή μετεωρολογικός σταθμός.

Τα κατακρημνίσματα που πέφτουν στον χώρο της χωματερής κινούνται με διαφορετικό τρόπο, ανάλογα με τα εμπόδια που θα συναντήσουν μπροστά τους. Έτσι, μέρος αυτών δε θα φτάσει ποτέ στον όγκο των απορριμμάτων, διότι παρεμποδίστηκε ή συγκρατήθηκε από δέντρα, φυτά, γρασίδι κ διάφορες κατασκευές. Κάποιο άλλο μέρος θα κατακρατηθεί από τις επιφανειακές κοιλότητες, ενώ κάποιο θα συγκρατηθεί από την επιφάνεια του εδάφους δημιουργώντας ένα φιλμ νερού. Τέλος, κάποιο μέρος των κατακρημνισμάτων θα εξατμιστεί στην ατμόσφαιρα και το υπόλοιπο θα διηθηθεί μέσα στη μάζα των απορριμμάτων.

Η φυσική διεργασία της εξάτμισης είναι η ίδια, είτε αυτή παρατηρείται σε επιφάνειες ελεύθερου νερού, είτε στην επιφάνεια του εδάφους, είτε σε φυτικές επιφάνειες που είναι εκτεθειμένες στην ατμόσφαιρα. Παρ' όλα αυτά όμως, η εξάτμιση από τις φυτικές επιφάνειες συνηθίζεται να αναφέρεται ως διαπνοή, η οποία και λαμβάνει χώρα μέσω των στοματίων του φυλλώματος. Ο διαχωρισμός των απωλειών του νερού μιας εδαφικής μάζας με απ' ευθείας εξάτμιση στην επιφάνειά της από τις απώλειες διαπνοής είναι πολύ δύσκολος, οι συνολικές απώλειες εξάτμισης του εδαφικού νερού θεωρούνται ενιαίο σύνολο και χαρακτηρίζονται ως εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration). Η εξατμισοδιαπνοή θα μπορούσε να ορισθεί ως «η βιοφυσική διεργασία επιβίωσης του φυτικού κόσμου σε ένα φιλικό ή εχθρικό περιβάλλον οριοθετούμενο από το έδαφος και την οριακή στρώση της ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας σαν μέσα την υγρή και αέρια φάση του νερού, συμμετέχοντας με αυτόν τον τρόπο δυναμικά στον υδρολογικό κύκλο» (Αλεξανδρή, 2007).

1.6. Οικοσύστημα μιας χωματερής

Ένας χώρος υγειονομικής ταφής όταν περιέχει τα απαραίτητα υποστρώματα που προωθούν τη μικροβιακή ανάπτυξη, ενώ παράλληλα προσφέρει και φυσικοχημικές παραμέτρους (θερμοκρασία, pH, οσμωτική πίεση, υγρασία κ.α.) συμβάλλοντας στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών, μπορεί να θεωρηθεί σαν οικοσύστημα ή ως ένας σύνθετος βιολογικός αντιδραστήρας.

Μέσα σε ένα οικοσύστημα μπορούμε να συναντήσουμε διάφορες κατηγορίες μικροοργανισμών. Αυτοί όμως που επιτελούν τις πιο σημαντικές διεργασίες είναι τα βακτήρια. Όπως κάθε ζωντανός οργανισμός, έτσι και τα βακτήρια πρέπει να βρουν στο περιβάλλον που ζουν, την απαραίτητη ύλη (χημικά στοιχεία) που είναι απαραίτητη για τη σύνθεση της βιομάζας τους, όπως είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη βιοσύνθεση των κυτταρικών συστατικών αυτών. Η μικροβιακή βιομάζα συνίσταται από μια ποικιλία στοιχείων. Κάποια από αυτά, όπως τα C, H, O, N, S, P αποτελούν τα βασικά συστατικά της. Τα μακρομόρια (πρωτεΐνες, νουκλεϊκά οξέα, πολυσακχαρίτες, λιπίδια) καθώς και τα μεταλλικά ιόντα συμμετέχουν στην οσμωτική ισορροπία του κυττάρου, στις διεργασίες μεταφοράς και ως συμπαραγόντες σε ενζυμικές αντιδράσεις. Τα βακτήρια πρέπει να βρουν αυτά τα στοιχεία στο οικοσύστημα που αναπτύσσονται και να τα χρησιμοποιήσουν στις κατάλληλες αναλογίες. Η έλλειψη κάποιων στοιχείων και ιδιαιτέρως του άνθρακα, του αζώτου και του φωσφόρου, μπορεί να προκαλέσει δυσμενείς συνθήκες στα βακτήρια, με σημαντικότερη την αναστολή της ανάπτυξής τους.

Ο άνθρακας είναι το κύριο στοιχείο της οργανικής ύλης. Τα βακτήρια, ανάλογα με τον τρόπο πρόσληψης του άνθρακα, διακρίνονται σε αυτότροφα και σε ετερότροφα. Τα αυτότροφα βακτήρια αποκτούν τον άνθρακα που χρειάζονται κυρίως από τη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα της ατμόσφαιρας και το διαλυμένο στο νερό. Τα ετερότροφα μπορούν να συνθέσουν, αν όχι όλα τα περισσότερα των οργανικών συστατικών που τους είναι απαραίτητα από απλές οργανικές ενώσεις, σάκχαρα, αλειφατικά και αρωματικά αμινοξέα, αλκοόλες κλπ. Τα μικρά μόρια (μονομερή, διμερή), έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρονται μέσω του κυτταρικού τοιχώματος, ενώ τα πολυμερή πρέπει να υδρολύονται με τη βοήθεια εξωενζύμων, προτού τα μονομερή και τα διμερή που έχουν προκύψει κατά την υδρόλυση μεταφερθούν στο εσωτερικό του κυττάρου. Γενικά, υπάρχουν μεγάλες διαφορές όσο αφορά τη ποσότητα και τη ποικιλία των βιολογικών ενώσεων που μπορούν να αφομοιωθούν από τους ετερότροφους οργανισμούς. Κάποιοι από αυτούς είναι σε θέση να χρησιμοποιήσουν μια ή λίγες μόνο ενώσεις, όπως είναι τα μεθανογενή που αφομοιώνουν μόνο το οξικό και το μυρμηκικό οξύ και κάποιες φορές τη μεθανόλη, το CO₂ και το CO, ενώ άλλοι είναι ευπροσάρμοστοι και μπορούν να χρησιμοποιήσουν περισσότερες από εκατό οργανικές ενώσεις.

Ένας παράγοντας που καθίσταται περιοριστικός για την ανάπτυξη μιας μικροβιακής κοινότητας είναι η παρουσία του αζώτου. Η έλλειψη του αζώτου στην αποσυντιθέμενη μάζα των απορριμμάτων θα οδηγήσει σε μείωση της φυσιολογικής ανάπτυξης (κυρίως τη σύνθεση των πρωτεϊνών και των νουκλεϊκών οξέων), ενώ παράλληλα συνεχίζεται η αποδόμηση της οργανικής ύλης έτσι ώστε να διατηρηθούν τα υπάρχοντα βακτήρια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συσσώρευση των μεταβολιτών, όπως τα οργανικά οξέα, τα οποία μπορούν να ρίξουν τα επίπεδα του pH και να αναστείλουν κάποιες διαδικασίες, όπως αυτή της μεθανογένεσης. Κάποιοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τα ανόργανο άζωτο, τα αμμωνιακά άλατα ή τα νιτρικά, ενώ άλλοι απαιτούν οργανικό άζωτο, ουρία ή αμινοξέα. Ακόμα, κάποια βακτήρια μπορούν να μετατρέψουν το μόριο του αζώτου (N_2) σε αμμωνία πριν το αφομοιώσουν. Η παρουσία αυτών των βακτηρίων σε μια ένωση θα μπορούσε να αποτρέψει τη μείωση του αζώτου.

Τέλος, ο φώσφορος, χρησιμοποιείται από τα βακτήρια κυρίως με τη μορφή φωσφορικών ιόντων. Εξαιτίας όμως της χαμηλής διαλυτότητας πολλών ανόργανων φωσφορικών αλάτων, περιορίζεται η ανάπτυξη της μικροβιακής κοινότητας κάτι το οποίο δυσχεραίνει με την ύπαρξη ιζήματος φωσφόρου. Η κατάσταση αυτή βέβαια μπορεί να ελεγχθεί με τη διαλυτοποίηση των μεταβολιτών, όπως είναι τα οργανικά οξέα που εκκρίνονται από τα βακτήρια.

Εκτός από τη τροφή, για τη βιοσύνθεση και τη διατήρηση της ζωής απαραίτητη είναι και η ύπαρξη της ενέργειας. Δυο είναι οι μορφές ενέργειας που είναι διαθέσιμες στους μικροοργανισμούς και τους διαχωρίζει σε δυο κατηγορίες. Έτσι, οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί είναι αυτοί που χρησιμοποιούν την ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία, και οι χημειοσυνθετικοί οργανισμοί οι οποίοι χρησιμοποιούν την ενέργεια που προέρχεται από μια εξώθερμη αντίδραση, την οξειδωση οργανικών ή ανόργανων τροφών.

Η ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία είναι η κύρια πηγή ενέργειας για την πρωτογενή παραγωγή στη γη, κυρίως όμως για τη φυτική παραγωγή. Στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, υπάρχουν μικροοργανισμοί που μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ενέργεια από τον ήλιο, αλλά η συνεισφορά τους στην όλη διαδικασία της αποδόμησης είναι μικρή. Αντίθετα, η εξώθερμη αντίδραση που λαμβάνει χώρα στο περιβάλλον των μικροοργανισμών, πραγματοποιείται με αφαίρεση ατόμων υδρογόνου από την οξειδούμενη οργανική ύλη. Οι χημειοσυνθετικοί αυτοί οργανισμοί είναι εκείνοι που διαδραματίζουν το σπουδαιότερο ρόλο στο εσωτερικό μιας χωματερής. Στη περίπτωση αυτή λαμβάνουν χώρα δύο διαδικασίες, αυτή της αναπνοής και αυτή της ζύμωσης.

Η διαδικασία της αναπνοής συνεπάγεται μεταφορά ηλεκτρονίων μέσω οξειδοαναγωγής. Όταν ο δότης των ηλεκτρονίων είναι ανόργανα στοιχεία, ο μικροοργανισμός ονομάζεται λιθότροφος, ενώ όταν ο δότης των ηλεκτρονίων είναι

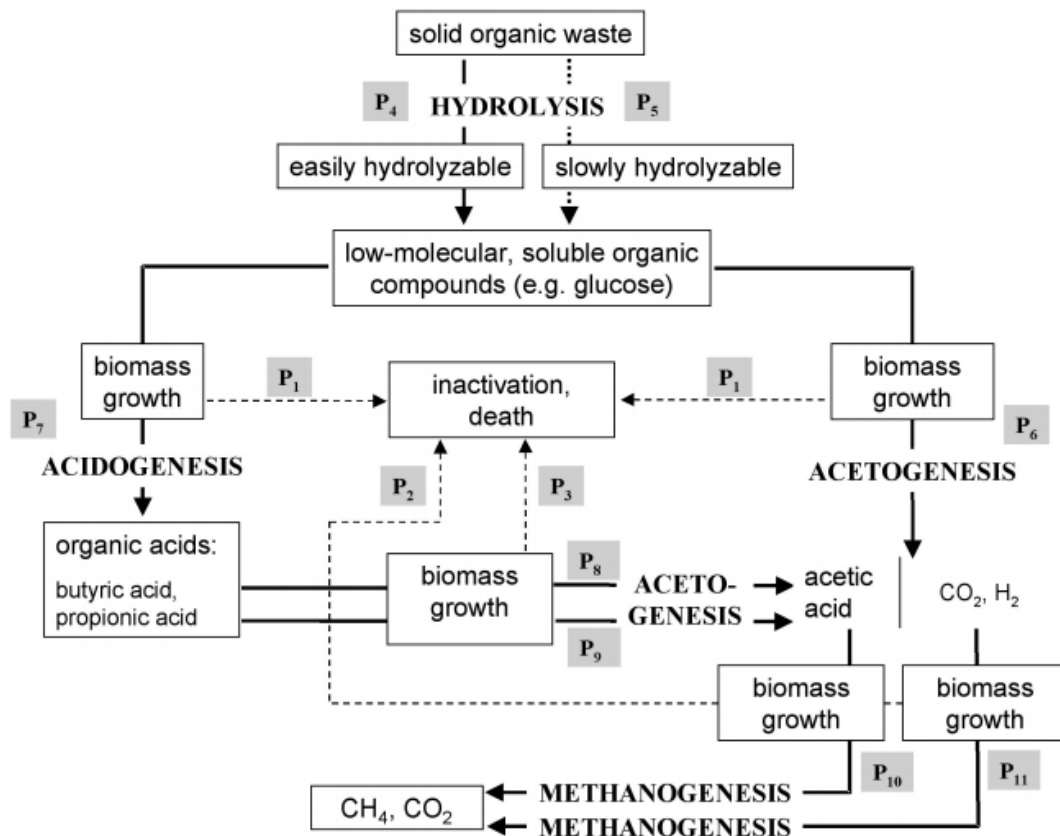
οργανικά στοιχεία, ο μικροοργανισμός ονομάζεται οργανότροφος. Οι λιθότροφοι μικροοργανισμοί συνήθως είναι και αυτότροφοι. Η ενέργεια που λαμβάνει ο οργανισμός από το ανόργανο στοιχείο, χρησιμοποιείται για τη μείωση του CO₂ και τη σύνθεση του κυτταρικού υλικού. Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει τόσο σε αερόβιες συνθήκες, όταν δηλαδή ο αποδέκτης των ηλεκτρονίων είναι το μοριακό οξυγόνο, όσο και σε αναερόβιες συνθήκες, όταν δηλαδή ο αποδέκτης ηλεκτρονίων είναι στοιχεία εκτός του οξυγόνου, που σε συνθήκες χωματερής είναι τα θειικά και τα νιτρικά. Σε αερόβιες συνθήκες, σε γενικές γραμμές, ο λιθότροφος μεταβολισμός λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει έλλειψη σε οργανικές θρεπτικές ουσίες. Σε αναερόβιες συνθήκες, πρακτικά μόνο το υδρογόνο (H₂) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει ηλεκτρόνια, ενώ δέκτες ηλεκτρονίων είναι τα θειικά. Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται υδρόθειο το οποίο αποτελεί ένα ιδιαίτερα δύσσομο προϊόν και CO₂ ή παράγωγά του. Η χρήση του CO₂ ως δέκτης ηλεκτρονίων σε συνδυασμό με την οξείδωση του υδρογόνου οδηγούν στη παραγωγή του μεθανίου, και αποτελεί μια από τις σημαντικότερες διεργασίες στη μικροβιακή αναερόβια αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων.

Κατά τη διαδικασία του οργανοτροφικού μεταβολισμού γίνεται αξιοποίηση των οργανικών υλικών ως δότες ηλεκτρονίων για παραγωγή ενέργειας. Παράλληλα όμως, κατά τη διαδικασία αυτή το οργανικό υπόβαθρο χρησιμεύει και ως πηγή άνθρακα, με ένα μέρος του να αφομοιώνεται για τη δημιουργία των κυττάρων και ένα άλλο να οξειδώνεται για αναπνευστικούς σκοπούς. Οι οργανότροφοι οργανισμοί στη συγκεκριμένη κατάσταση είναι ταυτόχρονα και ετερότροφοι. Ως αποδέκτες ηλεκτρονίων για την αερόβια αναπνοή χρησιμοποιείται το οξυγόνο, ενώ για την αναερόβια τα νιτρικά, τα θειικά και το στοιχειακό θείο. Η αερόβια αναπνοή δίνει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, αλλά και τη μέγιστη απώλεια ενέργειας ως θερμότητα. Έτσι, εάν η διάχυση της θερμότητας είναι περιορισμένη, οι αερόβιες δραστηριότητες θα συνοδεύονται από έντονη αύξηση της τοπικής θερμοκρασίας.

Μια ειδική κατηγορία των οργανοτροφικών οργανισμών αποτελούν τα μεθανογενή, τα οποία μετατρέπουν τη μεθανόλη, το φορμικό και το οξικό οξύ σε μεθυλομάδες. Η μεταφορά ηλεκτρονίων στη συνέχεια οδηγεί στο σχηματισμό μεθανίου και CO₂. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται από τον πολύ αργό ρυθμό, πράγμα το οποίο εξηγεί τη συντήρησή της για πολλά χρόνια.

Τα μεθανογενή βακτήρια καταναλώνουν μεγάλο μέρος από τα οργανικά οξέα είτε κατευθείαν, είτε με τη βοήθεια ενδιάμεσων μετασχηματισμών μέσω των οποίων το μετατρέπουν σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Συνέπεια της παραπάνω διαδικασίας είναι η σταδιακή άνοδος του pH σε τιμές 7- 8. Ως αποτέλεσμα, τα στραγγίσματα θα περιέχουν λιγότερες διαλυμένες ουσίες και φυσικά μειωμένο οργανικό φορτίο. Συνήθως, κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, παράγεται άζωτο και υδρόθειο, ενώ το υδρογόνο το οποίο έχει παραχθεί στις προηγούμενες φάσεις

καταναλώνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Η διαδικασία αυτή, μαζί με την λιθοτροφική- αυτοτροφική μεθανογένεση αποτελούν τους κυριότερους τρόπους παραγωγής μεθανίου κατά τη διάρκεια της αναερόβιας αποδόμησης των οργανικών συστατικών των απορριμμάτων.



Διάγραμμα 7. Στάδια της διαδικασίας βιοαποδόμησης

Ένας άλλος τρόπος απόκτησης ενέργειας για τους αναερόβιους οργανοτροφικούς οργανισμούς, που είναι επίσης πολύ διαδεδομένος, είναι οι ζυμώσεις. Ουσιαστικά, πρόκειται για εξώθερμες μεταβολές του οργανικού υποστρώματος, συχνά αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, οι οποίες συνδυάζονται με κάποιο τρόπο με τη σύνθεση της πλούσιας σε ενεργειακά αποθέματα φωσφορικής αδενοσίνης (ATP). Αυτός ο τρόπος σχηματισμού της ATP διαφέρει από τη σύνθεση της ATP μέσω της αναπνευστικής διαδικασίας. Το ποσό της ενέργειας που διατίθεται από τη ζύμωση είναι πολύ χαμηλότερο από το αντίστοιχο που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία της αναπνοής. Από τη διαδικασία της ζύμωσης μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες οργανικών οξέων, που έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της οξύτητας του περιβάλλοντός τους εάν δε καταναλωθούν άμεσα.

Τέλος, τα βακτήρια έχουν πολλές απαιτήσεις σε φυσικοχημικές παραμέτρους, όπως είναι η θερμοκρασία, η οσμωτική πίεση και το pH. Στη περίπτωση της αναερόβιας διεργασίας των οργανικών αποβλήτων, τα μεθανογενή βακτήρια είναι ουδετερόφιλα, ενώ η ζύμωση των βακτηρίων γίνεται συνήθως κάτω από όξινες συνθήκες. Όταν λάβει χώρα μια σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας, για παράδειγμα λόγω έντονης αερόβιας αναπνευστικής δραστηριότητας, πολλοί οργανισμοί θα θανατωθούν, αλλά στη πραγματικότητα θα αντικατασταθούν από θερμοφίλους οργανισμούς, ή οργανισμούς με παρόμοιες δυνατότητες. Σε βασικές συνθήκες, κατά συνέπεια σε υψηλή οσμωτική πίεση, ο αριθμός των βακτηρίων μειώνεται δραστικά.

1.7. Σύνθεση απορριμμάτων

Πολλές είναι οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί, σε παγκόσμιο επίπεδο, για τη σύσταση των στερεών αποβλήτων και αναγνωρίζουν ότι τα στερεά απόβλητα αποτελούν μια ειδική κατηγορία αποβλήτων. Ωστόσο, τα συγκριτικά δεδομένα είναι δύσκολο να ερμηνευθούν καθώς αναφέρονται σε διαφορετικούς τύπους αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων και σε κάποιες περιπτώσεις και των βιομηχανικών απόβλητων, που συλλέγονται από τις διάφορες κοινωνίες. Η σύσταση των αστικών στερεών αποβλήτων εξαρτάται κυρίως από τις τοπικές κοινωνίες, τις μεθόδους διάθεσης και συγκέντρωσης καθώς και το βαθμό της ανακύκλωσης που έχει λάβει η κάθε χώρα.

Παρά τη μεταβλητότητα στη σύνθεσή τους, το συνολικό οργανικό περιεχόμενο, ιδίως οι κυτταρινούχες ουσίες, αποτελούν το υψηλότερο ποσοστό στη σύνθεση των στερεών αστικών αποβλήτων (Pfeffer 1976; Barlaz & Ham 1993). Η κυτταρίνη προέρχεται από το χαρτί και τα ζυμώσιμα απορρίμματα. Από το μεταβολισμό της κυτταρίνης παράγεται η γλυκόζη και άλλα απλά σάκχαρα τα οποία αποδομούνται και δίνουν διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, αιθανόλη, προπιονικό, βουτυρικό και βαλερικό οξύ. Τα περισσότερα οργανικά υλικά είναι βιοδιασπώμενα και μπορούν να διασπαστούν σε απλούστερα συστατικά από τους αερόβιους και τους αναερόβιους μικροοργανισμούς. Το 92% των παραγόμενων οργανικών οξέων προέρχεται από την αποδόμηση της κυτταρίνης και της ημισυνθετικής κυτταρίνης και των πρωτεϊνών. Κατά τη διάρκεια της αερόβιας διεργασίας, η οποία διαρκεί μικρό χρονικό διάστημα, τα βιοδιασπώμενα οργανικά συστατικά αντιδρούν γρήγορα με το οξυγόνο σχηματίζοντας διοξείδιο του άνθρακα, νερό και άλλα υποπροϊόντα (π.χ. βακτηριακά κύτταρα). Η εξάντληση του οξυγόνου σηματοδοτεί την έναρξη της αναερόβιας μικροβιακής διεργασίας, η οποία διαρκεί πολύ περισσότερο. Στα αναερόβια οικοσυστήματα, η διαδικασία διάσπασης των οργανικών συστατικών γίνεται διαδοχικά ξεκινώντας από την υδρόλυση των σύνθετων σωματιδίων σε απλούστερα πολυμερή, όπως είναι οι πρωτεΐνες, οι

υδατάνθρακες και τα λιπίδια τα οποία υδρολύονται στη συνέχεια σε μονομερή, όπως είναι τα αμινοξέα, τα σάκχαρα και σε υψηλά μοριακά λιπαρά οξέα. Τα αμινοξέα και τα σάκχαρα μετατρέπονται είτε σε ενδιάμεσα υποπροϊόντα (π.χ. προπιονικό οξύ, βουτυρικό οξύ και άλλα πτητικά οξέα) είτε εφίστανται ζύμωση απευθείας δημιουργώντας οξικό οξύ. Τα υψηλά μοριακά λιπαρά οξέα οξειδώνονται σε ενδιάμεσα υποπροϊόντα και σε υδρογόνο. Το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα εμφανίζονται κυρίως μέσω της οξικής διάσπασης.

1.8. Φυσικοχημικές διαδικασίες σε μια χωματερή

Αν και σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων κυριαρχούν οι βιολογικές διαδικασίες, ωστόσο, μια σειρά φυσικοχημικών διαδικασιών παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποδόμηση των απορριμμάτων. Τέτοιες διαδικασίες μπορεί να είναι η προσρόφηση, η απελευθέρωση, η κατακρήμνιση, η ιοντοανταλλαγή και η διάλυση, οι οποίες εξαρτώνται από τις χημικές συνθήκες που επικρατούν στο χώρο της υγειονομικής ταφής (pH, δυναμικό οξειδοαναγωγής, συγκέντρωση ανόργανων αλάτων) και μεταβάλλονται καθώς είναι συνάρτηση των βιολογικών διαδικασιών.

Η φυσική αποδόμηση και η έκπλυση από τη κίνηση του νερού προκαλούν τη διάσπαση και τη μετακίνηση των συστατικών των απορριμμάτων. Υπεύθυνες γι' αυτό είναι οι φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στη μάζα των αποβλήτων. Η συμπύκνωση των απορριμμάτων, που επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του ΧΥΤΑ, η συναγωγή, η απορρόφηση των διαλυμένων ρύπων (δέσμευση των ρύπων μέσα σε άλλα υλικά) και η προσρόφηση (δέσμευση των ρύπων στην επιφάνεια άλλων υλικών, αποτελούν τις βασικότερες φυσικές διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσα στον χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων.

Η μετατροπή των οργανικών και ανόργανων ουσιών και των βαρέων μετάλλων από τη στερεά στην υγρή φάση (διάλυση) και την εμφάνισή τους στα στραγγίσματα, είναι αποτέλεσμα των χημικών διαδικασιών. Επιπλέον, οι χημικές διαδικασίες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της κινητικότητας των συστατικών των απορριμμάτων και ως εκ τούτου την επιτάχυνση του ρυθμού ομογενοποίησης της χωματερής.

Οι πιο σημαντικές διεργασίες που παρατηρούνται στους ΧΥΤΑ είναι η οξείδωση από το παγιδευμένο οξυγόνο, το οποίο όμως εξαντλείται σε μικρό χρονικό διάστημα, οι αντιδράσεις αναγωγής που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της μεθανογένεσης και οι αντιδράσεις των μετάλλων – οξέων. Οι τελευταίες συμβαίνουν λόγω της παρουσίας των οργανικών οξέων και του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), προκαλώντας την απελευθέρωση των μεταλλικών ιόντων και αλάτων που αποτελούν δυνητικούς ρύπους. Μετά την έναρξη παραγωγής του μεθανίου, το

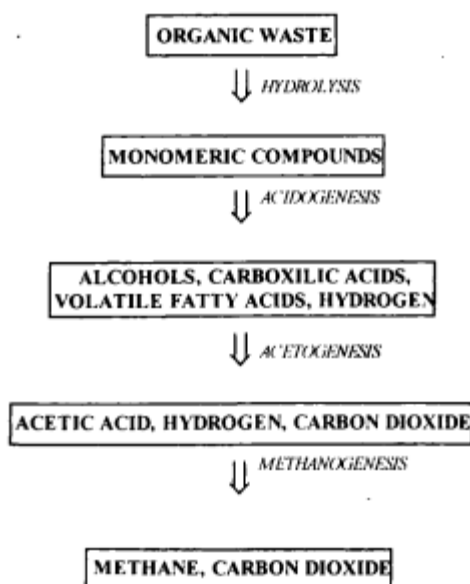
υλικό στην απορριμματική μάζα γίνεται λιγότερο όξινο και η απελευθέρωση των ιόντων μειώνεται.

1.9. Φάσεις αποδόμησης απορριμμάτων

Η κατανόηση της μικροβιακής διαδικασίας στους χώρους υγειονομικής ταφής είναι πολύ σημαντική για την ενίσχυση και τη βελτίωση των μικροβιακών διαδικασιών στους χώρους αυτούς. Σε γενικές γραμμές η αποσύνθεση των στερεών αστικών αποβλήτων παρακολουθείται μέσω της μέτρησης ορισμένων παραμέτρων, όπως είναι η συνολική παραγωγή βιοαερίου, η συγκέντρωση του CH_4 και η συγκέντρωση των πτητικών λιπαρών οξέων (VFAs) (Pohland & Gould 1986, Barlaz et al. 1990). Επιπλέον, τα μικροβιακά χαρακτηριστικά αυτών των διαδικασιών, όπως είναι η μέτρηση της περιεχόμενης ATP και οι ειδικές ενζυματικές δραστηριότητες, είναι επίσης σημαντικά στη κατανόηση και την ενίσχυση της αποσύνθεσης των απορριμμάτων.

Κατά τη διάρκεια της υγειονομικής ταφής των αστικών στερεών αποβλήτων, μπορούν να λάβουν χώρα πέντε χαρακτηριστικές φάσεις μικροβιολογικής αποδόμησης των απορριμμάτων (Christensen & Kjeldsen 1989). Αρχικά, υφίσταται κομποστοποίηση, κατά την οποία το οξυγόνο παγιδεύεται μέσα στη μάζα των αποβλήτων. Η αερόβια αυτή φάση συνήθως διαρκεί λίγο, λόγω της γρήγορης εξάντλησης του οξυγόνου. Το αποτέλεσμα της μείωσης του οξυγόνου είναι η ζύμωση του υλικού και η παραγωγή προϊόντων όπως είναι τα πτητικά λιπαρά οξέα (VFA), το H_2 , η αιθανόλη κλπ. Ουσιαστικά, τα βακτηρίδια παραγωγής οξέων μετατρέπουν τα εύκολα αποδομήσιμα οργανικά συστατικά, όπως τα σάκχαρα, σε προϊόντα αποδόμησης, όπως είναι τα πτητικά λιπαρά οξέα, το υδρογόνο και το διοξείδιο του άνθρακα. Ακολουθεί η δεύτερη φάση, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση των VFA και χαμηλή τιμή στο pH. Μια τρίτη φάση έντονης μεθανογένεσης ακολουθεί κατά την οποία τα μεθανογενή βακτήρια καταναλώνουν το H_2 , το μυρμηγκικό και το οξικό οξύ. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η μείωση της μερικής πίεσης του H_2 θα οδηγήσει σε συνθήκες που ευνοούν την αποδόμηση των οργανικών οξέων, οδηγώντας σε μια ταχεία αύξηση της παραγωγής του μεθανίου. Ο μετασχηματισμός των οξέων σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα οδηγεί στην αύξηση του pH. Η τέταρτη φάση ξεκινά όταν η παραγωγή του μεθανίου και του αερίου έχει σταθεροποιηθεί. Αυτό συμβαίνει όταν οι διαδικασίες της υδρόλυσης και της ζύμωσης έχουν ισορροπηθεί με αυτή της μεθανογένεσης. Οι συγκεντρώσεις των οργανικών οξέων στα στραγγίσματα θα είναι χαμηλές κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Μετά από πολλά χρόνια, το ποσοστό παραγωγής του αερίου θα μειωθεί, λόγω της μείωσης της ποιότητας του υποστρώματος, και του αέρα που μπορεί να έχει εισέλθει μέσα στο χώρο της υγειονομικής ταφής. Αυτό θα οδηγήσει στη πέμπτη αερόβια μετά-

κομποστοποίησης φάση. Η διάρκεια της κάθε φάσης εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων όπως είναι η ποιότητα των απορριμμάτων που δέχεται ο χώρος υγειονομικής ταφής, ο βαθμός της συμπίεσης και το κλίμα.



Διάγραμμα 8. Κύρια βήματα κατά τη διάρκεια της αναερόβιας φάσης αποσύνθεσης

Το αέριο από τους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων παράγεται από τη μικροβιακή αναερόβια αποδόμηση του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων που διατίθενται σε αυτούς. Τα βιοαποδομήσιμα οργανικά υλικά στα απόβλητα περιλαμβάνουν κυρίως χαρτί, ζωική και φυτική ύλη και απόβλητα κήπων. Τα κύρια συστατικά του αερίου αυτού είναι το μεθάνιο (CH_4 : 55- 60% v/v) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2 : 40- 45% v/v). Η παραγωγή του βασικού αερίου προκύπτει μέσω τριών αρχικών διαδοχικών φάσεων που ακολουθούνται από μια φάση που χαρακτηρίζεται από τη σταθερή παραγωγή του CH_4 και του CO_2 (Christensen et al. 1996). Η παραγωγή του αερίου θα συνεχιστεί μέχρι ότου η πλειοψηφία των οργανικών συστατικών των αποβλήτων να αποδομηθεί, πράγμα το οποίο μπορεί να διαρκέσει δεκάδες χρόνια.

Και το CH_4 και το CO_2 ταξινομούνται –σύμφωνα με πολλούς ερευνητές- ως αέρια του θερμοκηπίου (δηλαδή αέρια τα οποία έχουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας που ανακλάται από την επιφάνεια της γης). Το CH_4 έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη ένταση ακτινοβολίας των μακράς ζωής αερίων του θερμοκηπίου μετά το CO_2 (Forster et al. 2007). Οι χώροι υγειονομικής ταφής έχει βρεθεί να αποτελούν μια από τις κύριες πηγές παραγωγής CH_4 . Παγκοσμίως, οι εκπομπές του CH_4 από τους ΧΤΥΑ αποτελούν περίπου το 18% των παγκοσμίων

ανθρωπογενών εκπομπών του CH₄ (Bogner et al. 2007). Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η δεύτερη μεγαλύτερη ποσότητα ανθρωπογενών εκπομπών CH₄ προέρχεται από τους χώρους υγειονομικής ταφής, αποτελώντας το 23% του συνόλου των ανθρωπογενών εκπομπών CH₄. Το 2007, οι εκπομπές από τους χώρους αυτούς στις Ηνωμένες Πολιτείες ήταν περίπου 6329 Gg (US EPA 2009). Στην Ευρώπη, οι χώροι υγειονομικής ταφής αναφέρονται ως η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή ανθρωπογενών εκπομπών CH₄ (22%), με μια εκτιμώμενη εκπομπή CH₄ 3373 Gg από τη διάθεση των απορριμμάτων το 2006 (EEA 2008). Παγκοσμίως, οι ΧΥΤΑ έχει εκτιμηθεί ότι εκπέμπουν μεταξύ 35 και 69 Tg/year CH₄ στην ατμόσφαιρα, εκτός της εκτίμησης την ετήσιας παγκόσμιας εκπομπής των 600 Tg CH₄ (Denman et al. 2007, Bogner et al. 2007). Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι αυτές οι εκτιμήσεις βασίζονται σε εκτιμώμενα ποσοστά παραγωγής CH₄ που εφαρμόζονται στις εθνικές στατιστικές υπηρεσίες για την υγειονομική ταφή απορριμμάτων και όχι στο τμήμα μετρήσεων των εκπομπών.

Όμως, εκτός από το CH₄, το αέριο από τους χώρους υγειονομικής ταφής περιέχει πολλές πτητικές ουσίες (VOCs) συμπεριλαμβανομένων των αλογονωμένων και αρωματικών υδρογονανθράκων, του θείου και του οξυγόνου (και των ενώσεων αυτών) (Rettenberger & Stegmann 1996, Allen et al. 1997, Eklund et al. 1998). Έχει αποδειχθεί ότι οι πτητικές οργανικές ουσίες που διατίθενται στους χώρους υγειονομικής ταφής μπορεί να διαφύγουν στην ατμόσφαιρα μέσω της διάχυσης σε όλη τη κάλυψη της υγειονομικής ταφής (Kjeldsen & Christensen 2001). Οι εκπομπές των VOCs από τους χώρους υγειονομικής ταφής, μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία, να συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη, και στη περίπτωση των χλωροφθορανθράκων μπορεί να συμβάλλουν στη καταστροφή του όζοντος (Wallington et al. 1994, Christensen & Kjeldsen 1995). Εκτός λοιπόν από τη μείωση των εκπομπών του μεθανίου, έχει αποδειχθεί ότι η κατάλληλη κάλυψη με τα κατάλληλα υλικά των χώρων υγειονομικής ταφής μπορεί να μειώσει το ευρύ φάσμα των πτητικών οργανικών ενώσεων συμπεριλαμβανομένων και των αλογονωμένων και αρωματικών υδατανθράκων (Kjeldsen et al. 1997, Scheutz et al. 2003, 2004, 2008, 2009, Scheutz & Kjeldsen 2005).

1.10. Ποιότητα στραγγισμάτων

Τα στραγγίσματα των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων θεωρούνται ως ένας παράγοντας περιβαλλοντικού κινδύνου και αποτελούν βασικό μέλημα για το σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός τέτοιου χώρου. Για τον σχεδιασμό και την εφαρμογή της κατάλληλης επεξεργασίας είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων στραγγισμάτων. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη χημική σύσταση και τη παραγωγή αυτών περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων (αρχική σύνθεση, μέγεθος

σωματιδίων, πυκνότητα κλπ), την αλληλεπίδραση μεταξύ της υγρασίας του εδάφους -στο οποίο έχουν διατεθεί τα απόβλητα- με αυτά, την υδρολογία και το κλίμα της περιοχής όπου βρίσκεται ο χώρος υγειονομικής ταφής, το σχεδιασμό του χώρου αυτού και των λειτουργικών μεταβλητών, τις μικροβιολογικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια σταθεροποίησης των αποβλήτων και το στάδιο σταθεροποίησης του χώρου υγειονομικής ταφής. Οι περισσότεροι από αυτούς τους παράγοντες αλλάζουν κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας του χώρου, καθώς η υγειονομική ταφή αναπτύσσεται προκαλώντας σημαντικές αλλαγές στη ποιότητα και τη ποσότητα των στραγγισμάτων. Παράλληλα με όσα προαναφέρθηκαν, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση των υποκείμενων πιέσεων στα απορρίμματα, η οποία επιδρά στα υδραυλικά χαρακτηριστικά. Αυτή η πίεση προκαλεί τη συμπίεση των αποβλήτων κυρίως στις κατώτερες στρώσεις της υγειονομικής ταφής, καθιστώντας τα λιγότερα διαπερατά από τη κάθετη ροή του νερού. Αυτές οι υδραυλικές αλλαγές επηρεάζουν τη σύνθεση των στραγγισμάτων. Επίσης, σημαντικός παράγοντας είναι η επίδραση του χρόνου στη παραγωγή των στραγγισμάτων και η σταθεροποίηση των στραγγισμάτων που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του χώρου υγειονομικής ταφής.

Η μεταβολή της σύνθεσης των στραγγισμάτων και της ποσότητας των ρύπων που απομακρύνονται από τα απορρίμματα συχνά οφείλεται στον όγκο του νερού που διεισδύει στο χώρο της υγειονομικής ταφής και συνδέεται άμεσα με τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν μέσα σε αυτόν. Κάτω από ευνοϊκές συνθήκες, συνήθως η παρουσία αρκετής υγρασίας υποστηρίζει τη μικροβιακή δραστηριότητα και οι χώροι υγειονομικής ταφής συμπεριφέρονται σαν μεγάλοι αναερόβιοι αντιδραστήρες. Ταυτόχρονα, παράλληλα με τις βιοχημικές μεταβολές, φυσικοχημικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένων της διάλυσης, της καθίζησης, της προσρόφησης, της αραίωσης και άλλων, επηρεάζουν τη ποιότητα των στραγγισμάτων. Επιπλέον, ο χαρακτηρισμός των στραγγισμάτων περιπλέκεται από το γεγονός πως η σύστασή τους ποικίλλει ανάλογα με την ηλικία του χώρου υγειονομικής ταφής.

Τα στραγγίσματα είναι ιδιαίτερα μεταβλητά και ανομοιογενή. Γενικά, τα στραγγίσματα που παράγονται στους νεότερους χώρους υγειονομικής ταφής χαρακτηρίζονται από τη παρουσία σημαντικών ποσών σε πτητικά οξέα, ως αποτέλεσμα της όξινης φάσης της ζύμωσης. Σε ώριμους χώρους υγειονομικής ταφής, η μεγαλύτερη ποσότητα των οργανικών ουσιών στα στραγγίσματα είναι τα χουμικά και τα φουλβικά κλάσματα. Από παλαιότερη βιβλιογραφική άποψη, η συγκέντρωση των οργανικών ουσιών (όπως το COD) σε νέους χώρους υγειονομικής ταφής είναι άνω των 10.000 mg/l, ενώ σε στραγγίσματα χώρων υγειονομικής ταφής παλαιότερων των 10 χρόνων, το COD ήταν κάτω από 3000 mg/l (Chang, 1989; Chen, 1996). Από τις νεότερες μελέτες, τα αποτελέσματα δείχνουν πως και από τους νεότερους χώρους υγειονομικής ταφής, η συγκέντρωση των οργανικών ουσιών

είναι εξίσου μικρή (Aziz et al., 2007). Ο λόγος για τον οποίο αυτό συμβαίνει, είναι το ότι χρησιμοποιείται σε πολλούς χώρους υγειονομικής ταφής η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων. Σύμφωνα με τον Chan et al. (2002), η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων βελτιώνει τη ποιότητα των στραγγισμάτων, ιδίως όσον αφορά το COD. Οι Dorota Kulikowska και η Ewa Klimiu ανέφεραν πως η μείωση της συγκέντρωσης των στραγγισμάτων εξαρτάται από τη ποσότητα των θρεπτικών ουσιών, των ανόργανων στοιχείων ή των οργανικών που αραιώνονται από τα απόβλητα και το έδαφος στο κάθε κύτταρο της υγειονομικής ταφής. Τα στραγγίσματα περιέχουν οργανικές επικίνδυνες ουσίες, π.χ. αρωματικές ενώσεις, χλωριωμένες αλειφατικές ενώσεις, φαινόλες, φθαλικές ενώσεις και φυτοφάρμακα (Paxéus, 2000; Schwarzbauer et al., 2002; Baun et al., 2003, 2004). Επιπλέον σύμφωνα με τους Lo (1996), Kargi and Pamukoglu (2003), Kurniawan et al. (2006), στα στραγγίσματα ανιχνεύονται μεγάλες συγκεντρώσεις αμμωνίας, η οποία αποτελεί τον κύριο ρύπο σε αυτά. Σύμφωνα με τον Ehrig (1989) η αποδέσμευση του διαλυτού αζώτου από τα αστικά στερεά απόβλητα στα στραγγίσματα των νέων χώρων υγειονομικής ταφής οφείλεται στην απαμίνωση των αμινοξέων κατά τη διάρκεια της καταστροφής των οργανικών ενώσεων (Tatsi and Zouboulis, 2002, after Crawford and Smith, 1985). Τα στραγγίσματα από τους παλαιότερους χώρους υγειονομικής ταφής είναι πλούσια σε αμμωνιακό άζωτο, λόγω της υδρόλυσης και της ζύμωσης των αζωτούχων κλασμάτων των βιοαποικοδομήσιμων υποστρωμάτων (Carley and Mavinic, 1991). Η συγκέντρωση της αμμωνίας σε διάφορους χώρους υγειονομικής ταφής μπορεί να διαφέρουν κατά δεκάδες με εκατοντάδες mg N-NH₄/l (Tatsi and Zouboulis, 2002). Σύμφωνα με τον Chu et al. (1994), μετά τη πάροδο 3- 8 χρόνων, η συγκέντρωση του αζώτου της αμμωνίας φθάνει τιμές μεταξύ 500 και 1500 mg/l, και παραμένει σε αυτά τα επίπεδα για το λιγότερο 50 χρόνια.

Τα στραγγίσματα που προκύπτουν από τη πρώτη φάση της αερόβιας αποδόμησης των απορριμμάτων, δηλαδή τη φάση των οξέων, έχουν χαμηλές τιμές pH και έχουν αρκετά μεγάλες ποσότητες με οργανικό ρυπαντικό φορτίο. Παράλληλα, οι συγκεντρώσεις της βιοχημικής ζήτησης οξυγόνου (BOD₅) και της χημικής ζήτησης οξυγόνου (COD) είναι ιδιαίτερα υψηλές, αν και παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση. Επίσης, περιέχονται υψηλές συγκεντρώσεις πτητικών οξέων μικρού μοριακού βάρους (<120) και υψηλής πολικότητας, από τα οποία κυριαρχούν τα: οξικό, προπιονικό, βουτυρικό, βαλερικό, ισοβαλερικό και εξανικό οξύ, στα οποία και οφείλεται η δυσάρεστη οσμή των στραγγισμάτων.

Σημαντική παράμετρο επίσης αποτελεί εκείνη του χαρακτηρισμού της βιοδιασπασιμότητας των στραγγισμάτων BOD₅/ COD, που στα στραγγίσματα που προέρχονται από την όξινη φάση παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0,4-0,5.

Τα στραγγίσματα που δημιουργούνται από τη δεύτερη φάση αναερόβιας αποδόμησης, εκείνη δηλαδή της μεθανογένεσης, έχουν υψηλό pH λόγω της

μείωσης της συγκέντρωσης των πτητικών οργανικών οξέων, ενώ παράλληλα έχουν χαμηλές συγκεντρώσεις του οργανικού φορτίου BOD₅ και του COD. Ο οργανικός άνθρακας που παραμένει μετά την αποδόμηση παρουσιάζεται σε μεγάλο μοριακού βάρους κλάσματα (>500) και οι χουμικές οργανικές ενώσεις με μοριακό βάρος >50000 και δομή παρόμοια με αυτή των υδρογονανθράκων, εμφανίζονται πολύ σύντομα σε αυτή τη φάση. Ο λόγος BOD₅/ COD σε αυτά τα στραγγίσματα έχει χαμηλές τιμές (0,1-0,3 ή χαμηλότερα) λόγω της παρουσίας οργανικών ουσιών μεγάλου μοριακού βάρους, χουμικών και φουλβικών οξέων.

Τα στραγγίσματα από τους χώρους υγειονομικής ταφής περιέχουν επίσης βαρέα μέταλλα σε σημαντικές συγκεντρώσεις, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν ένα ιδιαίτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα εάν τα στραγγίσματα διαρρεύσουν στα επιφανειακά ή τα υπόγεια ύδατα. Η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων είναι συνάρτηση των πολύπλοκων οργανικών ενώσεων, του pH και των ανθρακικών ενώσεων. Η συγκέντρωσή τους αυξάνεται με το χαμηλό pH και μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των ανθρακικών ενώσεων (Stumm & Morgan, 1970).

Οι συγκεντρώσεις των στραγγισμάτων των ολικών βαρέων μετάλλων αναφέρονται σε mg/l (Reinhart and Grosh, 1998). Η έλξη των χημικών και φυσικών μεταλλικών ιόντων με τα διάφορα υλικά των αποβλήτων μπορεί να μειώνουν την εκπλυσιμότητά τους κάτω από τις συνηθισμένες συνθήκες υγειονομικής ταφής. Στη Σουηδία, οι συγκεντρώσεις των μετάλλων στα απόβλητα του χώρου υγειονομικής ταφής ήταν τέσσερις τάξεις μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες στα στραγγίσματα (Flyhammer, 1997). Η κινητικότητα αυτών των μεταλλικών ειδών μπορεί να αυξηθεί με τη πάροδο του χρόνου και καθώς τα απόβλητα γίνονται όξινα και επέρχονται σε όξινες συνθήκες (Kjeldsen et al., 2002).

Από τις μορφές του αζώτου στα στραγγίσματα των χώρων υγειονομικής ταφής, τα νιτρικά και τα νιτρώδη συνήθως εμφανίζονται με πολύ μικρές συγκεντρώσεις λόγω των αναερόβιων συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό της χωματερής. Το αμμωνιακό άζωτο (N- NH₄) φαίνεται να είναι από τα συστατικά που διαρκούν περισσότερο στα στραγγίσματα των χωματερών. Η παραγωγή της βιομάζας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την αναλογία C/N στα στραγγίσματα και στις διαχειριστικές πρακτικές. Οι Robinson & Maris (1983) έχουν δηλώσει πως το συνολικό ποσό του αζώτου στα στραγγίσματα μπορεί να καταναλωθεί για παραγωγή βιομάζας όταν η αναλογία του αζώτου στην οργανική συγκέντρωση είναι χαμηλή, για παράδειγμα C/N= 0,03. Ο λόγος C/N είναι επίσης ένας παράγοντας για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της απονιτροποίησης. Εάν ο λόγος C/N στα στραγγίσματα είναι χαμηλός, το ποσοστό του οργανικού άνθρακα μπορεί να είναι ανεπαρκές, ιδίως στα στραγγίσματα των ώριμων χώρων υγειονομικής ταφής.

Από τα μέταλλα ο σίδηρος φαίνεται να αποτελεί το κυρίαρχο στοιχείο, ενώ το μαγγάνιο και ο ψευδάργυρος φαίνεται να τον ακολουθούν. Οι συγκεντρώσεις του

χρωμίου, νικελίου, χαλκού, καδμίου και μολύβδου κυμαίνονται μεταξύ 0,01- 1,4 mg/l (Johansen & Carlson, 1979). Κατά τη διάρκεια της όξινης φάσης, οι συγκεντρώσεις των μετάλλων αυξάνονται επειδή είναι περισσότερο ευδιάλυτα λόγω του χαμηλού pH και του σχηματισμού συμπλόκου με τα ελεύθερα πτητικά οργανικά οξέα (Harmsen 1983). Η συγκέντρωση όμως των οξέων μειώνεται κατά τη διάρκεια της μεθανογέννεσης και το pH αυξάνεται οδηγώντας σε δραστική μείωση της συγκέντρωσης των μετάλλων, τα οποία και απορροφούνται από τη παραγόμενη από τους μικροοργανισμούς ιλύ, εκτός από τον μόλυβδο που σχηματίζει σταθερά σύμπλοκα με τις χουμικές ενώσεις που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης.

Τις τελευταίες δεκαετίες, το περιεχόμενο των αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων έχει αλλάξει, κυρίως ως αποτέλεσμα της αυξημένης ζήτησης και της βελτίωσης της ποιότητας των καταναλωτικών προϊόντων. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες, τα χρώματα, τα λάδια, τα ηλεκτρικά προϊόντα και τα φαρμακευτικά προϊόντα τα οποία διατίθενται στις χωματερές, περιέχουν πρόσθετα που θα μπορούσαν να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Προηγούμενες μελέτες στα στραγγίσματα των χώρων υγειονομικής ταφής έχουν αξιολογήσει παραμέτρους όπως η οργανική ύλη, η χημική και βιολογική ζήτηση οξυγόνου, τα θρεπτικά συστατικά και τα ιόντα μετάλλων. Από το 1990 όμως, οι μελέτες έχουν επεκταθεί στις οργανικές χημικές ομάδες όπως είναι οι φαινολικές ενώσεις, τα αρωματικά οξέα, οι χλωριωμένες αρωματικές ενώσεις, καθώς και στις πολυκυκλικές αρωματικές χημικές ενώσεις ([Paxéus, 2000], [Schwarzbauer et al., 2002], [Welander, 1997] and [Öman and Hynning, 1993]).

Νέες και αναδυόμενες ομάδες ενώσεων, όπως οι υπερφθοριωμένες ενώσεις (PFC), είναι πλέον ανιχνεύσιμες στο περιβάλλον ([Schultz et al., 2006], [Sinclair and Kannan, 2006] and [Woldegiorgis et al., 2006]) και στους ζώντες οργανισμούς ([Kannan et al., 2002] and [Martin et al., 2004]). Ιδιαίτερα το σουλφονικό υπερφθοροκτάνιο (PFOS) το υπερφθοροκτανοϊκό οξύ (PFOA) έχουν λάβει ιδιαίτερης προσοχής λόγω της μοναδικής χημείας τους, της επιμονής, της βιοσυσσώρευσης και των τοξικών επιδράσεων. Το PFC έχει μια ευρύτερη εφαρμογή σε μια πληθώρα προϊόντων, συμπεριλαμβανομένων των οικιακών προϊόντων καθαρισμού, των χαλιών, των υφασμάτων, των επιχειρημάτων χαρτιού, των καλλυντικών. Των αφρών κατάσβεσης και των συσκευασμένων τροφίμων (Hekster et al., 2003). Επί του παρόντος όμως, λίγα είναι τα στοιχεία των στραγγισμάτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής που δείχνουν πως αυτά μπορεί να αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πηγή των PFC ([Bossi et al., 2008], [Kallenborn et al., 2004], [Woldegiorgis et al., 2006] and [Busch et al., 2010]).

Σύμφωνα με τον Paris Honglay Chen (1995), το pH φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση της ηλικίας του χώρου υγειονομικής ταφής. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη βιολογική αποσύνθεση του οργανικού αζώτου σε αμμωνιακό άζωτο. Προφανώς, τα χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων επηρεάζονται ιδιαίτερα από την ηλικία της χωματερής, κυρίως έναν με ενάμιση χρόνο μετά το κλείσιμο αυτής. Η σταθερή κατάσταση επιτυγχάνεται άνω του ενός με ενάμιση έτους για τα διάφορα χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων. Η σύνθεση των στραγγισμάτων της υγειονομικής ταφής εξαρτώνται από την ηλικία του χώρου υγειονομικής ταφής σύμφωνα με τους Nanny and Ratasuk (2002), Kulikowska και Klimiuk (2008). Σύμφωνα με μετρήσεις από τη κεντρική χωματερή της Asturia της Ισπανίας, το COD των στραγγισμάτων φθάνει στις μέγιστες τιμές του κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών λειτουργίας του χώρου υγειονομικής ταφής, ενώ παρατηρείται μείωση των τιμών αυτού κατά τα επόμενα έτη [L. Castrillón, Y. Fernández-Nava, M. Ulmanu, I. Anger, E. Marañón (2009)]. Παράλληλα με τη μείωση του COD με την αύξηση της ηλικίας της χωματερής φαίνεται να μειώνεται και η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων λόγω των φαινομένων προσρόφησης και καταβύθισης τους με άλλες μορφές, ενώ το χαμηλό pH και η αύξηση των συγκεντρώσεων των ανθρακικών δείχνουν να αυξάνουν τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων (Stumm & Morgan, 1970).

Επίσης, σύμφωνα με τον Paris Honglay Chen (1995) η ροή των στραγγισμάτων φαίνεται αυξημένη με την αύξηση των βροχοπτώσεων, ενώ τα χαρακτηριστικά τους φαίνεται να επηρεάζονται τις συνεχόμενες μέρες βροχόπτωσης. Αυτές τις ημέρες παρατηρούνται και οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του COD.

Η διαχείριση των αστικών στερεών απορριμμάτων είναι γνωστό πως αποτελεί μια συνάρτηση πολλών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένων εκτός των ήδη αναφερθέντων (υλικό, πάχος καλύμματος, σύνθεση απορριμμάτων, κλίματος κ.α.), της πυκνότητας των αποβλήτων που επιτυγχάνεται μετά από συμπύκνωση του χώρου υγειονομικής ταφής (Wall and Zeiss, 1995; Ling et al., 1998; Youcai et al., 2002; Durmusoglu et al., 2005). Οι διαδοχικές διεργασίες συμπίεσης που γίνονται κατά τη διάρκεια της συνολικής παραμονής των απορριμμάτων στον χώρο υγειονομικής ταφής μπορούν να ταξινομηθούν σε αρχική (άμεση και ταχεία, λόγω της πίεσης υπερφόρτωσης), σε πρωτοβάθμια (λόγω της πλήρωσης των πόρων νερού και του κενού αέρος) και σε δευτεροβάθμια (λόγω της αποσύνθεσης των οργανικών υλών στα απόβλητα από τους μικροοργανισμούς) (Wall and Zeiss, 1995; Ling et al., 1998; Hossain et al., 2003). Η συγκέντρωση του οργανικού φορτίου που περιέχεται στα στραγγίσματα φαίνεται να αυξάνει με την αύξηση του βαθμού συμπίεσης αυτών.

1.11. Μέθοδοι επιτάχυνσης των διαδικασιών αποδόμησης σε μια χωματερή

Όπως προαναφέρθηκε, η αποδόμηση των απορριμμάτων στους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων είναι μια περίπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία, που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Υπάρχουν όμως ορισμένοι παράγοντες, οι οποίοι φαίνεται από διάφορες μελέτες να επιταχύνουν τις διαδικασίες αποδόμησης. Αυτοί μπορεί να είναι η περιεχόμενη υγρασία, η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, ο τεμαχισμός των στραγγισμάτων, η απόθεση μαζί με τα απορρίμματα λύων βιολογικών καθαρισμών καθώς και η ρύθμιση του pH και η διατήρηση της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα.

1.11.1. Υγρασία

Η περιεκτικότητα των απορριμμάτων σε υγρασία είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η βιολογική δραστηριότητα σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής. Η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία βελτιώνει την ανάμειξη και τη γενική διαθεσιμότητα των θρεπτικών ουσιών και της οργανικής ύλης που είναι πλούσια σε άνθρακα, αλλά επίσης διεγείρει την άμεση ανάπτυξη των βακτηρίων ενώ μειώνει τον ρυθμό μεταβολής της σεροτονίνης (Rees, 1980). Επιπλέον, ο μειωμένος υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT), ο οποίος συνήθως συνοδεύει τις έντονες βροχοπτώσεις, έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει τη παραγωγή μεθανίου (CH_4) από τη μάζα των αποβλήτων (Munasinghe 1996). Αρκετοί ερευνητές απέδειξαν πως η αυξημένη διείσδυση νερού στον χώρο της υγειονομικής ταφής αυξάνει τη συγκέντρωση των οργανικών ουσιών στα στραγγίσματα (Soper & McAlpine 1977; Bull et al. 1983; Jasper et al. 1987), χωρίς να γίνεται κάποιος ιδιαίτερος σχολιασμός στη παραγωγή αερίου.

Οι επιπτώσεις των βροχοπτώσεων στα στραγγίσματα και στη παραγωγή του βιοαερίου γίνονται αντιληπτές κυρίως κατά τη φάση σχηματισμού οξέων (αναερόβια αποδόμηση) και κατά τη φάση ζύμωσης του μεθανίου (αναερόβια αποδόμηση). Κατά τη διάρκεια της φάσης σχηματισμού οξέων, τα ενδιάμεσα πτητικά οξέα γίνονται το κύριο προϊόν, καθώς η υδρόλυση και η ζύμωση των αποβλήτων συνεχίζεται. Ο σχηματισμός αυτών των οργανικών οξέων οδηγεί στη μείωση του pH, το οποίο με τη σειρά του ενεργοποιεί τη κινητοποίηση και τη πιθανή αύξηση της πολυπλοκότητας των μετάλλων (Saint-Fort 1992). Τα οργανικά οξέα, οι αλκοόλες, τα νέα κύτταρα και η ενέργεια που παράγεται σε αυτή τη φάση χρησιμοποιούνται στη συνέχεια από τα μεθανογενή βακτήρια, κατά τη διάρκεια της μεθανογενούς φάσης, όπου τα κύρια προϊόντα είναι το CH_4 και το CO_2 . Η αξιοποίηση των οξέων σε αυτή τη φάση οδηγεί στη συνέχεια σε αύξηση του pH, η οποία με τη σειρά της προκαλεί μείωση της κινητικότητας των μετάλλων. Τα μεθανογενή βακτήρια είναι ο βασικός παράγοντας για τη πλήρη αναερόβια

χώνευση των αποβλήτων, αλλά είναι ελλιπή στα φρέσκα απορρίμματα λόγω της ευαισθησίας τους στο οξυγόνο (Rees 1980). Η ανάπτυξή τους φαίνεται να ευνοείται από τις υψηλές εισροές νερού. Σε κάποιες μελέτες, η μέγιστη παραγωγή CH₄ έχει βρεθεί πως γίνεται όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι της τάξης του 60 με 80% του υγρού βάρους (Ramaswamy 1970). Ωστόσο, άλλες μελέτες δίνουν μια διαφορετική εκδοχή. Μπορεί να θεωρηθεί πως εντός αυτού του εύρους υγρασίας, η κατανομή των θρεπτικών συστατικών, η πλούσια σε άνθρακα οργανική ύλη, τα βακτήρια και η αλκαλικότητα προκαλούν την αποσύνθεση του υλικού με τα μέγιστα οφέλη της μαζικής μεταφοράς (K.A. Wreford, J.W. Alwater, I.M. Lavkulich). Η ροή των στραγγισμάτων και η κατανομή των υλικών σε ολόκληρη τη μάζα των απορριμμάτων οδηγούν στην ενίσχυση της αποσύνθεσης των αποβλήτων. Όταν αυτή η κατανομή θα βελτιστοποιηθεί, η αυξημένη περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να έχει μικρή αξία, καθώς η αποδόμηση θα ήταν ανεξάρτητη από την υγρασία (Senior & Kasali 1990).

Δεν υπάρχει όμως κάποια γενική συμφωνία σχετικά με την επίδραση της υγρασίας στην απόδοση ταξινόμησης του αέρα. Σε δυο μελέτες που χρησιμοποίησαν πραγματικά αστικά στερεά απόβλητα, παρατηρήθηκε μείωση της ποσότητας των υλικών τροφίμων στα δείγματα των εκχυλισμάτων με τα υψηλότερα ποσοστά υγρασίας. Οι Trezek & Savage (1977) ανέφεραν πως το 70% των τροφίμων εμφανίσθηκε ως εκχύλισμα όταν η υγρασία στα αστικά στερεά απόβλητα ήταν μεταξύ του 20% και 30%, και ότι το ποσοστό αυτό αυξήθηκε στο 85% όταν επικρατούσαν μικρότερα ποσοστά υγρασίας, ενώ μειώθηκε στο 65% όταν τα ποσοστά υγρασίας ήταν μεγαλύτερα από 30%. Ο Lawler (1977) παρατήρησε παρόμοια αποτελέσματα, με τα υλικά των τροφίμων στο εκχύλισμα να μειώνονται από 65% με 15% υγρασία, στο 30% με 43% υγρασία. Αυτή η μείωση εξηγείται από την επίδραση της υγρασίας στη πυκνότητα των υλικών, με τα απορροφητικά χαρτιά να αυξάνουν τη πυκνότητά τους καθώς η υγρασία αυξάνεται. Ο Lawler (1977) παρατήρησε επίσης μια αύξηση της περιεκτικότητας σε τέφρα στο εκχύλισμα με την αύξηση της υγρασίας. Σημείωσε πως αυτό μπορεί να συμβεί επειδή το γυαλί κολλάει στο υγρό χαρτί και κατ' αυτόν τον τρόπο εξάγεται. Ο Saul (1981) ωστόσο, μελέτησε τη συμπεριφορά του γυαλιού στη ταξινόμηση του αέρα χρησιμοποιώντας συνθετικά αστικά στερεά απόβλητα που αποτελούνται από εφημερίδες και γυαλί, και βρήκε πως σε επίπεδα υγρασίας που κυμαίνονται από αυτά του ξηρού αέρα έως 30% δεν υπήρχε κάποια αύξηση στο ποσοστό του γυαλιού που εξάγεται με το γυαλί. Μια δεύτερη μελέτη (Bartlett 1981), χρησιμοποίησε συνθετικά αστικά στερεά απόβλητα που περιείχαν τέσσερις τύπους χαρτιού, πλαστικό, αλουμίνιο και σίδηρο, και δε βρήκε κάποια μείωση στα υλικά του εκχυλίσματος ή κάποια αύξηση στα αδρανή υλικά που εκχυλίστηκαν στο υγρό χαρτί για επίπεδα υγρασίας που κυμάνθηκαν από αυτά του ξηρού αέρα μέχρι 38%.

Αυτά τα αντικρουόμενα αποτελέσματα δείχνουν τους περιορισμούς στις υπάρχουσες μελέτες. Τα πειράματα που χρησιμοποιούν πραγματικά αστικά στερεά απόβλητα δε μπορούν εύκολα να ελέγξουν τις φυσικές ιδιότητες των απορριμμάτων, κάνοντας δύσκολο τον προσδιορισμό της διαδικασίας εκείνης που επηρεάζει τη διαδικασία ταξινόμησης. Η χρήση των συνθετικών αστικών στερεών αποβλήτων επιτρέπει τον έλεγχο των υλικών των απορριμμάτων, αλλά πάντα θα υπάρχει το ερώτημα εάν τα συνθετικά απορρίμματα μπορούν να αντιπροσωπεύουν πλήρως τη πραγματική φύση των αστικών στερεών αποβλήτων.

Τα επίπεδα υγρασίας γενικά θεωρούνται σημαντικά για την αποσύνθεση των στερεών αποβλήτων, με τα υψηλότερα ποσοστά της αποσύνθεσης να είναι ανάλογα με τα επίπεδα υγρασίας. Οι Rovers & Farquhar (1973) έχουν αποδείξει πως σε επίπεδα υγρασίας μεγαλύτερα του 80 % (συνολικά, κατά βάρος) η παραγωγή του μεθανίου και τα ποσοστά αποσύνθεσης των στερεών συστατικών μειώνονται. Οι Klink & Ham (1982) έχουν αναφέρει ποσοστά παραγωγής μεθανίου κάτω από συνθήκες που περιλαμβάνουν τη κίνηση της υγρασίας και τον έλεγχο ελάχιστης κίνησης υγρασίας. Ο αντίκτυπος των επιπέδων υγρασίας και της κίνησης της υγρασίας στη παραγωγή του μεθανίου δεν έχουν μετρηθεί κάτω από σχετικά φυσιολογικές συνθήκες.

1.11.2.Επανακυκλοφορία

Η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων αποτελεί μια μέθοδο για τη βελτίωση της αργής υποβάθμισης των αποβλήτων στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων. Ο κύριος στόχος των χωματερών αυτών στις οποίες εκτελείται αυτή η διαδικασία είναι η μείωση των στραγγισμάτων έτσι ώστε τα περιβαλλοντικά προβλήματα να είναι περιορισμένα στο μέλλον (Cossu and Rossetti, 2003). Οι στόχοι του σχεδιασμού αυτών των Χώρων Υγειονομικής Ταφής είναι η ελαχιστοποίηση της διέλευσης των στραγγισμάτων στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

Τα πλεονεκτήματα της επανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων περιλαμβάνουν τη διανομή των θρεπτικών συστατικών και των ενζύμων, τη ρύθμιση του pH, την αραίωση των ανασταλτικών ενώσεων, την ανακύκλωση και τη διανομή των μεθανογενών, την αποθήκευση των υγρών και τις δυνατότητες εξάτμισης (Reinhart, 1996). Η αποτελεσματικότητα της επανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων έχει δοκιμαστεί σε λυσίμετρα, σε πειραματικά κύτταρα και σε πλήρους κλίμακας μελέτες (Bilgili et al., 2007 a; Chan et al., 2002; Demir et al., 2004; Huo et al., 2008; Mehta et al., 2002; Pohland and Kim, 2000; Price et al., 2003; Reinhart et al., 2002; Wang et al., 2006), ενώ πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί για να αποδειχθεί η σταθεροποίηση των απορριμμάτων από την επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων (Pohland, 1975, 1980; Lecki et al., 1979; Buivid et al., 1981; Tittlebaum, 1982;

Pohland and Harper, 1985; Mata-Alvarez and MartinezVituria, 1986; Beker, 1987; Barlaz et al. 1989a, b).

Επίσης, η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων εφαρμόζεται σε ορισμένους χώρους υγειονομικής ταφής για την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία και για τη κυκλοφορία οργανικής ύλης μέσα στο κύτταρο της χωματερής. Έτσι, αυξάνεται η αποδοτικότητα της παραγωγής του μεθανίου. Η αυξημένη ποσότητα παραγωγής μεθανίου θα μπορούσε να είναι επωφελής για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Μια ποικιλία μεθόδων επανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων έχουν δοκιμαστεί. Οι Reinhart and Townsend (1998) πρότειναν πως η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων που περιέχουν οξέα στο μεθανογενές τμήμα του χώρου υγειονομικής ταφής, βοηθά στη παραγωγή μεθανίου. Μια άλλη εκτίμηση που συνίσταται είναι η ελεγχόμενη παροχή νερού και/ ή στραγγισμάτων σε παλιούς χώρους υγειονομικής ταφής (Gurijala and Suflita, 1993; Jokela et al., 1999; Jokela, 2002; Rajendra, 2002). Σε έναν αριθμό μελετών, ο σημαντικός ρόλος του νερού στη βιοαποικοδόμηση και στη παραγωγή βιοαερίου έχει επισημανθεί (Klink and Ham, 1982; Ehrig, 1983; Barlaz et al., 1987; Augenstein and Pacey, 1991; Ehrig, 1991; Bogner and Spokas, 1993; El-Fadel et al., 1996; Christensen et al., 1996). Μια αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία στον χώρο υγειονομικής ταφής ενισχύει τις διαδικασίες αναερόβιας αποδόμησης, διευκολύνοντας την ανακατανομή των υποστρωμάτων και των θρεπτικών συστατικών και την εξάπλωση των μικροοργανισμών στα μικροπεριβάλλοντα του χώρου υγειονομικής ταφής, οδηγώντας σε αύξηση της παραγωγής μεθανίου (Barlaz et al., 1989a, b; Augenstein and Pacey, 1991; Christensen et al. 1996; El-Fadel et al., 1996). Τέλος, οι Pohland & Gould (1980) μίλησαν για την εξάρτηση του ρυθμού της αναερόβιας αποσύνθεσης από το ποσοστό επανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων.

1.11.3. Τεμαχισμός

Ο τεμαχισμός των απορριμμάτων αποτελεί μια μέθοδο προ- επεξεργασίας που χρησιμοποιείται αρκετά τα τελευταία χρόνια. Ο τεμαχισμός πραγματοποιείται στον χώρο απόθεσης των απορριμμάτων στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής αυτών μέσω μηχανών που ονομάζονται μύλοι (λειοτεμαχιστές). Κατά την έξοδό τους από τους μύλους, τα απορρίμματα έχουν συγκεκριμένη ογκομετρική σύσταση ανάλογα με το επόμενο επιθυμητό στάδιο επεξεργασίας τους. Το βασικό πλεονέκτημα του τεμαχισμού είναι η μείωση του όγκου των απορριμμάτων. Αυτό συνεπάγεται τον μικρότερο απαιτούμενο αποθηκευτικό χώρο στη χωματερή, συνεπώς και την επιμήκυνση του χρόνου ζωής της. Παράλληλα επιτυγχάνεται ομοιόμορφη πλήρωση και καθίζηση του χώρου.

Σύμφωνα με κάποιες μελέτες, ο τεμαχισμός των απορριμμάτων επωφελεί την ανάπτυξη μικροοργανισμών καθώς και τη γρήγορη έναρξη παραγωγής μεθανίου. Επίσης μειώνει σημαντικά τις συγκεντρώσεις του οργανικού φορτίου στα στραγγίσματα.

1.11.4.Εμπλουτισμός των απορριμμάτων με μικροοργανισμούς

1.11.4.1. Προσθήκη ιλύος

Η χαμηλή περιεχόμενη στη μάζα των απορριμμάτων υγρασία, όπως προαναφέρθηκε, συμβάλλει στον αργό ρυθμό βιοδιάσπασης, πράγμα το οποίο οδηγεί στη παράταση του χρόνου ζωής ενός χώρου υγειονομικής ταφής και στη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση αυτής. Το κόστος της παρακολούθησης και της μακροχρόνιας φροντίδας του χώρου υγειονομικής ταφής είναι πολύ υψηλό.

Ένας από τους τρόπους για τη προώθηση της βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων αποτελεί η προσθήκη ιλύος σε αυτά. Η ιλύς είναι ένα αναπόφευκτο, επικίνδυνο υποπροϊόν από τις εγκαταστάσεις βιολογικών καθαρισμών, η οποία απαιτεί ασφαλή διάθεση είτε σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων είτε σε συστήματα αποτέφρωσης, τα οποία όμως έχουν μεγάλο κόστος. Η ιλύς από την επεξεργασία των λυμάτων αποτελεί έναν πιθανό κίνδυνο για την υγεία δεδομένου ότι περιέχει μεγάλο αριθμό κύστεων από πρωτόζωα, παρασιτικά ωάρια, κόπρανά παθογόνων μικροοργανισμών όπως *Salmonella* spp., *Shigella* spp. και *Escherichia coli*. Επίσης περιέχει βαρέα μέταλλα όπως είναι ο ψευδάργυρος, το κάδμιο, ο υδράργυρος και ο χαλκός. Επιπλέον, η λάσπη περιέχει οργανικά μόρια και φυτικά θρεπτικά συστατικά, όπως είναι το άζωτο, ο φώσφορος το κάλιο και διάφορα ιχνοστοιχεία. Η θρεπτική αξία της ιλύος είναι σημαντική κυρίως λόγω της παρουσίας του αζώτου και του φωσφόρου.

Ο L. H. Dollar, σύμφωνα με μελέτες τόσο σε λυσίμετρα όσο και σε εξωτερικά κύτταρα, παρατήρησε πως στα μείγματα απορριμμάτων που περιέχουν υψηλά ποσοστά ιλύος (1: 6, ιλύς: αστικά απόβλητα), αποθηκεύεται περισσότερη υγρασία ανά μονάδα ξηρού βάρους από τα απορρίμματα στα οποία δεν έχει γίνει προσθήκη ιλύος. Επίσης, η ιλύς, αυξάνει τη πυκνότητα στο εσωτερικό των κυττάρων. Παρά το γεγονός της μεγάλης προσθήκης ιλύος στο κύτταρο, η παραγωγή των στραγγισμάτων ήταν μικρότερη από το αντίστοιχο κύτταρο στο οποίο δεν είχε γίνει προσθήκη ιλύος.

Τέλος, άλλες μελέτες δείχνουν πως η προσθήκη χωνεμένης ιλύος στα φρέσκα απορρίμματα χωρίς να γίνει παράλληλη ρύθμιση του pH, δεν επιφέρει επιτάχυνση της παραγωγής βιοαερίου, ενώ επιταχύνεται η παραγωγή οξέων. Ουσιαστικά όμως, η μέθοδος αυτή έχει παρουσιάσει ποικίλες αντιδράσεις ως προς την ορθότητάς της. Οι μελέτες πάνω σε αυτή τη κατεύθυνση ωστόσο, συνεχίζονται.

1.11.4.2. Στρώμα παλιών απορριμμάτων

Το παλιό στρώμα των απορριμμάτων προκαλεί σύμφωνα με πολλούς μελετητές σημαντική μείωση των ρυπαντικών παραμέτρων στα παραγόμενα στραγγίσματα. Επίσης, η προσθήκη φρέσκων απορριμμάτων πάνω σε παλιά τα οποία έχουν αποδομηθεί συμβάλλει στη μείωση των συγκεντρώσεων των ρυπαντών στα στραγγίσματα που προέρχονται από την αποδόμηση των φρέσκων απορριμμάτων σε βαθμό της τάξεως του 85%. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα του παλαιού στρώματος των απορριμμάτων να επεξεργάζεται τα στραγγίσματα και να μειώνει τους περιεχόμενους σε αυτά ρύπους, όπως γίνεται και από τα εδαφικά υλικά. Ωστόσο, η ικανότητα αυτή εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που έχει παρέλθει μέχρι τη τοποθέτηση του νέου στρώματος απορριμμάτων. Σύμφωνα με τους Shimaoka et al. (1993), η ικανότητα μείωσης των ρυπαντών μειώνεται όταν το διάστημα αυτό είναι αρκετά μεγάλο.

1.11.4.3. Θερμοκρασία

Τα ενεργά μεθανότροφα βακτήρια μπορούν να χρησιμοποιούν το μεθάνιο ως πηγή ενέργειας, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Αυτά τα βακτήρια βρίσκονται σε περιβάλλοντα που περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις μεθανίου και υπάρχει αφθονία οξυγόνου. Διάφοροι περιβαλλοντικοί παράγοντες έχουν βρεθεί να ευθύνονται για τον έλεγχο των συντελεστών οξείδωσης του μεθανίου, με τον σημαντικότερο εξ αυτών να αποτελεί η θερμοκρασία. Οι υψηλές θερμοκρασίες είναι οι καταλληλότερες για την οξείδωση του μεθανίου. Ως απόρροια των υψηλών θερμοκρασιών όμως, η υγρασία, μπορεί να μειώσει τους συντελεστές οξείδωσης του μεθανίου.

Σύμφωνα με δημοσιευμένες μελέτες η βέλτιστη θερμοκρασία για την οξείδωση του μεθανίου συνήθως κυμαίνεται από 30° έως 36° C. Ο Whalen et al. (1990) ανέφερε ως βέλτιστη θερμοκρασία αυτή των 31° C και οι William & Zobell (1949) αυτή των 32° C. Οι Boeckx & Van Cleemput (1996) and Nesbit (1992) ανέφεραν πως οι βέλτιστες θερμοκρασίες κυμαίνονται από 25° έως 30° C και από 20° έως 30° C αντίστοιχα.

Οι Nozhevnikova et al. (1993) and Whalen et al. (1990) ανέφεραν πως στους 20° C η ικανότητα οξείδωσης του μεθανίου, πέφτει στο μισό, σε σύγκριση με την αντίστοιχη στους 30° C. Μηδενική οξείδωση παρατηρήθηκε από τον Nesbit (1992) στους 5° C.

Τέλος, ο Hartz et al. (1982), ανέφερε πως σε μεσοφιλικές συνθήκες, η βέλτιστη θερμοκρασία παραγωγής μεθανίου είναι 41- 42° C, οι Mata- Alvarez και Martinez-Virtutia (1986) δίνουν ως βέλτιστη θερμοκρασία αυτή των 42° C για τον μέγιστο

ρυθμό παραγωγής του μεθανίου ενώ υποστηρίζουν πως η συνολική παραγωγή του μεθανίου λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 34-38° C.

1.11.4.4. pH

Η ανάπτυξη των μεθανοβακτηριδίων απαιτεί απόλυτα αναερόβιες συνθήκες και ουδέτερο pH (=7), ενώ τα βακτήρια παραγωγής οξέων αναπτύσσονται κυρίως σε όξινα περιβάλλοντα. Οι βέλτιστες τιμές pH για την ανάπτυξη των μεθανότροφων βακτηρίων και την οξείδωση του CH₄ στα εδάφη συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 5,5 και 8,5 (Dunfield et al. 1993, Hütsch et al. 1994, Bender & Conrad 1995, Scheutz & Kjeldsen 2004), ενώ ο Barlaz et al. (1990) αναφέρει πως το βέλτιστο εύρος τιμών του ως pH είναι 6,8 έως 7,4.

Κεφάλαιο 3

Προσομοίωση των συνθηκών που λαμβάνουν χώρα στον ΧΥΤΑ με τη χρήση μοντέλων- χρήση μοντέλου HELP

1.1. Εισαγωγή

Η μεταφορά των διαλυμένων ουσιών στο έδαφος αποτελεί μεγάλο ζήτημα τόσο στη γεωργία και στις υπόλοιπες συναφείς επιστήμες, όσο και στην προστασία του περιβάλλοντος από τη ρύπανση. Για την επιστήμη της προστασίας του περιβάλλοντος το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται εκτός των άλλων στην διαρροή των χημικών τοξικών ουσιών από διάφορες πηγές στην επιφάνεια του εδάφους. Μια τέτοια πηγή αποτελούν και οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων.

Η ροή του νερού στα πορώδη μέσα –θεωρούμε ότι το δείγμα των συμπιεσμένων απορριμμάτων που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμά μας αποτελεί ένα πορώδες μέσο- είναι η κύρια αιτία για τη μεταφορά της μάζας, είτε με τη διαδικασία της μετακίνησης είτε με τη διασπορά.

Η μαθηματική περιγραφή της κίνησης του υπόγειου νερού βασίζεται στο νόμο του Darcy και το νόμο διατήρησης της μάζας ή της συνέχειας. Ο νόμος του Darcy ορίζει πως η παροχή του νερού ανά μονάδα επιφανείας είναι ανάλογη της κλίσης του υδραυλικού φορτίου, και εκφράζεται από τη σχέση

$$q = -k_{\theta} \frac{dH}{dz} = -k_{\theta} \frac{d(H + z)}{dz}$$

όπου q είναι η ειδική παροχή ή ταχύτητα (cm/d), H είναι το υδραυλικό φορτίο (cm), h είναι το ύψος πίεσης (cm), z είναι το ύψος θέσης (cm) και η απόσταση κατά τη κατακόρυφη διεύθυνση από κάποιο επίπεδο αναφοράς και k_{θ} είναι η συνάρτηση της υδραυλικής αγωγιμότητας (cm/d).

Τα τελευταία χρόνια έχουν δημιουργηθεί πολλά μαθηματικά μοντέλα μεταφοράς μάζας, ανάλυσης της ποιότητας του νερού των υδατικών συστημάτων και διαχείρισης των υδατικών πόρων. Τα μαθηματικά πρότυπα τα οποία προσομοιώνουν τη κίνηση των υδατοδιαλυτών ουσιών στο έδαφος και ειδικότερα της έκπλυσης των εδαφών, μπορούν να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες, τα καθοριστικά ή αιτιοκρατικά (deterministic) και τα στοχαστικά (stochastic). Οι κατηγορίες αυτές μπορούν επίσης να διακριθούν σε μηχανιστικά (mechanistic) και συναρτησιακά (functional) ή αλλιώς σε μοντέλα ρυθμού (rate models) και μοντέλα χωρητικότητας (capacity models).

Σε κάθε φυσικό σύστημα εμπεριέχονται κάποιες μορφής αβεβαιότητες, που όμως αγνοούνται στη περίπτωση των αιτιοκρατικών μοντέλων. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί

να προσομοιώσει την ανταπόκριση του συστήματος σε ένα δεδομένο σύνολο συνθηκών. Είναι γεγονός όμως, πως η θεωρία απέχει από τη πράξη, συνεπώς η εγκυρότητα αυτών των προβλέψεων εξαρτάται από τη φύση και την έκταση της παραλλακτικότητας στις διάφορες παραμέτρους που περιγράφουν τις φυσικές, χημικές, βιολογικές και άλλες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα. Αυτό αποτέλεσε την αιτία της δημιουργίας των στοχαστικών μοντέλων, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τόσο τη στατιστική αξιοπιστία των δεδομένων όσο και τη στατιστική αξιοπιστία των προβλέψεων. Ουσιαστικά, η διάκριση των μοντέλων σε μηχανιστικά και συναρτησιακά γίνεται προκειμένου να γίνει αντιληπτό ότι τα πρώτα εμπεριέχουν όλους τους βασικούς μηχανισμούς που διέπουν και βασικά περιγράφουν τις διάφορες διεργασίες του συστήματος (π.χ. νόμος του Darcy για τη κίνηση του νερού), ενώ τα δεύτερα χρησιμοποιούν απλουστευμένες εκφράσεις για τις διεργασίες του συστήματος, δε χρησιμοποιούν βασικές αρχές και ως εκ τούτου απαιτούν λιγότερα στοιχεία, λιγότερο χρόνο και λιγότερη εμπειρία στη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Στη παρούσα διπλωματική μελέτη, χρησιμοποιήθηκε το Μοντέλο Υδρολογικής Αξιολόγησης των Επιδόσεων των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (HELP) προκειμένου να υπολογισθεί το υδρολογικό ισοζύγιο του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων, με ειδικότερο στόχο την εκτίμηση των παραγόμενων στραγγισμάτων. Το μοντέλο αυτό αποτελεί ένα οιονεί δισδιάστατο αιτιοκρατικό υδρολογικό μοντέλο της κίνησης του νερού πάνω, διαμέσου και έξω από ένα κύτταρο ενός χώρου υγειονομικής ταφής.

1.2. Το μοντέλο HELP

1.2.1. Ιστορική αναφορά

Οι εκδόσεις 1, 2 και 3 του προγράμματος Υδρολογικής Αξιολόγησης των Επιδόσεων των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance - HELP) δημιουργήθηκαν από την υπηρεσία υδάτων του μηχανικού τμήματος του στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών Waterways Experiment Station (WES), Vicksburg, MS, για την Εταιρεία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA), το τεχνολογικό εργαστήριο μείωσης κινδύνου στο Σινσινάτι, Οχάϊο, για τις ανάγκες της Διατήρησης των Πόρων και της Δράσης Αποκατάστασης (RCRA) και την Ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Απόκριση, Αποζημίωση και Υπαιτιότητα (CERCLA, γνωστή ως Superfund) όπως αυτό ορίζεται από το γραφείο του τμήματος των στερεών αποβλήτων της EPA στην Ουάσιγκτον. Ο πρωταρχικός σκοπός του μοντέλου είναι να συμβάλλει στη σύγκριση του σχεδιασμού των εναλλακτικών λύσεων κατασκευής των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, όπως κρίνεται από τα υδατικά τους ισοζύγια.

Το μοντέλο Υδρολογικής Αξιολόγησης των Επιδόσεων των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (HELP) σχεδιάστηκε προκειμένου να βοηθήσει τους σχεδιαστές των χωματερών επικίνδυνων αποβλήτων και τις ρυθμιστικές αρχές να αξιολογήσουν την υδρολογική απόδοση των προτεινόμενων σχεδίων υγειονομικής ταφής. Το μοντέλο δέχεται μετεωρολογικά, εδαφικά και σχεδιαστικά δεδομένα και χρησιμοποιεί τεχνικές λύσεις που αντιπροσωπεύουν τις επιπτώσεις της επιφανειακής αποθήκευσης, του λιωσίματος του χιονιού, της απορροής, της διήθησης, της εξατμισοδιαπνοής, της ανάπτυξης φυτικής επιφάνειας, της αποθηκευμένης υγρασίας του εδάφους, της πλευρικής πλάγιας αποστράγγισης, της επανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων, της ακόρεστης κάθετης αποστράγγισης και των στραγγισμάτων μέσω του εδάφους, των γεωμεμβρανών ή των σύνθετων επενδύσεων. Τα συστήματα των χώρων υγειονομικής ταφής περιλαμβάνουν ποικίλους συνδυασμούς βλάστησης, εδαφοκάλυψης, κύτταρα απορριμμάτων, πλευρικά στρώματα αποστράγγισης, χαμηλής διαπερατότητας εδάφη και συνθετικά στρώματα γεωμεμβράνης. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σε ημερήσιες, μηνιαίες ή ετήσιες τιμές και σε μακροπρόθεσμους μέσους όρους ποσότητας νερού.

Το μοντέλο HELP είναι ένα δυο διαστάσεων, αιτιοκρατικό, δρομολόγησης του νερού μοντέλο που καθορίζει τα ισοζύγια του νερού. Το μοντέλο προσαρμόστηκε από το μοντέλο HSSWDS (Hydrologic Simulation Model for Estimating Percolation at Solid Waste Disposal Sites) της Εταιρείας Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (Perrier and Gibson, 1980; Schroeder and Gibson, 1982), και από διάφορα μοντέλα της Υπηρεσίας Γεωργικής Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών (ARS), συμπεριλαμβανομένου του μοντέλου CREAMS (Chemical Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel, 1980), του μοντέλου SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Arnold et al., 1989), του μοντέλου SNOW-17 routine of the National Weather Service River Forecast System (NWSRFS) Snow Accumulation and Ablation Model (Anderson, 1973), και του WGEN (synthetic weather generator) (Richardson and Wright, 1984).

Η πρώτη έκδοση του μοντέλου HELP (Schroeder et al., 1984a and 1984b) αποτέλεσε μια σημαντική πρόοδο από το πρόγραμμα HSSWDS (Perrier and Gibson, 1980; Schroeder and Gibson, 1982), το οποίο επίσης αναπτύχθηκε από τη WES. Το μοντέλο HSSWDS προσομοιώνει μόνο το σύστημα επικάλυψης και όχι τη πλευρική ροή μέσω των στρωμάτων αποστράγγισης ενώ χειρίζεται τη κάθετη αποστράγγιση μόνο με έναν στοιχειώδη τρόπο. Οι τρόποι υπολογισμού της διήθησης και της εξατμισοδιαπνοής είναι σχεδόν πανομοιότυποι με αυτούς που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems model), το οποίο αναπτύχθηκε από τον Knisel (1980) για το Υπουργείο Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών (USDA). Οι τρόποι υπολογισμού της απορροής και της διήθησης στηρίχθηκαν σε μεγάλο βαθμό στο τμήμα Υδρολογίας του Εθνικού Τεχνολογικού Εγχειριδίου (USDA, Soil Conservation Service, 1985). Η έκδοση 1 του

μοντέλου HELP ενσωμάτωσε ένα μοντέλο πλάγιας υπόγειας αποστράγγισης και βελτίωσε τα μοντέλα ακόρεστης διαρροής και της διαρροής από τα επενδυτικά στρώματα στο μοντέλο HSSWDS. Επιπλέον, το μοντέλο HELP παρείχε τη προσομοίωση του συνόλου του χώρου της υγειονομικής ταφής συμπεριλαμβανομένου του συστήματος συλλογής στραγγισμάτων και των επενδυτικών συστημάτων.

Η έκδοση 1 του προγράμματος HELP δοκιμάστηκε εκτενώς χρησιμοποιώντας τόσο δεδομένα της χωματερής όσο και εργαστηριακά δεδομένα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επίσης συγκρίθηκαν με τα δεδομένα 20 κυττάρων χώρων υγειονομικής ταφής επτά περιοχών (Schroeder and Peyton, 1987a). Η συνιστώσα της πλάγιας αποστράγγισης της έκδοσης 1 του μοντέλου συγκρίθηκε με τα πειραματικά αποτελέσματα δυο μεγάλης κλίμακας φυσικών μοντέλων συστημάτων επένδυσης/ αποστράγγισης των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (Schroeder and Peyton, 1987b). Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης αποτέλεσαν τα κίνητρα για κάποιες από τις βελτιώσεις που ενσωματώθηκαν στην έκδοση 2 του μοντέλου HELP.

Η έκδοση 2 (Schroeder et al., 1988a and 1988b) παρουσίασε μεγάλη βελτίωση στις δυνατότητες του μοντέλου HELP. Το WGEN (synthetic weather generator) που αναπτύχθηκε από την USDA Υπηρεσία Γεωργικής Έρευνας (ARS) (Richardson and Wright, 1984) προστέθηκε στο μοντέλο για να παράγει ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό αντικατέστησε τη χρήση των τιμών της κανονικής μέσης θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας και βελτίωσε τη μοντελοποίηση του χιονιού και της εξατμισοδιαπνοής. Επίσης, ένα μοντέλο φυτικής ανάπτυξης του μοντέλου Προσομοίωσης Υδατικών Πόρων στις Αγροτικές Λεκάνες (SWRRB) αναπτύχθηκε από το ARS (Arnold et al., 1989), και προστέθηκε στο μοντέλο HELP για να υπολογίζει τους δείκτες ημερήσιας φυλλικής επιφάνειας. Η μοντελοποίηση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας και ροής και οι υπολογισμοί της πλευρικής αποστράγγισης βελτιώθηκαν επίσης. Η προεπιλογή των εδαφικών δεδομένων βελτιώθηκε, και το μοντέλο επέτρεψε τη χρήση περισσότερων στρώσεων απορριμμάτων και της περιεχόμενης υγρασίας του εδάφους.

Στην έκδοση 3, το μοντέλο HELP έχει ενισχυθεί σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με την έκδοση 2. Ο αριθμός των στρώσεων των απορριμμάτων που μπορούν να μοντελοποιηθούν έχει αυξηθεί. Η λίστα προεπιλογής των χαρακτηριστικών του εδάφους/ υλικών έχει επεκταθεί έτσι ώστε να περιέχει επιπλέον υλικό αποβλήτων, γεωμεμβρανών, γεωσυνθετικών δικτύων αποχέτευσης και σύνθετων εδαφών. Το μοντέλο επίσης επιτρέπει τη χρήση εδαφών που έχουν συσταθεί από τον χρήστη. Έχουν επίσης προστεθεί υπολογισμοί της ανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων και της υπόγειας αποστράγγισης μέσα στη χωματερή. Επιπλέον, η έκδοση 3 του

μοντέλου HELP υπολογίζει τη διαρροή των στραγγισμάτων μέσα από τις γεωμεμβράνες λόγω κατασκευαστικών ελαττωμάτων (τρυπούλες) και ελαττωμάτων εγκατάστασης (παρακεντήσεις, σχισμές και ρωγμές) και από τη διάχυση των ατμών μέσα από τις επενδυτικές στρώσεις που βασίζεται στις εξισώσεις που καταρτίστηκαν από τον Giroud et al. (1989, 1992). Η εκτίμηση της απορροής από την επιφάνεια της χωματερής έχει βελτιωθεί ώστε να καλύπτει μεγαλύτερη επιφάνεια του χώρου υγειονομικής ταφής συμπεριλαμβανομένων και της απορροής από τις πλευρές του κυττάρου. Το μοντέλο για το λιώσιμο του χιονιού έχει αντικατασταθεί με ένα μοντέλο βασισμένο στην ενέργεια. Το δυναμικό μοντέλο Priestly-Taylor για την εξατμισοδιαπνοή έχει αντικατασταθεί από τη μέθοδο Penman, ενσωματώνοντας τις επιπτώσεις του ανέμου και της υγρασίας καθώς τα κύματα μεγάλης ακτινοβολίας χάνονται (απώλειες θερμότητας τη νύχτα). Ένα μοντέλο παγωμένου εδάφους έχει προστεθεί για να βελτιώσει τη διήθηση και για τη πρόβλεψη της απορροής στις ψυχρές περιοχές. Το μοντέλο ακόρεστης κάθετης αποστράγγισης έχει επίσης βελτιωθεί βοηθώντας στους υπολογισμούς αποθήκευσης. Τέλος, η εισαγωγή και η επεξεργασία των δεδομένων έχουν απλοποιηθεί διαδραστικά.

1.2.2. Δεδομένα εισόδου

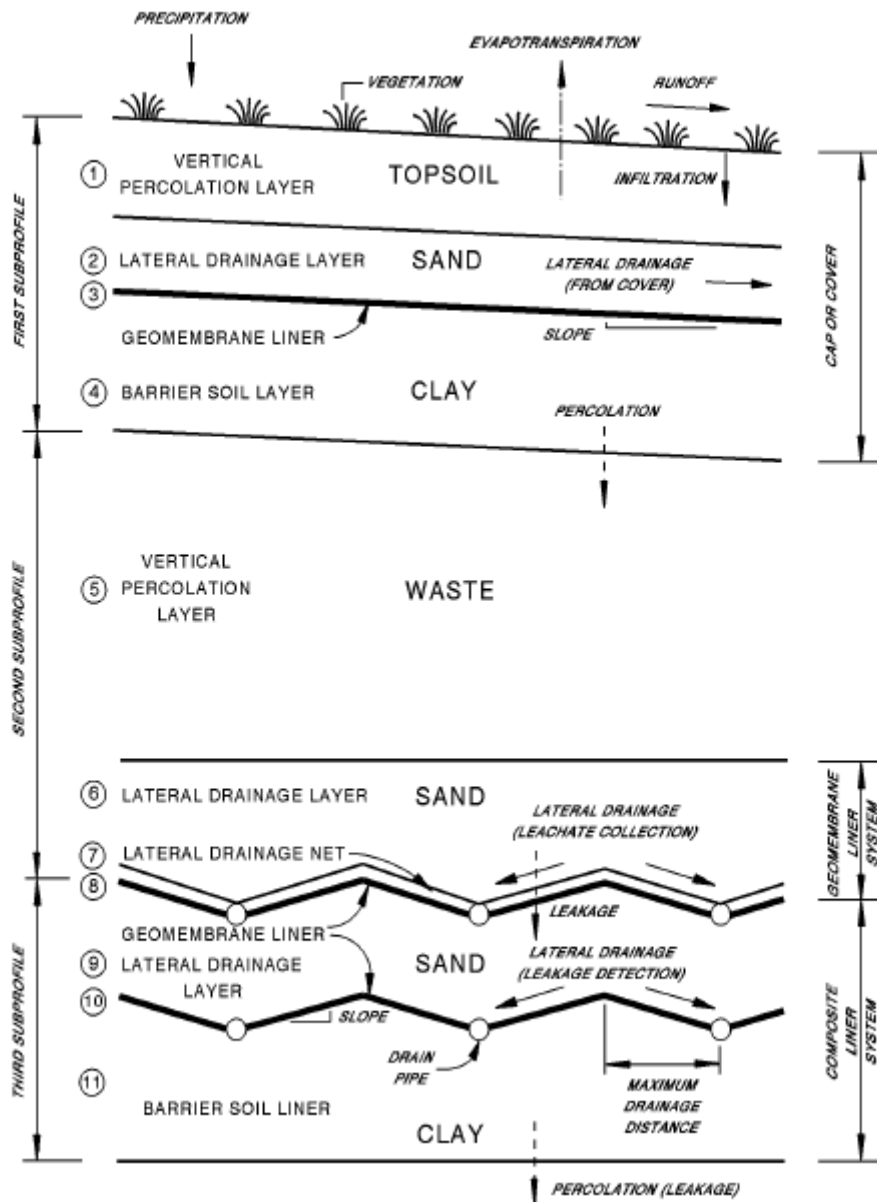
Το μοντέλο HELP απαιτεί ημερήσια κλιματολογικά δεδομένα, εδαφικά χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές του σχεδιασμού για την εκτέλεση της ανάλυσης. Τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης μπορούν να εισαχθούν από τον χρήστη, να παραχθούν στοχαστικά, ή να παρθούν από τη βάση δεδομένων του προγράμματος. Το μοντέλο περιέχει παραμέτρους για να παράγει σύνθετη βροχόπτωση για 139 πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών. Η ιστορική βάση δεδομένων περιέχει επίσης 5 χρόνια ημερήσιων δεδομένων βροχόπτωσης για 102 πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών. Τα δεδομένα ημερήσιας θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας παράγονται στοχαστικά ή εισάγονται από τον χρήστη. Τα απαραίτητα εδαφικά δεδομένα περιλαμβάνουν το πορώδες, την υδατοϊκανότητα, το σημείο κορεσμού, τη κορεσμένη υδραυλική ικανότητα και τη μέθοδο CN της καμπύλης απορροής (SCS). Το μοντέλο περιέχει προεπιλεγμένα χαρακτηριστικά για 42 τύπους εδαφών για χρήση όταν οι μετρήσεις ή οι ειδικές για τον χώρο εκτιμήσεις δεν είναι διαθέσιμες. Οι κατασκευαστικοί παράμετροι περιλαμβάνουν στοιχεία για τη κλίση και τη μέγιστη απόσταση αποστράγγισης των κάθετων στρώσεων αποστράγγισης, το πάχος της κάθε στρώσης, τη διαδικασία επανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων, τα χαρακτηριστικά κάλυψης της επιφάνειας της χωματερής και πληροφορίες σχετικά με τις γεωμεμβράνες.

Η εικόνα 1 είναι ένα χαρακτηριστικό σχέδιο για ένα χαρακτηριστικό προφίλ χώρου υγειονομικής ταφής επικίνδυνων απορριμμάτων. Τα πάνω μέρος του προφίλ

(στρώσεις 1-4) είναι το καπάκι ή αλλιώς κάλυμμα. Το κάτω τμήμα του χώρου υγειονομικής ταφής είναι ένα διπλό επενδυτικό σύστημα (στρώσεις 6-11), σε αυτή τη περίπτωση αποτελείται από γεωμεμβράνη και από μια σύνθετη επένδυση. Αμέσως πάνω από τον πυθμένα της σύνθετης επένδυσης βρίσκεται ένα σύστημα συλλογής στραγγισμάτων το οποίο συλλέγει τα στραγγίσματα από τη προηγούμενη στρώση, σε αυτή τη περίπτωση, από τη γεωμεμβράνη. Πάνω από το αρχικό επενδυτικό στρώμα υπάρχει ένα γεωσυνθετικό δίκτυ αποστράγγισης και ένα στρώμα άμμου τα οποία χρησιμεύουν ως στρώματα αποστράγγισης για τη συλλογή στραγγισμάτων. Τα στρώματα αποστράγγισης που αποτελούνται από άμμο έχουν τουλάχιστον 1 ft πάχος και έχουν κατάλληλα κατανομημένες διάτρητες σωλήνες ή ανοιχτές σωλήνες αποστράγγισης ενσωματωμένες κάτω από την επιφάνεια της μεμβράνης. Το στρώμα συλλογής των στραγγισμάτων χρησιμεύει στη συλλογή των στραγγισμάτων που μπορεί να διηθηθούν μέσω του στρώματος των απορριμμάτων. Σε αυτή τη περίπτωση, όπου η επένδυση είναι μόνο η γεωμεμβράνη, ένα αποστραγγιστικό δίκτυ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποστραγγίζει γρήγορα τα στραγγίσματα από το επενδυτικό στρώμα, αποφεύγοντας τη σημαντική συσσώρευση και μειώνοντας τα στραγγίσματα. Τα επενδυτικά στρώματα τοποθετούνται με κλίση για να προλάβουν τη λίμναση των στραγγισμάτων και για να βοηθούν τη ροή αυτών προς το σύστημα αποχέτευσης. Το πλεονέκτημα του δικτυού είναι πως μόνο πολύ μικρές ποσότητες στραγγίσματος μπορεί να διαρρεύσουν μέσω του αρχικού επενδυτικού στρώματος και ουσιαστικά δεν υφίσταται μετακίνηση των στραγγισμάτων από το τελευταίο σύνθετο στρώμα προς τους φυσικούς σχηματισμούς που ακολουθούν. Στο σύνολό τους, οι στρώσεις αποστράγγισης, οι γεωμεμβράνες και το έδαφος που λειτουργεί ως φράγμα μπορούν να αναφέρονται σαν ένα σύστημα συλλογής στραγγισμάτων και ως σύστημα απομάκρυνσης (drain/liner system) και ειδικότερα ως ένα διπλό σύστημα επενδυτικών στρώσεων.

Το σχέδιο 1 δείχνει 11 στρώσεις- οι τέσσερις αποτελούν το κάλυμμα ή καπάκι, η μια αποτελεί τη στρώση των απορριμμάτων, οι τρεις το αρχικό σύστημα συλλογής στραγγισμάτων και το σύστημα απομάκρυνσης και τρεις το δευτερεύον σύστημα αποστράγγισης και απομάκρυνσης. Αυτές οι 11 στρώσεις αποτελούνται από 3 υπόγεια προφίλ ή μονάδες μοντελοποίησης. Ένα υπόγειο προφίλ αποτελείται από όλα τα στρώματα μεταξύ (και συμπεριλαμβανομένου) της επιφάνειας του χώρου της υγειονομικής ταφής και του κάτω τμήματος του πάνω επενδυτικού στρώματος, μεταξύ του κάτω μέρους ενός επενδυτικού στρώματος και του κάτω μέρους του επόμενου επενδυτικού στρώματος, ή μεταξύ του κάτω μέρους της χαμηλότερης επενδυτικής στρώσης και του κάτω μέρους της στρώσης εδάφους. Στο σχήμα, το πάνω υπόγειο προφίλ περιλαμβάνει τα στρώματα κάλυψης, το μεσαίο υπόγειο προφίλ περιλαμβάνει τα απόβλητα, το σύστημα αποστράγγισης και το επενδυτικό σύστημα για τη συλλογή των στραγγισμάτων και το τελευταίο υπόγειο προφίλ

περιλαμβάνει το σύστημα αποστράγγισης και το επενδυτικό σύστημα για την ανίχνευση των διαρροών. Έξι υπόγεια προφίλ μιας υγειονομικής ταφής απορριμμάτων μπορούν να προσομοιωθούν σε ένα μοντέλο.



Εικόνα 4. Σχηματική αναπαράσταση του υπόγειου προφίλ ενός Χώρου Υγειονομικής Ταφής επικίνδυνων Απορριμμάτων

(THE HYDROLOGIC EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE (HELP) MODEL, Waste Minimization, Destruction and Disposal Research Division, Risk Reduction Engineerin, Cincinnati, Ohio)

Τα στρώματα στον χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων ορίζονται από την υδραυλική δραστηριότητα που αντιπροσωπεύουν. Τέσσερις τύποι στρώσεων είναι διαθέσιμες: τα κάθετα στρώματα διήθησης, τα πλευρικά στρώματα αποστράγγισης, τα στρώματα εδάφους που λειτουργούν ως φράγμα και οι στρώσεις γεωμεμβρανών. Αυτοί οι τύποι στρώματων φαίνονται στην εικόνα 3.1.

Το πάνω έδαφος και το στρώμα των απορριμμάτων είναι γενικά στρώματα κάθετης διήθησης. Τα στρώματα άμμου πάνω από τα επενδυτικά στρώματα αποτελούν συνήθως τα στρώματα πλάγιας αποστράγγισης, τα συμπιεσμένα στρώματα αργίλου αποτελούν τυπικά τα στρώματα εδαφικών φραγμάτων. Οι γεωμεμβράνες αποτελούν τις στρώσεις γεωμεμβρανών. Τα σύνθετα επενδυτικά στρώματα μοντελοποιούνται σαν δυο στρώματα. Τα γεωφάσματα δε θεωρούνται σα στρώματα εκτός εάν επιτελούν μια μοναδική υδραυλική λειτουργία.

Η ροή σε ένα στρώμα κάθετης διήθησης (π.χ. στρώματα 1 και 5 του σχήματος 1) γίνεται είτε προς τα κάτω, λόγω βαρύτητας ή εκχειλίζεται λόγω εξατμισοδιαπνοής. Η ακόρεστη κάθετη αποστράγγιση θεωρείται ότι γίνεται λόγω της βαρύτητας κάθε φορά που η υγρασία του εδάφους είναι μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα του εδάφους (μεγαλύτερη από το σημείο μάρανσης για τα εδάφη στη ζώνη εξάτμισης) ή όταν η αναρρόφηση του εδάφους πάνω από το στρώμα κάθετης διήθησης είναι μεγαλύτερη από την αναρρόφηση του εδάφους στο ίδιο στρώμα. Το ποσοστό της αποστράγγισης λόγω βαρύτητας (διήθηση) θεωρείται ότι είναι μια λειτουργία της αποθηκευμένης υγρασίας του εδάφους και είναι ανεξάρτητο από τις συνθήκες που επικρατούν σε γειτονικές στρώσεις. Το ποσοστό μπορεί να περιορισθεί όταν η κάτω στρώση είναι κορεσμένη και αποστραγγίζεται με πιο αργό ρυθμό από τη στρώση κάθετης διήθησης. Οι στρώσεις των οποίων η αρχική υδραυλική λειτουργία παρέχει την αποθήκευση της υγρασίας και τη συγκράτηση της αποστράγγισης, θα πρέπει κανονικά να ορισθούν ως στρώματα κάθετης διήθησης. Οι στρώσεις απορριμμάτων και οι στρώσεις που σχεδιάζονται για να υποστηρίξουν τη βλάστηση πρέπει να σχεδιάζονται ως στρώσεις κάθετης διήθησης, εκτός εάν οι στρώσεις διασφαλίζουν τη πλευρική αποστράγγιση σε συστήματα συλλογής.

Οι στρώσεις πλάγιας αποστράγγισης (π.χ. στρώσεις 2,6,7 και 9 του σχήματος 1) είναι στρώσεις που προωθούν τη πλευρική αποστράγγιση σε συστήματα συλλογής μέσα ή κάτω από την επιφάνεια των επενδυτικών στρώσεων. Η κάθετη αποστράγγιση μέσα σε μια στρώση πλάγιας αποστράγγισης μοντελοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως και στη στρώση κάθετης διήθησης, αλλά επιτρέπεται η κορεσμένη πλάγια αποστράγγιση. Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα μιας στρώσης πλάγιας αποστράγγισης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από $1 \cdot 10^{-3}$ cm/sec για οποιαδήποτε σημαντική πλάγια αποστράγγιση που μπορεί να συμβεί. Η κλίση του πυθμένα του στρώματος μπορεί να ποικίλει από 0 μέχρι 40%.

Τα στρώματα εδάφους που λειτουργούν ως φράγματα (π.χ. στρώματα 4 και 11 του σχήματος 1) προορίζονται για να περιορίσουν τη κάθετη ροή. Αυτά τα στρώματα πρέπει να έχουν υδραυλική αγωγιμότητα σημαντικά χαμηλότερη από αυτή των άλλων τύπων στρώσεων, τυπικά χαμηλότερη από $1 \cdot 10^{-6}$ cm/sec. Το πρόγραμμα επιτρέπει καθοδική ροή στα στρώματα του εδάφους που λειτουργούν ως φράγματα. Έτσι, κάθε κίνηση του νερού μέσα σε αυτή τη στρώση, τελικά θα διηθείται μέσα σε αυτό. Το ποσοστό της διήθησης του στραγγίσματος εξαρτάται από το βάθος του κορεσμένου με νερό εδάφους που βρίσκεται πάνω από τη βάση του στρώματος, το πάχος του στρώματος και τη κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος εδάφους που λειτουργεί ως φράγμα. Η διαρροή λαμβάνει χώρα κάθε φορά που η περιεχόμενη υγρασία της στρώσης πάνω από το επενδυτικό στρώμα είναι μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα του εδάφους σε αυτή τη στρώση. Το πρόγραμμα υποθέτει ότι το στρώμα εδάφους που λειτουργεί ως φράγμα είναι μόνιμα κορεσμένο και οι ιδιότητές του δεν αλλάζουν με τη πάροδο του χρόνου.

Οι στρώσεις γεωμεμβρανών (π.χ. στρώσεις 3,8 και 10 του σχήματος 1) είναι στρώματα σχεδόν αδιάβροχου υλικού, το οποίο περιορίζει σημαντικά τη διαρροή σε μικρές περιοχές γύρω από τα ελαττωματικά σημεία. Η διήθηση των στραγγισμάτων υπολογίζεται ότι είναι αποτέλεσμα τριών πηγών: διάχυσης ατμών, ελαττωματικής κατασκευής (τρυπούλες) και ελαττωματικής εγκατάστασης (παρακεντήσεις, σπασίματα, σχισμές, κακές ραφές). Η διαρροή από τη διάχυση ατμών υπολογίζεται ότι συμβαίνει σε ολόκληρη τη περιοχή των επενδυτικών στρωμάτων ως μια λειτουργία της επιφάνειας του στρώματος, του πάχους της γεωμεμβράνης και της διάχυσης των ατμών. Η διαρροή μέσω των τρυπών και των ελαττωμάτων εγκατάστασης υπολογίζεται σε 2 βήματα. Αρχικά, η περιοχή του εδάφους ή του υλικού που συμβάλλουν στη παραγωγή στραγγισμάτων υπολογίζεται ως μια λειτουργία του επενδυτικού στρώματος, του μεγέθους της τρύπας και της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους ή του υλικού που γειτνιάζει με τη γεωμεμβράνη. Δευτερευόντως, το ποσοστό της διαρροής στη βρεγμένη επιφάνεια υπολογίζεται ως μια λειτουργία του πάνω μέρους και του πάχους του εδάφους και της μεμβράνης και της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους ή των υλικών που γειτνιάζουν με τη γεωμεμβράνη.

1.2.3. Δημιουργία δεδομένων και προεπιλεγμένες τιμές

Το μοντέλο HELP απαιτεί γενικά κλιματικά δεδομένα για να υπολογίζει τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή και ημερήσια κλιματολογικά δεδομένα, χαρακτηριστικά του εδάφους και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά για την εκτέλεση της ανάλυσης. Τα απαιτούμενα γενικά κλιματικά στοιχεία περιλαμβάνουν τη περίοδο φυτικής ανάπτυξης, τη μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου, τη μέση τριμηνιαία σχετική υγρασία, τις κανονικές μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες, το δείκτη μέγιστης φυλλικής

επιφάνειας, το βάθος και το πλάτος της ζώνης εξάτμισης. Οι προεπιλεγμένες τιμές για αυτές τις παραμέτρους έχουν συνταχθεί ή αναπτυχθεί από το «Κλίμα των Κρατών» (Ruffner, 1985) και από τον «Κλιματικό Άτλαντα των Ηνωμένων Πολιτειών» (National Oceanic and Atmospheric Administration, 1974) για 183 πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών. Οι απαιτήσεις σε ημερήσια κλιματολογικά δεδομένα (καιρός) περιλαμβάνουν τη βροχόπτωση, τη μέση θερμοκρασία και τη συνολική ηλιακή ακτινοβολία. Τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης μπορούν να εισαχθούν από τον χρήστη, να δημιουργηθούν στοχαστικά ή να ληφθούν από την ιστορική βάση δεδομένων του προγράμματος. Τα δεδομένα ημερήσιας θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας δημιουργούνται στοχαστικά ή μπορεί να εισαχθούν από τον χρήστη.

Τα απαραίτητα εδαφικά δεδομένα περιλαμβάνουν το πορώδες, τη χωρητικότητα του εδάφους, το σημείο μάρανσης, τη κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα, την αρχική αποθηκευμένη υγρασία και τον αριθμό της καμπύλης απορροής του Εδάφους της Υπηρεσίας Συντήρησης (SCS) για τη προγενέστερη υγρασία στη κατάσταση II. Το μοντέλο περιέχει προεπιλεγμένα εδαφικά χαρακτηριστικά για 42 τύπους υλικών για χρήση όταν οι μετρήσεις ή οι εκτιμήσεις στον χώρο υγειονομικής ταφής δεν είναι διαθέσιμες. Το πορώδες, η χωρητικότητα του εδάφους, το σημείο μάρανσης και η υδραυλική αγωγιμότητα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του συντελεστή εξάτμισης του εδαφικού νερού και για τις παραμέτρους διατήρησης της εδαφικής υγρασίας των Brooks-Corey. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού περιλαμβάνουν στοιχεία, όπως είναι η κλίση και η μέγιστη απόσταση αποστράγγισης για τα στρώματα πλευρικής αποστράγγισης, το πάχος του κάθε στρώματος, τη περιγραφή του κάθε στρώματος, τη περιοχή, τη διαδικασία επανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων, τις υπόγειες εισροές, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και τα χαρακτηριστικά των γεωμεμβρανών.

1.2.3.1. Γεννήτρια κλιματικών δεδομένων

Το πρόγραμμα HELP ενσωματώνει έναν τρόπο δημιουργίας ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης, μέσης θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή η διαδικασία αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Γεωργικής Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών (USDA) (Richardson and Wright, 1984) βασισμένη σε μια διαδικασία που περιγράφεται από τον Richardson (1981). Ο χρήστης του μοντέλου HELP έχει την επιλογή να δημιουργήσει δεδομένα συνθετικής ημερήσιας βροχόπτωσης και να μη χρησιμοποιήσει τα προεπιλεγμένα από τη βάση δεδομένων του μοντέλου δεδομένα. Ομοίως ο χρήστης έχει την επιλογή να δημιουργήσει συνθετικά δεδομένα για τη μέση ημερήσια θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία και να μη χρησιμοποιήσει τα δεδομένα της βάσης δεδομένων. Η παραγωγική αυτή διαδικασία έχει σχεδιαστεί για να διατηρεί την εξάρτηση από τον χρόνο, τη

συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών και των εποχικών χαρακτηριστικών σε πραγματικά δεδομένα καιρού σε συγκεκριμένη τοποθεσία. Οι συντελεστές για τη παραγωγή καιρού είναι διαθέσιμοι για πάνω από 183 πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών. Για οποιαδήποτε πόλη που δεν υπάρχει μέσα στη βάση δεδομένων του προγράμματος, τα δεδομένα εισάγονται από τον χρήστη.

1.2.3.2. Διατήρηση υγρασίας και παράμετροι υδραυλικής αγωγιμότητας

Το πρόγραμμα HELP απαιτεί τιμές για το συνολικό πορώδες, τη χωρητικότητα του εδάφους, το σημείο μάρανσης και τη κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα για κάθε στρώση που δεν αποτελεί επενδυτικό στρώμα. Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα απαιτείται για όλες τις επενδύσεις. Οι τιμές για αυτές τις παραμέτρους μπορούν να καθορισθούν από τον χρήστη ή να επιλεγούν από μια λίστα προεπιλεγμένων τιμών που παρέχεται από το πρόγραμμα HELP. Οι τιμές χρησιμοποιούνται για να υπολογισθεί η αποθηκευμένη υγρασία, η ακόρεστη κάθετη αποστράγγιση, η κορυφή της επένδυσης και η εξάτμιση του εδαφικού νερού.

1.2.3.3. Παράμετροι διατήρησης της υγρασίας

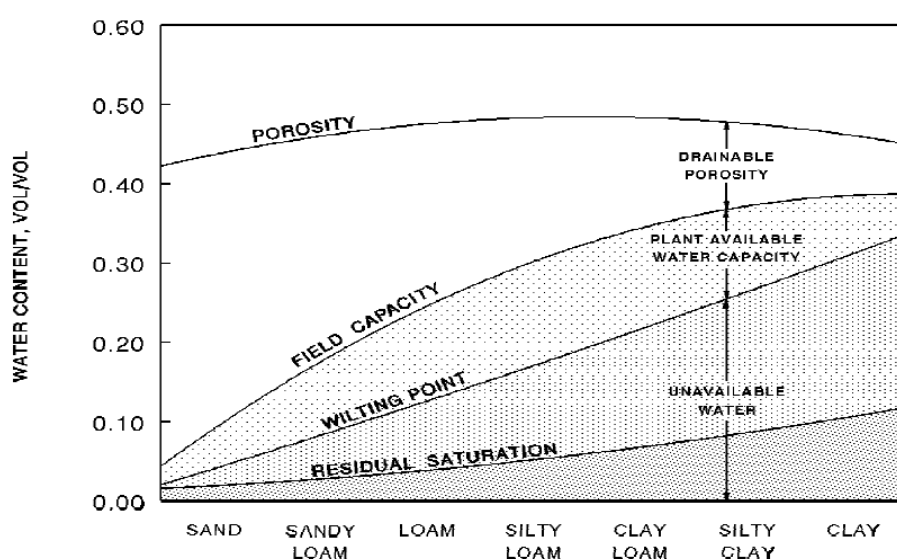
Η διατήρηση της σχετικής υγρασίας ή της αποθηκευμένης υγρασίας που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα HELP διαφέρει από το περιεχόμενο νερό που χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς. Το αποθηκευμένο εδαφικό νερό που χρησιμοποιείται από το μοντέλο HELP είναι σε μονάδες όγκου (q), όγκος νερού (V_w) στο σύνολο (έδαφος, νερό, αέρας) προς τον όγκο εδάφους ($V_t = V_s + V_w + V_a$), μέτρηση η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στη γεωπονία και τη φυσική. Οι μηχανικοί πιο συχνά εκφράζουν τη περιεκτικότητα σε υγρασία σε μονάδες μάζας, μάζα νερού (M_w) προς μάζα εδάφους (M_s). Και τα δυο μπορεί να σχετίζονται μεταξύ τους γνωρίζοντας τη ξηρά φαινομενική πυκνότητα (r_{db}) και τη πυκνότητα του νερού (r_w), το ξηρό ειδικό βάρος του εδάφους (G_{db}) (αναλογία της ξηράς φαινομενικής πυκνότητας με τη πυκνότητα του νερού), ($q = w * G_{db}$), ή την υγρή φαινομενική πυκνότητα (r_{wb}), το υγρό ειδικό βάρος του εδάφους (G_{wb}) (αναλογία της υγρής φαινομενικής πυκνότητας με τη πυκνότητα του νερού), ($q = [w * G_{db}] / [1 + w]$).

Το συνολικό πορώδες είναι μια αποτελεσματική τιμή, η οποία ορίζεται ως ο όγκος του νερού που περιέχεται (όγκος νερού προς συνολικό όγκο) όταν οι πόροι που συμβάλλουν στην αλλαγή της αποθήκευσης της υγρασίας είναι σε κορεσμό. Το συνολικό πορώδες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τον όγκο των κενών ενεργών πόρων που βρίσκονται στο έδαφος ή στα στρώματα των απορριμμάτων. Η χωρητικότητα του πεδίου είναι η ογκομετρική περιεκτικότητα νερού στο έδαφος με ικανότητα προσρόφησης 0,33 bars ή η παραμονή μετά από

μια παρατεταμένη περίοδο αποστράγγισης λόγω βαρύτητας χωρίς πρόσθετη παροχή νερού. Το σημείο μάρανσης είναι η ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό υπό πίεση 15 bars ή η χαμηλότερη ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό που μπορεί να επιτευχθεί από τη διαπνοή των φυτών. Αυτές οι παράμετροι διατήρησης της υγρασίας χρησιμοποιούνται για να προσδιορισθεί η αποθηκευμένη υγρασία και η σχετική ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα.

Το πρόγραμμα HELP απαιτεί το σημείο μάρανσης να είναι μεγαλύτερο του μηδενός αλλά λιγότερο από τη χωρητικότητα του εδάφους. Η χωρητικότητα του εδάφους πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το σημείο μάρανσης και μικρότερη από το πορώδες. Το ολικό πορώδες πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τη χωρητικότητα του εδάφους αλλά μικρότερο από ένα. Η γενική σχέση μεταξύ των παραμέτρων διατήρησης της υγρασίας και της υφής του εδάφους φαίνονται στο σχήμα 2.

Ο χρήστης του μοντέλου HELP μπορεί να καθορίσει το αρχικό περιεχόμενο του όγκου του νερού όλων των στρώσεων εκτός των επενδύσεων. Οι εδαφικές επενδύσεις αναμένεται να παραμείνουν κορεσμένες σε όλες τις χρονικές περιόδους.



Εικόνα 5. Σχέση μεταξύ των παραμέτρων διατήρησης της υγρασίας και των διαφόρων ειδών εδάφους

(THE HYDROLOGIC EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE (HELP) MODEL, Waste Minimization, Destruction and Disposal Research Division, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio)

Εάν η αρχική περιεκτικότητα σε νερό δεν καθορίζεται, το πρόγραμμα υποθέτει τιμές κοντά στις τιμές της σταθερής κατάστασης (μη επιτρέποντας τη μακροχρόνια αλλαγή στην αποθήκευση υγρασίας) και τρέχει έναν χρόνο προσομοίωσης για την προετοιμασία της υγρασίας πιο κοντά στη σταθερή κατάσταση. Το περιεχόμενο του εδαφικού νερού στο τέλος του χρόνου αντικαθίσταται με τις αρχικές τιμές της περιόδου προσομοίωσης. Το πρόγραμμα τρέχει τη πλήρη προσομοίωση, ξεκινώντας ξανά από την αρχή του πρώτου χρόνου των δεδομένων. Τα αποτελέσματα του περιεχόμενου όγκου του νερού δεν αναφέρονται στη τελική αναφορά.

1.3. Υδραυλική αγωγιμότητα

Η σταθερά αναλογικότητας του Darcy που διέπει τη ροή σε ένα πορώδες μέσο είναι γνωστή ποσοτικά ως υδραυλική αγωγιμότητα ή συντελεστής διαπερατότητας ή ποιοτικά ως διαπερατότητα. Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μια λειτουργία των μέσων, όπως το μέγεθος των σωματιδίων, ο λόγος των κενών, η σύνθεση, ο βαθμός κορεσμού και το ιξώδες του υγρού που κινείται μέσα στο μέσο. Το πρόγραμμα HELP χρησιμοποιεί τη κορεσμένη και την ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους και της μάζας των απορριμμάτων για να υπολογίσει τη κάθετη αποστράγγιση, τη πλάγια αποστράγγιση και τη διήθηση των στρωμάτων εδάφους. Η διάχυση των ατμών στις γεωμεμβράνες καθορίζεται ως κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα για τον υπολογισμό της διαρροής μέσω των γεωμεμβρανών από τη διάχυση των ατμών.

Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη ροή διαμέσου ενός πορώδους μέσου όπου οι κενοί χώροι πληρώνονται με υγρό διαβροχής (π.χ. νερό). Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα κάθε στρώσης καθορίζεται από τα δεδομένα εισόδου.

Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη ροή διαμέσου μια στρώσης όταν οι κενοί χώροι πληρώνονται τόσο με υγρό διαβροχής όσο και με υγρό μη- διαβροχής (π.χ. νερό και αέρας). Το πρόγραμμα HELP υπολογίζει την ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα τόσο των στρώσεων εδάφους όσο και των στρώσεων των απορριμμάτων.

1.4. Συντελεστής εξάτμισης

Ο συντελεστής εξάτμισης δείχνει την ευκολία με την οποία το νερό μπορεί να αντληθεί προς τα πάνω από το έδαφος ή από το στρώμα των απορριμμάτων λόγω εξάτμισης. Χρησιμοποιώντας τα εργαστηριακά εδαφικά δεδομένα του Ritchie (1972), φάνηκε πως ο συντελεστής εξάτμισης (σε mm/day 0,5) μπορεί να σχετισθεί με την ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα σε τριχοειδή πίεση 0,1 bar. Το πρόγραμμα HELP χρησιμοποιεί την ακόλουθη εξίσωση του Ritchie για να υπολογίσει το συντελεστή εξάτμισης:

$$CON = \begin{cases} 3.30 & (K_u)_{0.1 \text{ bar}} \leq 0.05 \frac{cm}{day} \\ 2.44 + 17.19(K_u)_{0.1 \text{ bar}} & 0.05 \text{ cm/day} < (K_u)_{0.1 \text{ bar}} < 0.178 \text{ cm/day} \\ 5.50 & (K_u)_{0.1 \text{ bar}} \geq 0.178 \text{ cm/day} \end{cases}$$

Όπου,

CON = συντελεστής εξάτμισης mm/day^{0.5}

(K_u)_{0.1bar} = ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα σε πίεση 0,1 bar

τριχοειδής πίεση, cm/sec

Το πρόγραμμα HELP επιβάλλει ανώτατο και κατώτερο όριο στο συντελεστή εξάτμισης έτσι ώστε να μη προκύψει τριχοειδής ροή έξω από το εύρος του εδάφους που αναφέρει ο Knisel (1980). Εάν η υπολογισμένη τιμή του συντελεστή εξάτμισης είναι μικρότερη από 3,30 τότε εξισώνεται με 3,30 και εάν ο συντελεστής εξάτμισης είναι μεγαλύτερος από 5,50, τότε εξισώνεται με 5,50. Ο χρήστης δε μπορεί να εισάγει κάποια τιμή για τον δείκτη εξάτμισης.

1.5. Προεπιλεγμένα χαρακτηριστικά του εδάφους και των απορριμμάτων

Η συνολική πυκνότητα των στρώσεων εδάφους και των απορριμμάτων μπορεί να οριστεί ως η μάζα των στερεών και του νερού ανά μονάδα όγκου του συνόλου του εδάφους. Η συνολική πυκνότητα αυτών των στρώσεων εξαρτάται από τη πυκνότητα των στερεών σωματιδίων, του όγκου των κενών χώρων και του ποσοστού του νερού σε κάθε στρώση. Όπως προαναφέρθηκε, το συνολικό πορώδες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τον όγκο των κενών χώρων μέσα στη μάζα του εδάφους ή των απορριμμάτων. Ως εκ τούτου, το συνολικό πορώδες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη πυκνότητα του εδάφους και των στρώσεων των απορριμμάτων.

Η πυκνότητα των στρώσεων του εδάφους και των απορριμμάτων μπορεί να αυξηθεί από τη συμπίεση, το στατικό φορτίο, και/ή την αφυδάτωση του εδάφους και του στρώματος των απορριμμάτων. Η αφυδάτωση αυξάνει τη πυκνότητα αφαιρώντας το νερό από τους πόρους και/ή μειώνοντας τη πίεση των πόρων στις στρώσεις. Η αφυδάτωση μπορεί να επιτευχθεί από την εγκατάσταση οριζόντιων και/ή κάθετων αποχετεύσεων, χαντακιών, πηγαδιών και/ή με την εφαρμογή ηλεκτρικών ρευμάτων. Το πρόγραμμα HELP παρέχει προκαθορισμένες τιμές για το ολικό πορώδες, τη

χωρητικότητα του πεδίου, το σημείο μάρανσης και τη κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα των διαφόρων εδαφών και των υλικών των απορριμμάτων όπως επίσης και για υλικά γεωμεμβράνης. Οι προεπιλεγμένες τιμές για τα εδαφικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά των απορριμμάτων έχουν προκύψει από μελέτες και από πειραματικά δεδομένα. Διαφοροποιούνται όμως κάθε φορά ανάλογα με το υλικό. Η εφαρμογή λοιπόν των προεπιλεγμένων ιδιοτήτων του εδάφους θα πρέπει να περιορίζεται στον προγραμματισμό μελετών και δεν προορίζονται για να αντικαθιστούν το εργαστηριακό τμήμα και το τμήμα των προγραμματικών δοκιμών.

1.6. Προεπιλεγμένα εδαφικά χαρακτηριστικά

Παράλληλα, το πρόγραμμα HELP παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις τιμές προεπιλεγμένης κατακρατημένης εδαφικής υγρασίας για χαμηλά, μέσα και υψηλά εδαφικά στρώματα. Τα υψηλής πυκνότητας εδαφικά στρώματα περιγράφονται επίσης ως στρώματα εδάφους. Η εφαρμογή των προεπιλεγμένων ιδιοτήτων του εδάφους θα πρέπει να περιορίζονται στον προγραμματισμό μελετών και δεν προορίζονται για να αντικαθιστούν το εργαστηριακό τμήμα και το τμήμα των προγραμματικών δοκιμών.

Για τα χαμηλής πυκνότητας εδαφικά στρώματα, ο Rawls et al. (1982) ανέφερε τις μέσες τιμές για το ολικό πορώδες, το υπολειμματικό περιεχόμενο όγκο νερού, τη πίεση ανάδευσης και τον δείκτη μεγέθους των πόρων για το Υπουργείο Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών (USDA). Ο ίδιος ανέφερε επίσης τις τιμές κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε σημαντικό ασυμπίεστο είδος εδάφους του USDA. Αυτές οι τιμές προήλθαν από τα αποτελέσματα πολλών πειραμάτων και συγκρίθηκαν με παρόμοια δεδομένα. Τα προεπιλεγμένα χαρακτηριστικά για τη χονδρή και λεπτή άμμο αναπτύχθηκαν από τη παρεμβολή μεταξύ των δεδομένων Rawls.

Οι Freeze and Cherry (1979) ανέφεραν ότι το εύρος των τυπικών μη ενοποιημένων εδαφικών πορώδων κυμαίνονται από 0,40 μέχρι 0,70. Σύμφωνα με τον Rawl's τα εδαφικά πορώδη για την αμμώδη άργιλο, την ιλυώδη άργιλο και τον πηλό είναι 0,43, 0,48 και 0,47 αντίστοιχα. Όλα τα δεδομένα υπάρχουν σε πίνακες που έχει εκδώσει το Υπουργείο Γεωργίας Των Ηνωμένων Πολιτειών.

Αντίστοιχες τιμές για τα μεσαίας πυκνότητας εδαφικά στρώματα έχουν δημιουργηθεί βάση των τιμών για τα χαμηλής πυκνότητας εδαφικά στρώματα, με μια τυπική απόκλιση της τάξεως του 0,5, μειωμένες για τον συνολικό δείκτη κατανομής του συνολικού πορώδους και του μεγέθους των πόρων και αυξημένες για τη πίεση ανάδευσης και τον υπολειπόμενο κορεσμό. Οι τιμές αυτές

παρουσιάζονται σε πίνακα που δίνεται από το Υπουργείο Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών.

Τέλος, τα υψηλής πυκνότητας εδάφη παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα και χαμηλή κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα. Λόγω των γεωχημικών ιδιοτήτων της αργίλου και της χαμηλής κορεσμένης αγωγιμότητας, τα εδαφικά επενδυτικά στρώματα κατασκευάζονται από συμπιεσμένη άργιλο. Οι Elsbury et al. (1990) έδειξαν ότι η υδραυλική αγωγιμότητα των επενδυτικών στρωμάτων από άργιλο μπορεί να επηρεαστούν από τη λειτουργικότητα του εδάφους, τη διαβάθμιση και το δυναμικό πίεσης, την υπερκείμενη πίεση πάνω στην επενδυτική στρώση, το πάχος της στρώσης, τη σταθερότητα της στρώσης και το βαθμό συμπίεσης. Το πρόγραμμα HELP προσφέρει προεπιλεγμένες τιμές για τα επενδυτικά στρώματα από άργιλο με κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα $1 \cdot 10^{-7}$ και $1 \cdot 10^{-9}$ cm/sec. Όλες οι τιμές των ιδιοτήτων των επενδυτικών στρωμάτων από άργιλο, υπάρχουν σε πίνακες που δίνονται από το Υπουργείο Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών.

Αντίστοιχοι πίνακες υπάρχουν και για τις προεπιλεγμένες τιμές των χαρακτηριστικών του νερού καθώς και των απορριμμάτων, των γεωσυνθετικών υλικών, του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και των ζωνών εξατμισοδιαπνοής.

1.7. Χρήση βοηθητικών μοντέλων από το HELP

Το πρόγραμμα HELP προσομοιώνει τη καθημερινή κίνηση του νερού μέσα και έξω από έναν χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Γενικά, η υδρολογική διαδικασία μοντελοποιείται από ένα πρόγραμμα και μπορεί να διαχωριστεί σε δυο κατηγορίες: στις επιφανειακές διαδικασίες και στις υπόγειες διαδικασίες. Οι επιφανειακές διαδικασίες που μοντελοποιούνται είναι το λιώσιμο των χιονιών, η παρακολούθηση της βροχόπτωσης από τη βλάστηση, η επιφανειακή απορροή και η εξάτμιση του νερού. Οι υπόγειες διαδικασίες που μοντελοποιούνται είναι η εξάτμιση του νερού από το έδαφος, η διαπνοή των φυτών, η κάθετη ακόρεστη αποστράγγιση, το στράγγισμα από την επένδυση των γεωμεμβρανών, η διήθηση από την επένδυση εδάφους που λειτουργεί ως φράγμα και η πλευρική κορεσμένη αποστράγγιση. Τα μοντέλα φυτικής ανάπτυξης και παγωμένου εδάφους περιλαμβάνονται επίσης στο πρόγραμμα για να βοηθήσουν στις διαδικασίες μοντελοποίησης του νερού.

Η καθημερινή διήθηση στον χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων καθορίζεται έμμεσα από την ισορροπία του επιφανειακού νερού. Κάθε μέρα, η διήθηση θεωρείται ότι ισούται με το άθροισμα των βροχοπτώσεων και του λιωσίματος του χιονιού, μείον το άθροισμα της απορροής, της επιφανειακής αποθήκευσης και της επιφανειακής εξάτμισης. Δε συγκρατείται νερό στην επιφάνεια από τη μια ημέρα στην άλλη, εκτός αν υπάρχει κάλυψη χιονιού. Η υποκλοπή υπολογίζεται μόνο για τη

βροχόπτωση, όχι για την εκροή από τη χιονοκάλυψη. Το λιώσιμο του χιονιού και η βροχόπτωση που δεν μπορεί να διαφύγει ή να εξατμιστεί και υποτίθεται ότι διεισδύει στο εσωτερικό του χώρου της υγειονομικής ταφής. Η υπολογισμένη διείσδυση πάνω από την επιφάνεια και η ικανότητα αποστράγγισης του εδάφους δρομολογείται πίσω στην επιφάνεια και προστίθενται στην απορροή ή κρατούνται ως επιφανειακή αποθήκευση.

Οι πρώτες υπόγειες διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα είναι η εξάτμιση από το έδαφος και η διαπνοή των φυτών από τη ζώνη εξάτμισης του πρώτου υπόγειου τμήματος. Αυτά υπολογίζονται σε καθημερινή βάση.

Οι άλλες υπόγειες διαδικασίες δημιουργούν ένα προφίλ κάθε φορά, από πάνω προς τα κάτω, χρησιμοποιώντας ένα χρονικό βήμα που κυμαίνεται από 30 λεπτά μέχρι 6 ώρες. Η ακόρεστη κάθετη αποστράγγιση υπολογίζεται για κάθε τμήμα της μοντελοποίησης στη κορυφή του υπόγειου προφίλ, σε κάθε επενδυτικό σύστημα ή στο κάτω μέρος του υπόγειου προφίλ.

Το πρόγραμμα εκτελεί την ισορροπία νερού σε κάθε τμήμα για τον προσδιορισμό της αποθηκευτικής ικανότητας του νερού και την αποστράγγιση σε κάθε τμήμα, αντιπροσωπεύοντας τη διήθηση ή την αποστράγγιση από τα πάνω, την υπόγεια εισροή, την επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, τη περιεχόμενη υγρασία και τα χαρακτηριστικά των υλικών.

Ο υπολογισμός της απορροής γίνεται με τη βοήθεια της μεθόδου αριθμητικής καμπύλης SCS (Soil Conservation Service), η οποία βασίζεται σε ημερήσια ποσά βροχόπτωσης και χιονόπτωσης (USDA, Soil Conservation Service, 1985). Αυτή η διαδικασία επιλέχθηκε για τέσσερις λόγους: 1) είναι ευρέως αποδεκτή, 2) είναι υπολογιστικά αποδοτική, 3) τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου είναι γενικά διαθέσιμα και 4) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς τύπους εδαφών, χρήσεις γης και διαχειριστικές πρακτικές. Η διαδικασία SCS αναπτύχθηκε από δεδομένα βροχόπτωσης- απορροής για μεγάλες καταιγίδες σε μικρές λεκάνες απορροής. Το πρόγραμμα υποθέτει πως οι περιοχές που γειτνιάζουν με τον χώρο υγειονομικής ταφής δεν απορρέουν σε αυτόν. Η χρονική κατανομή της έντασης των βροχοπτώσεων δε λαμβάνεται υπόψη. Ως εκ τούτου, το πρόγραμμα δε μπορεί να δώσει ακριβείς εκτιμήσεις για τον όγκο της απορροής για τα επιμέρους επεισόδια βροχής σύμφωνα με τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης. Ωστόσο, επειδή η σχέση βροχής- απορροής στη SCS βασίζεται σε ευρύ πεδίο καθημερινών δεδομένων, οι μακροπρόθεσμες εκτιμήσεις της απορροής πρέπει να είναι λογικές. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή μοντελοποιείται βάση της μεθόδου Penman. Τα δεδομένα για τη βλάστηση δημιουργούνται από ένα φυτικής ανάπτυξης μοντέλο. Το πρόγραμμα HELP υποθέτει πως η ροή συμβαίνει, σύμφωνα με τον ν. Darcy, για τη κάθετη αποστράγγιση, μέσα από ένα ομοιογενές, ομοιόμορφο έδαφος και από το στρώμα των αποβλήτων (Darcy, 1856). Ως εκ τούτου, το πρόγραμμα έχει τη τάση να

υπερεκτιμά την αποθηκευμένη ποσότητα του νερού κατά τη διάρκεια του πρώτου μέρους της προσομοίωσης και τον χρόνο που απαιτείται για τη παραγωγή στραγγισμάτων. Οι επιπτώσεις αυτών των περιορισμών ελαχιστοποιούνται μέχρι το πρόγραμμα να αυξήσει την αποτελεσματική κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα και να μειώσει τη field capacity. Η διήθηση μέσω των εδαφικών στρωμάτων επένδυσης μοντελοποιείται από τον νόμο του Darcy, υποθέτοντας ότι από το κάτω μέρος της επενδυτικής στρώσης πραγματοποιείται ελεύθερη αποστράγγιση. Οι στρώσεις αποστράγγισης υποτίθεται ότι είναι πάντα κορεσμένες, αλλά τα στραγγίσματα παράγονται μόνο όταν η εδαφική υγρασία του υπερκείμενου στρώματος είναι μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα του εδάφους (field capacity).

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

Η υγειονομική ταφή απορριμμάτων, παρ' όλα τα περιβαλλοντικά προβλήματα που ενέχει, παραμένει μέχρι σήμερα μια από τις πιο κοινές μεθόδους για την επεξεργασία και τη διάθεση των αστικών στερεών απορριμμάτων παγκοσμίως. Με το πέρασμα των χρόνων έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες για τη βελτίωση των χώρων υγειονομικής ταφής και τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η πιο σημαντική από αυτές τις προσπάθειες είναι η συλλογή και η επεξεργασία των στραγγισμάτων που προκύπτουν από την αποσύνθεση των αποβλήτων.

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν διεξαχθεί προς αυτή τη κατεύθυνση, η σύσταση των αστικών στερεών αποβλήτων, και κατά συνέπεια η ποσότητα και η ποιότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων, διαφέρει από περιοχή σε περιοχή σύμφωνα με τους εκάστοτε κοινωνικοοικονομικούς και εποχικούς παράγοντες. Διαφοροποιήσεις στη σύσταση των απορριμμάτων μπορεί να εντοπιστούν ακόμα και στον ίδιο χώρο υγειονομικής ταφής. Ο Ragle et al. (1995) σύγκρινε τα στραγγίσματα από παλιά και νέα κύτταρα του ίδιου ΧΥΤΑ και εντόπισε σημαντικές διαφορές.

Οι περισσότερες από τις μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για τη κατανόηση της λειτουργίας ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, έχουν γίνει μέσω πιλοτικών εγκαταστάσεων σε πειραματικά λυσιμέτρα, ενώ λιγότερες είναι αυτές που έχουν πραγματοποιηθεί σε φυσική κλίμακα, λόγω των πρακτικών δυσκολιών που αντιμετωπίζονται. Επίσης, σε κάποιες μελέτες έχει γίνει προσπάθεια σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα των στραγγισμάτων που προκύπτουν από το σύστημα επεξεργασίας αυτών στον χώρο της υγειονομικής ταφής.

Η επίδραση διαφόρων τεχνικών, όπως η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων, ο τεμαχισμός των απορριμμάτων, κ.α., στην επιτάχυνση του βαθμού αποδόμησης των αποβλήτων, αποτέλεσε τα τελευταία χρόνια μια πρόκληση στη διαχείριση των αστικών απορριμμάτων, συνεπώς, πολλοί ήταν οι μελετητές εκείνοι που ασχολήθηκαν με αυτές τις μεθόδους ελαχιστοποίησης της διέλευσης των στραγγισμάτων στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και της ταχύτερης αποδόμησης των απορριμμάτων.

Ωστόσο, πολύ σημαντικό ρόλο στη κατανόηση λειτουργίας ενός ΧΥΤΑ αποτελεί η υδρολογική διαδικασία που λαμβάνει χώρα μέσα στη μάζα των απορριμμάτων καθώς και η διαδικασία αποδόμησης αυτών. Η ροή των στραγγισμάτων ελέγχεται από την υδρολογία του χώρου υγειονομικής ταφής και η σύσταση των στραγγισμάτων από τις βιολογικές και χημικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στη χωματερή. Κάποιες μελέτες βασισμένες σε λυσιμέτρα (Reitzel et al. 19991;

Johnson et al. 1999; Vadillo et al, 1999) δείχνουν πως η σύσταση των στραγγισμάτων μπορεί επίσης να επηρεάζεται από την υδρολογική διαδικασία.

Τέλος, πολλά είναι τα μοντέλα εκείνα που έχουν δημιουργηθεί για να εκτιμήσουν τη ροή των στραγγισμάτων. Ένα από τα πιο σημαντικά αφορά το μοντέλο Υδρολογικής Αξιολόγησης των Επιδόσεων των ΧΥΤΑ (HELP), το οποίο σχεδιάστηκε για να βοηθήσει στη βέλτιστη κατασκευή των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων για την αποφυγή διαρροών των στραγγισμάτων στον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα.

Στον ελλαδικό χώρο, σύμφωνα με την ΕΕΔΣΑ, το μεγαλύτερο μέρος των απορριμμάτων αποτελείται από ζυμώσιμα υλικά, με το δεύτερο ποσοστό να αποτελεί το χαρτί. Η μεγάλη περιεκτικότητα σε ζυμώσιμα υλικά εξηγεί τη μεγάλη αρχική περιεχόμενη υγρασία στα απορρίμματα, σε σχέση πάντα με τις αναφερόμενες στη βιβλιογραφία τιμές. Ακόμη, βάση των πιο πρόσφατων στοιχείων από την Ν.Υ.Μ.Ρ. η παραγωγή των στραγγισμάτων έφθασε το 2007 το 1,27 kg/κάτοικο και οι προβλέψεις για το 2020 δείχνουν αύξηση του ρυθμού παραγωγής.

Δυστυχώς, η ενημέρωση των πολιτών για τη δημιουργία, λειτουργία και συντήρηση ενός ΧΥΤΑ με βάση τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα τη συνεχή αντίδραση για τη κατασκευή καινούργιων χώρων υγειονομικής ταφής. Οι ήδη υπάρχοντες ΧΥΤΑ τείνουν να πληρωθούν συνεπώς αποτελεί επιτακτική ανάγκη η εξεύρεση καινούργιων τέτοιων χώρων. Η μετάβαση από τους ΧΥΤΑ στους ΧΥΤΥ (χώροι υγειονομικής ταφής υπολειμμάτων) και η αύξηση της ανακύκλωσης θα αποτελούσαν ένα πολύ σημαντικό βήμα στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τα απόβλητα, στον απαιτούμενο χώρο που απαιτείται καθώς και στην άμεση επανένταξη του χώρου στο φυσικό περιβάλλον.

Στόχος λοιπόν της συγκεκριμένης διατριβής είναι η εκτίμηση του ρυθμού αποδόμησης των ελληνικών απορριμμάτων, η ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση των παραγόμενων στραγγισμάτων και τέλος, η εκτέλεση του προγράμματος HELP για την εκτίμηση των επιδόσεων της χωματερής ως προς τη παραγωγή στραγγισμάτων.

Κεφάλαιο 5

Σύγκριση στραγγισμάτων από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων και των στραγγισμάτων που προέκυψαν από το πείραμα στο εργαστήριο

5.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων των στραγγισμάτων όπως αυτά μας δόθηκαν από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων προκειμένου να γίνει σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Ο στόχος των συγκρίσεων είναι η προσέγγιση των χημικών αναλύσεων από τον χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αποτελούν πολύ σημαντική παράμετρο διότι συμβάλλουν στην εκτίμηση των επιπτώσεων από την ενδεχόμενη διαρροή των στραγγισμάτων στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Επίσης, το κλείσιμο του χώρου και η επανένταξη του εξαρτώνται από τις μακροχρόνιες επιπτώσεις των στραγγισμάτων στο περιβάλλον.

5.2. Ιστορικό και περιγραφή της χωματερές

Ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων Άνω Λιοσίων χωροθετείται μέσα σε έκταση που παραχωρήθηκε από τον ΕΣΔΚΝΑ, βόρεια και σε άμεση γειτονία με τον παλιό χώρο διάθεσης απορριμμάτων (ΧΔΑ) Άνω Λιοσίων. Μέχρι το 1998, το μεγαλύτερο μέρος των απορριμμάτων που παράγονταν από τους κατοίκους της Αττικής κατέληγε στον ένα και μοναδικό χώρο ελεγχόμενης διάθεσης που υπήρχε στην Αττική, στη περιοχή των Άνω Λιοσίων. Δεδομένου όμως ότι ο χώρος αυτός πλησίαζε τη κατάσταση κορεσμού και το υπόλοιπο των απορριμμάτων που δεν διατίθετο σε αυτόν κατέληγε στις ανεξέλεγκτες χωματερές που ήταν διάσπαρτες στο Λεκανοπέδιο της Αττικής, ήταν αναγκαία η δημιουργία ενός Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων, που θα πληροί όλες τις απαιτούμενες ευρωπαϊκές προδιαγραφές.

Η κατασκευή του ΧΥΤΑ ξεκίνησε από το 1994, ενώ η έναρξη λειτουργίας του πρώτου τμήματος αυτού χρονολογείται το 1998. Στον χώρο λειτουργούν επίσης ένα εργοστάσιο Μηχανικής Ανακύκλωσης και κομποστοποίησης απορριμμάτων και ένας αποτεφρωτήρας μολυσματικών απορριμμάτων.

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των έργων υποδομής έγινε σύμφωνα με τις πλέον σύγχρονες προδιαγραφές, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις για ορθολογική ανάπτυξη και αποκατάσταση του χώρου, τις τοπικές συνθήκες επιφανειακής απορροής και προστασίας του υπεδάφους και των υπόγειων νερών, τις απαιτήσεις

για αποτελεσματική διαχείριση των στραγγισμάτων και του βιοαερίου, καθώς και τις απαιτήσεις για συνεχή περιβαλλοντική παρακολούθηση.

Η κατασκευή του έργου έγινε σύμφωνα με το Πρόγραμμα Ελέγχου Ποιότητας υλικών και εργασιών, στα πλαίσια του συστήματος ποιότητας κατά το πρότυπο ISO 9002 των ανάδοχων εταιρειών ΚΟΡΩΝΙΣ Α.Ε. και ENVITEC Α.Ε., υπό τον έλεγχο και επιθεώρηση του ΕΛΟΤ.

Ο ΧΥΤΑ έχει αναπτυχθεί στη μισγάγγεια του ρέματος «Στενό», βόρεια του υφιστάμενου Χώρου Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΔΑ) στα Άνω Λιόσια. Η έκταση του έργου δεν αποκαλύπτεται στη γύρω περιοχή στην οποία λαμβάνουν χώρα οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες. Η έκταση που καλύπτει ο ΧΥΤΑ Δυτικής Αττικής (τμήμα Ι) φθάνει τα 250 στρέμματα και έχει χωρητικότητα περίπου 10,000,000m³. Η συνολική έκταση του χώρου φθάνει τα 350 στρέμματα.



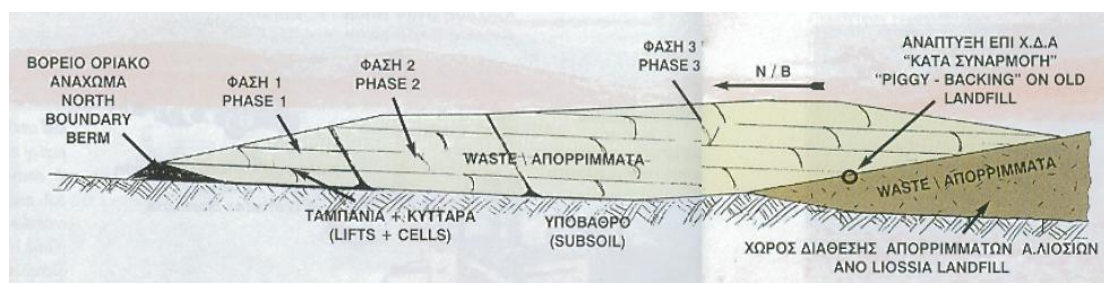
Εικόνα 6. Αεροφωτογραφία του ΧΥΤΑ Δυτικής Αττικής

Η υλοποίηση του έργου έγινε σταδιακά, σε τρεις φάσεις, εισάγοντας τμηματικά σε λειτουργία τα κύτταρα και θέτοντας ως στόχο την αποκατάσταση αυτών. Η πρώτη φάση ήταν αυτή της αρχικής κατασκευής και οργάνωσης. Κατά τη διάρκεια αυτής έγινε η κατασκευή των έργων υποδομής του πρώτου κυττάρου διάθεσης, των υπόλοιπων βοηθητικών έργων υποδομής και η εγκατάσταση του σχετικού

εξοπλισμού. Η δεύτερη φάση ήταν η φάση λειτουργίας, στην οποία γινόταν η διάθεση των απορριμμάτων, η εκτέλεση των εργασιών για την καθ' ύψος επέκταση των έργων υποστήριξης της λειτουργίας (αναχώματα, βιοαέριο), η προσωρινή κάλυψη των τελικών πρανών. Παράλληλα συνεχίζονται τα έργα διαμόρφωσης, στεγάνωσης κλπ του επόμενου κυττάρου. Η τρίτη και τελευταία φάση είναι η φάση της Τελικής Αποκατάστασης, στην οποία επιδιώκεται η πλήρης ένταξη του χώρου στο φυσικό περιβάλλον, κάτι που γίνεται με ιδιαίτερη επιτυχία στις ευρωπαϊκές χώρες.

Τη διαδικασία ταφής των απορριμμάτων την έχει αναλάβει ο ΕΣΔΚΝΑ, ενώ οι εργασίες κατασκευής των έργων διαμόρφωσης του χώρου, στεγάνωσης, τοποθέτησης στραγγιστηρίων, λήψης του βιοαερίου κλπ, των βοηθητικών έργων υποδομής καθώς και των έργων τελικής αποκατάστασης κ επανένταξης εκτελούνται από την Ανάδοχο Κοινοπραξία.

Η λεκάνη του ΧΥΤΑ έχει διαμορφωθεί με εκσκαφές έτσι ώστε ο πυθμένας και τα πρανά να εξομαλυνθούν και να αποκτήσουν ενιαία κλίση. Στη βόρεια πλευρά του χώρου κατασκευάστηκε ανάχωμα με στόχο την απομόνωση του ΧΥΤΑ από τις ανάντι εκτάσεις και τη βέλτιστη διαχείριση των ομβρίων και των στραγγισμάτων. Στη νότια πλευρά, ο καινούργιος ΧΥΤΑ αναπτύσσεται με τη μέθοδο «κατά συναρμογή», πάνω στο απορριμματικό ανάγλυφο του παλαιού ΧΔΑ, σε έκταση 100.000m³. Ακόμα, ο ΧΥΤΑ διαιρείται σε 3 φάσεις από 2 αναχώματα που έχουν κατασκευαστεί για να βοηθήσουν στη τμηματική κατασκευή των έργων υποδομής και τη τμηματική λειτουργία του. Η τμηματική διαμόρφωση και πλήρωση του χώρου ταφής συμβάλλει στον περιορισμό της δημιουργίας στραγγισμάτων, επιτρέποντας την προοδευτική αποκατάσταση του χώρου, ελαττώνοντας και διαβαθμίζοντας το κόστος των χωματουργικών εργασιών και των υπολοίπων προετοιμασιών. Για τη διάθεση των απορριμμάτων χρησιμοποιείται η μέθοδος των κυττάρων.



Εικόνα 7. Σχηματική μηκοτομή ΧΥΤΑ Δυτικής Αττικής

Το σημείο έναρξης της απόθεσης των απορριμμάτων βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του ΧΥΤΑ, το οποίο αποτελεί και τον χώρο της Α΄ Φάσης που περιλαμβάνει 3 κύτταρα διάθεσης. Οι Φάσεις Β΄ και Γ΄ χωρίζονται αντίστοιχα σε 4 και 5 κύτταρα.

Οι εργασίες κατασκευής της 1^{ης} Φάσης ολοκληρώθηκαν και το έργο τέθηκε σε λειτουργία τον Ιούνιο του 1998. Η κατασκευή της 2^{ης} Φάσης ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 1999, όπου και ξεκίνησε η κατασκευή της 3^{ης} Φάσης. Με την έναρξη λειτουργίας του ΧΥΤΑ το 1998, έκλεισε οριστικά ο ΧΔΑ Άνω Λιοσίων, και ξεκίνησε η διάθεση των απορριμμάτων με έναν ενδεδειγμένο και περιβαλλοντικά ασφαλέστερο τρόπο.

Σημαντικό ρόλο στη σωστή λειτουργία του ΧΥΤΑ αποτελεί η στεγανοποίηση των κυττάρων. Σύμφωνα με τον ΕΣΔΚΝΑ στον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων κατασκευάστηκε σύστημα διπλής σύνθετης στεγάνωσης που αποτελείται από συνδυασμό γεωσυνθετικών και αργιλικών μονωτικών υλικών. Ανάμεσα στα δυο συστήματα στεγάνωσης, τοποθετήθηκε ενδιάμεση στραγγιστήρια στρώση ελέγχου των διαφυγών. Τα στραγγιστήρια αυτά επιτρέπουν τον εντοπισμό και την απομάκρυνση τυχόν διαρροών των στραγγισμάτων από τη στεγάνωση. Η απομάκρυνση αυτή επιτυγχάνεται μέσω ειδικού δικτύου αγωγών, που έχουν τοποθετηθεί στον πυθμένα του χώρου.

Τα γεωσυνθετικά υλικά αποτελούν η γεωμεμβράνη, που είναι ένα «αδιαπέρατο» πλαστικό λεπτό φύλλο και χρησιμοποιείται στη στεγάνωση, το γεωπλέγμα, που είναι πλέγμα με διασταυρωνόμενες ραβδώσεις και χρησιμοποιείται για τη στράγγιση, το γεωύφασμα που είναι ύφασμα από συνθετικές ίνες και χρησιμοποιείται ως φίλτρο στη προστατευτική στρώση και τέλος το γεωσύνθετο που αποτελεί οποιονδήποτε συνδυασμό από τα παραπάνω (δηλαδή γεωύφασμα και γεωπλέγμα).

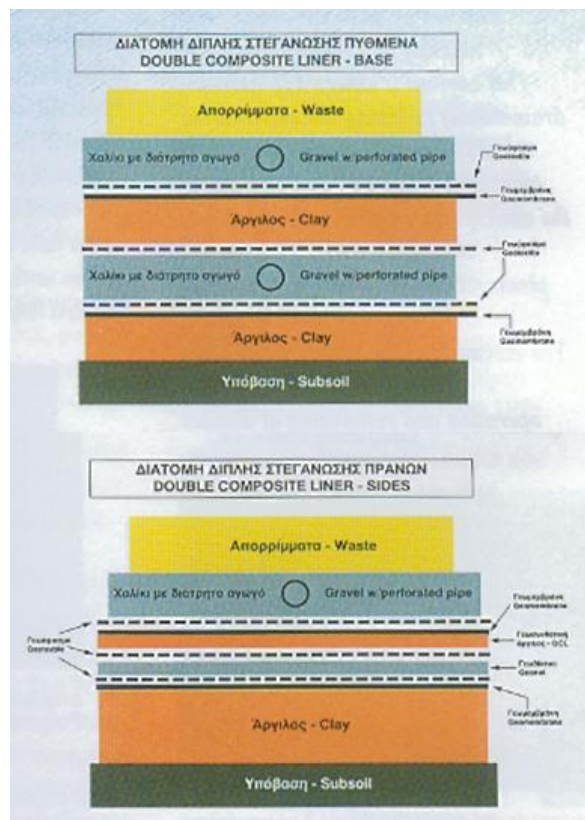
Το σύστημα αυτό επιλέχθηκε για τον συγκεκριμένο χώρο λόγω του γεωλογικού υποβάθρου της περιοχής και του υποκείμενου υδροφόρου ορίζοντα, ο οποίος είναι ιδιαίτερα βεβαρημένος από τις βιομηχανικές δραστηριότητες της περιοχής. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν τη περιοχή της χωματερής είναι τα πλευρικά κορήματα και αποσαθρώματα ασβεστολιθικής κυρίως σύστασης και οι ασβεστόλιθοι και δολομίτες της πελαγονικής ζώνης, Τριαδικής- Ιουρασικής ηλικίας. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι υδατοπερατοί ή ημιπερατοί με μέσο συντελεστή υδατοπερατότητας 10^{-2} cm/sec.

Ο πυθμένας του ΧΥΤΑ επενδύθηκε με σύστημα διπλής σύνθετης στεγάνωσης το οποίο αποτελείται με τη σειρά από:

- Μια στρώση διάτρητων αγωγών για τη κυκλοφορία και τη συλλογή των στραγγισμάτων

- Μια στρώση αποστράγγισης με χαλίκι, 16*32 mm
- Μια στρώση άμμου πάχους 0,10m με διάμετρο μικρότερη από 5mm
- Μια στρώση με διάτρητους αγωγούς για τον έλεγχο και τη συλλογή των στραγγισμάτων που έχουν διαφύγει, που διαχωρίζεται από την ανώτερη αργιλική στρώση με γεωύφασμα διαχωρισμού
- Μία κάτω γεωμεμβράνη HDPE πάχους 2mm, πάνω από την οποία έχει τοποθετηθεί γεωύφασμα προστασίας από πολυπροπυλένιο PP600gr/m²
- Έναν κάτω αργιλικό φραγμό, πάχους 0,50m με διαπερατότητα $h < 1 \cdot 10^{-9}$ m/sec

Προκειμένου να επιτευχθεί η αύξηση του ωφέλιμου όγκου του ΧΥΤΑ και να εξασφαλισθεί η ταχεία και άρτια κατασκευή της πολυστρωματικής στεγάνωσης στα πρανή της Φάση 1 του ΧΥΤΑ κρίθηκε τεχνικά καταλληλότερη η χρήση γεωσυνθετικών υλικών στα ενδιάμεσα στρώματα της διατομής. Αντικαταστάθηκε δηλαδή η στρώση ελέγχου των διαφυγών με geonet και η ανώτερη στρώση τεχνητού γεωλογικού φραγμού με GCL, επιτυγχάνοντας την αύξηση του πάχους της κατώτερης αργιλικής στρώσης με αποτέλεσμα την εξασφάλιση σε κάθε περίπτωση της στεγανότητας του χώρου. Ο έλεγχος της ποιότητας των υλικών και των εργασιών διενεργήθηκε σύμφωνα με το Πρόγραμμα Ποιότητας που περιλαμβάνεται στο σύστημα ποιότητας κατά ISO 9002 των εταιρειών ΚΟΡΩΝΙΣ Α.Ε. και ENVITEC Α.Ε., το οποίο ελέγχεται από τον ΕΛΟΤ.



Εικόνα 8. Διατομή διπλής στεγάνωσης πυθμένα, Διατομή διπλής στεγάνωσης πρανών

Το Πρόγραμμα Ποιότητας περιλαμβάνει δειγματοληπτικό έλεγχο όλων των γεωσυνθετικών υλικών πριν τη τοποθέτησή τους, εργαστηριακές δοκιμές καταλληλότητας των αργιλικών υλικών και επιτόπου δοκιμές συμπίκνωσης και περατότητας σε δοκιμαστικό επίχωμα υπό συνθήκες πεδίου, προ της έναρξης κατασκευής του τεχνητού γεωλογικού φραγμού.

Οι δειγματοληψίες και οι δοκιμές επαναλαμβάνονται διαρκώς και καθ' όλες τις φάσεις κατασκευής του γεωλογικού φραγμού και της διάστρωσης των γεωσυνθετικών υλικών.



Εικόνα 9. Κατασκευή άνω αργιλικού φραγμού στον πυθμένα της Φάσης I

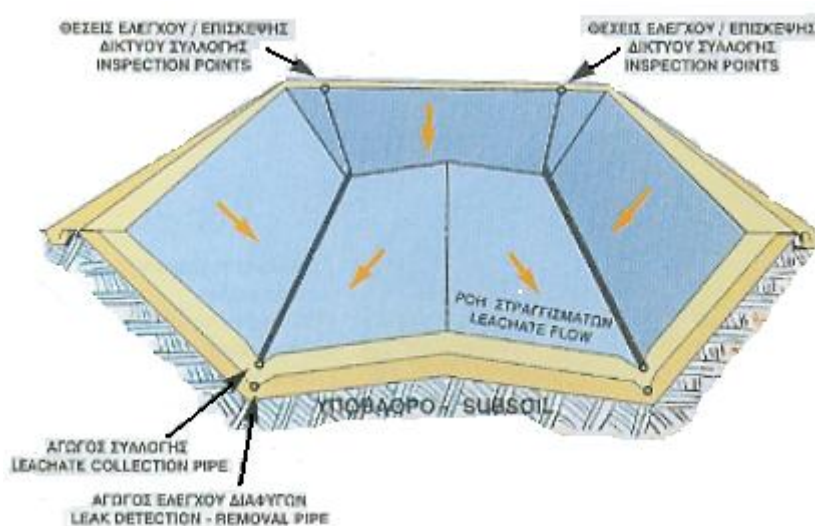


Εικόνα 10. Τοποθέτηση γεωσυνθετικών στα πρανή της Φάσης I

Παράλληλα, στον χώρο του ΧΥΤΑ λειτουργεί και ένα σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων. Το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε με γνώμονα τη συνεχή και ενιαία αποστράγγιση του ΧΥΤΑ έτσι ώστε να αποφευχθεί η λίμναση των στραγγισμάτων στον πυθμένα, πράγμα το οποίο θα είχε δυσμενή επίπτωση στην ευστάθεια του ΧΥΤΑ. Επίσης, συμβάλλει στην αποφυγή δημιουργίας κατακόρυφων φρεατίων

ελέγχου μέσα στο σώμα των απορριμμάτων, λόγω του μεγάλου τελικού ύψους τους. Η επισκεψιμότητα του δικτύου συλλογής των στραγγισμάτων και η δυνατότητα ελέγχου και καθαρισμού του καθώς και η πλήρης επεξεργασία των στραγγισμάτων έτσι ώστε να είναι κατάλληλα για τελική διάθεση για άρδευση ή στον υδατικό αποδέκτη, αποτελούν επίσης κριτήρια για τη λειτουργία του συστήματος διαχείρισης στραγγισμάτων.

Ο πυθμένας και τα πρανή του ΧΥΤΑ έχουν επενδυθεί με μια στρώση αποστράγγισης, ενώ στον πυθμένα έχει τοποθετηθεί δίκτυο δίδυμων κεντρικών αγωγών HDPE δομημένου τοιχώματος που αποστραγγίζουν ενιαία και συνεχώς τον ΧΥΤΑ. Οι δευτερεύοντες συλλεκτήριοι αγωγοί έχουν τοποθετηθεί στα σημεία αλλαγής κλίσης των πρανών, ενώ οι στραγγιστήριοι αγωγοί επεκτείνονται ως τη στέψη των ανάντι πρανών, σε ειδικά διαμορφωμένα σημεία ελέγχου, από όπου είναι δυνατός ο έλεγχος και ο καθαρισμός τους.



Εικόνα 11. Σχηματική τομή διαμόρφωσης πυθμένα

Οι κεντρικοί αγωγοί είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να καταλήγουν σε ένα κεντρικό φρεάτιο συλλογής από όπου τα στραγγίσματα οδηγούνται μέσω καταθλιπτικών δικτύων στην Εγκατάσταση επεξεργασίας. Το φρεάτιο είναι επισκέψιμο, έχει εξαερισμό και παγίδες βιοαερίου, και επιτρέπει τη χρήση κάμερας-ρομπότ για τον έλεγχο των αγωγών.

Αξίζει να σημειωθεί πως στον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων, στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας που χωροθετείται στο Ανατολικό πρανές του χώρου, γίνεται πλήρης επεξεργασία των στραγγισμάτων. Η εγκατάσταση αυτή περιλαμβάνει αρχική καθίζηση και αναερόβια επεξεργασία, αερισμό με το σύστημα SBR (αντιδραστήρας διαλείπουσας

λειτουργίας) και τέλος, τριτοβάθμια επεξεργασία με χημική καθίζηση, κροκίδωση και φίλτρα άμμου, καθώς και περαιτέρω καθαρισμό σε εφεδρικές κλίνες ενεργού άνθρακα. Το τελικό προϊόν αποθηκεύεται σε δεξαμενή για να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά ως νερό άρδευσης των φυτών που θα χρησιμοποιηθούν στην τελική επιφάνεια του ΧΥΤΑ στα πλαίσια της επανένταξης του χώρου στο φυσικό περιβάλλον ή οδηγείται στο δίκτυο συλλογής των ομβρίων. Ένα μέρος του τελικού προϊόντος από την επεξεργασία των στραγγισμάτων χρησιμοποιείται για επανακυκλοφορία στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ σύμφωνα με ειδικό πρόγραμμα που βασίζεται στο υδατικό ισοζύγιο του χώρου.

Όπως έχει προαναφερθεί, ο ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων δέχεται μεγάλες ποσότητες απορριμμάτων. Ως αποτέλεσμα της καθημερινής ταφής των απορριμμάτων είναι και οι ταχείς ρυθμοί παραγωγής βιοαερίου. Για να είναι εφικτή η συλλογή του έχει σχεδιαστεί σύστημα συλλογής βιοαερίου υψηλής ανάκτησης με συνδυασμό κατακόρυφων φρεάτων και οριζόντιων τάφρων. Το βιοαέριο αντλείται και καίεται σε δυο μονάδες άντλησης και καύσης, ονομαστικής δυναμικότητας 2500m³/h.

Όπως ορίζουν και οι ευρωπαϊκές προδιαγραφές, η επιφάνεια του ΧΥΤΑ θα πρέπει να διαμορφωθεί μετά την τελική πλήρωση των κυττάρων. Έτσι το τελικό ανάγλυφο του ΧΥΤΑ θα πρέπει να διαμορφωθεί σταδιακά λόγω της προοδευτικής πλήρωσής του. Στον εν λόγω ΧΥΤΑ η κάλυψη θα γίνει σε δυο στάδια: 1) τοποθέτηση προσωρινού καλύμματος τύπου «αναπνοής» και 2) τοποθέτηση μόνιμου καλύμματος τελικής αποκατάστασης.

Το προσωρινό κάλυμμα τύπου «αναπνοής» (capillary barrier) αποτελείται από 2 διαβαθμισμένες στρώσεις αμμοχαλικωδών υλικών. Ο σκοπός του είναι ο περιορισμός της κατείδυσης των όμβριων στα περαιωμένα απορριμματικά πρηνή και συνεπώς η μείωση των παραγόμενων στραγγισμάτων και ο έλεγχος της υγρασίας στη μάζα των απορριμμάτων έτσι ώστε να προωθείται η βιοαποδόμηση αυτών, να επιταχύνονται δηλαδή οι ρυθμοί καθιζήσεων και παραγωγής βιοαερίου. Το κάλυμμα αυτό συμβάλλει στη ταχύτερη βιοχημική και μηχανική σταθεροποίηση του χώρου, περιορίζοντας τον χρονικό ορίζοντα πρόκλησης δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ και αφού έχουν ολοκληρωθεί οι καθιζήσεις του απορριμματικού ανάγλυφου, πρέπει να τοποθετηθεί το μόνιμο κάλυμμα τελικής αποκατάστασης, που έχει σκοπό τη σφράγιση του χώρου και την τελική διαμόρφωσή του ως χώρο πρασίνου, με τη τοποθέτηση στεγανωτικής μεμβράνης, στρώσεων απορροής όμβριων και στρώσεων διαμόρφωσης και ανάπτυξης φυτών.

Για να διασφαλισθεί η δημόσια υγεία και το περιβάλλον από το ενδεχόμενο διαφυγής ρυπαντών από τον Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων και για να ελέγχεται η λειτουργία αυτού, πρέπει να εφαρμόζεται το πρόγραμμα

παρακολούθησης των περιβαλλοντικών παραμέτρων. Το πρόγραμμα περιβαλλοντικής παρακολούθησης του ΧΥΤΑ Δυτικής Αττικής περιλαμβάνει:

- Καταγραφή των μετεωρολογικών στοιχείων και εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου στο χώρο ταφής από τον επιτόπου εγκατεστημένο μετεωρολογικό σταθμό.
- Τακτική καταγραφή της ποσότητας και ποιότητας των παραγόμενων στραγγισμάτων. Τα στοιχεία λαμβάνονται από φορητά σταθμήμετρα και από τα παροχόμετρα του φρεατίου στραγγισμάτων, και με συχνές δειγματοληψίες στην είσοδο και έξοδο της εγκατάστασης επεξεργασίας στραγγισμάτων.
- Έλεγχο της ποιότητας των υπογείων υδάτων μέσω των τακτικών δειγματοληψιών των γεωτρήσεων αναφοράς και ελέγχου. Οι γεωτρήσεις αυτές έχουν διανοιχτεί ανάντι και κατάντι της υδραυλικής κλίσης του υπόγειου υδροφόρου του ΧΥΤΑ.
- Έλεγχο πλευρικών διαφυγών βιοαερίου από τα πρηνή του ΧΥΤΑ, με τακτική δειγματοληψία και χρήση φορητού αναλυτή στις περιμετρικές γεωτρήσεις ελέγχου διαφυγής βιοαερίου.
- Αποτύπωση και συνεχής υπολογισμός του όγκου της υγειονομικής ταφής και της εξέλιξης των καθιζήσεων με τακτικές τοπογραφικές μετρήσεις σε κάρναβο μαρτύρων μέσα στον χώρο της ταφής.

5.3. Σύσταση των απορριμμάτων

Τα οικιακά απορρίμματα ποικίλλουν ως προς τη σύσταση και τη ποιότητά τους, πράγμα το οποίο οφείλεται στο βιοτικό επίπεδο των κατοίκων, τα καταναλωτικά πρότυπα, τη κινητικότητα του αστικού πληθυσμού και τις εποχές του έτους. Με βάση τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (2003) τα ζυμώσιμα υλικά των αστικών αποβλήτων της Ελλάδος φθάνουν το 46% των συνολικών απορριμμάτων, το χαρτί το 19%, τα πλαστικά το 9%, τα μέταλλα το 5%, το γυαλί το 5% ενώ τα υπόλοιπα αγγίζουν το 16%.

Από τη δεκαετία του '80 μέχρι σήμερα οι πιο ουσιαστικές μεταβολές στη σύνθεση των απορριμμάτων είναι η μείωση των ζυμώσιμων υλικών και η αύξηση των πλαστικών και του χαρτιού. Σήμερα βρίσκεται σε εξέλιξη η δεύτερη έρευνα για τη σύνθεση των οικιακών απορριμμάτων της Αθήνας, υπό την επίβλεψη του Εργαστηρίου Περιβαλλοντικής Χημείας του Πανεπιστημίου Αθηνών (επικεφαλής καθηγητής κ. Μ. Σκούλλος) για λογαριασμό του ΕΣΔΚΝΑ. Σύμφωνα με τα πρώτα στοιχεία, στην Αθήνα ο κύριος όγκος των αστικών αποβλήτων εξακολουθεί να αποτελείται από ζυμώσιμα υλικά (40%), σε μικρότερο ποσοστό όμως από αυτό που ίσχυε κατά την προηγούμενη έρευνα. Αντιθέτως, το χαρτί και το χαρτόνι έχει

αυξηθεί από το ένα πέμπτο στο ένα τρίτο, διπλασιάστηκε το ποσοστό των πλαστικών (14%), το γυαλί παραμένει στα ίδια επίπεδα (3%), τα μέταλλα στο 3%, το δέρμα- ξύλο- λάστιχο στο 2%, ενώ το υπόλοιπο 6% αποτελείται από διάφορα άλλα υλικά.

Στην κατηγορία των ζυμώσιμων υλικών περιλαμβάνονται τα υπολείμματα κουζίνας και κήπου. Σε αυτή του χαρτιού περιλαμβάνονται τα πάσης φύσεως χαρτιά και χαρτόνια που προέρχονται κυρίως από έντυπο υλικό και από τις συσκευασίες των προϊόντων. Στα μέταλλα περιλαμβάνεται το σύνολο των μεταλλικών υλικών που απαντώνται στα απορρίμματα. Απαραίτητο είναι να γίνει ένας διαχωρισμός μεταξύ των σιδηρούχων και των μη σιδηρούχων μετάλλων (λόγω κυρίως της μαγνητικής ιδιότητας των πρώτων), με τα τελευταία να έχουν ως κυριότερο αντιπρόσωπο το αλουμίνιο. Σε ορισμένες αναλύσεις έχουν εξετασθεί ως ξεχωριστή υποκατηγορία και οι μπαταρίες λόγω της σχετικά υψηλότερης επικινδυνότητάς τους. Λόγω της έλλειψης υαλουργιών στην Ελλάδα, η διαχείριση του γυαλιού γίνεται με ιδιαίτερη δυσκολία. Δόκιμος είναι ο διαχωρισμός μεταξύ λευκού, καφέ και πράσινου γυαλιού όσον αφορά την ανακύκλωση διότι η παραγωγή καφέ και λευκού γυαλιού απαιτεί υαλότριμμα του ίδιου του χρώματος. Στη κατηγορία των πλαστικών περιλαμβάνεται το σύνολο των πολυμερών απορριμμάτων. Χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι η έντονη ανομοιογένειά της, λόγω πολλών χρησιμοποιούμενων πολυμερών (π.χ. PVC, PE, PP, PS, ABS κλπ.). Τα ξύλο- δέρμα- λάστιχο χαρακτηρίζονται ως λοιπά καύσιμα. Στα αδρανή περιλαμβάνονται τα χημικά ανενεργά υλικά που καταλήγουν στα οικιακά απορρίμματα (πέτρες, χώμα, κλπ.), ενώ στα λοιπά περιλαμβάνονται τα υλικά που δε μπορούν να κατανεμηθούν σε καμία από τις άλλες κατηγορίες.

5.4. Ανάλυση στραγγισμάτων από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων

Όπως έχει αναφερθεί στον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων λειτουργεί ένα σύστημα διαχείρισης των στραγγισμάτων. Μέρος αυτής της διαχείρισης είναι και ο τακτικός έλεγχος της ποιότητας των στραγγισμάτων, ο οποίος πραγματοποιείται από τα Χημικά Εργαστήρια Ανδρέου με τα οποία συνεργάζεται ο ΗΛΕΚΤΩΡ Α.Ε.. Σύμφωνα με τους υπευθύνους του τομέα της διαχείρισης των στραγγισμάτων του ΧΥΤΑ, αποστέλλονται δείγματα στα εργαστήρια κάθε εβδομάδα για κάθε ημέρα της εβδομάδος. Παρακάτω αναγράφονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων από 2 διαφορετικά δείγματα κατά τις ημερομηνίες 11/07/11- 18/07/11. Οι αναλύσεις εκτελούνται σύμφωνα με τις αναφερόμενες μεθόδους του «Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater» 21st Edition by APHA- AWWA- WEF.

Για το πρώτο δείγμα «ΧΥΤΑ ΦΥΛΗΣ –Φ1» έχουμε:

Χημικές Παράμετροι	Μέθοδος ανάλυσης	Μονάδες Μέτρησης	Αποτελέσματα
pH	4500- H ⁺ B		7.8
Αγωγιμότητα στους 25° C	2540 D	μS/cm	31300
B.O.D.	2510 D	mgO ² /L	7850
C.O.D.	2520 B	mgO ² /L	13724
Αιωρούμενα Στερεά	2540 D	mg/L	144
Ολικά Στερεά	2540 D	mg/L	21050
Υδρογονάνθρακες	5520 C	mg/L	280
Αμμωνία	4500- NH ₃ D	mgN/L	2680
Ολικό άζωτο	4500- N _{org} B	mgN/L	3153
Ολικός φώσφορος	4500- P B	mgP/L	15
Φωσφορικά	4500- P D	mgP/L	14
Κυανιούχα	4500- CN B	mgCN/L	0
Φαινόλες	5530 D	mg/L	7.6
Θειικά	4500- SO ₄ E	mgSO ₄ /L	10
Χλωριούχα	4500Cl ⁻ B	mgCl/L	3377
Σίδηρος	3111 B	mgFe/L	11
Χαλκός	3111 B	mgCu/L	0.03
Ψευδάργυρος	3111 B	mgZn/L	0.66
Κάδμιο	3111 B	mgCd/L	0.01
Χρώμιο ολικό	3111 B	mgCr/L	0.58
Νικέλιο	3111 B	mgNi/L	0.66
Μόλυβδος	3111 B	mgPb/L	0.03
Αρσενικό	3111 B	mgAs/l	0.55
Υδράργυρος	3111 B	mgHg/L	0
Ολική σκληρότητα	2340 B	Γερμανικοί βαθμοί	128,3
		mgCaCO ₃ /L	2284
		Γαλλικοί βαθμοί	228,4
Αργίλιο	3111 D	mgAl/L	2.0
Φθοριούχα	4500- F	mgF/L	0.2
Στρόντιο	3111 D	mgSr/L	2.1
Ασβέστιο	3111 D	mgCa/L	412
Μαγνήσιο	3111 D	mgMg/L	303
Πυριτικά ολικά	4500- SiO ₂ D	mgSiO ₂ /L	35

Για το δεύτερο δείγμα «ΧΥΤΑ ΦΥΛΗΣ – Φ2» έχουμε:

Χημικές Παράμετροι	Μέθοδος ανάλυσης	Μονάδες Μέτρησης	Αποτελέσματα
pH	4500- H ⁺ B		8.1
Αγωγιμότητα στους 25° C	2540 D	μS/cm	34200
B.O.D.	2510 D	mgO ² /L	2384
C.O.D.	2520 B	mgO ² /L	8313
Αιωρούμενα Στερεά	2540 D	mg/L	118
Ολικά Στερεά	2540 D	mg/L	20810
Υδρογονάνθρακες	5520 C	mg/L	22
Αμμωνία	4500- NH ₃ D	mgN/L	2790
Ολικό άζωτο	4500- N _{org} B	mgN/L	3080
Ολικός φώσφορος	4500- P B	mgP/L	19
Φωσφορικά	4500- P D	mgP/L	17
Κυανιούχα	4500- CN B	mgCN/L	0
Φαινόλες	5530 D	mg/L	3.1
Θειικά	4500- SO ₄ E	mgSO ₄ /L	13
Χλωριούχα	4500Cl ⁻ B	mgCl/L	3899
Σίδηρος	3111 B	mgFe/L	6.3
Χαλκός	3111 B	mgCu/L	0.04
Ψευδάργυρος	3111 B	mgZn/L	0.54
Κάδμιο	3111 B	mgCd/L	0
Χρώμιο ολικό	3111 B	mgCr/L	0.88
Νικέλιο	3111 B	mgNi/L	0.68
Μόλυβδος	3111 B	mgPb/L	0.03
Αρσενικό	3111 B	mgAs/l	0.99
Υδράργυρος	3111 B	mgHg/L	0
Ολική σκληρότητα	2340 B	Γερμανικοί βαθμοί	59.2
		mgCaCO ₃ /L	1054
		Γαλλικοί βαθμοί	105.4
Αργίλιο	3111 D	mgAl/L	2.3
Φθοριούχα	4500- F	mgF/L	1.3
Στρόντιο	3111 D	mgSr/L	0.6
Ασβέστιο	3111 D	mgCa/L	31
Μαγνήσιο	3111 D	mgMg/L	235
Πυριτικά ολικά	4500- SiO ₂ D	mgSiO ₂ /L	37

Κεφάλαιο 6

Εργαστηριακή προσομοίωση

5.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για τη ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση των στραγγισμάτων από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων με τη χρήση λυσιμέτρων. Τα λυσίμετρα είναι δοχεία πληρωμένα με απορρίμματα τα οποία προσομοιώνουν τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στον ΧΥΤΑ και επιτρέπουν τη λεπτομερή μελέτη της διαχρονικής εξέλιξης της ποιότητας των στραγγισμάτων κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες.

Τα αντικείμενα που ερευνήθηκαν ήταν:

- Η παραγωγή στραγγισμάτων και η σχέση τους με τη βροχόπτωση
- Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων που προέκυψαν

Τα λυσίμετρα κατασκευάστηκαν και εγκαταστάθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου της Γεωργικής Υδραυλικής του τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και λειτούργησαν επί ενάμιση μήνα.

5.2. Πειραματική εγκατάσταση

Για τον σχεδιασμό των λυσιμέτρων λάβαμε υπόψη τα παρακάτω κριτήρια:

- Τα απορρίμματα που πλήρωσαν τα λυσίμετρα είχαν σύνθεση αντιπροσωπευτική των οικιακών απορριμμάτων της περιοχής.
- Η συμπίεση των απορριμμάτων κατά τη πλήρωση των λυσιμέτρων πρέπει να είναι αντίστοιχη με αυτή του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων.
- Η περιεκτικότητα σε υγρασία των απορριμμάτων στα λυσίμετρα πρέπει να αντιστοιχεί στη φυσική τους υγρασία.
- Το μέγεθος των απορριμμάτων πρέπει να είναι τέτοιο έτσι ώστε να μην εμποδίζει τη σωστή λειτουργία των λυσιμέτρων.
- Οι κλιματικές συνθήκες πρέπει να είναι παρόμοιες με αυτές που επικρατούν στη περιοχή των Άνω Λιοσίων του νομού Αττικής.

Ο τρόπος κατασκευής και λειτουργίας των λυσιμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν πείραμα βασίστηκε στο διδακτορικό της κ. Μποσδογιάννη Αγγελικής με θέμα «Βιολογική αποδόμηση αστικών απορριμμάτων».

5.3. Κατασκευή πειραματικής διάταξης

Για την εκτέλεση του πειράματος απαιτήθηκαν δύο διάφανοι σωλήνες από PVC ύψους 1 μέτρου και διαμέτρου 20 εκατοστών, οι οποίοι σφραγίσθηκαν από τη κάτω μεριά με διάτρητα πώματα αντίστοιχης διαμέτρου. Τα πώματα των σωλήνων στηρίχθηκαν με σύρμα για τη διασφάλιση της ασφαλούς σφράγισης του πυθμένα. Παράλληλα, ο πυθμένας του σωλήνα επενδύθηκε με γεωμεμβράνη, παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στην επένδυση των κυττάρων του ΧΥΤΑ.



Εικόνα 12. Πυθμένας του λυσιμέτρου μετά τη προσθήκη της γεωμεμβράνης

Παράλληλα, απαιτήθηκαν και δυο συσκευές Mariotte, μέσω των οποίων γινόταν η τροφοδότηση των λυσιμέτρων με απιονισμένο νερό διατηρώντας σταθερή τη στάθμη στην επιφάνεια διήθησης του νερού. Λόγω του μεγάλου όγκου νερού που θέλαμε να εισάγουμε στα λυσίμετρα, περίπου 17lt σε κάθε λυσίμετρο, κατασκευάσαμε δυο συσκευές Mariotte, καθώς οι διαθέσιμες στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου συσκευές ήταν μικρού όγκου. Για τη κατασκευή τους απαιτήθηκαν δυο μπουκάλες από ψύκτες εμφιαλωμένου νερού, διάφανοι ελαστικοί σωλήνες, αριθμητικό μέτρο καθώς και φελλοί για το αεροστεγές κλείσιμό τους. Επειδή το σχήμα των μπουκαλών νερού δεν ήταν ομοιόμορφο, χρειάστηκε να κάνουμε ογκομέτρηση αυτών για να μπορούμε να υπολογίζουμε τον όγκο νερού που περνούσε κάθε χρονική στιγμή από τη συσκευή Mariotte στο λυσίμετρο.



Εικόνα 13. Συσκευή Mariotte

Η πλήρωση των λυσιμέτρων έγινε με οικιακά απόβλητα που ελήφθησαν με τη βοήθεια γεωτρυπάνου από βάθος 30 μέτρων, ύστερα από μετάβαση στον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων, τηρώντας όλες τις προδιαγραφόμενες οδηγίες ασφαλείας. Τα απορρίμματα αυτά είχαν υποστεί αποδόμηση σε σημαντικό βαθμό. Η λήψη του δείγματος των απορριμμάτων έγινε τον μήνα Μάιο του 2011. Τα δείγματα σφραγίσθηκαν σε νάιλον σακούλες, έτσι ώστε να διατηρηθεί η περιεχόμενη υγρασία έως ότου τοποθετηθούν στα λυσίμετρα.

Κατά τη τοποθέτηση των απορριμμάτων στα λυσίμετρα έγινε διαλογή αφαιρώντας τα μεγάλα μπουκάλια, κουτιά και άλλα αντικείμενα που θα ήταν πιθανό να φράξουν τη διατομή των λυσιμέτρων και να εμποδίσουν την ομαλή διέλευση του νερού και ως επί των πλείστων των στραγγισμάτων σε όλο το χώρο του λυσιμέτρου.

Τα δείγματα που εισήχθησαν στους σωλήνες υπέστησαν συμπίεση της τάξεως του 2:1. Για να επιτευχθεί αυτή η συμπίεση, τα απορρίμματα έπρεπε να εισαχθούν στο σωλήνα σταδιακά και να πιέζονται χειρονακτικά με μια «βαριά». Το ύψος των συμπιεσμένων απορριμμάτων στο σωλήνα έφθασε τα 50 εκατοστά και ο τελικός τους όγκος διαμορφώθηκε στα $0,016 \text{ m}^3$.

Για το στήσιμο του πειράματος απαιτήθηκε μια πυροστιά ως βάση, πάνω στην οποία στηρίχθηκε το λυσίμετρο. Η πυροστιά τοποθετήθηκε μέσα σε ταψί, έτσι ώστε να αποφευχθεί η διαρροή των στραγγισμάτων στο χώρο του εργαστηρίου. Μέσα στο ταψί, εισήχθη ένα ακόμα ταψί μικρότερης διαμέτρου, από το οποίο γινόταν η λήψη των στραγγισμάτων. Τα λυσίμετρα στηρίχθηκαν επίσης με σύρμα σε στατό

που βρισκόταν στο πίσω μέρος της κατασκευής, για την επιπλέον διασφάλιση της στήριξής τους. Τέλος, τα λυσίμετρα σκεπάστηκαν με αλουμινένια ταψάκια για την αποφυγή οσμών και την ελαχιστοποίηση της εξάτμισης.



Εικόνα 14. Πιλοτική εγκατάσταση στο εργαστήριο

5.4. Πειραματική διαδικασία

Για την εκτέλεση του πειράματος τα απορρίμματα έπρεπε να κορεστούν και στη συνέχεια να βρεθούν σε κατάσταση πλήρους κατάκλισης. Η κατάκλιση που εφαρμόσαμε αντιστοιχεί στη μέση ετήσια βροχόπτωση από το 1951 έως το 2008-δεδομένα που ελήφθησαν κατόπιν αίτησης από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Μήνας	Μέση μηνιαία βροχόπτωση (mm)
Ιανουάριος	53,5
Φεβρουάριος	38,4
Μάρτιος	39,7
Απρίλιος	27,2
Μάιος	21,1
Ιούνιος	10,8
Ιούλιος	11,8
Αύγουστος	7,7
Σεπτέμβριος	17,7
Οκτώβριος	47,9
Νοέμβριος	66,7
Δεκέμβριος	64,2
Σύνολο	406,8

Πίνακας 3. Μέσα μηνιαία υδρολογικά δεδομένα (πηγή: EMY)

Προκειμένου να έχουμε μια πρώτη εικόνα για τη ταχύτητα ροής του νερού (**ks**) μέσα στο δείγμα των απορριμμάτων, εκτελέστηκε πείραμα σε μικρότερο δείγμα απορριμμάτων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μέθοδος μεταβλητού φορτίου (Reynolds *et al* 2002, Αργυροκαστρίτης 2006). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων από το περατόμετρο μεταβλητού φορτίου η ταχύτητα ροής μέσα στα απορρίμματα αντιστοιχεί σε 0,02cm/min ή 0,31m/day.

Κατά τη πορεία όμως του πειράματος, η παραπάνω εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας υπολειπόταν κατά πολύ εκείνης που επικράτησε στην πειραματική διάταξη. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη διαφορά της σύστασης των απορριμμάτων που εισάγαμε στο περατόμετρο, αφού κάναμε πολύ προσεκτική διαλογή, στη ποσότητα αυτών αλλά και στη συμπίεσή τους.



Εικόνα 15. Περατόμετρο μεταβλητού φορτίου

Παράλληλα, προσδιορίσθηκε η υγρασία κατά μάζα και κατ' όγκο των απορριμμάτων, τόσο αρχικά όσο και στη κατάσταση κορεσμού. Για τον υπολογισμό της, τα απόβλητα χρειάστηκε να ζυγισθούν πριν ξεκινήσει η διαδικασία του πειράματος, μετά το τέλος αυτού καθώς επίσης και μετά τη ξήρανσή τους που έγινε σε κλίβανο στους 105° C για μια ημέρα. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς η υγρασία των απορριμμάτων παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Υγρασία	Δυσίμετρο 1	Λυσίμετρο 2
$w_{αρχ}$ (gr /gr)	11.78%	11.84%
W_s (gr /gr)	32,65%	32,30%
$\theta_{αρχ}$ (cm ³ /cm ³)	12,4%	13,6%
θ_s (cm ³ /cm ³)	34,4%	37,2%

Πίνακας 4. Υγρασία κατά μάζα και κατ' όγκο των απορριμμάτων των 2 λυσιμέτρων

5.5. Πρόγραμμα αναλύσεων

Όπως προαναφέρθηκε, τα απορρίμματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη πλήρωση των λυσιμέτρων έχουν αρκετά μεγάλη αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία, που αντιστοιχεί στο 32,65% στο πρώτο λυσίμετρο και στο 32,30% κ.μ. στο δεύτερο λυσίμετρο. Το δείγμα των απορριμμάτων που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση του πειράματος ήταν αντιπροσωπευτικό των ελληνικών οικιακών απορριμμάτων, πράγμα το οποίο εξηγεί την υψηλότερη τιμή της υγρασίας σε σχέση με τις τιμές που δίνονται από τη βιβλιογραφία και οι οποίες αγγίζουν το 20- 25% (Rees, 1980), λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας των ελληνικών απορριμμάτων σε οργανικά εύκολα βιοαποδομήσιμα υλικά.

Και τα δυο λυσιμέτρα κατασκευάσθηκαν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αποφευχθούν οι διαρροές από τον πυθμένα. Τα στραγγίσματα που παρήχθησαν συλλέχθηκαν σε ταψάκι που βρισκόταν στον πυθμένα του λυσιμέτρου. Κάθε φορά που γινόταν λήψη των στραγγισμάτων, αυτά ογκομετρούνταν και στη συνέχεια αποθηκεύονταν για να γίνει η ποιοτική τους αξιολόγηση.



Εικόνα 16. Τρόπος συλλογής στραγγισμάτων, αποθήκευση στραγγισμάτων

Η εξάτμιση από τα λυσιμέτρα αυτής της διαμέτρου (20 cm) ουσιαστικά είναι αμελητέα. Για την αποφυγή όμως της διάχυσης οσμών στο χώρο του εργαστηρίου, τα λυσιμέτρα καλύφθηκαν, μηδενίζοντας ακόμα και τα ελάχιστα ποσά εξάτμισης από την επιφάνεια των λυσιμέτρων. Συνεπώς, η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου για τη περίπτωση των λυσιμέτρων του πειράματος γίνεται:

$$P = L + DE$$

όπου, P: βροχόπτωση

L: όγκος παραγόμενων στραγγισμάτων

DE: νερό που απαιτήθηκε για τον κορεσμό

Κατά τη διάρκεια του πειράματος και τις ίδιες χρονικές στιγμές λαμβάναμε μετρήσεις από το Mariotte, έτσι ώστε να μπορέσουμε να εκτιμήσουμε τη ποσότητα του νερού που έχει περάσει μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων, από το φορτίο πίεσης που ασκούσαμε στην επιφάνεια των απορριμμάτων, ενώ παράλληλα γινόταν και η ζύγιση των παραγόμενων στραγγισμάτων.

Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με τις μετρήσεις από τα mariotte και με βάση την ογκομέτρηση αυτών, υπολογίσθηκε ότι πέρασαν 16,952 lt και 17,432 lt νερού από το πρώτο και δεύτερο λυσιμέτρο αντίστοιχα. Και στα δυο λυσιμέτρα απαιτήθηκε κάποια ποσότητα νερού έτσι ώστε να φθάσουν τα απορρίμματα στον κορεσμό και να ξεκινήσουν να δίνουν στραγγίσματα. Η ποσότητα αυτή υπολογίσθηκε με βάση τον τύπο $(\theta_s - \theta_{αρχ}) \cdot V_{\lambdaυσιμ}$ και αντιστοιχεί σε 3454 cm³ για το πρώτο λυσιμέτρο και 3697 cm³ το δεύτερο. Τα στραγγίσματα που προέκυψαν από το πρώτο λυσιμέτρο είχαν συνολικό βάρος 11752,85 gr ενώ τα αντίστοιχα από το δεύτερο 12767,65.

5.6. Αποδόμηση των απορριμμάτων- παραγωγή στραγγισμάτων

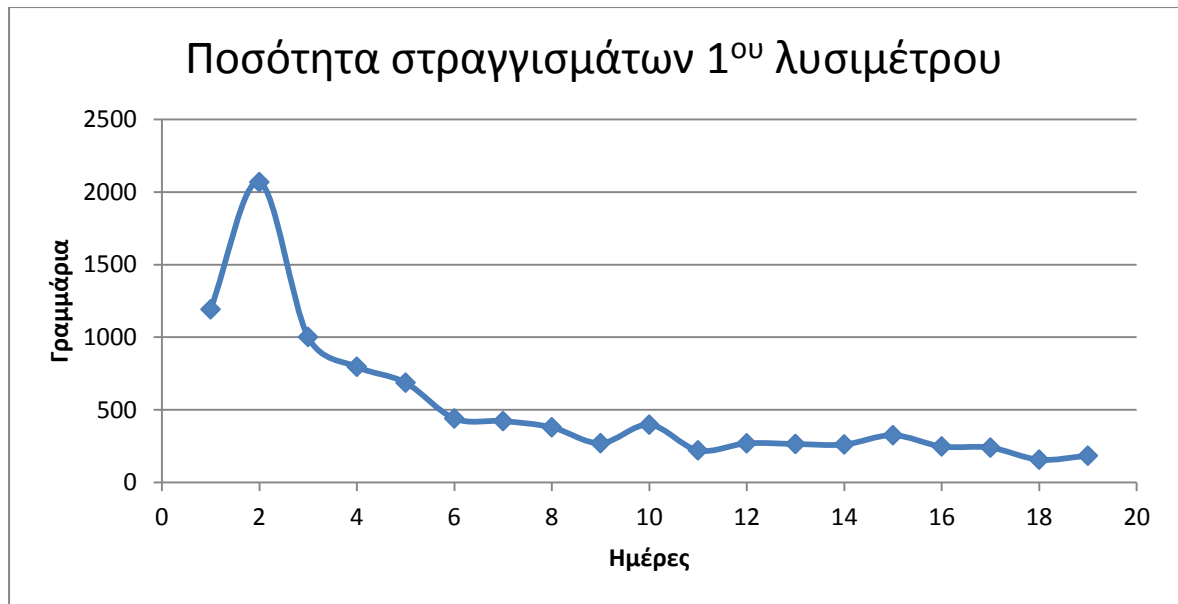
5.6.1. Ποσότητα παραγόμενων στραγγισμάτων

Τα δυο λυσίμετρα πληρώθηκαν με απορρίμματα, τα οποία ελήφθησαν από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων από βάθος 30 μέτρων, ύστερα από εξαγωγή τους με γεωτρύπανο, βάρους 21,238 kg και 22,955 kg αντίστοιχα, με αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία στο 32,65% στο πρώτο λυσίμετρο και στο 32,30% κ.μ. στο δεύτερο λυσίμετρο.. Τα λυσίμετρα αυτά χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να εκτιμηθεί η ποσότητα και η ποιότητα των στραγγισμάτων που προκύπτουν από την αποδόμηση των αποβλήτων και η ενδεχόμενη μόλυνση που θα επέλθει από ατυχία κατασκευής του Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων.

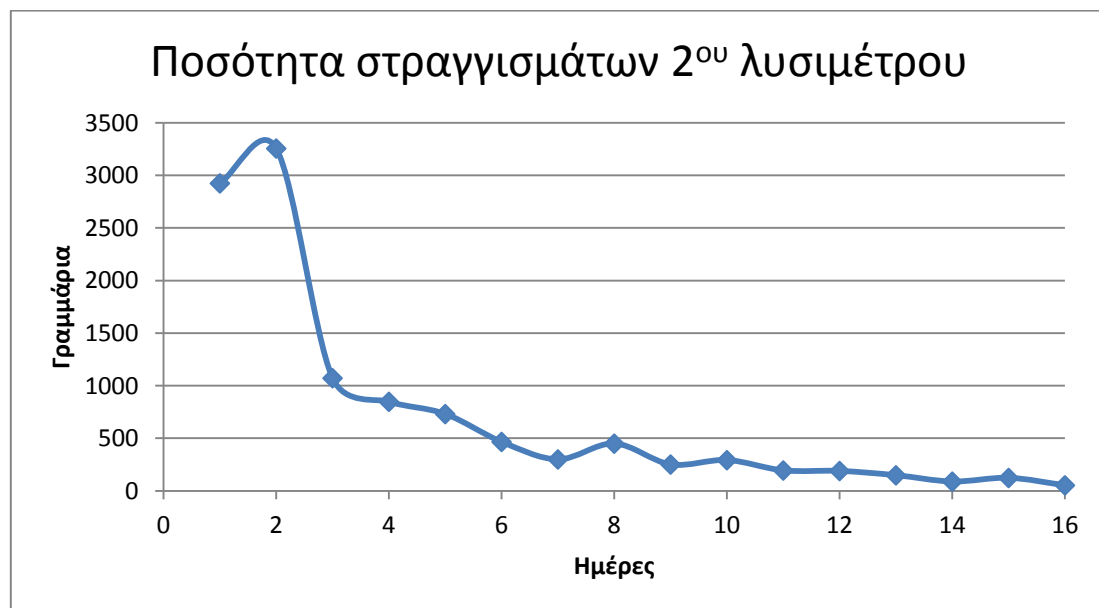
Λόγω του γεγονότος ότι τα απορρίμματα δεν ελήφθησαν αμέσως μετά την εξαγωγή τους από το κύτταρο, η περιεχόμενη υγρασία τους δεν ήταν αυτή που ενδεχομένως θα ήταν εάν είχαν ληφθεί αμέσως μετά την εξαγωγή τους. Συνεπώς, τα απορρίμματα δεν ήταν εφικτό να δώσουν στραγγίσματα, ακόμα και μετά τη συμπίεση τους μέσα στα λυσίμετρα. Η παραγωγή των στραγγισμάτων ξεκίνησε αφού η μάζα των απορριμμάτων κορέσθηκε με απιονισμένο νερό.

Η συνολική ποσότητα του νερού που απαιτήθηκε για την εκτέλεση του πειράματος ήταν η ποσότητα που απαιτήθηκε για τον κορεσμό καθώς και η μέση ετήσια βροχόπτωση από το 1951 έως το 2008, σύμφωνα με τα δεδομένα από την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία. Για τη πρώτη στήλη το νερό που απαιτήθηκε αντιστοιχούσε σε 16,952 lt και για τη δεύτερη στήλη σε 17,432 lt.

Ο ρυθμός παραγωγής των στραγγισμάτων έφτασε στο μέγιστό του μετά από τέσσερις ώρες για το πρώτο και έξι για το δεύτερο λυσίμετρο από την ώρα έναρξης παραγωγής αυτών. Στη συνέχεια, ο ρυθμός παραγωγής μειώθηκε, έχοντας μια τάση σταθεροποίησης, πράγμα το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι τα απορρίμματα έφθασαν στο μέγιστο ποσοστό υγρασίας που μπορούν να συγκρατήσουν. Η κατάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί προσδιορίζει την έναρξη παραγωγής των στραγγισμάτων στους χώρους υγειονομικής ταφής. Το μέγιστο ποσοστό υγρασίας που συγκρατούν τα απόβλητα εξαρτάται από τη πίεση που ασκείται από τα υποκείμενα στρώματα και το βαθμό αποσύνθεσης αυτών. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η κατανομή της ποσότητας των παραγόμενων στραγγισμάτων κατά τη διάρκεια των 19 και 16 ημερών που απαιτήθηκαν για τη διέλευση του απαιτούμενου όγκου νερού από το πρώτο και το δεύτερο λυσίμετρο αντίστοιχα.



Διάγραμμα 9. Ποσότητα στραγγισμάτων σε συνάρτηση με τη πάροδο του χρόνου για το πρώτο λυσίμετρο



Διάγραμμα 10. Ποσότητα στραγγισμάτων σε συνάρτηση με τη πάροδο του χρόνου για το δεύτερο λυσίμετρο

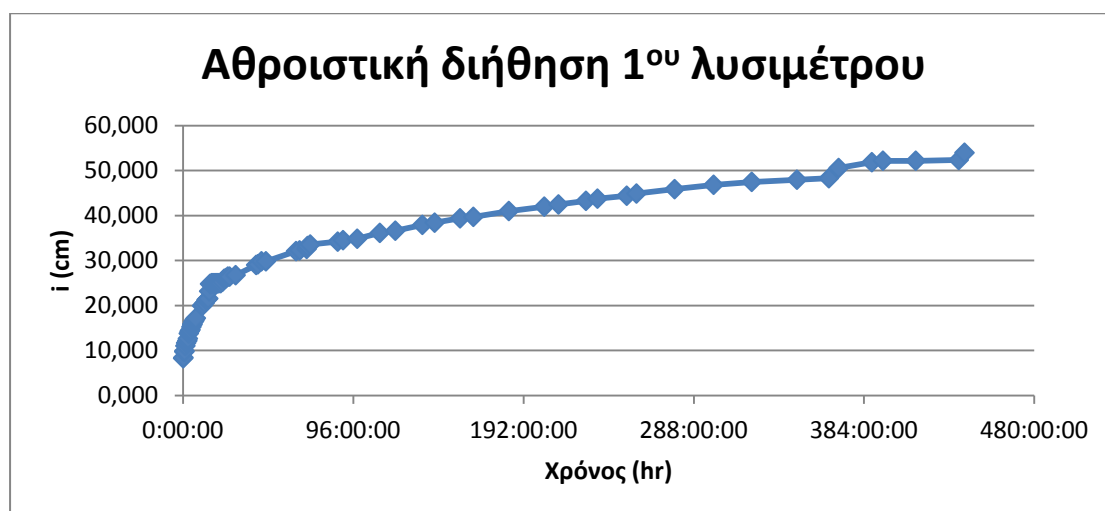
Σύμφωνα με τη γενική εξίσωση ροής, η οποία προκύπτει από τον συνδυασμό του νόμου του Darcy και της γενικής αρχής διατήρησης της μάζας (εξίσωση της συνέχειας), η κίνηση του νερού σε ένα ακόρεστο πορώδες μέσο χαρακτηρίζεται από μη σταθερή ταχύτητα, αφού κάποιιοι πόροι προσλαμβάνουν νερό, κάποιιοι ίσως αποδίδουν και κάποιιοι άλλοι απλά διαπερνώνται από το νερό. Στην επιφάνεια

διήθησης, απ' όπου το νερό διατίθεται και εισχωρεί στη προς μελέτη μάζα, μπορεί να επικρατούν είτε συνθήκες σταθερής παροχής, δηλαδή αναφερόμαστε σε διήθηση του νερού με σταθερή ταχύτητα βροχόπτωσης, είτε συνθήκες σταθερού φορτίου (ή υγρασίας), όπως όταν έχουμε κατάκλιση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέξαμε να εφαρμόσουμε συνθήκες κατάκλισης, συνεπώς στην επιφάνεια διήθησης επικρατούσαν συνθήκες σταθερού φορτίου. Υπολογίζοντας τη ταχύτητα διήθησης $u_0(t)$, δηλαδή την ταχύτητα εισόδου του νερού στη μάζα των απορριμμάτων, όπως αυτή προκύπτει από την εφαρμογή του $v. Darcy$ στην επιφάνεια της διήθησης, παρατηρήσαμε ότι η αθροιστική διήθηση αυξάνεται σταδιακά μέχρι που τείνει να σταθεροποιηθεί, ενώ αντίστοιχα η ταχύτητα διήθησης τείνει να μηδενιστεί σε άπειρο χρόνο. Η σταθερή κλίση που τείνει να αποκτήσει η καμπύλη της αθροιστικής διήθησης, αντιστοιχεί στη k_s . Τα χαρακτηριστικό αυτό ισχύει στη φυσική του φαινομένου της οριζόντιας διήθησης και όχι της κατακόρυφης. Η μείωση αυτή της ταχύτητας διήθησης πιστεύουμε ότι οφείλεται στο γεγονός ότι τα απορρίμματα έχουν κατακρατήσει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορούν, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

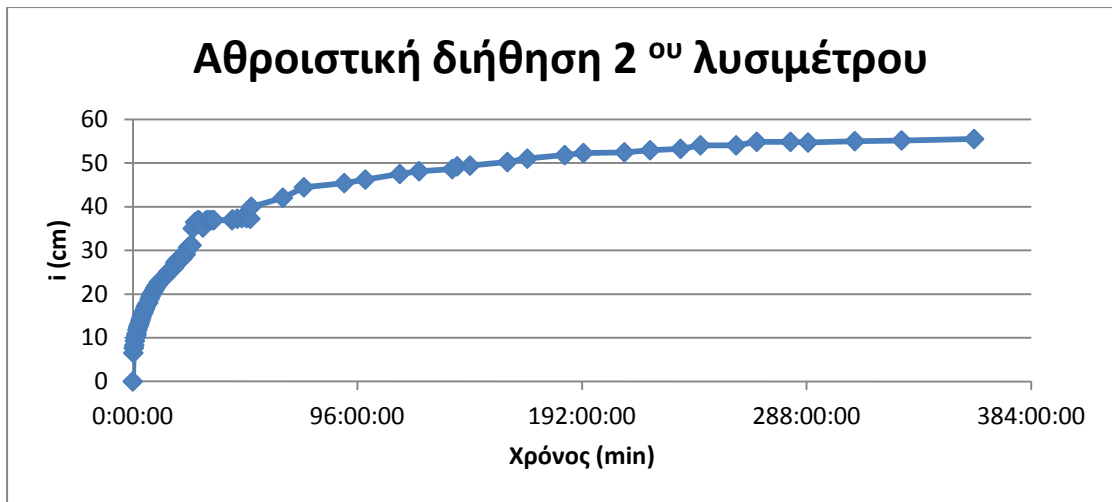
Για τον υπολογισμό της ταχύτητας διήθησης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Kostiaikov (1932). Η εξίσωση αυτή αποτελεί μια από τις πιο απλές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τη περιγραφή της σχέσης μεταξύ αθροιστικής διήθησης και χρόνου για τη περίπτωση της οριζόντιας διήθησης. Η εξίσωση είναι της μορφής:

$$i = k * t^\alpha$$

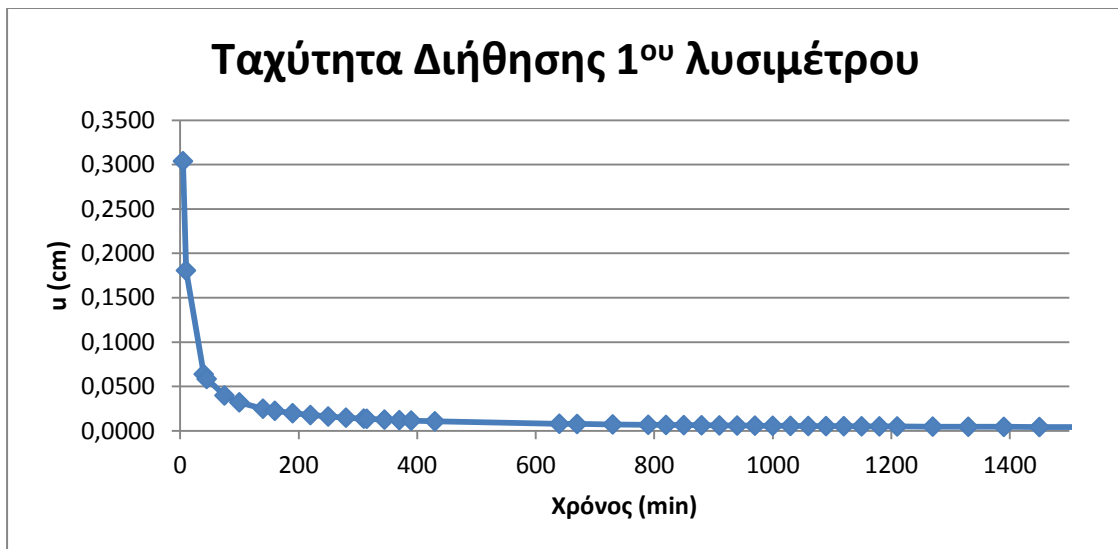
Όπου, α και k είναι παράμετροι που προσδιορίζονται από το πείραμα.



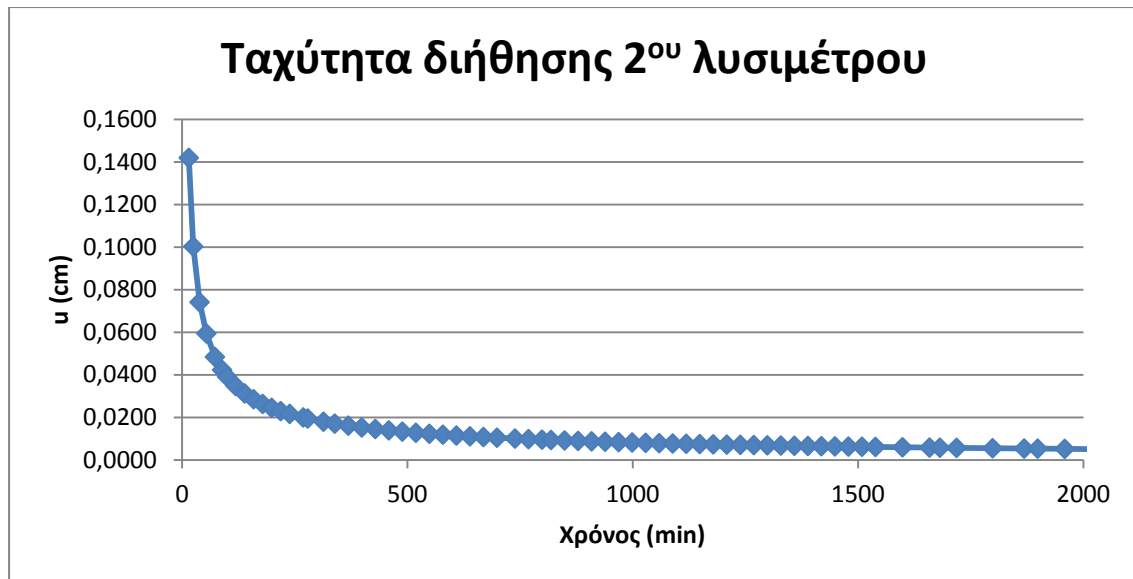
Διάγραμμα 11. Αθροιστική διήθηση για το πρώτο λυσίμετρο



Διάγραμμα 12. αθροιστική διήθηση για το δεύτερο λυσίμετρο



Διάγραμμα 13. Ταχύτητα διήθησης για το πρώτο λυσίμετρο



Διάγραμμα 14. Ταχύτητα διήθησης για το δεύτερο λυσίμετρο

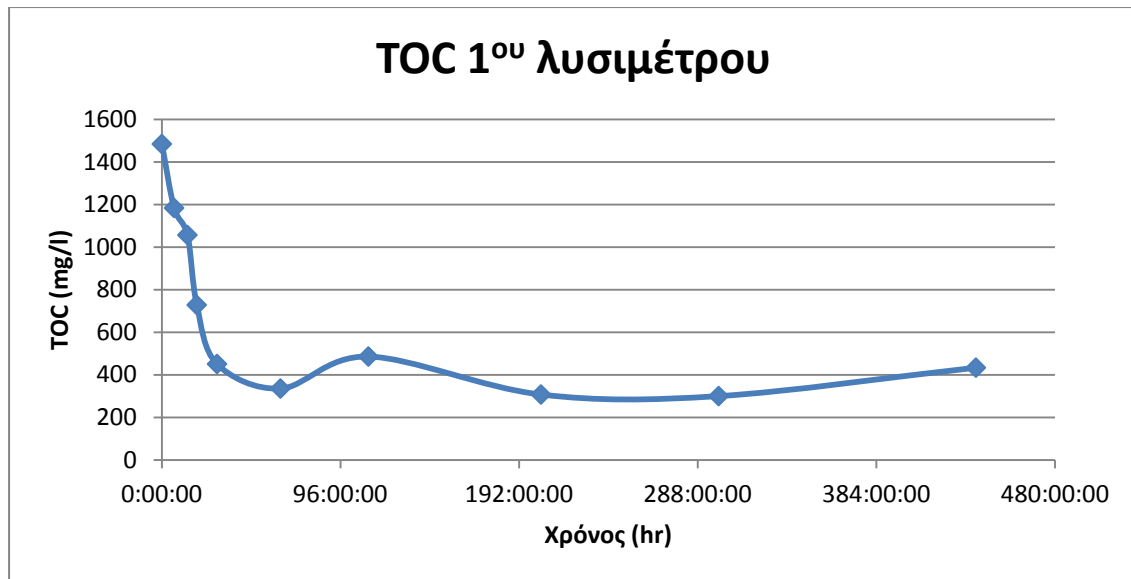
5.6.2. Οργανικός άνθρακας (TOC), COD, ολικό άζωτο, pH

Ο οργανικός άνθρακας αποτελεί έναν από τους ρύπους που συναντώνται σε μεγάλη κλίμακα στα αστικά στερεά απόβλητα. Ο προσδιορισμός της συνολικής συγκέντρωσης του οργανικού φορτίου των στραγγισμάτων που προέρχονται από την αποδόμηση των απορριμμάτων σε χώρους υγειονομικής ταφής μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του BOD₅, του COD και του TOC.

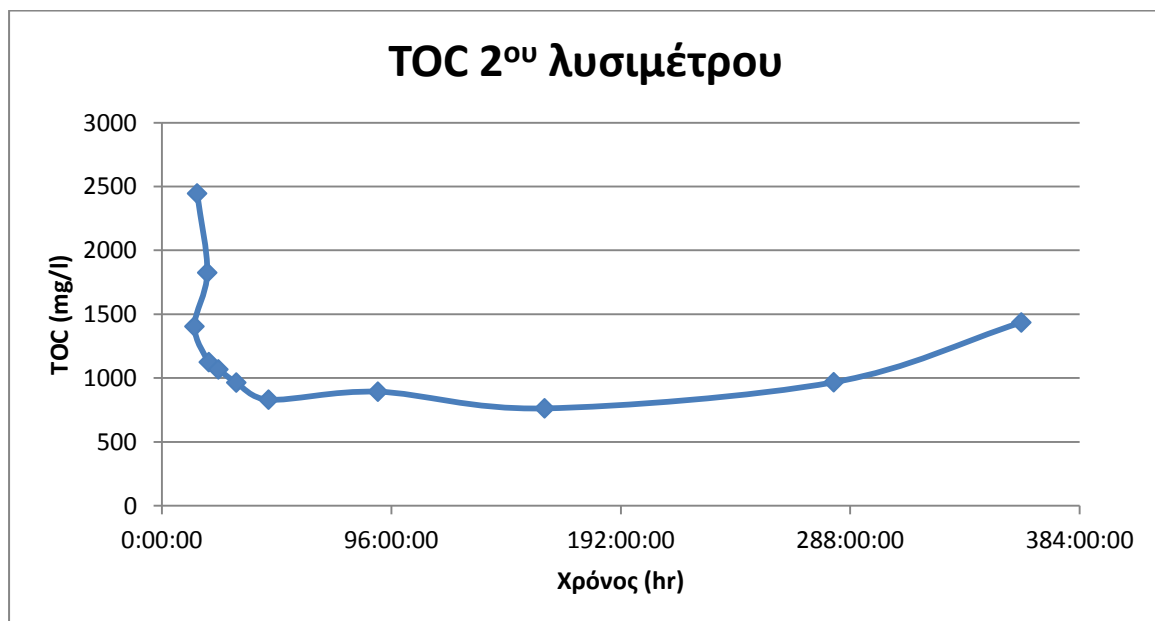
Το BOD₅ είναι η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου που χρησιμοποιείται από ένα δείγμα υγρών για τη διάσπαση του οργανικού φορτίου του με τη βοήθεια μικροοργανισμών στους 25° C και για περίοδο 5 ημερών.

Το COD μετράει τον ολικό οργανικό άνθρακα, με εξαίρεση ορισμένες αρωματικές ενώσεις, όπως το βενζόλιο, οι οποίες δεν οξειδούνται. Ο ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) μετράει τη συγκέντρωση του συνολικού οργανικού άνθρακα σαν CO₂ (σε mg/ lt CO₂). Ανάλογα με τη προέλευση των προς εξέταση υγρών, το COD συνδέεται με το TOC.

Κατά τη διάρκεια των αναλύσεών μας υπολογίσθηκε ο συνολικός οργανικός άνθρακας (TOC), οι τιμές του οποίου κυμάνθηκαν από 1484 mg/lt έως 307,2 mg/lt στο πρώτο λυσίμετρο και από 2446,5 mg/lt έως 763,5 mg/lt στο δεύτερο λυσίμετρο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του συνολικού οργανικού άνθρακα στα στραγγίσματά μας.



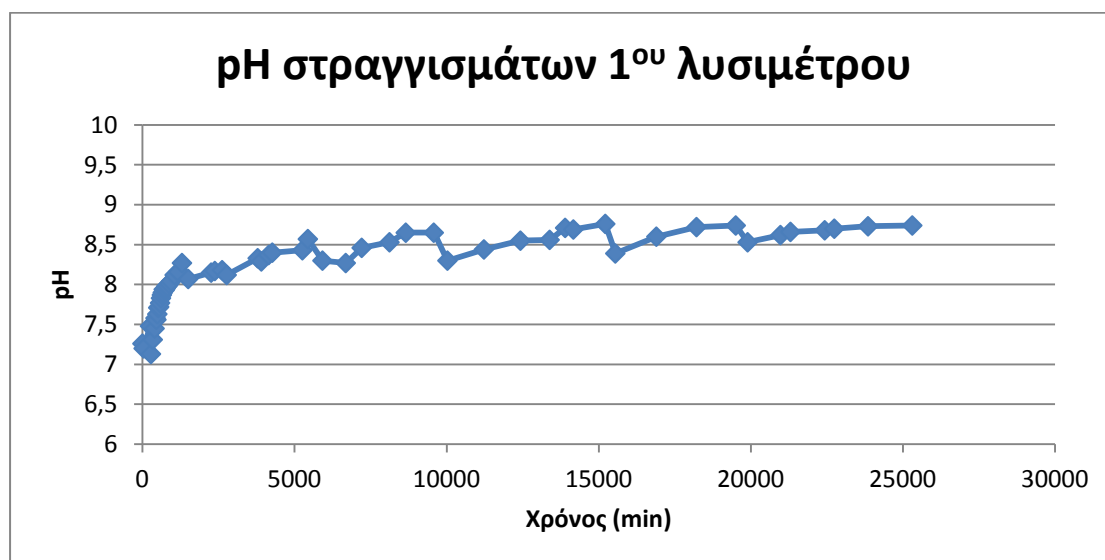
Διάγραμμα 15. Κατανομή μεταβολής του συνολικού οργανικού άνθρακα του πρώτου λυσιμέτρου



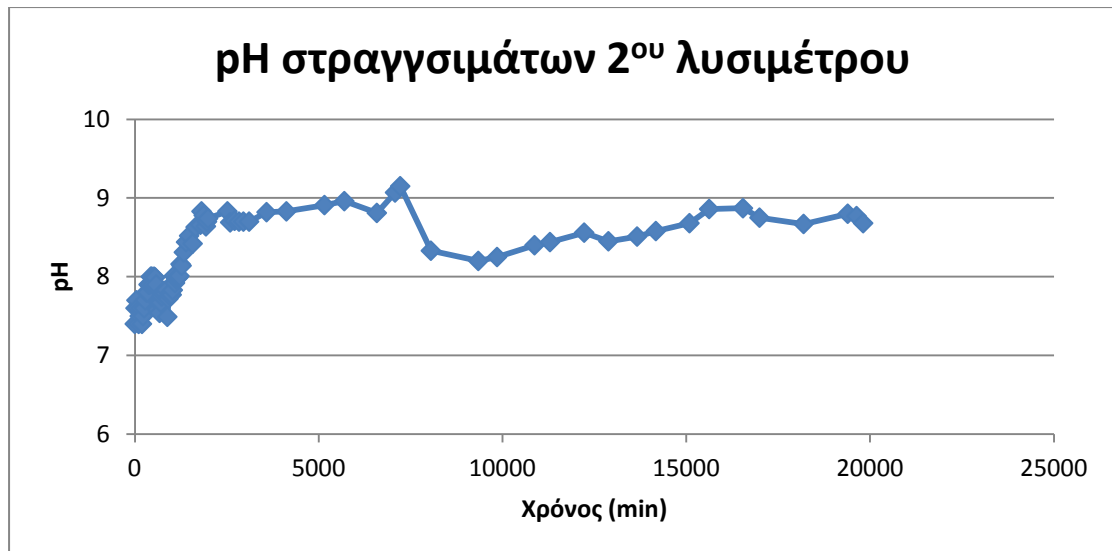
Διάγραμμα 16. Κατανομή μεταβολής του συνολικού οργανικού άνθρακα του δεύτερου λυσιμέτρου

Το pH των στραγγισμάτων αποτελεί μια άλλη παράμετρο σημαντικού ενδιαφέροντος, η διακύμανση του οποίου μπορεί να μας δηλώσει σε ποια φάση αποδόμησης βρίσκονται τα απορρίμματα. Σύμφωνα με τις αναλύσεις που έγιναν στα στραγγίσματα και από τα δυο λυσιμέτρα, το pH κυμάνθηκε από 7,13 έως 8,76 για το πρώτο λυσίμετρο και από 7,4 έως 9,15 για το δεύτερο λυσίμετρο, ακολουθώντας και στις δυο περιπτώσεις μια ανοδική πορεία. Δεδομένου ότι τα

απορρίμματα ελήφθησαν από βάθος 30 μέτρων, η διαδικασία αποδόμησης αυτών ήταν προχωρημένη, πράγμα που επιβεβαιώνεται από τις υψηλές τιμές του pH. Ειδικότερα, η αύξηση αυτή του pH οφείλεται στη μείωση της συγκέντρωσης των οξέων, τα οποία μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Αυτό συμβαίνει στην τρίτη φάση αποδόμησης των απορριμμάτων, κύριο χαρακτηριστικό της οποίας είναι η έντονη μεθανογέννεση. Τα μεθανογενή βακτήρια καταναλώνουν το H₂, το μυρμηγκικό και το οξικό οξύ, οι συγκεντρώσεις των οποίων ήταν πολύ υψηλές στις προηγούμενες φάσεις αποδόμησης, ευνοώντας την αποδόμηση των οργανικών οξέων και την ταχεία αύξηση του μεθανίου, με αποτέλεσμα την άνοδο του pH. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η διακύμανση του pH σε συνάρτηση με το χρόνο (min).



Διάγραμμα 17. Διακύμανση του pH στα στραγγίσματα από το πρώτο λυσίμετρο



Διάγραμμα 18. Διακύμανση του pH στα στραγγίσματα από το δεύτερο λυσίμετρο

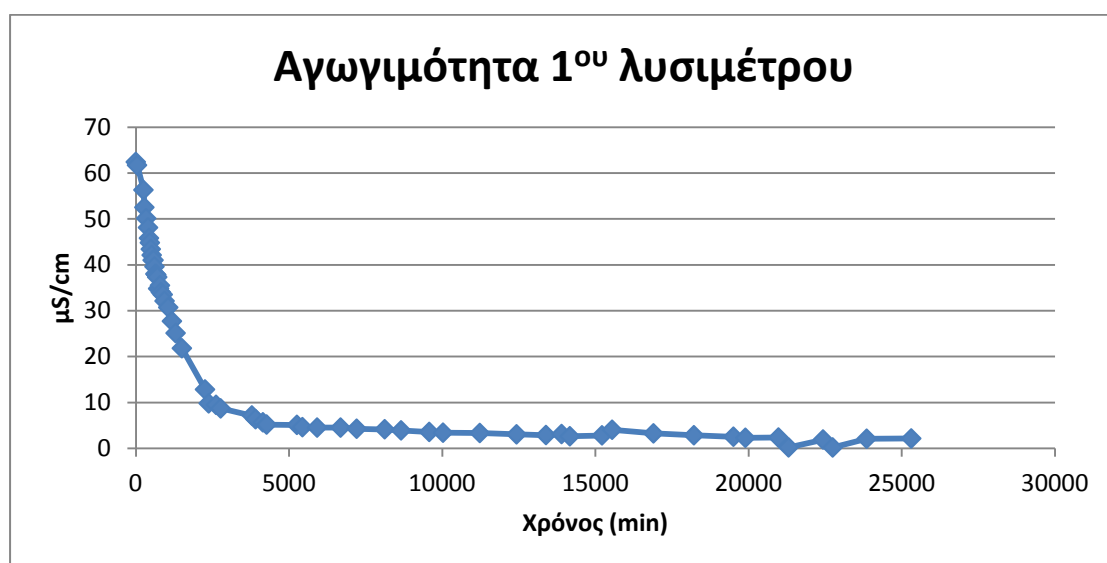
5.6.3. Ηλεκτρική αγωγιμότητα, Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) αποτελεί έναν τρόπο μέτρησης της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα. Το ηλεκτρικό ρεύμα άγεται στο διάλυμα λόγω της κίνησης των ιόντων. Συνεπώς, όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός των ιόντων, τόσο μεγαλύτερη είναι η EC. Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των στραγγισμάτων από τα δυο λυσίμετρα, έδειξαν πως κυμαίνεται αρχικά σε πολύ υψηλά επίπεδα, 62 mS/sec για το πρώτο λυσίμετρο και 52,5 mS/sec για το δεύτερο, ενώ μειώνεται μέχρι τα 1,91 μ S/sec και 4,8 μ S/cm για το πρώτο και δεύτερο λυσίμετρο αντίστοιχα. Ενδεικτικά να αναφέρουμε ότι οι τυπικές αγωγιμότητες για το θαλασσινό νερό κυμαίνονται από 40-48 mS/sec. Η κατανομή της αγωγιμότητας στα δυο λυσίμετρα παρουσιάζεται στα διαγράμματα 11 και 12.

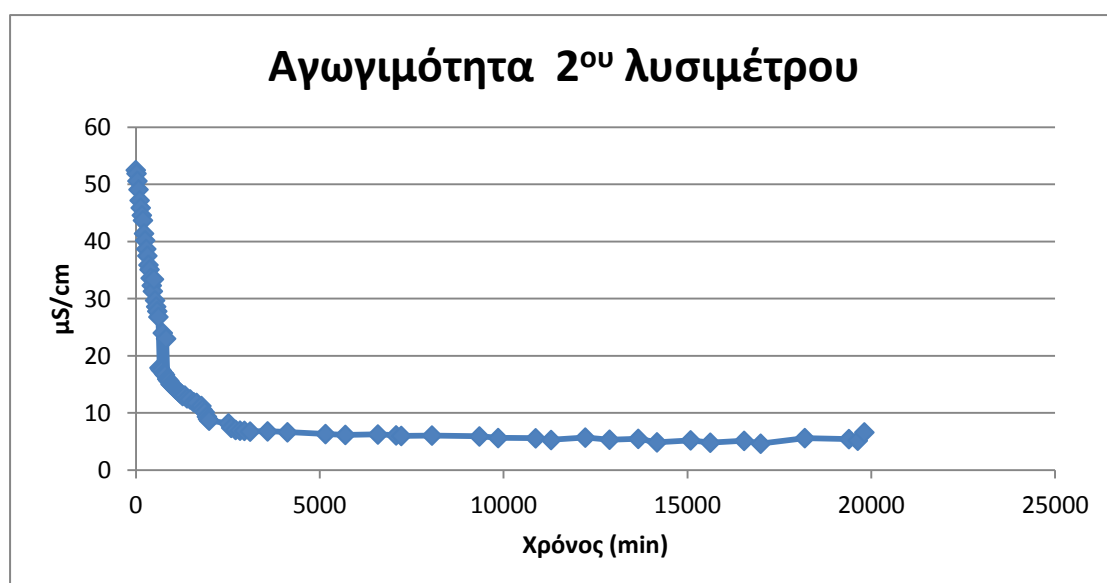
Οι αρχικά τόσο υψηλές συγκεντρώσεις στα στραγγίσματα πιστεύουμε πως οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητα των αποβλήτων μας σε οργανικά υλικά. Η αγωγιμότητα κατά κύριο λόγο οφείλεται στις ανόργανες ενώσεις, ενώ οι οργανικές συνεισφέρουν πάρα πολύ λίγο. Σπουδαίο ρόλο στη κατανόηση της τιμής της EC παίζουν οι συντελεστές αγωγιμότητας των διαφόρων ιόντων. Αυτές αναφέρονται στον ακόλουθο πίνακα.

Συντελεστής αγωγιμότητας fi (μS/cm)			Συντελεστής αγωγιμότητας fi (μS/cm)		
Κατιόντα	meq/l	mgr/l	Ανιόντα	meq/l	mgr/l
Ca ²⁺	52	2.6	HCO ₃ ⁻	43.6	0.72
Mg ²⁺	46.6	3.82	CO ₃ ²⁻	84.6	2.82
K ⁺	72	1.84	Cl ⁻	75.9	2.14
Na ⁺	48.9	2.13	NO ₃ ⁻	71	1.15
			SO ₄ ²⁻	73.9	1.54

Πίνακας 5. Συντελεστής αγωγιμότητας για διάφορα ιόντα (Tchobanoglous and Schroeder, 1897)

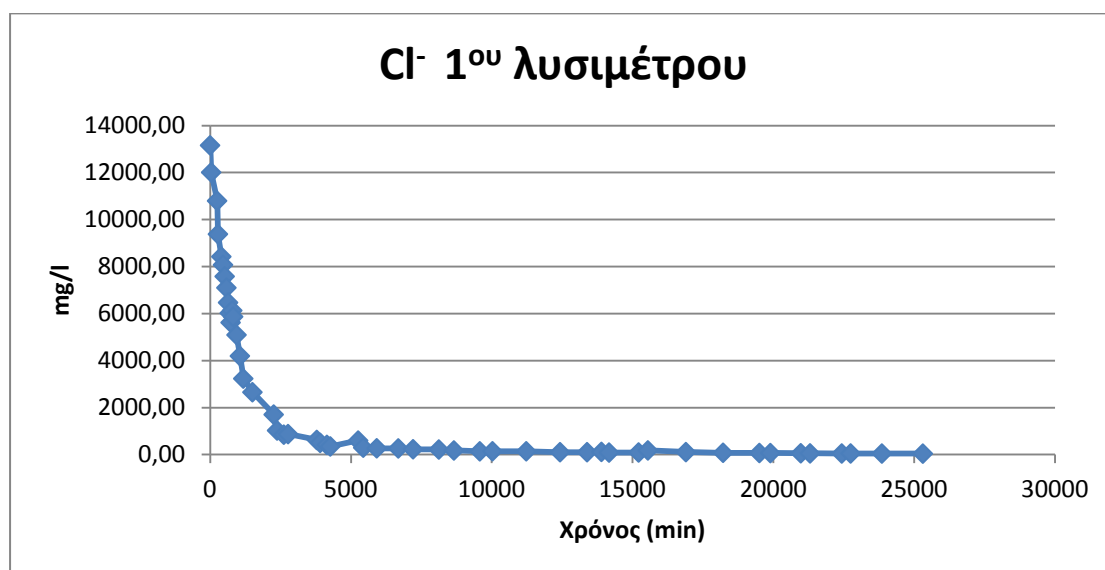


Διάγραμμα 19. Κατανομή της αγωγιμότητας στο πρώτο λυσίμετρο

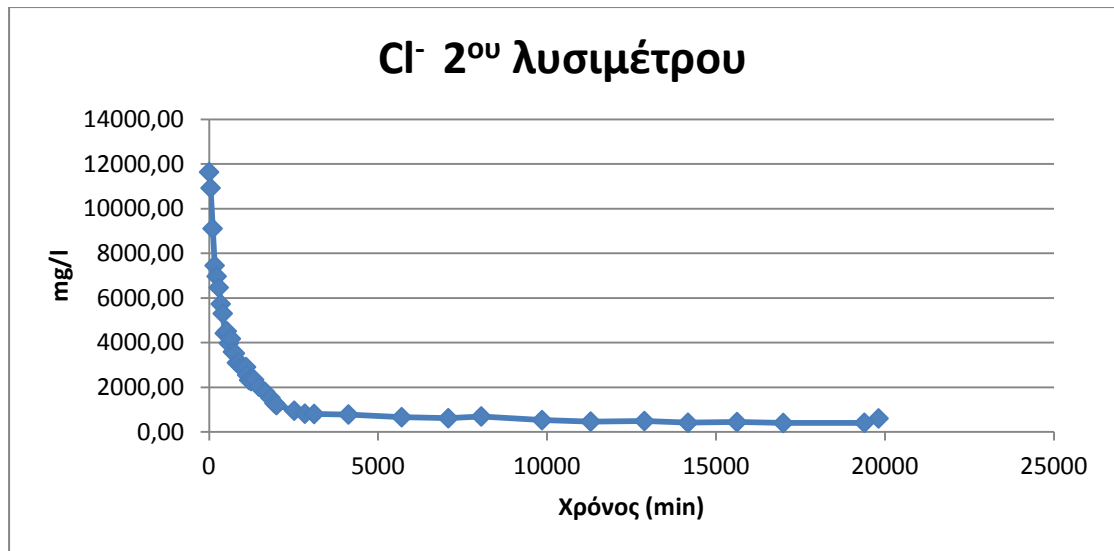


Διάγραμμα 20. Κατανομή της αγωγιμότητας στο δεύτερο λυσίμετρο

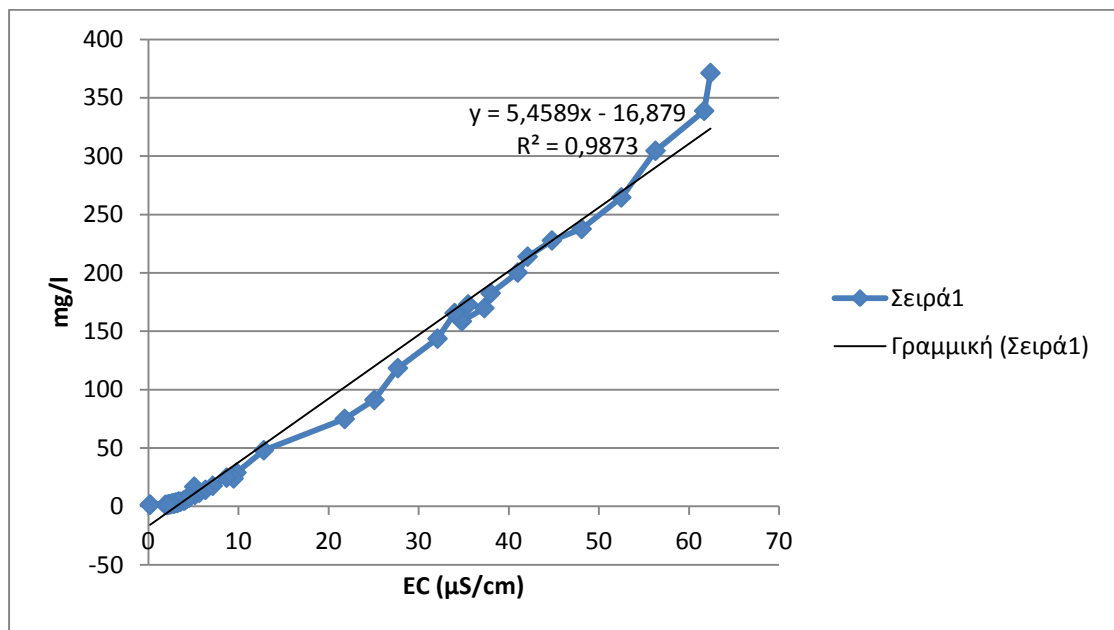
Τα στραγγίσματα αναλύθηκαν επίσης για τη περιεκτικότητά τους σε ιόντα χλωρίου, νατρίου, καλίου και σε θεϊκά ιόντα. Το χλώριο είναι ένας συντηρητικός ρύπος και δεν επηρεάζεται από τις βιοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη μάζα των απορριμμάτων. Ωστόσο, συνιστά μια σοβαρή απειλή εάν διηθηθεί στον υδροφόρο ορίζοντα. Η περιεκτικότητα των στραγγισμάτων σε Cl^- ήταν ιδιαίτερα υψηλή αρχικά, ενώ στη συνέχεια ελαττώθηκε κατά πολύ λόγω της έκπλυσης των απορριμμάτων. Η τιμή του κυμάνθηκε από 13160,56 mg/l έως 43,67 mg/l για το πρώτο λυσιμέτρο και από 11636,90 mg/l έως 403,68 mg/l για το δεύτερο λυσιμέτρο. Οι υψηλές τιμές των ιόντων χλωρίων ήταν αναμενόμενες, λόγω της υψηλής αγωγιμότητας των στραγγισμάτων μας. Παρατηρούμε επίσης πως η κατανομή της αγωγιμότητας με αυτή των ιόντων χλωρίου είναι παρόμοια, οδηγώντας σε μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ αυτών των δυο παραμέτρων. Αν και η συσχέτιση αυτή δε μπορεί να προβλέψει την ύπαρξη επαρκούς αιτιολογικού συνδέσμου μεταξύ των δυο παραμέτρων, ωστόσο η περιεκτικότητα σε χλώριο φαίνεται να είναι ενδεικτική της περιεκτικότητας σε μέταλλα στα στραγγίσματα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τον Reitzel (1990).



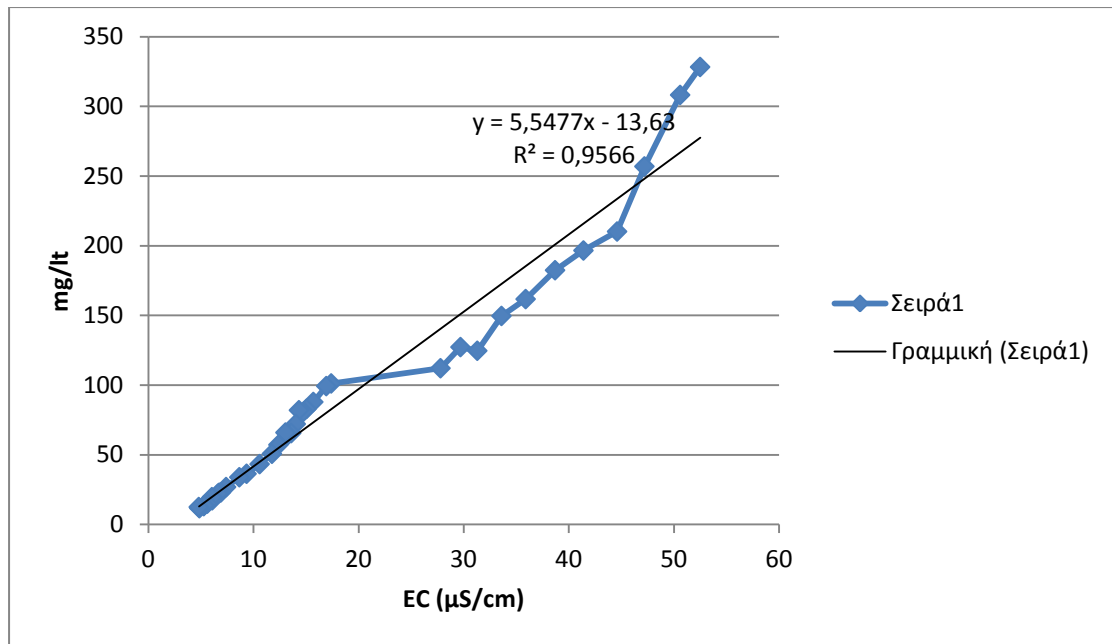
Διάγραμμα 21. Κατανομή ιόντων Cl^- στο πρώτο λυσιμέτρο



Διάγραμμα 22. Κατανομή ιόντων Cl στο δεύτερο λυσίμετρο



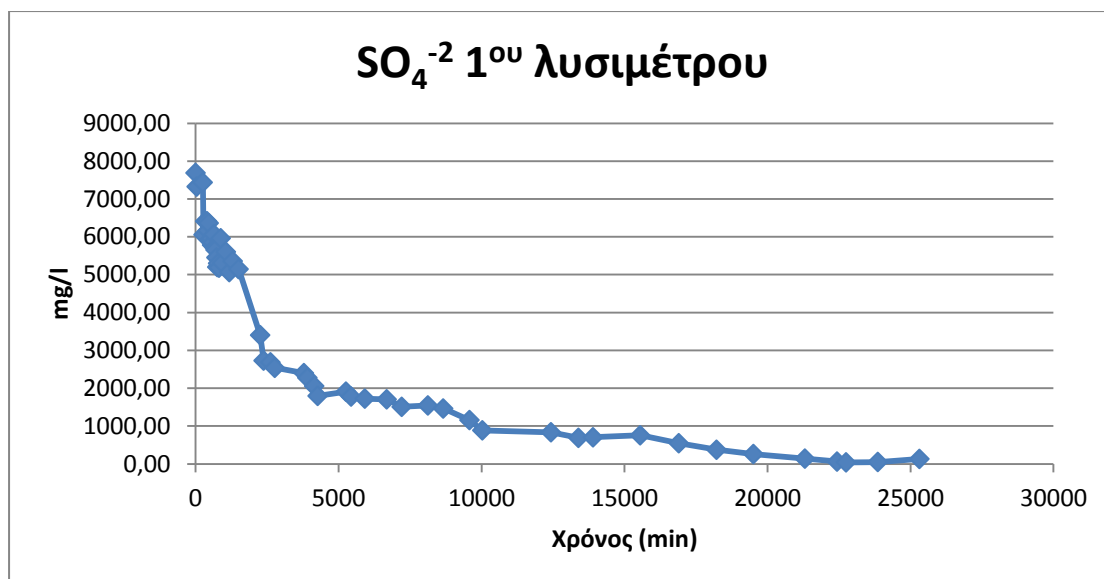
Διάγραμμα 23. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ιόντων Χλωρίου στο πρώτο λυσίμετρο



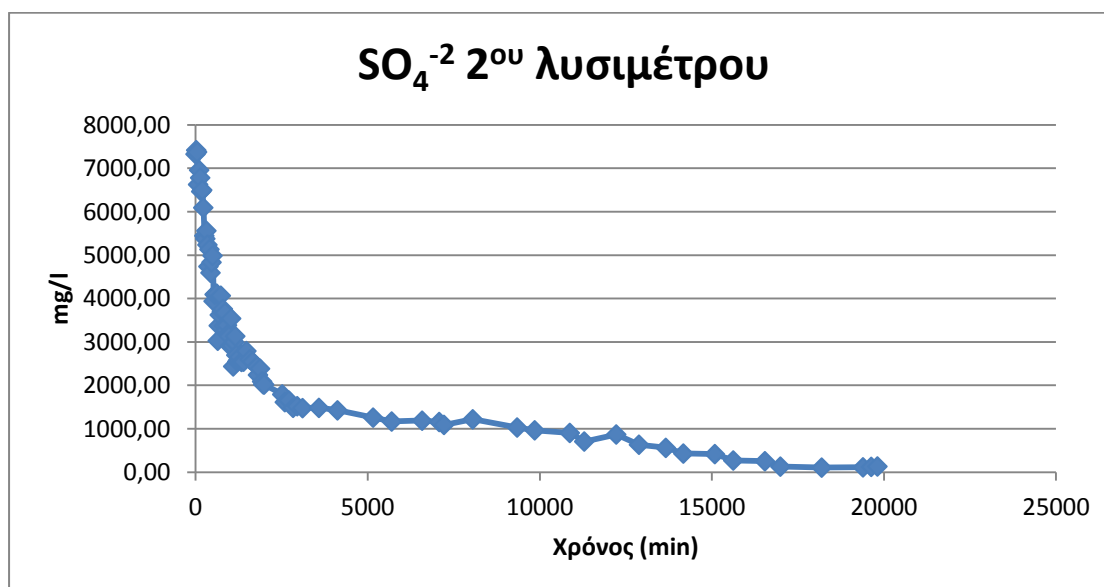
Διάγραμμα 24. Γραμμική συσχέτιση μεταξύ ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ιόντων Χλωρίου στο δεύτερο λυσίμετρο

Βάση της υψηλής αγωγιμότητας που μετρήσαμε στα στραγγίσματά μας, αναμέναμε υψηλές συγκεντρώσεις και στα θειικά ιόντα, πράγμα το οποίο επιβεβαιώθηκε. Παρόλα αυτά, οι τιμές που μετρήσαμε ήταν αρκετά υψηλότερες από τις αναμενόμενες τιμές που δίνονται στη βιβλιογραφία και κυμαίνονταν από 7690mg/l έως 40,8 mg/l για το πρώτο λυσίμετρο και από 7419 mg/l έως 108,25 mg/l στο δεύτερο λυσίμετρο. Η υψηλή περιεκτικότητα των απορριμμάτων σε θειικά ιόντα πιστεύουμε πως οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητα των απορριμμάτων σε οργανικά υλικά. Στα διαγράμματα 15 και 16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κατανομών των θειικών ιόντων και στα δυο λυσίμετρα.

Όπως προαναφέρθηκε, λόγω της υψηλής τιμής του pH των στραγγισμάτων, συμπεράναμε πως το δείγμα απορριμμάτων που τοποθετήσαμε στα λυσίμετρα είχε ήδη φθάσει στη φάση της μεθανογέννεσης. Σύμφωνα με τον Ehrling (1988) οι τιμές των θειικών ιόντων είναι χαμηλότερες στη φάση της μεθανογέννεσης λόγω της μικροβιακής μείωσης των θειικών ιόντων σε σουλφίδια, γεγονός που υποδηλώνει ότι η περιεκτικότητα των απορριμμάτων σε θειικά ιόντα ήταν πολύ μεγαλύτερη στις προηγούμενες φάσεις αποδόμησης αυτών.

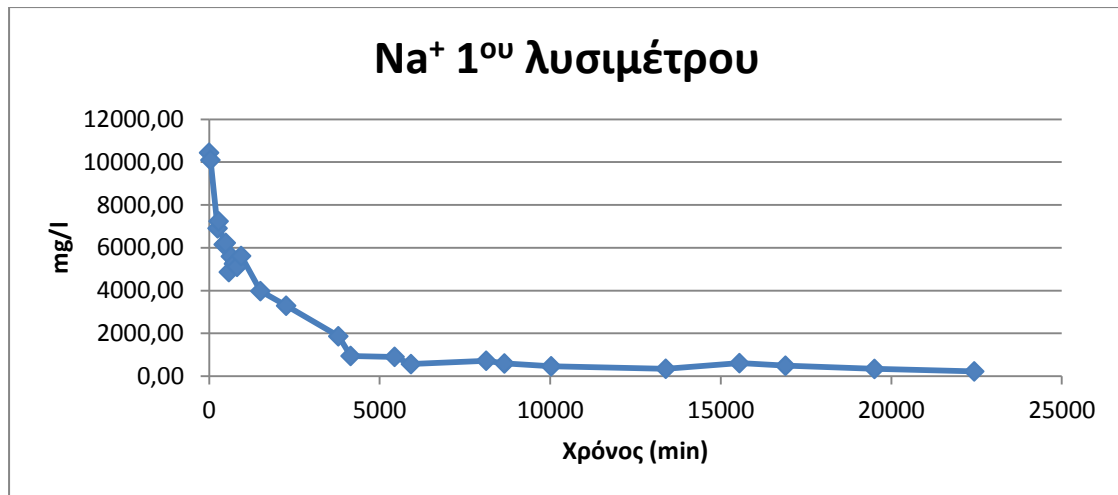


Διάγραμμα 25. Κατανομή SO_4^{-2} στο πρώτο λυσίμετρο

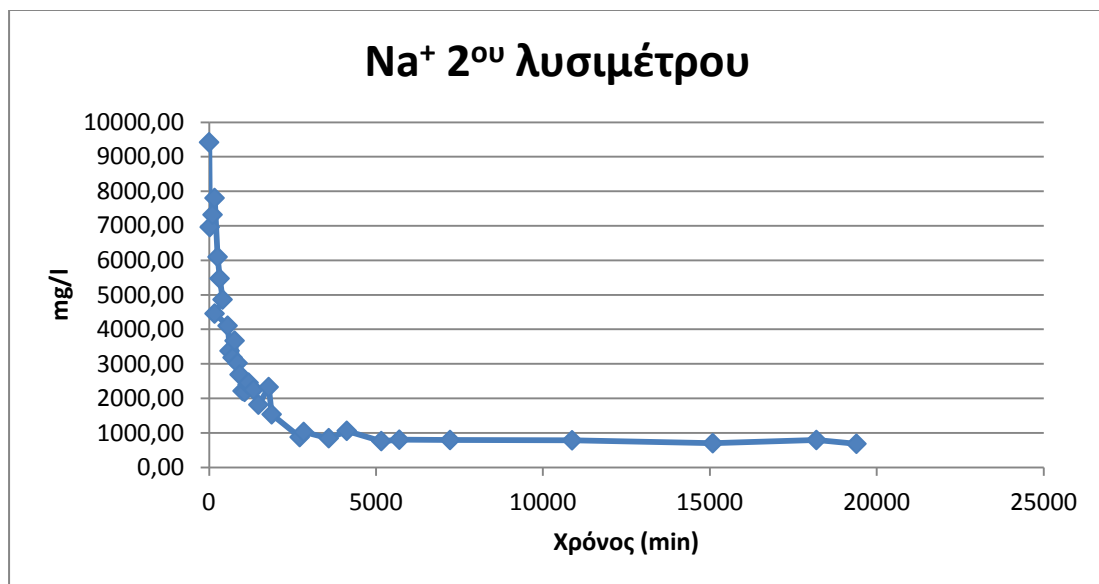


Διάγραμμα 26. Κατανομή SO_4^{-2} στο δεύτερο λυσίμετρο

Αντίστοιχη με την κατανομή της αγωγιμότητας ήταν και η κατανομή των ιόντων Na^+ , οι τιμές των οποίων ήταν αρκετά υψηλές. Έτσι, για το πρώτο λυσίμετρο οι τιμές των ιόντων νατρίου κυμάνθηκαν από 10366,56 mg/l έως 221,75 mg/l, ενώ για το δεύτερο λυσίμετρο από 9418,37 mg/l έως 449,81 mg/l. Οι υψηλές τιμές της αγωγιμότητας σε συνδυασμό με τις υψηλές συγκεντρώσεις των διαλυτών ιόντων στα στραγγίσματα, δηλώνουν πως τα διαλυτά άλατα υπόκεινται σε έκπλυση.

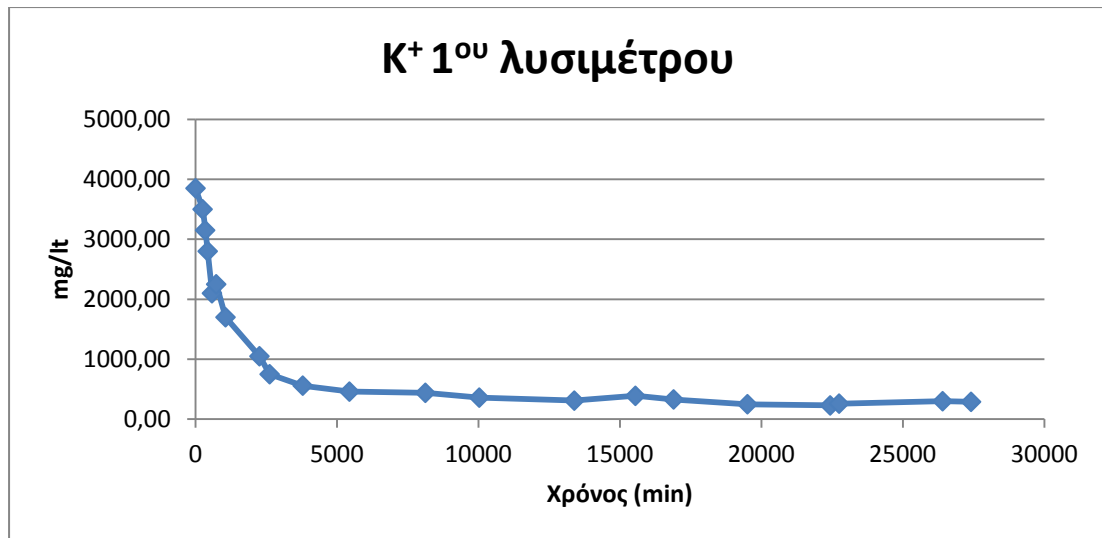


Διάγραμμα 27. Κατανομή των ιόντων Νατρίου στο πρώτο λυσίμετρο

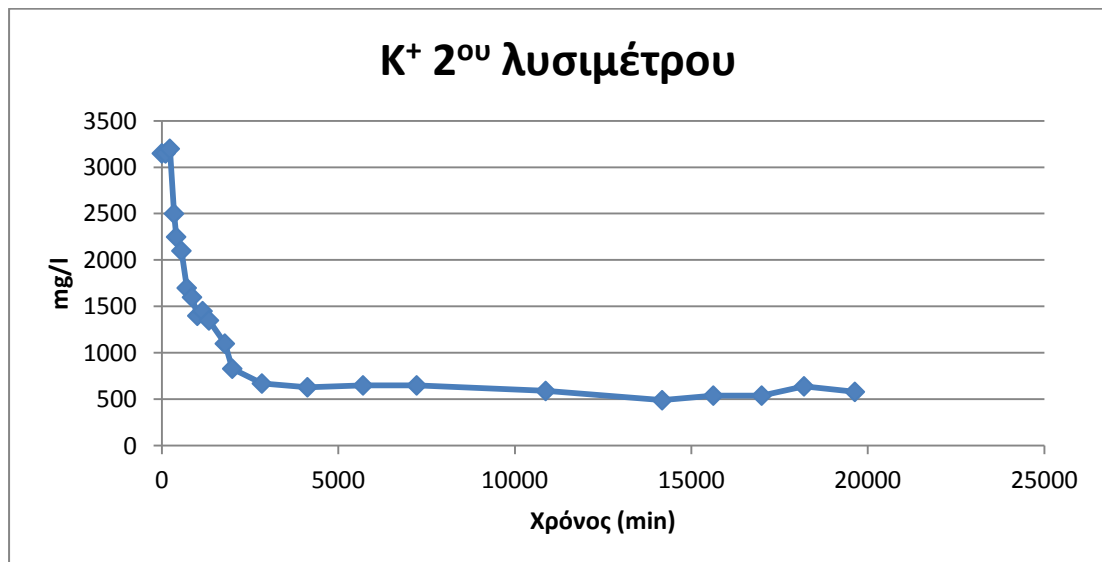


Διάγραμμα 28. Κατανομή των ιόντων Νατρίου στο δεύτερο λυσίμετρο

Παράλληλα, μετρήθηκαν και τα ιόντα καλίου, τα οποία βάση της βιβλιογραφίας αναμέναμε να κυμαίνονται σε αρκετά υψηλά επίπεδα, πράγμα το οποίο και συνέβη. Οι τιμές για τα ιόντα καλίου κυμάνθηκαν από 3850 mg/l έως 230 mg/l για το πρώτο λυσίμετρο και από 3150 mg/l έως 490 mg/l για το δεύτερο λυσίμετρο. Παρατηρούμε πως η συμπεριφορά των ιόντων καλίου είναι παρόμοια με αυτή των ιόντων νατρίου. Στα διαγράμματα 19 και 20 δίνονται οι κατανομές των ιόντων καλίου.



Διάγραμμα 29. Κατανομή των ιόντων Καλίου στο πρώτο λυσίμετρο



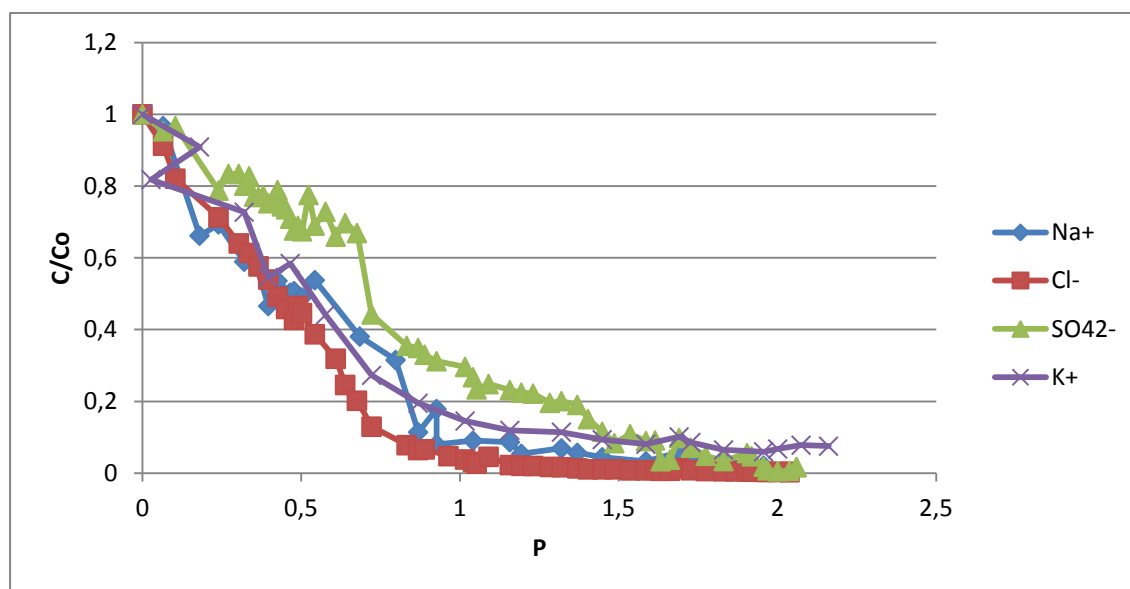
Διάγραμμα 30. Κατανομή των ιόντων Καλίου στο δεύτερο λυσίμετρο

Παρατηρώντας τα διαγράμματα της κατανομής τόσο του Cl^- , όσο του Na^+ και των SO_4^{2-} , συμπεραίνουμε πως τα λυσίμετρα υπόκεινται στο φαινόμενο της έκπλυσης. Η συγκέντρωση των στοιχείων αυτών στα στραγγίσματα μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου. Λόγω του γεγονότος ότι ο ρυθμός τροφοδοσίας του λυσιμέτρου με ρύπους είναι μηδέν, η αρχική συγκέντρωση σε ρύπους των απορριμμάτων $C(0)$ αντιστοιχεί σε C_0 .

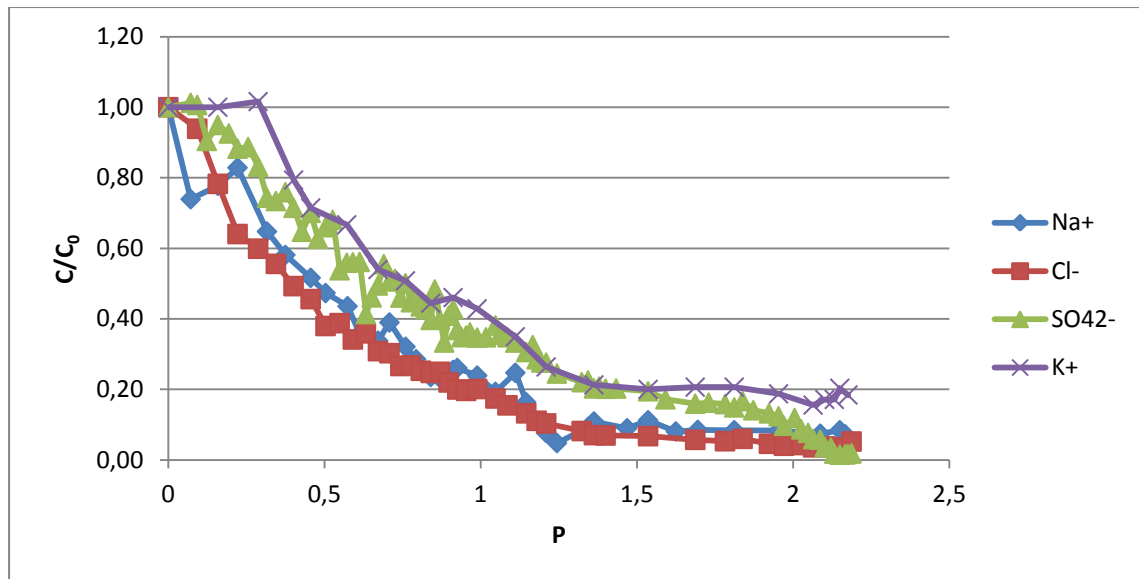
Τα αποτελέσματα της έκπλυσης των Cl^- , Na^+ και SO_4^{2-} των απορριμμάτων μέσα στο λυσίμετρο παρουσιάζονται υπό μορφή καμπύλης που συσχετίζει τη σχετική συγκέντρωση C/C_0 με τον αδιάστατο λόγο P (pore volume). Ως C ορίζεται η

συγκέντρωση του διαλύματος στην έξοδο, στη συγκεκριμένη περίπτωση στα στραγγίσματα, C_0 η αρχική συγκέντρωση του διαλύματος, στο πείραμά μας αποτελεί την αρχική συγκέντρωση των στραγγισμάτων και ως P ο λόγος του όγκου του διαλύματος που εκρέει από τη στήλη σε κάποιο χρόνο t προς τον όγκο του νερού (διαλύτη) που βρίσκεται μέσα στη στήλη.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η έκπλυση των Na^+ , K^+ , Cl^- , και SO_4^{2-} την ίδια χρονική στιγμή. Σύμφωνα με τα διαγράμματα, στο πρώτο λυσίμετρο τα ιόντα χλωρίου είναι αυτά που εκπλένονται γρηγορότερα από τη μάζα των αποβλήτων, ακολουθούν με μικρή διαφορά τα ιόντα νατρίου, στη συνέχεια τα ιόντα καλίου και τέλος τα θειικά ιόντα παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο χρόνο κατακράτησης. Παρομοίως, στο δεύτερο λυσίμετρο, γρηγορότερα εκπλένονται τα ιόντα χλωρίου, ακολουθούν τα ιόντα νατρίου, μετά τα θειικά ιόντα και με μικρή διαφορά τα ιόντα καλίου. Δεδομένου βέβαια πως μέσα στη μάζα των απορριμμάτων υπάρχει και χώμα, θα περιμέναμε τα θετικά φορτισμένα ιόντα, τα K^+ και τα Na^+ στη συγκεκριμένη περίπτωση, να προσροφούνται από το έδαφος (Ι.Α.Κ.). Επίσης, είναι γνωστό πως η Ι.Α.Κ. αυξάνει με τη περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και με το pH, κάτι το οποίο όμως δεν επαληθεύεται από τα αποτελέσματα των μετρήσεων του πειράματός μας.

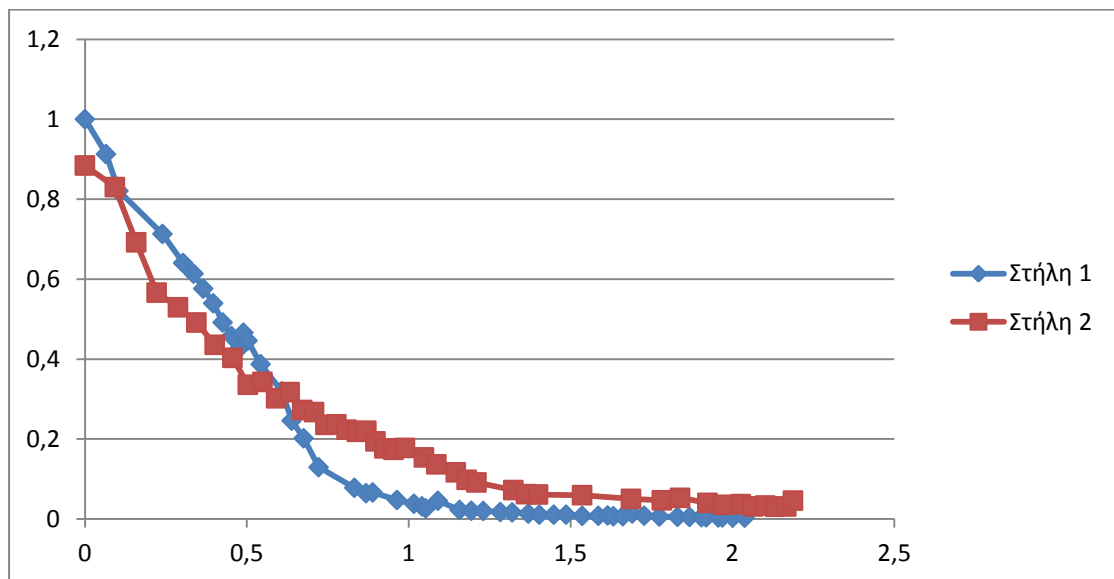


Διάγραμμα 31. Εκθετική μείωση της συγκέντρωσης των ιόντων Cl^- , Na^+ , K^+ και SO_4^{2-} στο πρώτο λυσίμετρο, με αρχική συγκέντρωση C_0 την αρχική συγκέντρωση των στραγγισμάτων

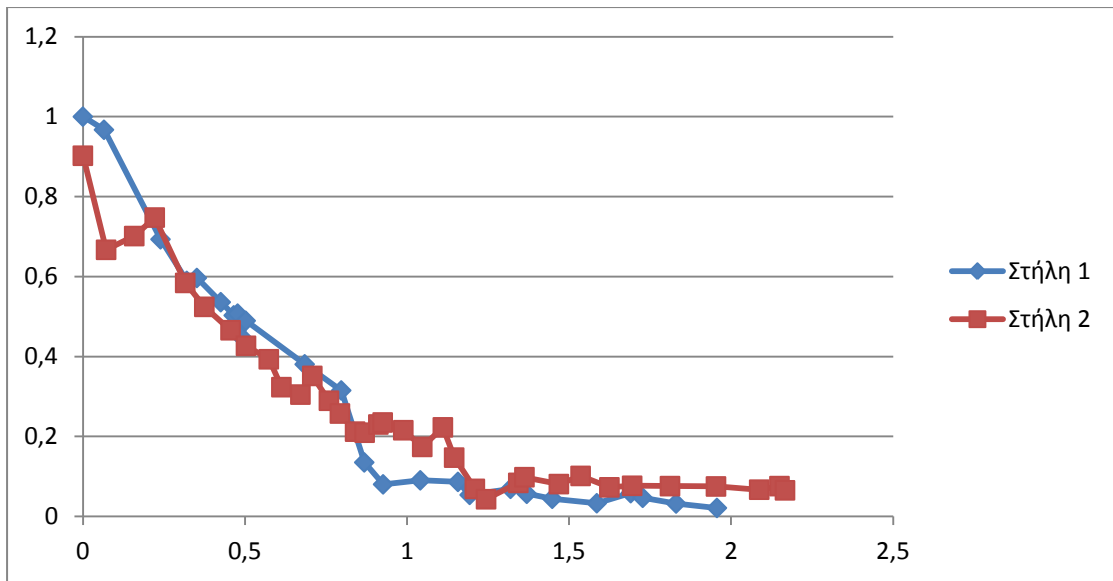


Διάγραμμα 32. Εκθετική μείωση της συγκέντρωσης των ιόντων Cl⁻, Na⁺, K⁺ και SO₄²⁻ στο δεύτερο λυσίμετρο, με αρχική συγκέντρωση C₀ την αρχική συγκέντρωση των στραγγισμάτων

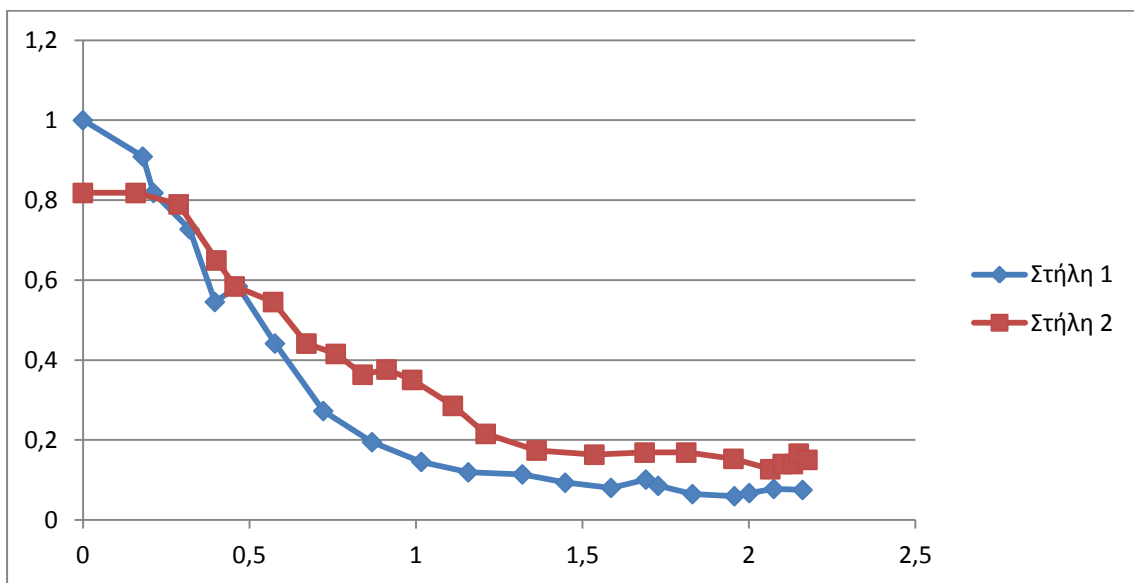
Παράλληλα, συγκρίνοντας όλα τα παραπάνω ιόντα ως προς την έκπλυσή τους και από το δυο λυσίμετρα, παρατηρούμε πως αυτά εκπλένονται με τον ίδιο περίπου τρόπο, με εξαίρεση τα νιτρικά ιόντα τα οποία έχουν διαφορετική συμπεριφορά, λόγω της διαφοράς συγκέντρωσης των ιόντων αυτών στα δυο λυσίμετρα.



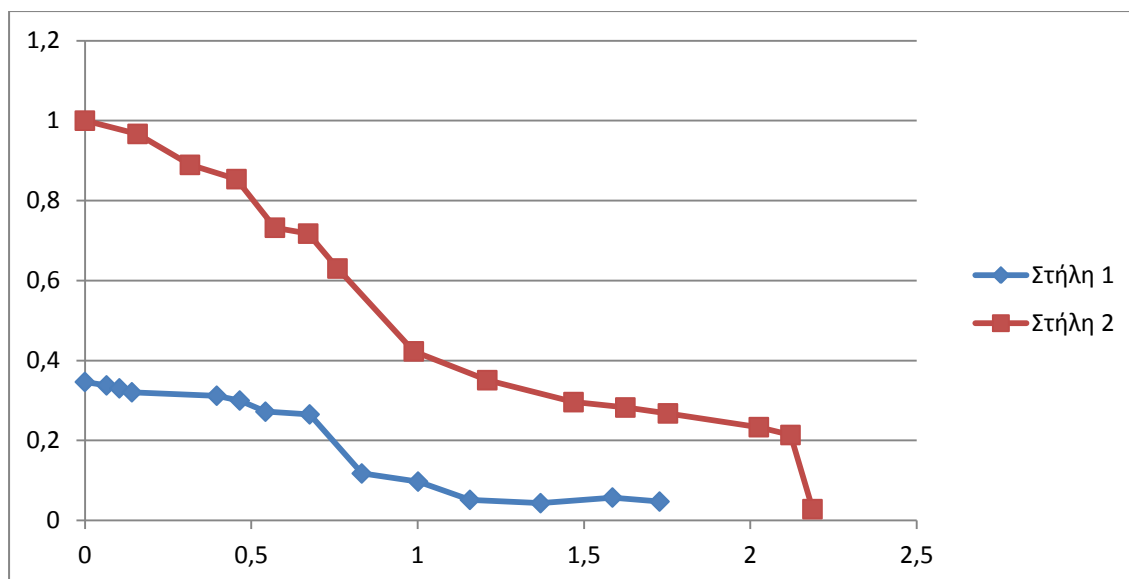
Διάγραμμα 33. Σύγκριση έκπλυσης των ιόντων χλωρίου και από τα δυο λυσίμετρα



Διάγραμμα 34. Σύγκριση έκπλυσης των ιόντων νατρίου και από τα δυο λυσίμετρα



Διάγραμμα 35. Σύγκριση έκπλυσης των ιόντων καλίου και από τα δυο λυσίμετρα



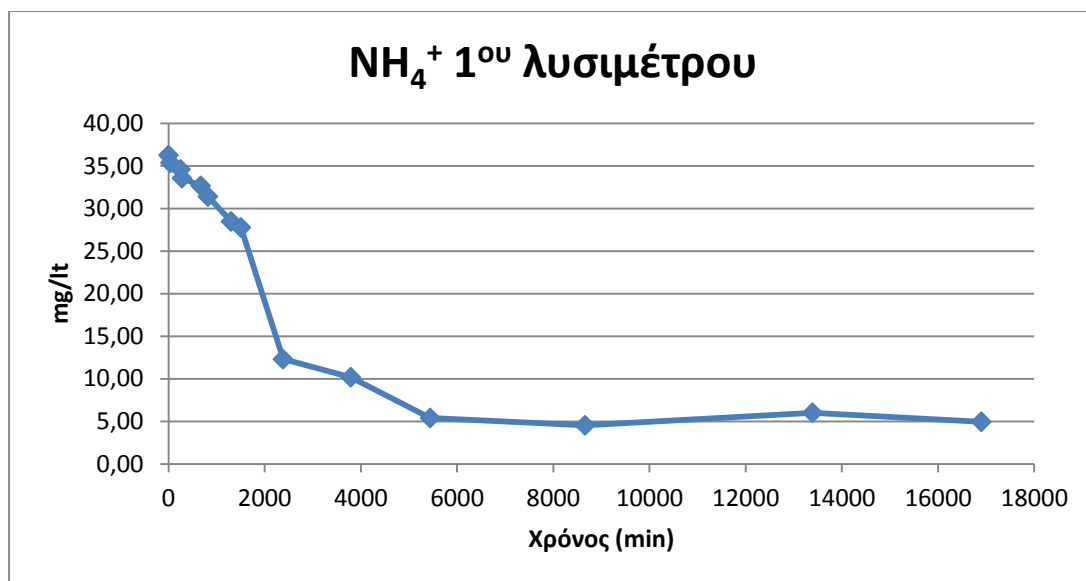
Διάγραμμα 36. Σύγκριση έκπλυσης των νιτρικών ιόντων και από τα δυο λυσίμετρα

5.6.4. Μορφές αζώτου

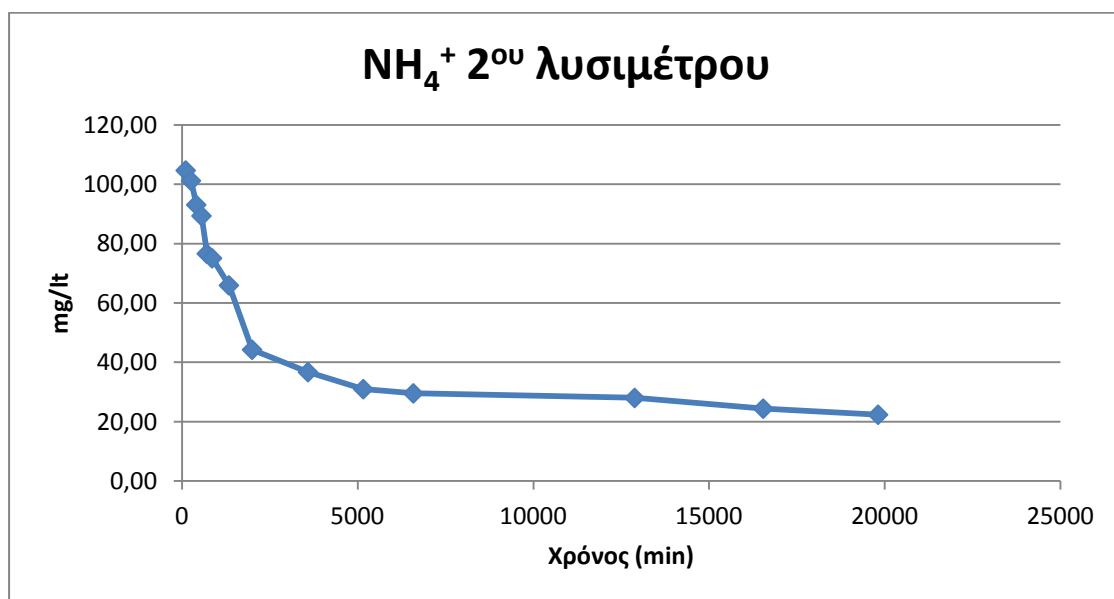
Δεδομένου ότι και στα δυο λυσίμετρα εφαρμόσαμε συνθήκες κατάκλισης, μέσα στη μάζα των απορριμμάτων επικρατούσαν ισχυρά αναερόβιες συνθήκες. Εξ αιτίας των αναερόβιων αυτών συνθηκών, οι μετρήσεις του νιτρικού και του νιτρώδους αζώτου των στραγγισμάτων ήταν πολύ μικρές, σχεδόν μηδενικές.

Αντίθετα, στα στραγγίσματά μας εντοπίστηκαν ποσότητες αμμωνιακού αζώτου. Τα ελληνικά απορρίμματα, όπως προαναφέρθηκε, είναι πλούσια σε οργανικά απόβλητα, συνεπώς τα στραγγίσματα που προκύπτουν από αυτά είναι πλούσια σε άζωτο. Οι υψηλές τιμές του αζώτου, παρατηρούνται κυρίως στα στραγγίσματα από τα φρέσκα απορρίμματα λόγω της ραγδαίας αποδόμησης του οργανικού αζώτου. Στη συνέχεια, οι τιμές αυτές πέφτουν εξαιτίας της εξάτμισης της αμμωνίας. Στα στραγγίσματα που προέκυψαν από τα λυσίμετρα, οι τιμές των αμμωνιακών ιόντων δεν ήταν ιδιαίτερα υψηλές, όπως θα αναμέναμε σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Οι τιμές αυτές κυμάνθηκαν από 32,26 mg/lt έως 4,95 mg/lt για το πρώτο λυσίμετρο και από 104,66 mg/lt έως 2,96 mg/lt για το δεύτερο λυσίμετρο, ακολουθώντας μια πτωτική πορεία.

Αντίθετα, το ολικό άζωτο κυμάνθηκε σε υψηλότερα επίπεδα με τιμές από 2150mg/l έως 497,6mg/l για το πρώτο λυσίμετρο, και από 2377mg/l έως 665,5mg/l για το δεύτερο λυσίμετρο. Το γεγονός αυτό μας κάνει να πιστεύουμε πως ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό των οργανικών ενώσεων δεν είχε διασπαστεί.



Διάγραμμα 37. Κατανομή NH_4^+ στο πρώτο λυσίμετρο



Διάγραμμα 38. Κατανομή NH_4^+ στο δεύτερο λυσίμετρο

5.6.5. Βαρέα μέταλλα

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία ως προς τις αναφερόμενες συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων από διαφορετικούς χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Ωστόσο, οι μέσες συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων είναι αρκετά χαμηλές. Αυτό έχει αποδειχτεί από διάφορες μελέτες στις οποίες μελετητές έχουν μετρήσει τις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα που προέρχονται τόσο από πλήρους κλίμακας χώρους υγειονομικής ταφής, όσο από κύτταρα χωματερών και από εργαστηριακές μελέτες. Όλες αυτές οι μελέτες καταλήγουν στο ίδιο

συμπέρασμα, δηλαδή ότι η περιεκτικότητα των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα δεν αποτελεί μεγάλη ανησυχία (Christensen et al., 1999; Robinson, 1995; Reinhart and Grosh, 1999; Revans et al., 1999; Kjeldsen and Christophersen, 2001; Christensen et al., 1994).

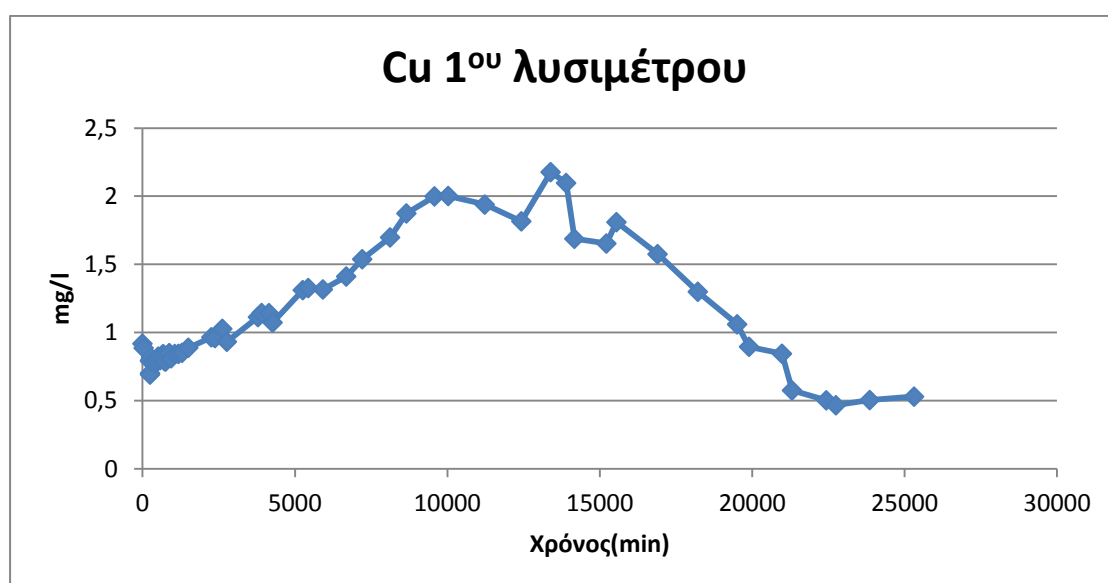
Η αιτία των χαμηλών συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα που προέρχονται από τη φάση της μεθανογένεσης δεν είναι η μη ύπαρξη βαρέων μετάλλων στα απορρίμματα. Οι ισορροπίες των βαρέων μετάλλων για τους χώρους υγειονομικής ταφής έχουν δείξει ότι λιγότερο από το 0,02% των βαρέων μετάλλων που περιέχονται στα απόβλητα, εκπλύνονται από τη χωματερή μετά από 30 χρόνια (Flyhammer, 1995; Aulin and Neretnieks, 1995; Belevi and Baccini, 1989). Πιστεύεται, πως και η προσρόφηση και η κατακρήμνιση αποτελούν σημαντικούς μηχανισμούς για την ακινητοποίηση των μετάλλων και για τις επακόλουθες χαμηλές συγκεντρώσεις τους στα στραγγίσματα. Τα απόβλητα που περιέχουν στρώσεις εδάφους και οργανική ύλη, ειδικά στη φάση μεθανογένεσης με τιμές pH από ουδέτερες μέχρι αλκαλικές, έχουν σημαντική προσροφητική ικανότητα (Bozkurt, 1999). Επιπλέον, η διαλυτότητα πολλών μετάλλων σε συνδυασμό με τη παρουσία των σουλφιδίων και των ανθρακικών αλάτων που περιέχονται σε αυτή τη φάση αποδόμησης των απορριμμάτων, είναι χαμηλή. Η καθίζηση των σουλφιδίων που σχηματίζονται από τη μείωση των θεικών ιόντων κατά τη διάρκεια της αποδόμησης των απορριμμάτων αναφέρεται συχνά ως η αιτία των χαμηλών συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα (Christensen et al., 2000; Christensen et al., 1994).

Τα κολλοειδή του εδάφους αποτελούν επίσης έναν πολύ σημαντικό παράγοντα, διότι επηρεάζουν τη κινητικότητα των βαρέων μετάλλων (Gounaris et al., 1993). Οι συγκεντρώσεις των μετάλλων που μετριούνται σε ένα δείγμα μπορεί να εξαρτώνται ισχυρά από το ποσοστό της κολλοειδούς ουσίας που υπάρχει στο δείγμα, καθώς και από τον χειρισμό του δείγματος. Η παρουσία των βαρέων μετάλλων στα κολλοειδή των στραγγισμάτων μπορεί να επηρεάζουν, εκτός από τη συγκέντρωση που μετράται στο δείγμα, τη συμπεριφορά των βαρέων μετάλλων στη εγκατάσταση επεξεργασίας των στραγγισμάτων ή στο περιβάλλον, εάν τα στραγγίσματα περάσουν στα επιφανειακά ή τα υπόγεια νερά.

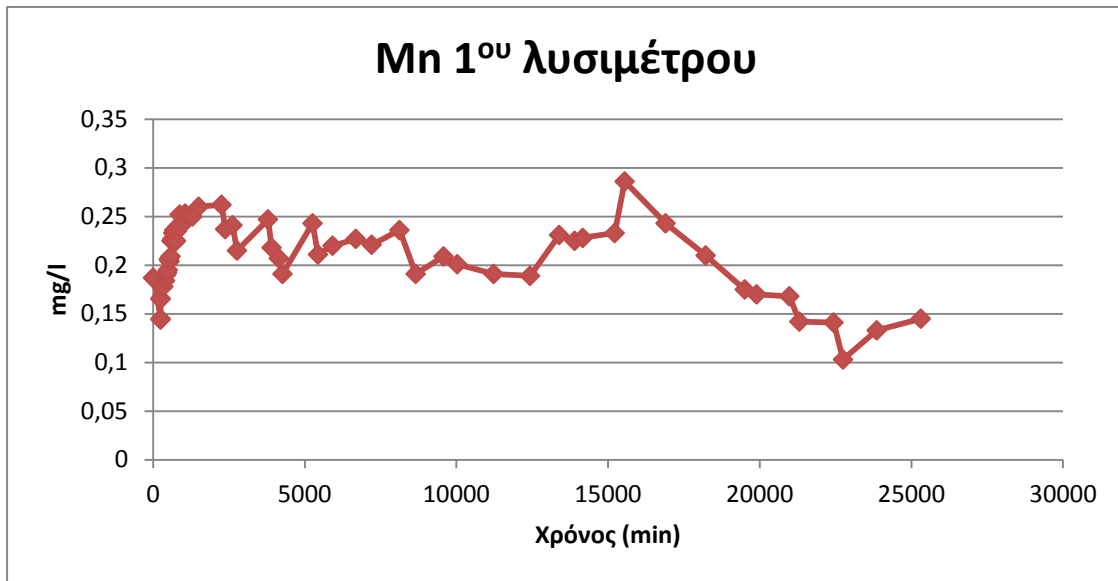
Ο Gounaris et al. (1993) ανέφερε πως σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής στην Αμερική, ένα σημαντικό ποσοστό των Zn, Pb και Cr βρίσκονταν στα κολλοειδή κλάσματα, ενώ ο σίδηρος (Fe) βρέθηκε ως επί το πλείστον στο κολλοειδές κλάσμα. Οι Klein and Niessner (1998) βρήκαν σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής στη Γερμανία πως η μεγαλύτερη ποσότητα των βαρέων μετάλλων ήταν συνδεδεμένη με τη κολλοειδή ουσία.

Στα στραγγίσματα από τα λυσίμετρα του πειράματός μας μετρήθηκαν τα οκτώ πιο βασικά μέταλλα, μέσω της ατομικής απορρόφησης. Από αυτά, στη πρώτη στήλη δεν

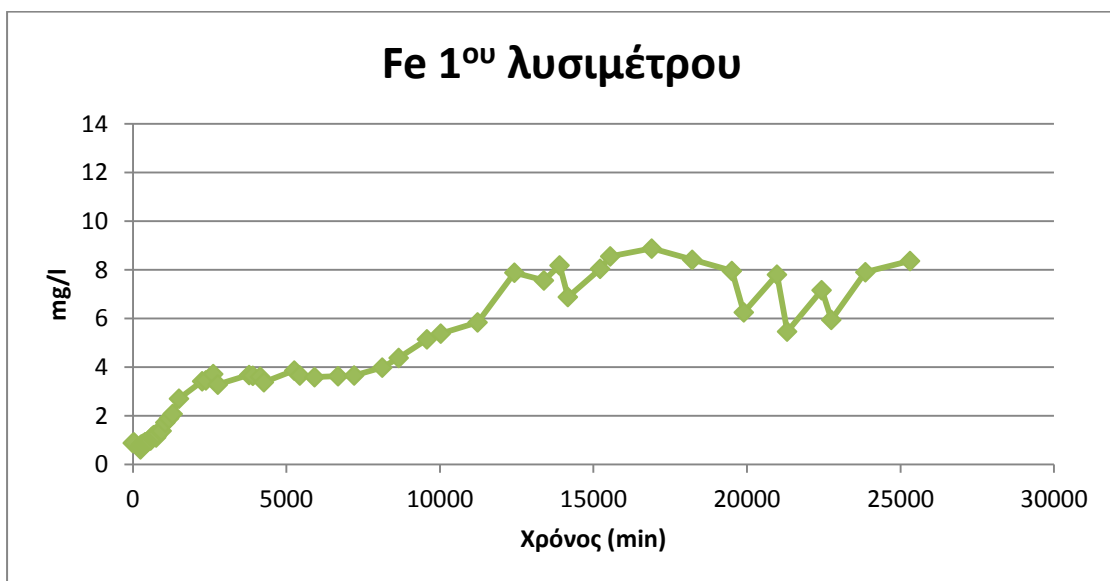
ανιχνεύτηκε ούτε το χρώμιο (Cr), ούτε ο μόλυβδος (Pb), ενώ οι συγκεντρώσεις του καδμίου (Cd) ήταν πολύ μικρές, σχεδόν μηδενικές. Αντίθετα, οι συγκεντρώσεις του χαλκού (Cu) κυμάνθηκαν από 2,177mg/l έως 0,452 mg/l, του μαγγανίου (Mn) από 0,286mg/l έως 0,103 mg/l, του σιδήρου (Fe) από 0,732 mg/l έως 12,13 mg/l, του νικελίου (Ni) 0,264 mg/l έως 1,3 mg/l και του ψευδαργύρου (Zn) από 0,5056 mg/l έως 0,9818 mg/l. Στο δεύτερο λυσίμετρο δεν ανιχνεύθηκε επίσης το χρώμιο (Cr), ο μόλυβδος (Pb) και το κάδμιο (Cd). Η συγκέντρωση του χαλκού (Cu) κυμάνθηκε από 0,54 mg/l έως 2,967 mg/l, του μαγγανίου (Mn) από 0,087 mg/l έως 0,644 mg/l, του σιδήρου (Fe) από 2,03 mg/l έως 39,41 mg/l, του νικελίου (Ni) από 0,826 mg/l έως 2,467 mg/l και του ψευδαργύρου (Zn) από 1,132 mg/l έως 4,011 mg/l. Οι συγκεντρώσεις όλων των μετάλλων είναι σχετικά χαμηλές με εξαίρεση τη συγκέντρωση του σιδήρου, που και στα δυο λυσίμετρα φαίνεται να αυξάνεται με τη πάροδο του χρόνου. Η μεγάλη συγκέντρωση του σιδήρου πιστεύουμε πως οφείλεται στην ύπαρξη σιδερένιων αντικειμένων που υπήρχαν μέσα στη μάζα των απορριμμάτων μας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αρχικά μέσα στο κύτταρο του χώρου υγειονομικής ταφής επικρατούν αερόβιες συνθήκες, συνεπώς υπάρχει διαθέσιμο οξυγόνο. Ο σίδηρος αντιδρά με το οξυγόνο και το νερό σχηματίζοντας οξείδια του σιδήρου, τη λεγόμενη σκουριά. Τα σίδηρα που συνυπήρχαν μεταξύ άλλων στα απόβλητα, ήταν ήδη σκουριασμένα, συνεπώς τα οξείδια του σιδήρου παρασύρονταν από το νερό και εξέρχονταν από τη μάζα των απορριμμάτων μέσα στα στραγγίσματα. Επιπλέον, η παρουσία νατρίου, η συγκέντρωση του οποίου στα στραγγίσματά μας ήταν ιδιαίτερα μεγάλη, διευκολύνει την οξείδωση. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι κατανομές των βαρέων μετάλλων σε σχέση με τον χρόνο και στα δυο λυσίμετρα.



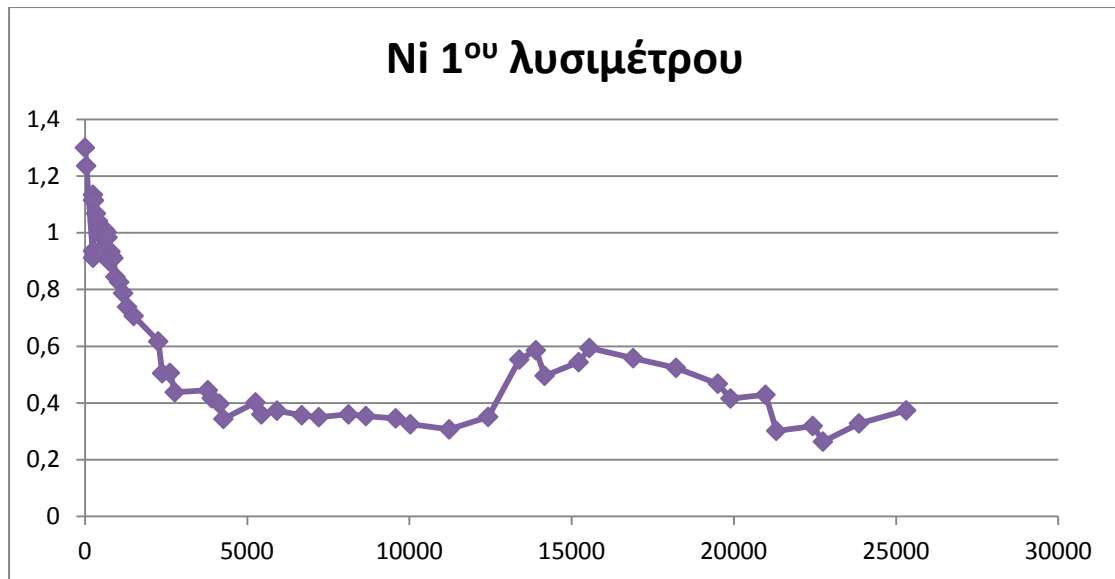
Διάγραμμα 39. Κατανομή του χαλκού στο πρώτο λυσίμετρο



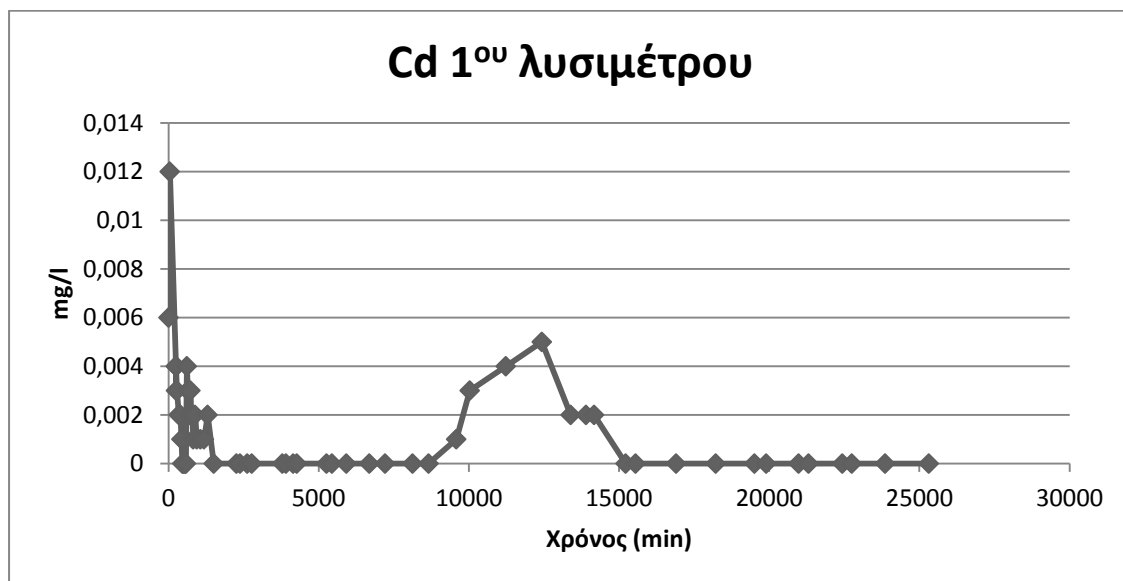
Διάγραμμα 40. Κατανομή του μαγνητίου στο πρώτο λυσίμετρο



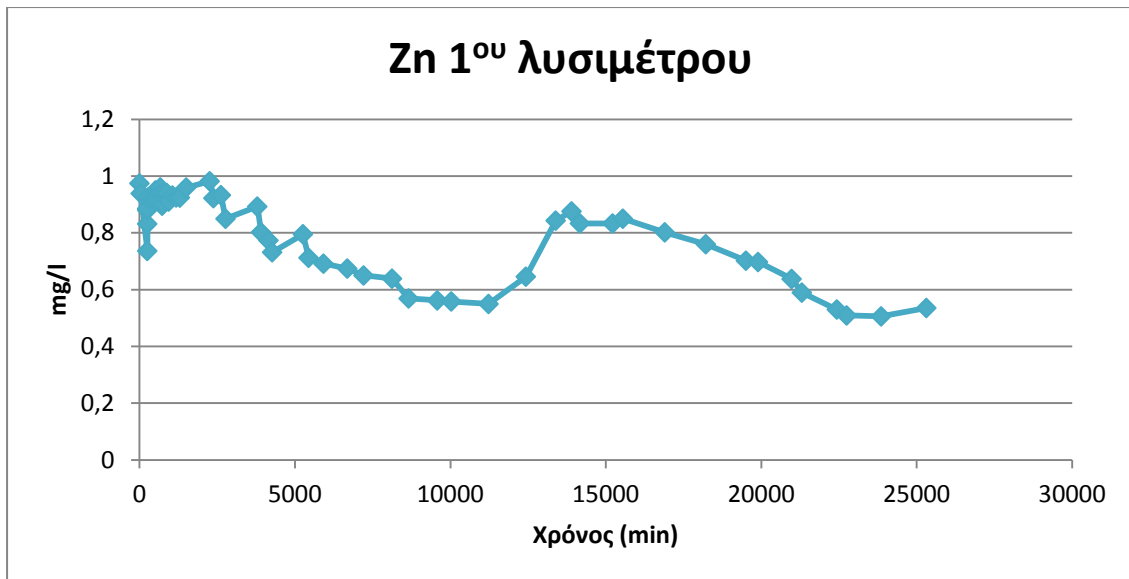
Διάγραμμα 41. Κατανομή του σιδήρου στο πρώτο λυσίμετρο



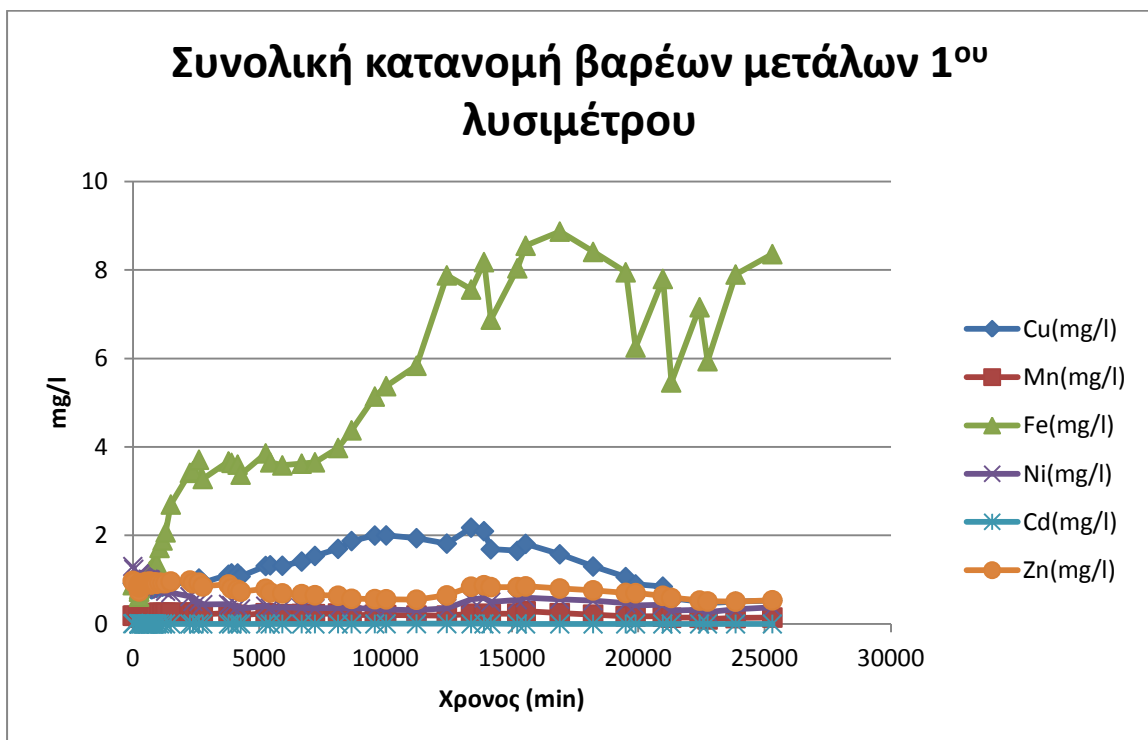
Διάγραμμα 42. κατανομή του νικελίου στο πρώτο λυσίμετρο



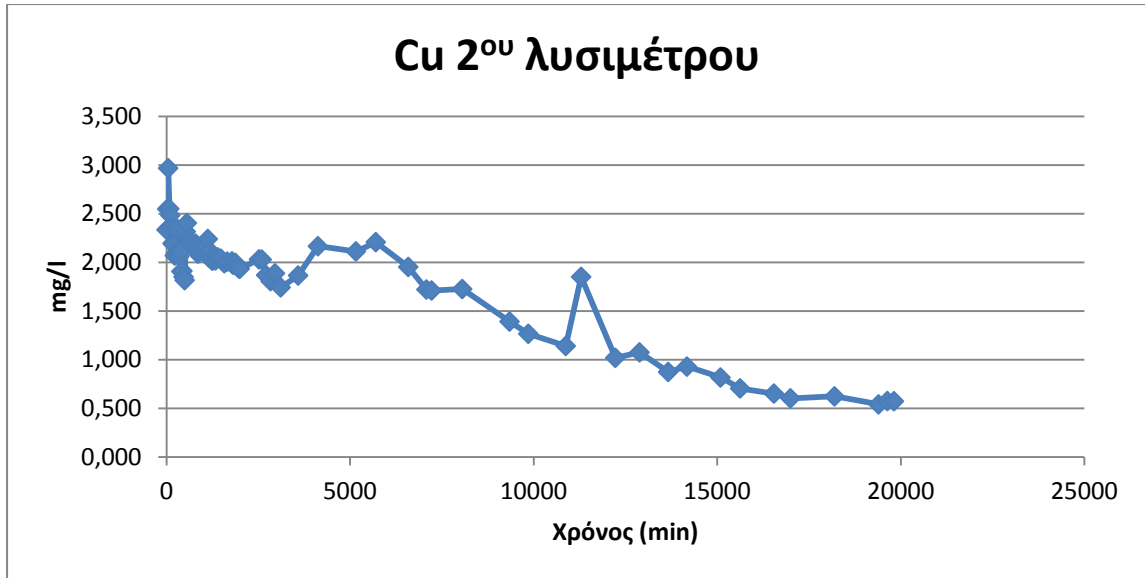
Διάγραμμα 43. Κατανομή του καδμίου στο πρώτο λυσίμετρο



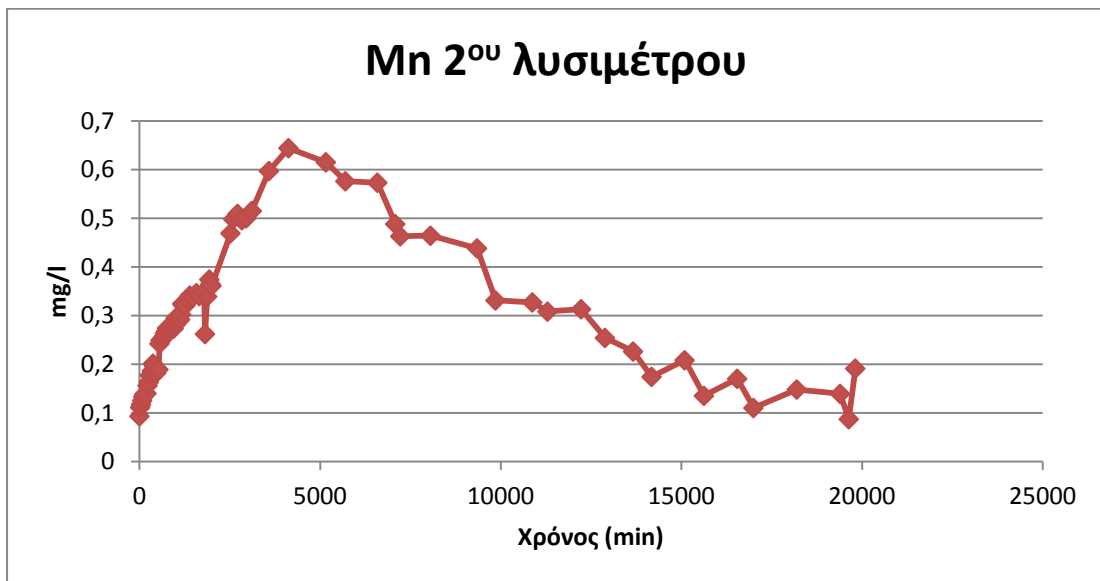
Διάγραμμα 44. Κατανομή του ψευδαργύρου στο πρώτο λυσίμετρο



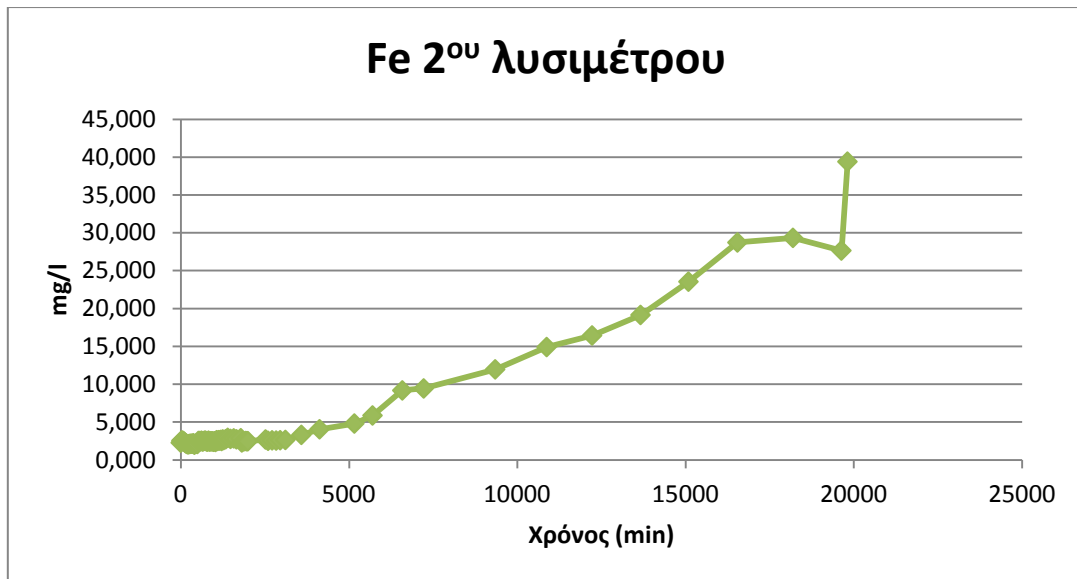
Διάγραμμα 45. Συνολική κατανομή όλων των ανιχνεύσιμων βαρέων μετάλλων στο πρώτο λυσίμετρο



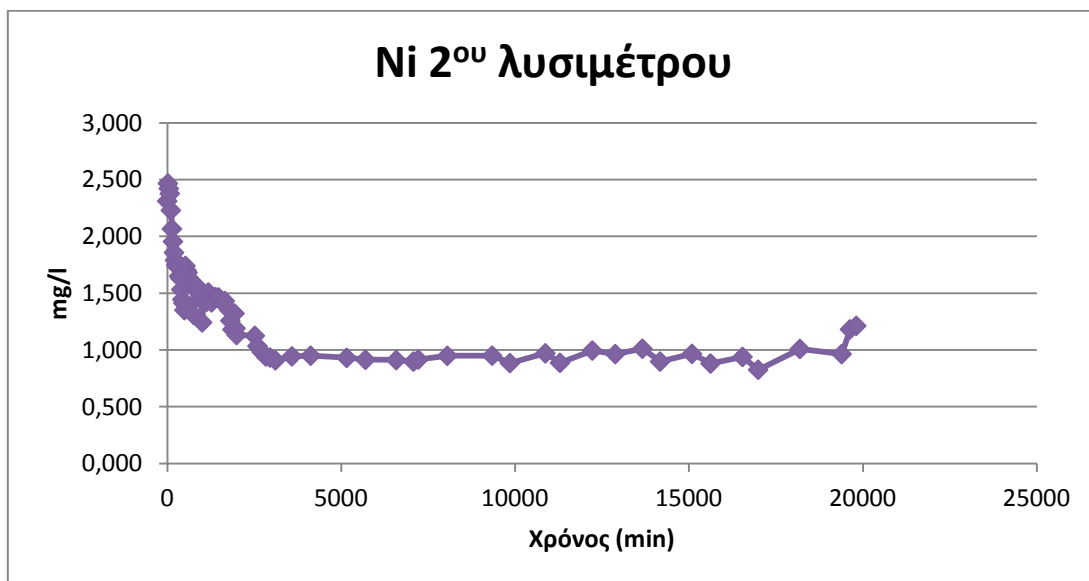
Διάγραμμα 46. Κατανομή του χαλκού στο δεύτερο λυσίμετρο



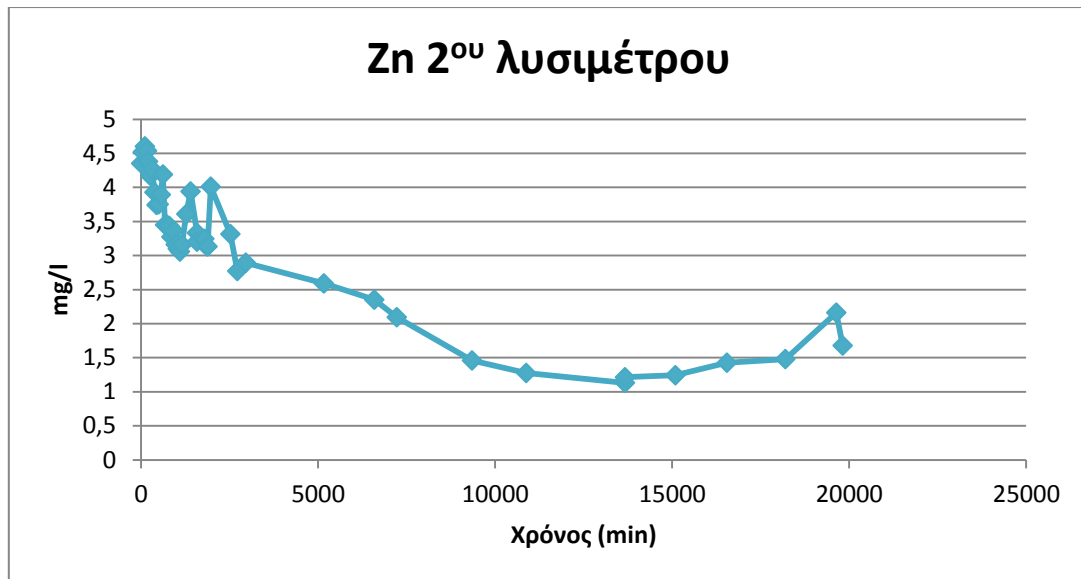
Διάγραμμα 47. Κατανομή του μαγγανίου στο δεύτερο λυσίμετρο



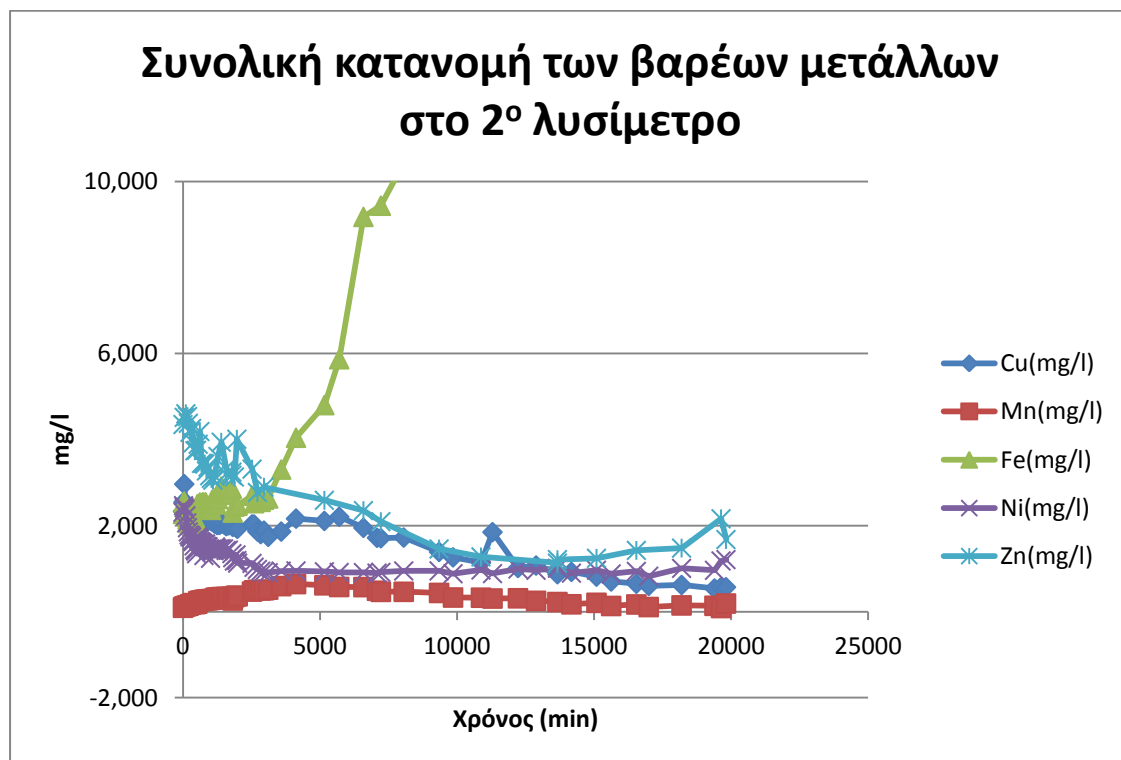
Διάγραμμα 48. Κατανομή του σιδήρου στο δεύτερο λυσίμετρο



Διάγραμμα 49. Κατανομή του νικελίου στο δεύτερο λυσίμετρο



Διάγραμμα 50. Κατανομή του ψευδαργύρου στο δεύτερο λυσίμετρο



Διάγραμμα 51. Συνολική κατανομή των ανιχνεύσιμων βαρέων μετάλλων στο δεύτερο λυσίμετρο

Κεφάλαιο 7

Εκτέλεση του μοντέλου HELP

7.1. Εισαγωγή

Η απόθεση των αστικών στερεών απορριμμάτων σε έναν χώρο υγειονομικής ταφής σίγουρα εμπεριέχει αρκετούς κινδύνους. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που μπορεί να προκύψει από μια τέτοια διεργασία είναι η μόλυνση του εδάφους, των υπόγειων και των επιφανειακών υδάτων από τη διαρροή των στραγγισμάτων που προκύπτουν από την αποδόμηση των απορριμμάτων. Ιδιαίτερο πρόβλημα συνίσταται όταν στους ΧΥΤΑ εναποτίθενται και βιομηχανικά απόβλητα, καθώς πολλές από τις περιεχόμενες ουσίες τους είναι ανθεκτικές στη βιολογική ή χημική αποδόμηση, παραμένοντας στην αρχική τους μορφή για πολλά χρόνια.

Η ποιοτική εκτίμηση των στραγγισμάτων που προέρχονται από έναν χώρο υγειονομικής ταφής δε μπορεί να εκτιμηθεί μέσω κάποιου μοντέλου, διότι εξαρτάται κάθε φορά από τη σύσταση των προς απόθεση απορριμμάτων. Αντίθετα πολλά είναι τα μοντέλα εκείνα τα οποία έχουν δημιουργηθεί για την εκτίμηση της ποσότητας των παραγόμενων στραγγισμάτων καθώς και της συμπεριφοράς τους μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων. Ένα από αυτά είναι το μοντέλο Υδρολογικής Αξιολόγησης των Επιδόσεων των Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (HELP), το οποίο και χρησιμοποιήσαμε στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, προκειμένου να εκτιμηθεί η παραγόμενη ποσότητα στραγγισμάτων από τον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (4), στο μοντέλο HELP κάποια από τα δεδομένα τα εισάγει ο χρήστης, ενώ κάποια υπάρχουν ως προεπιλεγμένες τιμές από το πρόγραμμα. Ως δεδομένα εισόδου το μοντέλο απαιτεί κλιματολογικά δεδομένα, εδαφικά χαρακτηριστικά καθώς και τις προδιαγραφές του σχεδιασμού για την εκτέλεση της ανάλυσης. Συνεπώς, για την εκτέλεση του μοντέλου, τα κλιματολογικά δεδομένα εισήχθησαν από εμάς με βάση τις πληροφορίες που πήραμε από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία για τα χιλιοστά βροχόπτωσης, την εξατμισοδιαπνοή, την ηλιακή ακτινοβολία και για τη θερμοκρασία από τον πλησιέστερο στα Άνω Λιόσια σταθμό (Ελευσίνα). Τα απαραίτητα εδαφικά δεδομένα περιλαμβάνουν το πορώδες, την υδατοϊκανότητα, το σημείο κορεσμού και τη κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα. Οι κατασκευαστικοί παράμετροι περιλαμβάνουν στοιχεία για τη κλίση, τη μέγιστη απόσταση των κάθετων στρώσεων αποστράγγισης, το πάχος της κάθε στρώσης, τη διαδικασία επανακυκλοφορίας των στραγγισμάτων, τα χαρακτηριστικά κάλυψης της επιφάνειας της χωματερής και πληροφορίες σχετικά με τις γεωμεμβράνες και τα γεωσυνθετικά υλικά. Οι

πληροφορίες αυτές μας παραχωρήθηκαν από τον Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. Τα κλιματολογικά δεδομένα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Μήνας	Βροχόπτωση (mm)	Θερμοκρασία (°C)
Ιανουάριος	53,5	8,40
Φεβρουάριος	38,4	9,00
Μάρτιος	39,7	12,70
Απρίλιος	27,2	14,50
Μάιος	21,1	17,90
Ιούνιος	10,8	25,30
Ιούλιος	11,8	26,50
Αύγουστος	7,7	28,20
Σεπτέμβριος	17,7	22,70
Οκτώβριος	47,9	19,10
Νοέμβριος	66,7	14,10
Δεκέμβριος	64,2	6,70

Πίνακας 6. Μέσα μηνιαία δεδομένα βροχόπτωσης (πηγή: ΕΜΥ) και θερμοκρασίας (πηγή: FAO)

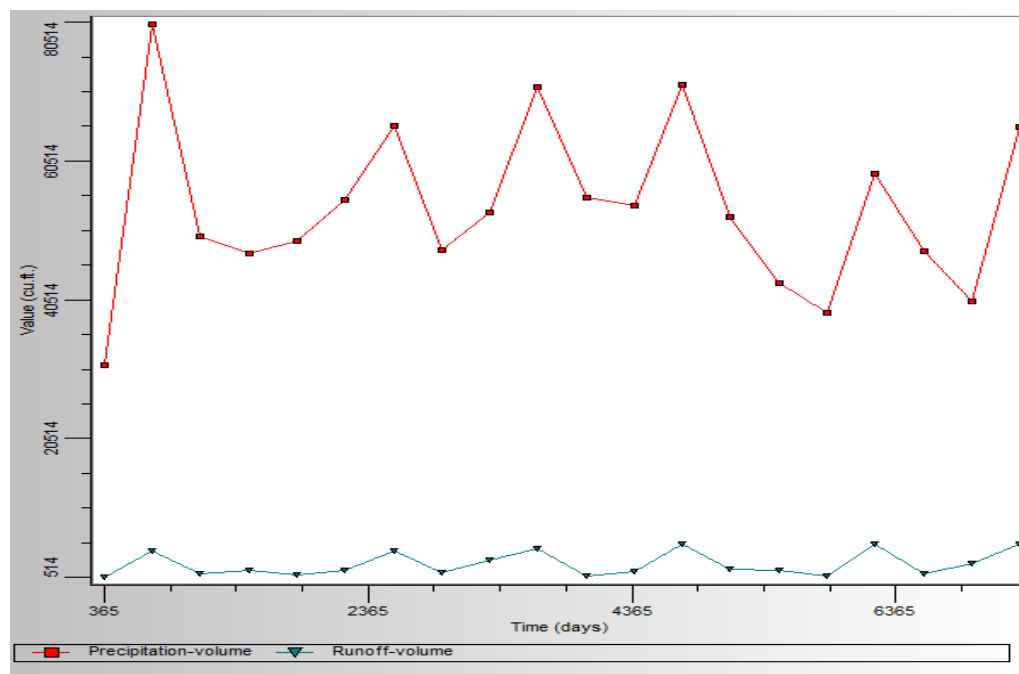
Τα αποτελέσματα που μας έδωσε το πρόγραμμα HELP αναφέρονται σε ετήσια βάση και για διάρκεια 20 χρόνων, ύστερα από δική μας επιλογή. Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη στρωμάτωση ενός κυττάρου βάθους 42,6 μέτρων.

Αριθμός στρώσης	Τύπος στρώσης	Πάχος στρώσης (m)
1	Αμμοπηλώδες	0,5
2	Απορρίμματα	7
3	Ιλυώδης άργιλος	1,5
4	Απορρίμματα	5
5	Ιλυώδης άργιλος	1,5
6	Απορρίμματα	8
7	Ιλυώδης άργιλος	1,5
8	Απορρίμματα	4
9	Ιλυώδης άργιλος	1,5
10	Απορρίμματα	5
11	Ιλυώδης άργιλος	1
12	Απορρίμματα	5
13	Χαλίκι	0,5
14	Χονδρή άμμος	0,1
15	Δίκτυο αποστράγγισης	
16	Υψηλής πυκνότητας γεωμεμβράνη	
17	Άργιλος	0,50

Πίνακας 7. Διαστρωμάτωση ενός κυττάρου για την εκτέλεση του προγράμματος HELP

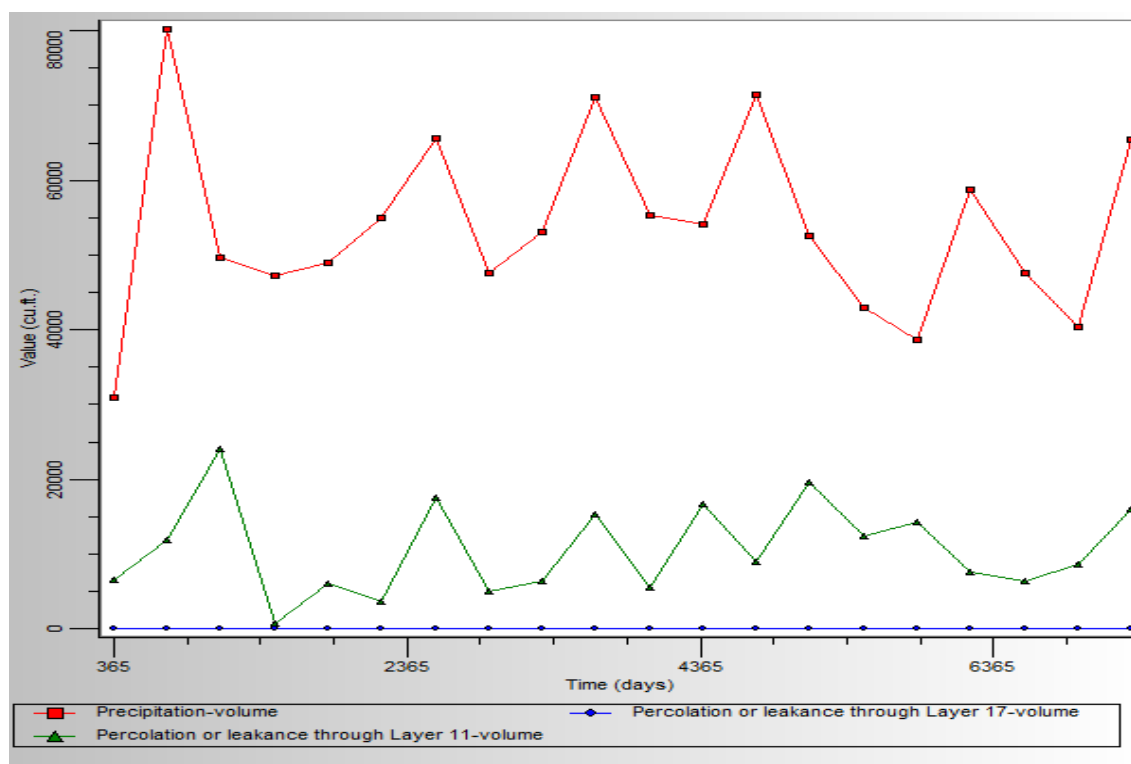
Για τον υπολογισμό της απορροής χρησιμοποιείται η μέθοδος CN της SCS (Soil Conservation Service), η οποία βασίζεται στα ημερήσια ποσά βροχόπτωσης και στο λιώσιμο του χιονιού. Το πρόγραμμα επίσης δέχεται πως οι περιοχές που γειτνιάζουν στο χώρο υγειονομικής ταφής δεν απορρέουν σε αυτόν. Επίσης δε λαμβάνεται υπόψη η ένταση της βροχόπτωσης συνεπώς το πρόγραμμα δεν αναμένεται να δώσει ακριβείς εκτιμήσεις για τον όγκο απορροής για τα επιμέρους επεισόδια. Ωστόσο, οι μακροπρόθεσμες εκτιμήσεις φαίνεται να είναι λογικές. Η εξατμισοδιαπνοή διαμορφώνεται μέσω της εξίσωσης Penman ενώ οι πληροφορίες για τη βλάστηση από ένα μοντέλο φυτικής ανάπτυξης. Τέλος, το μοντέλο HELP χρησιμοποιεί τον νόμο του Darcy για την κάθετη αποστράγγιση στα στρώματα εδάφους και στα απόβλητα και για τη διήθηση μέσα από τα στρώματα εδάφους. Δέχεται ακόμα ότι οι στρώσεις είναι κορεσμένες ανά πάσα στιγμή, αλλά η διαρροή λαμβάνει χώρα όταν η υγρασία της στρώσης εδάφους που βρίσκεται πάνω από τη στρώση επένδυσης είναι μεγαλύτερη από την υδατοϊκανότητα.

Σύμφωνα λοιπόν με το μοντέλο HELP, η απορροή που λαμβάνει χώρα στον ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων είναι απόλυτα συνυφασμένη με τη βροχόπτωση, καθώς το έδαφος στην επιφάνεια του κυττάρου παραμένει ακάλυπτο και χωρίς κανενός είδους φυτοκάλυψη. Στο διάγραμμα 6.1. παρατηρείται η σχέση της βροχόπτωσης και της απορροής με τη πάροδο του χρόνου.



Διάγραμμα 52. Μεταβολή της βροχόπτωσης και της απορροής σε σχέση με τον χρόνο

Η παραγωγή των στραγγισμάτων, όπως έχει αναφερθεί, εκτός των άλλων εξαρτάται και από τη βροχόπτωση. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 39, η ποσότητα παραγωγής των στραγγισμάτων αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η βροχόπτωση. Επίσης, στο ίδιο διάγραμμα παρατηρούμε πως η διαστρωμάτωση που χρησιμοποιείται στον ΧΥΤΑ, σχεδόν μηδενίζει τη διέλευση των στραγγισμάτων από τη τελευταία στρώση της στεγάνωσης του πυθμένα. Η διήθηση των στραγγισμάτων γίνεται μέχρι αυτά να φθάσουν στο σύστημα συλλογής αυτών που είναι τοποθετημένο κάτω από τη τελευταία στρώση απορριμμάτων. Αυτό βέβαια δε συνεπάγεται πως η διάθεση των απορριμμάτων σε χώρους υγειονομικής ταφής είναι απόλυτα ασφαλής, αλλά πως τα τελευταία χρόνια η μέθοδος αυτή έχει γίνει ασφαλέστερη λόγω των καλύτερων υλικών που χρησιμοποιούνται για τη στεγάνωση του πυθμένα των κυττάρων.



Διάγραμμα 53. Παραγωγή στραγγισμάτων σε σχέση με τη βροχόπτωση και διέλευση των στραγγισμάτων από το τελευταίο στρώμα εδάφους (που λειτουργεί ως φράγμα) και από τον πυθμένα του κυττάρου

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

Στη παρούσα διατριβή μελετήσαμε τη συμπεριφορά των απορριμμάτων ως προς τη δημιουργία στραγγισμάτων, τα οποία συνιστούν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα από τους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων. Κατά τη κατασκευή ενός τέτοιου χώρου λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα για τη προστασία του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα από την ενδεχόμενη μόλυνσή του από τα στραγγίσματα. Παρόλα αυτά, κανείς δε μπορεί να υποσχεθεί πως η διαφύλαξή του έχει πάντα απόλυτη επιτυχία. Έτσι, αποτελεί πολύ σημαντικό εργαλείο η γνώση της ποιότητας των στραγγισμάτων καθώς και η εκτίμηση του παραγόμενου όγκου τους, για τις περιπτώσεις αστοχίας της προφύλαξης των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων.

Συνεπώς, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, προσομοιώσαμε τις συνθήκες ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων στο εργαστήριο και αναλύσαμε ποσοτικά και ποιοτικά τα παραγόμενα στραγγίσματα. Παράλληλα, κάναμε χρήση του υδρολογικού μοντέλου HELP, προκειμένου να εκτιμήσουμε τον παραγόμενο όγκο των στραγγισμάτων από ένα συγκεκριμένο κύτταρο του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων.

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, βγάλαμε κάποια συμπεράσματα όσον αφορά τη ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση των παραγόμενων στραγγισμάτων από τα ελληνικά απορρίμματα. Έτσι λοιπόν, παρατηρήσαμε πως η περιεχόμενη στα απορρίμματα υγρασία, και στα δυο λυσίμετρα, ήταν υψηλότερη (32,65% στο πρώτο και 32,30% στο δεύτερο λυσίμετρο) από αυτή που παρατηρείται στη βιβλιογραφία. Αυτό οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητα των ελληνικών αποβλήτων σε ζυμώσιμα υλικά.

Εκτιμώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκτέλεση του πειράματος, δηλαδή τη ποσότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων καθώς και τη ποσότητα του νερού που εισήχθη στα λυσίμετρα, διαπιστώσαμε πως τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα. Οι όποιες αστοχίες οφείλονται στις συνθήκες εκτέλεσης του πειράματος.

Η ποσότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου τείνοντας να σταθεροποιηθεί, και αφού τα απορρίμματα έχουν συγκρατήσει το μέγιστο της ποσότητας νερού που είναι εφικτό. Παράλληλα μειώνεται και η ταχύτητα παραγωγής των στραγγισμάτων, λόγω της μέγιστης κατακράτησης νερού από τα απορρίμματα. Η μορφή της καμπύλης της ταχύτητας εξόδου των στραγγισμάτων ως προς τον χρόνο, καθώς και η αντίστοιχη καμπύλη της

αθροιστικής διήθησης ως προς τον χρόνο, φαίνεται να ακολουθεί τη φυσική του φαινομένου της οριζόντιας διήθησης.

Η ποιότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων εξαρτάται από τη φάση αποδόμησης των απορριμμάτων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, παρατηρούνται διαφορετικές τιμές σε όλες τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν ποιοτικά τα στραγγίσματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το pH, η τιμή του οποίου είναι καθοριστική για την αξιολόγηση της φάσης αποδόμησης των απορριμμάτων. Στο πείραμά μας, οι τιμές του pH κυμάνθηκαν σε υψηλά επίπεδα, κάτι το οποίο μας κάνει να πιστεύουμε πως η αποδόμηση των απορριμμάτων είχε περάσει στη φάση της μεθανογένεσης. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει (Μποσδογιάννη, 1997) σε ελληνικούς χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, τα ελληνικά απορρίμματα, λόγω της σύστασής τους, περνούν στη φάση της μεθανογένεσης σε λιγότερο από έναν χρόνο, ενώ σε ΧΥΤΑ άλλων χωρών μπορεί να περάσουν μέχρι και δέκα χρόνια. Το δείγμα των απορριμμάτων που χρησιμοποιήσαμε για το πείραμά μας είχε ληφθεί από κύτταρο του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων, το οποίο είχε εναποτεθεί αρκετό χρονικό διάστημα. Συνεπώς τα αποτελέσματά μας ήταν αναμενόμενα.

Η σύσταση των ελληνικών απορριμμάτων, ως φαίνεται, επηρεάζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων. Οι τιμές της αγωγιμότητας ξεπερνούσαν κατά πολύ τις αναφερόμενες στη βιβλιογραφία τιμές, πράγμα το οποίο πιστεύουμε πως οφείλεται στην περιεκτικότητα των αποβλήτων σε οργανικά υλικά.

Σαν αποτέλεσμα της υψηλής αγωγιμότητας των στραγγισμάτων, οι συγκεντρώσεις των ιόντων χλωρίου, νατρίου καθώς και των θειικών ιόντων που μετρήθηκαν στα στραγγίσματα ήταν εξίσου υψηλές, με αυτές των θειικών ιόντων να ξεπερνούν τις αναφερόμενες στη βιβλιογραφία. Οι συγκεντρώσεις και των τριών στοιχείων φαίνεται να μειώνονται με τη πάροδο του χρόνου, κάτι το οποίο συνεπάγεται πως στα απορρίμματα μας λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της έκπλυσης.

Τα απορρίμματα, λόγω της προχωρημένης αποδόμησης και της προσθήκης ιλύος σε αυτά, έπρεπε να λειτουργούν ως εδαφικό υλικό, δηλαδή τα θετικά φορτισμένα ιόντα θα έπρεπε να συγκρατούνται από τα κολλοειδή της αργίλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η συμπεριφορά τόσο των ιόντων νατρίου και καλίου (θετικά φορτισμένα ιόντα) όσο και του χλωρίου και των θειικών ιόντων (αρνητικά φορτισμένα ιόντα) είναι παρόμοια, με τη μεγαλύτερη κατακράτηση από τα απορρίμματα να παρατηρείται στα θειικά ιόντα στο ένα λυσίμετρο και με μικρή διαφορά στα ιόντα καλίου στο δεύτερο λυσίμετρο, ενώ αναμέναμε να γίνεται στα ιόντα νατρίου και καλίου. Η μόνη εξήγηση που μπορεί να δοθεί για αυτή τη συμπεριφορά είναι πως το κολλοειδές είχε ήδη προσροφήσει κατά τις προηγούμενες φάσεις αποδόμησης τη μέγιστη ποσότητα ιόντων νατρίου και καλίου που ήταν εφικτό.

Τέλος, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων κυμάνθηκαν σε αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις, με εξαίρεση αυτές του σιδήρου και του χαλκού, και περισσότερο αξιοσημείωτη αυτή του σιδήρου. Τα απορρίμματα στη φάση μεθανογέννεσης έχουν σημαντική προσροφητική ικανότητα κάτι το οποίο εξηγεί τις μικρές συγκεντρώσεις των μετάλλων στα στραγγίσματα. Η εμφάνιση των υψηλών τιμών του σιδήρου φαίνεται να οφείλεται στα οξείδια του σιδήρου που προέρχονται από τα σκουριασμένα αντικείμενα που βρίσκονταν μέσα στη μάζα των απορριμμάτων.

Η εκτέλεση του μοντέλου HELP, φαίνεται να αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στη διαχείριση των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Με βάση τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος και των αποτελεσμάτων αυτού, μπορούμε να κρίνουμε αν ένας ΧΥΤΑ λειτουργεί με βάση τις απαιτούμενες προδιαγραφές ως προς τη διασφάλιση της προστασίας του υποκείμενου υδροφόρου ορίζοντα. Ως αποτέλεσμα αυτού, μπορεί να γίνει οποιαδήποτε βελτίωση στη στεγάνωση του πυθμένα των υπό κατασκευή κυττάρων. Στη παρούσα διατριβή, και με βάση τα δεδομένα που εισάγαμε στο πρόγραμμα για τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής αλλά και για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του ΧΥΤΑ, υπολογίσαμε πως από τη τελευταία στεγανωτική στρώση του πυθμένα του κυττάρου τα στραγγίσματα δεν διηθούνται. Η παραγωγή των στραγγισμάτων αυξάνεται με την αύξηση της βροχόπτωσης, ενώ η απορροή μεταβάλλεται με βάση το ύψος βροχόπτωσης.

Βιβλιογραφία

Alkaabi Salem, Van Geel J. Paul, Warith A. Mostafa, «Effect of saline water and sludge addition on biodegradation of municipal solid waste in bioreactor landfills», Waste Management and Research, Vol 27, Issue 1, pp 59-69, February 2009

Aragno Michel, «The landfill ecosystem: a microbiologist' s look inside a "black box», The Landfill, Vol 20, pp 15-38, 1989

Αντωνόπουλος Ζ.Βασίλειος , «Υδραυλική Περιβάλλοντος και Ποιότητα Επιφανειακών Υδάτων», Εκδόσεις Τζιόλα, 2009

Bartlett D. Janyce, Vesilind A. P., «The effect of moisture on air classification of municipal solid», Biomass and Bioenergy, Vol 3, Issue 3-4, pp 163-180, July 1992

Baun DHI L. Dorthe, Christensen H. Thomas, «Speciation of heavy metals in landfill leachate: a review» , Waste Management and Research, Vol 22, Issue 1, 3-23, February 2004

Bendz D., Singh P. V., Akesson M., «Accumulation of water and generation of leachate in a young landfill», Journal of Hydrology, Vol 203, Issues 1-4, pp 1-10, December 1997

Bilgili M. Sinan, Demir Ahmet, Varank Gamze, «Effect of leachate recirculation and aeration on volatile fatty acid concentrations in aerobic and anaerobic landfill leachate», Waste Management and Research, Vol 30 , Issue. 2, p.p. 161-170

Bititewski B., Hardtle G., Marek K., Weissbach A., Boeddicker H., (1994) Waste management, Εκδόσεις Springer

Boldrin Alessio, Andersen K. Jacob, Møller Jacob, Christensen H. Thomas, «Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions», Waste Management and Research, Vol 27, Issue 8, pp 800-812, September 2009

Börjesson Gunnar, Svensson H. Bo, «Seasonal and Diurnal Emissions from a Landfill and their Regulation by Methane Oxidation», Waste Management and Research, Vol 15, Issue 1, pp 33-54, January 1997

Cardoso J. Antonio, Levine D. Audrey, Nayak S. Bina, Rhea Jones R. Lisa, «Lysimeter comparison of the role of waste characteristics in the formation of mineral deposits in leachate drainage systems», Waste Management and Research, Vol 24, Issue 6, pp 560-572, December 2006

Castrillón L., Fernández-Nava Y., Ulmanu M., Anger I., Marañón E., «Physico-chemical and biological treatment of MSW landfill leachate» , Waste Management and Research, Vol 30, Issue 2, pp 228-235, February 2010

Chen Honglay Paris, «Assessment of leachates from sanitary landfills: impact of age, rainfall and treatment», Environment International, Vol 22, Issue 2, pp 225-237, December 1995

Chen Yun- Min, Zhan L.T. Tony, «Environmental Geotechnics related to landfills of municipal solid wastes», Advances in Environmental Geotechnics, Vol 2, pp 132-152, 2010

Chul Kong In, «Bioassessments of anaerobically decomposing organic refuse in laboratory lysimeters with and without leachate recycling and pH adjustment», Waste Management and Research, Vol 28, Issue 2, pp 141-148, February 2010

Dollar H. L., «Moisture retention of municipal solid waste mixed with sewage sludge and ash in a semi-arid climate», Waste Management and Research, Vol 23, Issue 3, pp 209-219, June 2005

Donovan Sally Maree, Pan Jilang, Bateson Thomas, Gronow R.Jan, Voulvoulis Nikolaos, «Gas emissions from biodegradable waste in United Kingdom landfills», Waste Management and Research, Vol 29, Issue 1, pp 69-76, January 2011

Eggen Trine' , Moeder Monika, Arukwe Augustine, «Municipal landfill leachates: A significant source for new and emerging pollutants», Science of the Total Environment, Vol 408, Issue 21, pp 5147-5157, October 2010

Ejlertsson J. , Meyerson U. and Svensson H.B., «Anaerobic degradation of phthalic acidesters during digestion of municipal solid waste under landfilling conditions », Biodegradation, Vol 7, Issue 4, pp 345-352, June 1996

El-Fadel M., Shazbak S., Saliby E., Leckie J., «Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications», Waste Management and Research, Vol 17, Issue 5, pp347-368, October 1999

Fatta Despina, Papadopoulos Achilleas, Loizidou Maria, « A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area», Environmental Geochemistry and Health, Vol 21, Issue 2, pp 175-190, March 1999

Giusti L., «A review of waste management practices and their impact on human health», Waste Management and Research, Vol 29, Issue 28, pp 2227- 2239, August 2009

Haarstrick A., Hempel D. C., Ostermann L., Ahrens H., Dinkler D., «Modelling of the biodegradation of organic matter in municipal landfills», *Waste Management and Research*, Vol 19, Issue 4, pp 320-331, August 2001

Harmsen J. , «Identification of organic compounds in leachate from a waste trip» , *Water Research*, Vol 17, Issue 6, pp 699-705, 1983

Hartz E. K., Ham K. R., «Moisture level and movement effects on methane production rates in landfill samples», *Waste Management and Research*, Vol 1, Issue 2, pp 139-145, June 1983

J. Rodriguez Iglesias, L. Castrillon Pelaez, E. Maranon Maison, H. Sastre Andres, «A comparative study of the leachates produced by anaerobic digestion in a pilot plant and at a sanitary landfill in Asturias, Spain», *Waste Management and Research*, Vol 18, Issue 1, pp 86-93, February 2000

Johansen Ole Jakob, Carlson A. Dale, « Characterization of sanitary landfill leachates» , *Water Research*, Vol 10, Issue 12, pp 1129-1134, June 1976

Klimiuk Ewa, Kulikowska Dorota, «The influence of operational conditions in sequencing batch reactors on removal of nitrogen and organics from municipal landfill leachate», *Waste Management and Research*, Vol 23, Issue 5, pp 429-438, October 2005

Kostiakov A.N., 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Sixth Comm. Int. Soil Sci. Soc. Moscow.

Kulikowska Dorota, Klimiuk Ewa, «The effect of landfill age on municipal leachate composition», *Bioresource Technology*, Vol 99, Issue 13, pp 5981-5985, September 2008

Κερκίδης Πέτρος, «Διασπορά Διαλυτών Ουσιών στο έδαφος», Πανεπιστημιακές σημειώσεις Γ.Π.Α., Αθήνα, 2004

Λώλος Θ., Τσομπανίδης Χ., Λώλος Γ., « Η ποιοτική σύσταση ως βασικός παράγοντας της διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων. Εναλλακτικές μεθοδολογίες διεθνώς και αποτελέσματα προγραμμάτων προσδιορισμού ποιοτικής σύστασης στην Ελλάδα»

Mavropoulos Antonis, Kaliampakos Dimitrios, «International report: uncontrolled landfill investigation- a case study in Athens», *Waste Management and Resaerch*, Vol 17, Issue 2, pp 159-165, April 1999

McKay Gordon, «Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review», *Waste Management and Research*, Vol 86, Issue 3, pp 343-368, October 2001

Μιμίδης Θεολόγος, «Περιβαλλοντική Υδραυλική και Υδρολογία- Ποιότητα Νερών», Πανεπιστημιακές παραδόσεις Γ.Π. Α., Αθήνα, Δεκέμβριος 2006

Orta de Velásquez Ma. Teresa, Cruz-Rivera Reynaldo, Rojas-Valencia Neftalí, Monje-Ramírez Ignacio, Sánchez-Gómez Jorge, «Serial water balance method for predicting leachate generation in landfills», *Waste Management and Research*, Vol 21, Issue 2, pp 127-136, April 2003

Papageorgiou Asterios, Karagiannidis Avraam, Barton R.John, Kalogirou Eftraios , «Municipal solid waste management scenarios for Attica and their greenhouse gas emission impact», *Waste Management and Research*, Vol 27, Issue 9, pp 928-937

Poulsen G. Tjalfe, Moldrup Per, Sørensen Kirsten, Hansen Aa. Jens, «Linking landfill hydrology and leachate chemical composition at a controlled municipal landfill (Kåstrup, Denmark) using state-space analysis», *Water Management and Research*, Vol 20, Issue 5, pp 445-456, October 2002

Reynolds W.D., Elrick D.E., Youngs E.G., Booltink H.D.G., Bouma J. (2002) *Laboratory Methods in Dane J.H. and G.C.Topp, Methods of soil analysis, part 4, physical methods SSSA, p. 802-817*

Παναγιωτακόπουλος Δ., (2007), *Βιώσιμη διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων*, εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη

Sanphoti N., Towprayoon S., Chairasert P., Nopharatana A., «The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill», *Waste Management and Research*, Vol 81, Issue 1, pp 27-35, October 2006

Scheutz Charlotte, Kjeldsen Peter, Bogner E. Jean, De Visscher Alex, Gebert Julia, Hilger A. Helene , Huber-Humer Marion , Spokas Kurt, «Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions», Vol 27, Issue 5, pp 409-455, August 2009

Sinha K. Rajiv, Herat Sunil, Bharambe Gokul, Brahambhatt Ashish, «Vermistabilization of sewage sludge (biosolids) by earthworms: converting a potential biohazard destined for landfill disposal into a pathogen-free, nutritive and safe biofertilizer for farms», *Waste Management and Research*, Vol 28, Issue 10, pp 872-881, October 2010

Swati M., Joseph Kurian, «Settlement analysis of fresh and partially stabilised municipal solid waste in simulated controlled dumps and bioreactor landfills», Waste Management and Research, Vol 28, Issue 8, pp 1355-1363, 2008

Σκορδίλης Δ. Αδαμάντιος , «Τεχνολογίες διάθεσης απορριμμάτων. Η υγειονομική ταφή», Εκδόσεις «ΙΩΝ», 1993

Tatsi A. A., Zouboulis I. A., «A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki, Greece)», Advances in Environmental Research, Vol 6, Issue 3, pp 207-219, September 2009

Tyrrel F. S. , Leeds-Harrison B. P., Harrison S. K., «Removal of ammoniacal nitrogen from landfill leachate by irrigation onto vegetated treatment planes», Water Research, Vol 36, Issue 1, pp 291-299, January 2002

Visvanathan C., Pokhrel Dinesh, Cheimchaisri Wilai, Hettiaratchi A. J. P. , Wu S. J., «Methanotrophic activities in tropical landfill cover soils: effects of temperature, moisture content and methane concentration», Waste Management and Research, Vol 17, Issue 4, pp 313-323, August 1999

Ward L. Marnie, Bitton Gabriel, Townsend Timothy, «Heavy metal binding capacity (HMBC) of municipal solid waste landfill leachates» , Chemosphere, Vol 60, Issue 2, pp 206-215, July 2005

Williams T. Paul , Waste Treatment and Disposal, Εκδόσεις Wiley (John Wiley and Son), Department of Fuel and Energy. The University of Leeds, UK. 1998

Wreford A. K., Atwater W. J., Lavkulich M. L., «The effects of moisture inputs on landfill gas production and composition and leachate characteristics at the Vancouver Landfill Site at Burns Bog», Waste Management and Research, Vol 18, Issue 4, pp 386-392, August 2000

Yildiz Demirekler Ebru, Ünlü Kahraman, Kerry Rowe R., «Modelling leachate quality and quantity in solid waste landfills», Waste Management and Research, Vol 22, Issue 2, pp 78-92, April 2004

Διαδίκτυο

<http://aix.meng.auth.gr/lhtee/index.html>

http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/3454/1/grammatikogiannise_landfill.pdf

<http://el.ercd.usace.army.mil/elmodels/pdf/help3use.pdf>

<http://estia.hua.gr:8080/dspace/bitstream/123456789/408/1/Thoma.pdf>

<http://poseidon.library.tuc.gr/artemis/MT2006-0004/MT2006-0004.pdf>

<http://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/9164#page/34/mode/2up>

<http://www.balkwaste.eu/project/GREECE.WASTE.pdf>

<http://www.chem.uoa.gr/courses/instrumental2/%CE%91sk12-Ca-FAES.pdf>

<http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=95>

<http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/184ph.html>

http://www.geo.auth.gr/887/PDF/XYTA_6.pdf

http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/PDF/XYTA_3.pdf

<http://www.scribd.com/doc/6461793/->

http://www.tzampazi.gr/diaxeirisi_aporrimmatwn.pdf

http://www.unep.or.jp/ietc/ESTdir/Pub/MSW/SP/SP2/SP2_1.asp

http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/spc/ISWMPlan_Vol2.pdf

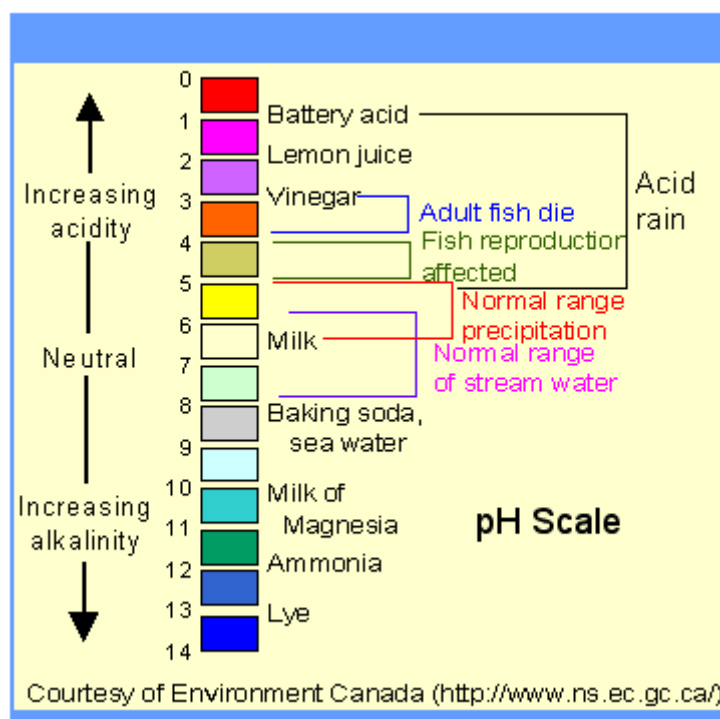
Παράρτημα Α

Περιγραφή αναλυτικών μεθόδων ελέγχου των χαρακτηριστικών των στραγγισμάτων

A-1. Μέτρηση pH

Το pH είναι ένας εύκολος τρόπος έκφρασης της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου σε ένα υδατικό διάλυμα. Απλούστερα, αποτελεί μέτρο οξύτητας ή αλκαλικότητας μιας χημικής ουσίας, εξ ου και αναφέρεται ως ενεργός οξύτητα. Το pH αποτελεί τον αρνητικό δεκαδικό λογάριθμο της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου $[H^+]$ στο διάλυμα και δεν έχει μονάδες.

Η κλίμακα του pH κυμαίνεται από 0 έως 14, με τη τιμή 7 να αποτελεί την τιμή για τα ουδέτερα διαλύματα. Τα διαλύματα των οποίων η τιμή του pH είναι μικρότερη από 7 χαρακτηρίζονται ως όξινα, ενώ αυτά που η τιμή του pH είναι μεγαλύτερη από 7 χαρακτηρίζονται αλκαλικά.



Εικόνα A-1. Κλίμακα pH

Προκειμένου να γίνουν οι μετρήσεις των στραγγισμάτων από τα λυσίμετρα, το pHάμετρο (μοντέλο Metrohm 654) έπρεπε να ρυθμιστεί με τη χρήση ρυθμιστικών διαλυμάτων. Το ηλεκτρόδιο του pHάμετρου έπρεπε να εκπλυθεί καλά πριν από κάθε μέτρηση, έτσι ώστε να μη λάβουμε λανθασμένες ενδείξεις. Το ηλεκτρόδιο στη

συνέχεια βυθιζόταν στο δείγμα και μετρίοταν η ένδειξη στην κλίμακα του pHμέτρου.

A-2. Μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) είναι ένα μέτρο της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα. Το ηλεκτρικό ρεύμα άγεται στο διάλυμα από τη κίνηση των ιόντων και έτσι όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός των ιόντων, τόσο υψηλότερη είναι η ιοντική κινητικότητα και άρα μεγαλύτερο το μέγεθος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Το χημικά καθαρό νερό δεν άγει το ηλεκτρικό ρεύμα επειδή περιέχει μόνο ιόντα H^+ και OH^- , με αποτέλεσμα να παρουσιάζει αγωγιμότητα μόλις 0,05 $\mu S/cm$ στους 25° C. Αντιθέτως, το θαλασσινό νερό με υψηλή συγκέντρωση σε άλατα έχει μέση αγωγιμότητα περίπου 40000 $\mu S/cm$ στους 25° C. Τυπικές τιμές αγωγιμοτήτων δίνονται στον πίνακα A-1.

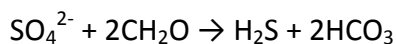
Νερό	Αγωγιμότητα ($\mu S/cm$ στους 25° C)
Χημικά καθαρό	0,05
Απεσταγμένο	0,10- 4,00
Νερό βροχής	20- 100
Μαλακό νερό	40- 150
Σκληρό νερό	200- 500
Ποτάμια	100- 1.000
Υπόγεια νερά	200- 1.500
Λιμνοθάλασσες	200- 2.000
Θαλασσινό νερό	40.000-48.000

Πίνακας A-1. Τυπικές τιμές αγωγιμότητας

Για τη μέτρηση της αγωγιμότητας των δειγμάτων μας, χρησιμοποιήθηκε αγωγιμόμετρο (Consort C931), το οποίο αρχικά έπρεπε να ρυθμιστεί για τη σωστή ένδειξη των μετρήσεων. Το ηλεκτρόδιο τα αγωγιμομέτρου έπρεπε να εκπλυθεί καλά πριν από κάθε μέτρηση. Για τη λήψη της μέτρησης, το ηλεκτρόδιο εμβαπτιζόταν σε ποσότητα δείγματος και αφού αναδεύαμε το δείγμα με τη βοήθεια του ηλεκτροδίου, το αφήναμε να ηρεμήσει έτσι ώστε να μας δώσει την ένδειξη.

A-3. Μέτρηση Θεϊκών Ιόντων

Γενικά το θείο και οι ενώσεις του ευθύνονται για τα προβλήματα οσμών και διαβρώσεων. Παρουσία οργανικής ύλης τα θειικά ιόντα- SO_4^{2-} μπορεί να αναχθούν, κυρίως σε υδρόθειο (H_2S), το οποίο έχει δυσάρεστη οσμή και διαβρώνει τους αγωγούς μεταφοράς του νερού:



Για τη μέτρηση των θειικών ιόντων των δειγμάτων μας χρησιμοποιήθηκε το φασματοφωτόμετρο Hach Lange- DR 2800. Παράλληλα απαιτήθηκαν φάκελοι σκόνης αντιδραστηρίου SulfaVer 4, πιπέτες, τετράγωνες κυψελίδες των 25 ml, κυκλικές κυψελίδες των 25 ml ογκομετρικοί κύλινδροι των 100 ml, καθώς και ποτήρια ζέσεως. Στο φασματοφωτόμετρο αρχικά έπρεπε να τοποθετηθεί το «τυφλό» δείγμα- blank, έτσι ώστε να μη παρουσιάζει σφάλμα στις ενδείξεις του. Το «τυφλό» δείγμα παρασκευάστηκε σε μια τετράγωνη κυψελίδα με απιονισμένο νερό στο οποίο προστέθηκε ένας φάκελος αντιδραστηρίου SulfaVer 4. Το δείγμα αναταράχθηκε έντονα έτσι ώστε να διαλυθεί η σκόνη και αφέθηκε να ηρεμήσει για πέντε λεπτά. Μετά τη πάροδο των πέντε λεπτών, το δείγμα εισήχθη στο φασματοφωτόμετρο και η ένδειξη που έπρεπε να λάβουμε ήταν 0 mg/l.

Το φασματοφωτόμετρο είναι όργανο που μετρά την ένταση μιας επιλεγμένης συχνότητας ακτινοβολίας. Για τη μέτρηση των θειικών ιόντων, το φασματοφωτόμετρο έπρεπε να μετρήσει τη θολότητα, που προκαλούσε ύστερα από ανάδευση, το αντιδραστήριο SulfaVer 4 στο δείγμα. Το χρώμα των δειγμάτων ήταν πορτοκαλί- κεραμμυδί, πράγμα το οποίο δεν επέτρεπε τη μέτρηση των θειικών ιόντων. Συνεπώς, τα δείγματα υπέστησαν αραιώση 1:100, και εφόσον απαιτήθηκε, 1:25 και 1:10. Προτού το δείγμα τοποθετηθεί στο φασματοφωτόμετρο, έπρεπε να παρέλθει διάστημα πέντε λεπτών.

Για τη μη ανάμειξη των δειγμάτων οι κυψελίδες έπρεπε κάθε φορά να πλένονται καλά με HCl και απιονισμένο νερό. Τέλος, προτού αυτές τοποθετηθούν στο φασματοφωτόμετρο με το προς εξέταση δείγμα, έπρεπε να έχουν καθαρισθεί και εξωτερικά έτσι ώστε να μη παρεμποδιστεί η ακτινοβολία.

A-4. Υπολογισμός Na⁺

Για τον υπολογισμό των Na των δειγμάτων μας χρησιμοποιήθηκε το φλογοφωτόμετρο Corning- Flame Photometer 410. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι τα άλατα των μεταλλικών κατιόντων όταν αναχθούν στη θερμοκρασία της οξειδωτικής φλόγας, ιονίζονται και εκπέμπουν ακτινοβολία χαρακτηριστικού μήκους κύματος. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομονώνεται από το οπτικό φίλτρο. Στη συνέχεια, η ακτινοβολία προσπίπτει και ενεργοποιεί ένα φωτοκύτταρο, του οποίου το παραγόμενο ρεύμα κατευθύνεται στο γαλβανόμετρο και προκαλεί ανάλογη απόκλιση. Η απόκλιση αυτή είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του διαλύματος σε άλας.

Προκειμένου να μετρηθεί η ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας του Na στα δείγματά μας, έπρεπε να ορισθεί η καμπύλη βαθμονόμησης προτύπων διαλυμάτων

Νατρίου. Τα πρότυπα αυτά διαλύματα ήταν των 0, 5, 10, 15, 20, 25 και 30 ppm. Η δημιουργία της καμπύλης έγινε με βάση τις ενδείξεις του φλογοφωτομέτρου για το κάθε πρότυπο διάλυμα.

Τα δείγματά μας επίσης έπρεπε να αραιωθούν για να μπορέσει να γίνει η διάκριση του Na από το φλογοφωτόμετρο. Η αραιώση που έλαβε χώρα ήταν της τάξης του 1:500 και σε κάποιες περιπτώσεις 1:100.

Οι ενδείξεις του φλογοφωτομέτρου για τη περιεκτικότητα των δειγμάτων μας σε Na, έπρεπε να συγκριθούν με αυτές των πρότυπων διαλυμάτων. Έτσι, σύμφωνα με την δευτέρου βαθμού εξίσωση της καμπύλης που δημιουργήθηκε, έγινε η μετατροπή των ενδείξεων που λάβαμε σε mg Na. Για να υπολογισθεί η πραγματική τιμή mg Na στα δείγματα, έπρεπε να γίνει ο πολλαπλασιασμός των ενδείξεων από το φλογοφωτόμετρο με τις αντίστοιχες αραιώσεις που είχαν υποστεί τα δείγματα.

A-5. Υπολογισμός K⁺

Για τον υπολογισμό των ιόντων Καλίου χρησιμοποιήθηκε το φλογοφωτόμετρο Corning- Flame Photometer 410, το ίδιο δηλαδή που χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό των ιόντων Νατρίου.

Τα δείγματά μας έπρεπε να αραιωθούν έτσι ώστε να είναι εφικτή η διάκριση του Καλίου από το φλογοφωτόμετρο. Η αραιώση που έγινε ήταν της τάξης του 1:500 και 1:100 σε ορισμένα δείγματα.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η καμπύλη βαθμονόμησης των προτύπων διαλυμάτων του Καλίου είναι γραμμική, επομένως για τη μετατροπή των ενδείξεων σε mg Καλίου, έπρεπε μόνο να γίνει ο πολλαπλασιασμός των ενδείξεων για κάθε δείγμα με την αντίστοιχη αραιώση.

A- 6. Υπολογισμός Cl⁻

Το χλώριο υπό μορφή χλωριόντων, αποτελεί ένα από τα βασικά ανιόντα των υδάτων και των αποβλήτων. Στα φυσικά επιφανειακά νερά, η συγκέντρωση των χλωριόντων διαφέρει και εξαρτάται κυρίως από τη χημική σύσταση των πετρωμάτων, από τα οποία διέρχεται το νερό.

Στη χώρα μας σε πολλές περιοχές παρατηρούνται υψηλές τιμές χλωριόντων στα υπόγεια νερά. Υψηλές τιμές χλωριόντων παρατηρούνται και σε όλα σχεδόν τα υπόγεια νερά των παράκτιων περιοχών, λόγω των υπεραντλήσεων και της προέλασης του θαλάσσιου μετώπου. Στα αστικά λύματα, η συγκέντρωση των χλωριόντων είναι υψηλότερη από εκείνη των πόσιμων νερών γιατί κατά τη χρήση

του από τον άνθρωπο, το νερό επιβαρύνεται με άλατα και κυρίως με χλωριούχο νάτριο.

Η μέθοδος με την οποία μετρήσαμε τη ποσότητα των ιόντων χλωρίου στα στραγγίσματα από το πείραμά μας, ήταν αυτή της ποτενσιομετρίας. Η μέθοδος αυτή κάνει χρήση επιλεκτικών ηλεκτροδίων ιόντων, τα οποία αποκρίνονται εκλεκτικά σε ένα ή περισσότερα είδη ιόντων. Στις περισσότερες αναλυτικές μεθόδους προσδιορίζεται η ολική ποσότητα ενός στοιχείου σε ένα διάλυμα. Αντίθετα, στην ποτενσιομετρία μετράται η ενεργότητα ενός ιόντος, η οποία σχετίζεται με την συγκέντρωσή του. Η ενεργότητα ή η συγκέντρωση του ιόντος μπορεί να διαφέρει από την αναλυτική συγκέντρωση του στοιχείου στο διάλυμα.

Η μέθοδος της ποτενσιομετρίας στηρίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης ενός ηλεκτροχημικού συστήματος, το οποίο αποτελείται από ένα ενδεικτικό ηλεκτρόδιο και από ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς. Τα ηλεκτρόδια αυτά είναι βυθισμένα μέσα στο διάλυμα που μας ενδιαφέρει.

Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση των ιόντων χλωρίου ήταν το νιτρικό οξύ και ο νιτρικός άργυρος, πρότυπο διάλυμα 0,1M. Αρχικά έπρεπε να καλιμπραριστεί το ποτενσιόμετρο με πρότυπο διάλυμα απιονισμένου νερού στο οποίο είχε προστεθεί νιτρικό οξύ. Πρακτικά, χρησιμοποιήθηκε μικρό ποτήρι ζέσεως στο οποίο βάλαμε 50 ml απιονισμένου νερού και 5 ml νιτρικού οξέως. Τα ηλεκτρόδια του ποτενσιόμετρου εισήχθησαν στο δείγμα και έγινε η τιτλοδότηση του διαλύματος με νιτρικό άργυρο. Στη συνέχεια υπολογίσθηκε με βάση την ένδειξη του ποτενσιόμετρου και τον παρακάτω τύπο η ποσότητα των χλωριόντων στο πρότυπο διάλυμα.

$$\frac{N * 1000 * \text{κατανάλωση} * \text{αραίωση}}{\text{ml δείγματος}} * \text{ατομικό βάρος}$$

Για τα δείγματα των στραγγισμάτων μας απαιτήθηκε αραίωση 1:100 και 1:25. Χρειάστηκαν επίσης δυο κωνικές φιάλες των 100ml και δυο των 25ml, δυο πιπέτες, καθώς και πέντε ποτηράκια ζέσεως.

Αφού γινόταν η αραίωση των δειγμάτων μας, μεταφέρονταν 25ml αυτών σε ποτηράκι ζέσεως στο οποίο προσθέταμε 2,5ml νιτρικού οξέως. Στη συνέχεια, βυθίζαμε τα ηλεκτρόδια μέσα στο δείγμα, και μέσω αυτών τιτλοδοτούσαμε το δείγμα μας με νιτρικό άργυρο. Όταν γινόταν η εξουδετέρωση του αντιδραστηρίου, το ποτενσιόμετρο μας έδινε μια ένδειξη. Κατόπιν, με τη χρήση του παραπάνω τύπου υπολογίζαμε τη ποσότητα των ιόντων χλωρίου στο δείγμα μας σε ml/lit.

A- 7. Ανίχνευση Βαρέων Μετάλλων

Για την ανίχνευση των βασικών βαρέων μετάλλων, δηλαδή του χρωμίου (Cr), χαλκού (Cu), νικελίου (Ni), μαγγανίου (Mn), καδμίου (Cd), μολύβδου (Pb), ψευδαργύρου (Zn) και του σιδήρου (Fe) χρησιμοποιήθηκε το Φασματοφωτόμετρο Ατομικής Απορρόφησης με Φλόγα (FAAS) Agilent AA240FS. Η μέθοδος βασίζεται στο Standard Methods, 21th edition (part 3111B, 3010), και στις οδηγίες χρήσης του οργάνου. Οι αναλύσεις των βαρέων μετάλλων έγιναν στο εργαστήριο , των Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του κ. Σίμου Μαλαμή και των συνεργατών του.

Κατά τη μέθοδο αυτή, το σωματίδιο κατά την επίδρασή του με την ακτινοβολία βρίσκεται σε ατομική μορφή και στην αέρια κατάσταση. Όταν το διάλυμα ενός μεταλλικού ιόντος ψεκασθεί σε μια φλόγα, τότε συμβαίνουν διαδοχικά κ με μεγάλη ταχύτητα τα παρακάτω:

- Εξάτμιση του διαλύτη.
- Τήξη και εξαέρωση του στερεού άλατος που απομένει μετά την απομάκρυνση του διαλύτη.
- Διάσπαση του άλατος και σχηματισμός ελευθέρων αερίων ατόμων του μετάλλου (ατομοποίηση), που βρίσκονται στη θεμελιώδη ηλεκτρονική στάθμη. Ανάλογα με τις συνθήκες και κυρίως τη θερμοκρασία της φλόγας αλλά και το είδος των ατόμων, τα άτομα μπορεί να διεγερθούν ή να ιονισθούν.

Τα άτομα παραμένουν στη διεγερμένη κατάσταση για μικρό χρονικό διάστημα ($\sim 10^{-8}$ s) και επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση με εκπομπή της επί πλέον ενέργειας με μορφή ακτινοβολίας, χαρακτηριστικού μήκους κύματος για κάθε μέταλλο.

Τα αποτελέσματα που μας δίνει το φασματοφωτόμετρο, δεν προκύπτουν από άμεσο υπολογισμό της συγκέντρωσης, αλλά σύμφωνα με τη καμπύλη αναφοράς που δημιουργείται ύστερα από τη μέτρηση της απορρόφησης διαλυμάτων γνωστής απορρόφησης.

Τα αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής:

- Νιτρικό οξύ 65%, HNO₃
- Θειικό οξύ 98%, H₂SO₄
- Υπεροξείδιο του νατρίου 30%
- Υπερκαθαρό νερό, αντίστασης 18.2 MΩcm⁻¹
- Πρότυπα διαλύματα μετάλλων βαθμονόμησης και ελέγχου βαθμονόμησης 1000 mgL⁻¹ της Merck
 - Chromium (1.19779)

- Nickel (1.19792)
- Manganese (1.19789)
- Cadmium (1.19777)
- Zinc (1.19806)
- Iron (1.19781)
- Lead (1.19776)
- Copper (1.19786)

Για τη δημιουργία των προτύπων βαθμονόμησης απαιτήθηκαν πιπέτες, με τις οποίες μεταφέρονταν οι κατάλληλες ποσότητες των αντιδραστηρίων σε ογκομετρικές φυάλες των 100mg. Παράλληλα, έγινε αραίωση των δειγμάτων με προσθήκη 3 σταγόνων νιτρικού οξέως 65%. Το τυφλό διάλυμα παρασκευάστηκε με τη προσθήκη σε γυάλινη φυάλη 500ml υπερκάθαρου νερού και 2,5ml νιτρικού οξέως.

Για την εκτέλεση της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν το Φασματοφωτόμετρο Ατομικής Απορρόφησης με Φλόγα (FAAS) Agilent AA240FS, μια αυτόματη πιπέτα μεταβλητού όγκου EPPENDORF 10-100 μ L, μια αυτόματη πιπέτα μεταβλητού όγκου EPPENDORF 100-1000 μ L, και μια αυτόματη πιπέτα μεταβλητού όγκου EPPENDORF 500-5000 μ L, 3 ογκομετρικές φυάλες για τα πρότυπα διαλύματα βαθμονόμησης και μια για το τυφλό διάλυμα.



Εικόνα A-2. Φασματοφωτόμετρο Ατομικής Απορρόφησης με Φλόγα (FAAS) Agilent AA240FS



Εικόνα A-3. Αυτόματη πιπέτα μεταβλητού όγκου

Για τη μέτρηση των βαρέων μετάλλων των δειγμάτων μας, αυτά έπρεπε να οξυνθούν. Η όξυνση έγινε με πυκνό νιτρικό οξύ (HNO_3), έτσι ώστε το pH τους να είναι μικρότερο του 2 (απαιτήθηκαν περίπου 1,5- 2 ml πυκνού νιτρικού οξέως σε κάθε δείγμα). Στη συνέχεια τα δείγματα διατηρήθηκαν στο ψυγείο, μέχρις ότου αναλυθούν.

Δεδομένου ότι τα δείγματά μας ήταν πυκνά και είχαν πολλά αιωρούμενα στερεά, απαιτήθηκε να φυγοκεντρηθούν και στη συνέχεια να αναλυθούν από το φασματοφωτόμετρο ατομικής απορρόφησης. Με τον τρόπο αυτό αποφύγαμε τη συσσώρευση των σωματιδίων στο όργανο. Επίσης, κάποια δείγματα χρειάστηκε να αραιωθούν, διότι η κλίμακα μου μετρούσε το όργανο ήταν πιο μεγάλη.