ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΓΡΩΝ, ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

# ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΙΑΣΤΑΛΛΑΓΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΧΩΡΟ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΟΥΣΚΟΣ ΖΑΧΑΡΙΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ Α.
ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ Ε.
ΓΚΕΚΑΣ Β.

**ΧΑΝΙΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 200**

**ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Οικονομόπουλο Αλέξανδρο για την άριστη συνεργασία και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου για την παραχώρηση της συγκεκριμένης εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Γιδαράκο Ευάγγελο και κ. Γκέκα Βασίλειο για τη διάθεση του πολύτιμου χρόνου τους στη διόρθωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα τέλος, να ευχαριστήσω την Αντέλλη Πόπη για την πολύτιμη και συνεχή καθοδήγηση στην πραγματοποίηση του εργαστηριακού μέρους της εργασίας.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση των αστικών απορριμμάτων αποτελεί πρόκληση για τον σύγχρονο κόσμο. Το πρόβλημα της διαχείρισης των οικιακών αποβλήτων έχει αποκτήσει ιδιαίτερη διάσταση τα τελευταία χρόνια και στην Ελλάδα λόγω της ανάπτυξης των μεγάλων αστικών κέντρων, την συνεχή αύξηση του τουριστικού ρεύματος και την άνοδο του βιοτικού επιπέδου έτσι έχει καταρτισθεί πλαίσιο προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων (ΦΕΚ 1016/1997). Σήμερα, η ελεγχόμενη απόθεση των απορριμμάτων σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής (ΧΥΤΑ) αποτελεί τον πλέον συνηθισμένο και παράλληλα οικονομικό τρόπο διάθεσης αυτών.

Τα υγρά απόβλητα, διασταλλάγματα, που προκύπτουν σε ένα χώρο διάθεσης απορριμμάτων, είναι ωστόσο δυνατόν, να προκαλέσουν οξύτατα προβλήματα στο περιβάλλον και κυρίως στο έδαφος και στον υπόγειο υδροφορέα εξαιτίας του σημαντικού ρυπαντικού φορτίου που φέρουν. Ένας από τους βασικούς στόχους του ΧΥΤΑ είναι ο περιορισμός μετακίνησης των διασταλλαγμάτων και η συσσώρευσή τους σε συγκεκριμένο χώρο από όπου και θα οδηγούνται προς επεξεργασία.

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζεται πλήθος πληροφοριών που σχετίζεται με την ποιότητα των στραγγισμάτων και τις μεθόδους επεξεργασίας αυτών (φυσικοχημικές και βιολογικές) που έχουν χρησιμοποιηθεί σε εργαστηριακό επίπεδο, σε πιλοτικές μονάδες αλλά και σε έργα πραγματικής κλίμακας. Δίνεται επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή και στην ανακύκλωση των στραγγισμάτων που αποτελεί συνήθη πρακτική σε ΧΥΤΑ τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα.

Παράλληλα, η εργασία εστιάζεται και στην μονάδα επεξεργασίας στραγγισμάτων του ΧΥΤΑ Χανίων που πρόκειται να τεθεί σύντομα σε λειτουργία. μελετώντας, την ποιότητα, την ποσότητα των διασταλλαγμάτων (χρήση μοντέλων Hydrological Evaluation of Landfill Performance, 'HELP' και Landfill Gas Emissions, 'Landgem') αλλά και την ενδεχόμενη απόδοση της μονάδας. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες στραγγισμάτων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

Επιπλέον, μελετάται ο τρόπος κατασκευής και στεγανοποίησης ενός ΧΥΤΑ προτού αυτός δεχθεί απορρίμματα αλλά και μετά το πέρας της λειτουργίας του (αποκατάσταση) ενώ με χρήση του μοντέλου HELP ελέγχεται το κατά πόσο αποδίδει η μόνωση ενός ΧΥΤΑ στον περιορισμό των στραγγισμάτων. Δίνεται επίσης έμφαση και στον τρόπο κατασκευή ενός αποστραγγιστικού συστήματος με παράλληλο έλεγχο του δικτύου που έχει κατασκευασθεί στο ΧΥΤΑ Χανίων.

Τέλος, δίνονται ενδεικτικά κάποια μεγέθη κόστους για την κατασκευή ενός ΧΥΤΑ αλλά και για την διαχείριση των παραγόμενων στραγγισμάτων.

## ABSTRACT

Solid waste management constitutes a real challenge today. The problem of waste management has loomed large the last decade in Greece, mainly because of the development of great urban areas and the rise of living standards.
Sanitary landfill is the primary method of disposal of municipal refuse. Although it has lost some of its share in the array of solid waste management technologies such as recycling, incineration and composting, it is still the most common and the least expensive method to dispose waste.
However liquid waste, leachate, that are produced from a landfill can cause serious damage to the environment and especially to soil and waterbed because, of their great pollutant load.
One of the main targets of a landfill is to limit the movement of leachate and lead them to a predetermined place where they will be treated.
In this project a number of information correlated with the quality of landfill leachate and methods for their treatment (physicochemical and biological) that have been used either in laboratories or in real existing landfills, is presented.
The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) computer model is used, which facilitates rapid estimation of the amounts of runoff, evapotranspiration, drainage, leachate collection and liner leakage for a specific landfill.
The results of this model are compared to those of another model presented in 'Integrated Solid Waste Management' by Tchobanoglous G.
Another computer model that is used is 'Landfill Gas Emissions Model'. Landgem is used to estimate emission rates for methane, carbon dioxide, nonmethane organic compounds, and individual air pollutants from landfill.
The recycling of leachate back to the landfill is studied as well, as it is a usual practice of treating leachate in landfills not only in Greece but also in Europe.
Moreover, this project focuses on the leachate treatment unit that exists in landfill if Chania and will soon operate. In order to evaluate the quality of leachate in this landfill a number of samplings took place during summer and the samples were resolved in the laboratory. The quantity of leachate, produced in this landfill is also estimated (by using HELP & Landgem) and finally the efficiency of the SBR (Sequencing Batch Reactor) system that is examined.
Furthermore, the design of landfill liners is also studied, before the deposition of solid waste, the intermediate cover layers, which are used to cover the wastes placed each day and the final cover layers whose purpose is to minimize the infiltration of water from the rainfall after the landfill is completed.
Finally some information is presented about the capital cost of a landfill and the operational and maintenance cost of some leachate treatment processes.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1$^{Ο}$ - Διαχείριση στερεών αποβλήτων - Υγειονομική ταφή**

1.1 Μη επικίνδυνα στερεά απόβλητα.....σελ.2

1.1.1 Οικιακά απόβλητα.....σελ.4

1.2 Υγειονομική ταφή.....σελ.9

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2$^{Ο}$ - Παραγωγή – Σύνθεση διασταλλαγμάτων**

2.1 Παραγωγή στραγγισμάτων.....σελ.12

2.2 Φάσεις αποδόμησης απορριμμάτων.....σελ.17

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη σύνθεση των στραγγισμάτων.....σελ.20

2.4 Χημικά χαρακτηριστικά στραγγισμάτων.....σελ.21

2.5 Μικροβιολογική σύνθεση στραγγισμάτων.....σελ.25

2.6 Τοξικότητα στραγγισμάτων.....σελ.26

2.7 Μοντέλα ποιότητας στραγγισμάτων.....σελ.27

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3$^{Ο}$ - Υπολογισμός παραγόμενων στραγγισμάτων ΧΥΤΑ**

3.1 Υδατικό Ισοζύγιο.....σελ.33

3.2 Υπολογιστικό μοντέλο εκτίμησης του όγκου των διασταλλαγμάτων.....σελ.38

3.3 Δεδομένα υπολογιστικού μοντέλου.....σελ.44

3.4 Μοντέλο HELP……...σελ.51

3.5 Υποθέσεις μοντέλου.....σελ.61

3.6 Περιορισμοί μοντέλου.....σελ.63

3.7 Εφαρμογή μοντέλου HELP.....σελ.64

3.8 Συμπεράσματα .....σελ.73

3.9 Μοντέλο Landgem.....σελ.75

3.10 Εφαρμογή μοντέλου Landgem.....σελ.76

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4$^{ο}$- Διαμόρφωση του χώρου – Στεγανοποίηση**

4.1 Στεγανοποίηση κυψέλης.....σελ.80

4.2 Αργιλική μόνωση.....σελ.81

4.3 Μόνωση με γεωμεμβράνες.....σελ.85

4.5 Στρώσεις προστασίας της γεωμεμβράνης .....σελ.88

3.6 Στρώση αποστράγγισης στραγγισμάτων.....σελ.90

3.7 Τελική αποκατάσταση του χώρου.....σελ.91

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο- Αποστραγγιστική ζώνη – Διαστασιολόγηση αγωγών**

5.1 Ζώνη αποστράγγισης.....σελ.94
5.2 Αγωγοί στραγγισμάτων. .....σελ.94
5.3 Συστήματα συλλογής στραγγισμάτων.....σελ.97
5.4 Έλεγχος απόστασης αγωγών..... .....σελ.103

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο - Μέθοδοι επεξεργασίας στραγγισμάτων**

6.1 Κατηγορίες επεξεργασίας στραγγισμάτων.....σελ.102
6.2 Διοχέτευση των Στραγγισμάτων.....σελ.105
6.2.1 Επεξεργασία εκτός της τοποθεσίας .....σελ.105
6.2.2 Ανακυκλοφορία.....σελ.106
6.2.3 Άρδευση.....σελ.109
6.3 Φυσική και Χημική Επεξεργασία.....σελ.111
6.3.1 Χημική εξάτμιση.....σελ.111
6.3.2 Χημική οξείδωση.....σελ.111
6.3.3 Χημική κατακρήμνιση.....σελ.112
6.3.4 Προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα.....σελ.114
6.3.5 Ακτινοβολία γ.....σελ.115
6.3.6 Αντίστροφη όσμωση.....σελ.115
6.3.7 Αφαίρεση αμμωνίας.....σελ.120
6.4 Βιολογική Επεξεργασία.....σελ.121
6.4.1 Αερόβια επεξεργασία.....σελ.121
6.4.1.1 Αερόβιοι Αντιδραστήρες.....σελ.121
6.4.1.2 Εγκαταστάσεις Ενεργούς Ιλύος.....σελ.122
6.4.1.3 Αερόβια Φίλτρα.....σελ.123
6.4.1.4 Συνεχούς-Ροής Αερόβιοι Αντιδραστήρες.....σελ.124
6.4.1.5 Περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι, RBC .....σελ.124
6.4.1.6 Αντιδραστήρες SBR (Sequencing Batch Reactor) .....σελ.125
6.4.1.7 Τεχνητές λίμνες/ Επιφάνειες με καλλιέργειες καλαμιών.....σελ.137
6.4.1.8 Νιτροποίηση/ Απονιτροποίηση.....σελ.131
6.4.2 Αναερόβια επεξεργασία.....σελ.132
6.4.2.1 Συμβατικοί Χωνευτήρες.....σελ.134
6.4.2.2 Αναερόβια Φίλτρα.....σελ.134
6.4.2.3 UASB.....σελ.135
6.5 Ολοκληρωμένα συστήματα επεξεργασίας στραγγισμάτων.....σελ.137
6.6 Συμπεράσματα.....σελ.142

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο - SBR & Συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων**

7.1 Εγκατάσταση επεξεργασίας στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Χανίων.....σελ.145

7.2 Διαδοχικός Batch αντιδραστήρας (SBR) .....σελ.147

7.2.1 Λειτουργία ενός κύκλου του SBR.....σελ.150

7.2.2 Πλεονεκτήματα –Μειονεκτήματα.....σελ.153

7.2.3 Κινητικές του SBR.....σελ.154

7.2.4.Σχεδιαστικές εξισώσεις για τη διαστασιολόγηση SBR.....σελ.156

7.3 Εφαρμογή SBR στο ΧΥΤΑ Χανίων.....σελ.157

7.4 Φυσικά Συστήματα.....σελ.161

7.5 Υγροβιότοποι για την επεξεργασία στραγγισμάτων ΧΥΤΑ.....σελ.162

7.5.1 Σχεδιασμός υγροβιότοπου.....σελ.175

7.6 Εφαρμογή υγροβιότοπου στο ΧΥΤΑ Χανίων.....σελ.168

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο -Παρακολούθηση υπόγειων υδάτων**

8.1 Τοποθέτηση φρεατίων.....σελ.170

8.2 Εξυγίανση εδάφους.....σελ.172

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο -Οικονομικά στοιχεία κατασκευής ΧΥΤΑ**

9.1 Οικονομικά στοιχεία στεγάνωσης, μόνωσης&διαχείρισης στραγγισμάτων.σελ.173

9.2 Οικονομικά στοιχεία επεξεργασίας στραγγισμάτων.....σελ.175

9.3 Οικονομικά στοιχεία κατασκευής του ΧΥΤΑ ανεξάρτητα από τη διαχείριση των στραγγισμάτων .....σελ.177

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10ο -Δειγματοληψία -Επεξεργασία μετρήσεων**

10.1 Μετρούμενες παράμετροι.....σελ.180

10.2 Δειγματοληψία.....σελ.182

10.3 Συνοπτική παρουσίαση οργάνων.....σελ 183

10.4 Παρουσίαση εργαστηριακών μετρήσεων.....σελ.188

10.5 Συμπεράσματα.....σελ.189

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11ο – Σύνοψη – Επίλογος**

10.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων.....σελ.191

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**.....σελ.194

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1$^{ο}$

Πίνακας 1.1 Πηγές και είδη αστικών στερεών αποβλήτων……σελ.3
Πίνακας 1.2 Σύνθεση απορριμμάτων που καταλήγουν στο ΧΥΤΑ Χανίων……..σελ.9

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2$^{ο}$

Πίνακας 2.1 Τιμές χαρακτηριστικών παραμέτρων των διασταλλαγμάτων……...σελ.14
Πίνακας 2.2 Παράμέτροι παρακολούθησης των διασταλλαγμάτων…….σελ.15
Πίνακας 2.3 Τιμές σύστασης των στραγγισμάτων στην Ελλάδα……..σελ.17
Πίνακας 2.3 Παράμετροι ανίχνευσης βαθμού σταθεροποίησης αποβλήτων……σελ.19
Πίνακας 2.4 Τιμές οργανικών ενώσεων σε στραγγίσματα……...σελ.25
Πίνακας 2.5 Μέθοδοι μέτρησης τοξικότητας των στραγγισμάτων……...σελ.27
Πίνακας 2.6 Ενδεικτικές τιμές γ……..……..σελ.29
Πίνακας 2.7 Ενδεικτικές τιμές των $K_1$ και $K_2$……..σελ.29

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3$^{ο}$

Πίνακας 3.1 Τιμές του συντελεστή απορροής……...σελ.33
Πίνακας 3.2 Ετήσιες ποσότητες απορριμμάτων στα Χανιά……..σελ.45
Πίνακας 3.3 Μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής……σελ.46
Πίνακας 3.4 Τιμές διηθούμενης ποσότητας νερού ανά ταμπάνι κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ΧΥΤΑ……..σελ.48
Πίνακας 3.5 Τιμές διηθούμενης ποσότητας νερού ανά ταμπάνι μετά το πέρας λειτουργίας του ΧΥΤΑ……..σελ.48
Πίνακας 3.6 Τιμές παραγόμενης ποσότητας στραγγισμάτων……..σελ.52
Πίνακας 3.7 Τύποι εδαφών που διαθέτει το μοντέλο……σελ.58
Πίνακας 3.8 Ποιότητα γεωμεμβράνης……...σελ.60
Πίνακας 3.9 Δεδομένα εξατμισοδιαπνοής μοντέλου……σελ.64
Πίνακας 3.10 Διαμόρφωση χώρου 2 έτη μετά τη λειτουργία της κυψέλης……..σελ.66
Πίνακας 3.11 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη…..σελ.66
Πίνακας 3.12 Αποτελέσματα μοντέλου για το μηνιαίο ισοζύγιο στην κυψέλη…σελ.67
Πίνακας 3.13 Διαμόρφωση χώρου αμέσως μετά το πέρας λειτουργίας……...σελ.67
Πίνακας 3.14 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (2$^{η}$ περίπτωση) ……σελ.68

Πίνακας 3.15 Αποκατάσταση του χώρου χωρίς τη χρήση τεχνητής μόνωσης επιφανειακά……...σελ.68
Πίνακας 3.16 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (3η περίπτωση) ……σελ.69
Πίνακας 3.17 Αποκατάσταση του χώρου με χρήση συμπυκνωμένης αργίλου & μιας στρώσης μπετονίτη……σελ.69
Πίνακας 3.18 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (4η περίπτωση) ……σελ.70
Πίνακας 3.19 Αποκατάσταση του χώρου χωρίς με χρήση τεχνητής μόνωσης HDPE ……...σελ.71
Πίνακας 3.20 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (4η περίπτωση)……σελ.71
Πίνακας 3.21 Διαμόρφωση χώρου 2 έτη μετά τη λειτουργία της κυψέλης……σελ.72
Πίνακας 3.22 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (6η περίπτωση) ……σελ.72
Πίνακας 3.23 Διαμόρφωση χώρου αμέσως μετά το πέρας λειτουργίας……..σελ.73
Πίνακας 3.24 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (7η περίπτωση)……σελ.73
Πίνακας 3.25 Ετήσιες ποσότητες απορριμμάτων που δέχεται ο ΧΥΤΑ……...σελ.77

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο**

Πίνακας 4.1 Σύνθεση της αργιλικής μόνωσης……σελ.82
Πίνακας 4.2 Ιδιότητες μπετονίτη……...σελ.83
Πίνακας 4.3 Έλεγχοι των ιδιοτήτων του αργιλικού φραγμού……..σελ.85
Πίνακας 4.4 Μηχανικές ιδιότητες της γεωμεμβράνης……..σελ.86
Πίνακας 4.5 Παράμετροι συγκόλλησης γεωμεμβρανών……...σελ.87
Πίνακας 4.6 Ενδεικτικές διαστάσεις ρολού γεωμεμβράνης……..σελ.88
Πίνακας 4.7 Χαρακτηριστικά γεωυφάσματος……...σελ.89
Πίνακας 4.8 Ενδεικτικές διαστάσεις ρολού γεωυφάσματος……σελ.90
Πίνακας 4.9 Χαρακτηριστικά υλικού ζώνης αποστράγγισης……..σελ.91
Πίνακας 4.10 Επιφανειακή στεγανοποίηση……..σελ.93

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο**

Πίνακας 5.1 Αγωγοί Φ400 από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας……..σελ.102

Πίνακας 5.2 Σχέσεις γεωμετρικών χαρακτηριστικών ροής σε αγωγό κυκλικής διατομής με μερική πλήρωση……..σελ.103

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6$^{ο}$**

Πίνακας 6.1 Απόδοση συστήματος με μεμβράνες στο ΧΥΤΑ Lubeck……..σελ.118
Πίνακας 6.2 Απόδοση συστήματος νανοδιήθησης και υψηλής πίεσης αντίστροφης όσμωσης……..σελ.119
Πίνακας 6.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αντίστροφης όσμωσης……..σελ.120
Πίνακας 6.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα νανοδιήθησης……...σελ.120
Πίνακας 6.5 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα βιολογικών φίλτρων έναντι συστημάτων ενεργούς ιλύος……σελ.124
Πίνακας 6.6 Απόδοση SBR στο ΧΥΤΑ Georgswerder……...σελ.126
Πίνακας 6.7Ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων και των στραγγισμάτων που εισέρχονται στον SBR…….σελ.127
Πίνακας 6.8 Καταστάσεις λειτουργίας SBR……...σελ.127
Πίνακας 6.9 Απόδοση SBR ……σελ.127
Πίνακας 6.10 Εφαρμογές αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας στραγγισμάτων..σελ.131
Πίνακας 6.11 Εφαρμογές αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας στραγγισμάτων ……..……...σελ.137

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7$^{ο}$**

Πίνακας 7.1 Όρια εκροής επεξεργασμένων στραγγισμάτων……..σελ.147
Πίνακας 7.2 Απόδοση συστημάτων SBR……σελ.148

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9$^{ο}$**

Πίνακας 9.1 Κόστος στεγάνωσης, μόνωσης ΧΥΤΑ……...σελ.175
Πίνακας 9.2 Δαπάνες κατασκευής εγκατάστασης επεξεργασίας στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Λάρισας……..σελ.175
Πίνακας 9.3 Κόστος μεθόδων επεξεργασίας στραγγισμάτων……σελ.177
Πίνακας 9.4 Επιπλέον κόστη κατά την κατασκευή ενός ΧΥΤΑ……σελ.179

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10$^{ο}$**

Πίνακας 10.1 Εργαστηριακά αποτελέσματα……...σελ.189

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1$^{Ο}$

Εικόνα 1.1 Παραγόμενες ποσότητες απορριμμάτων για τα έτη 1991 & 1997…...σελ.4
Εικόνα 1.2 Ποιοτική σύσταση οικιακών απορριμμάτων……....σελ.4
Εικόνα 1.3 Διάθεση απορριμμάτων κατά το έτος 1997 στην Ελλάδα……σελ.6

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2$^{Ο}$

Εικόνα 2.1 Κίνηση – δημιουργία στραγγισμάτων……...……..σελ.13
Εικόνα 2.2 Διαχρονική εξέλιξη συγκεντρώσεων παραμέτρων ΧΥΤΑ…...……..σελ.13

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3$^{Ο}$

Εικόνα 3.1 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου…...……...σελ.39
Εικόνα 3.2 Σχηματική απεικόνιση των ταμπανιών…….……..σελ.49
Εικόνα 3.3 Διάταξη στρωμάτων που θεωρεί το μοντέλο HELP…….……..σελ.56
Εικόνα 3.4 Ενδεικτικές τιμές αριθμών καμπύλης…….……σελ.61
Εικόνα 3.5 Παραγόμενες εκπομπές μεθανίου από την κυψέλη……σελ.78
Εικόνα 3.6 Παραγόμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την κυψέλη….σελ.78
Εικόνα 3.7 Παραγόμενες εκπομπές NMOC από την κυψέλη……...σελ.78
Εικόνα 3.8 Παραγόμενες εκπομπές VOC από την κυψέλη…….……..σελ.79

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4$^{Ο}$

Εικόνα 4.1 Γεωτρήσεις ελέγχου ποιότητας εδαφών…….……σελ.80
Εικόνα.4.2 Τύποι διαστρωμάτωσης ΧΥΤΑ…….……..……...σελ.81
Εικόνα 4.3 Εργασίες συμπύκνωσης αργίλου το ΧΥΤΑ Χανίων..……...….σελ.82
Εικόνα 4.4 Διαρροή διασταλλαγμάτων μέσω αργιλικής στρώσης..……σελ.84
Εικόνα 4.5 Τοποθέτηση γεωμεμβράνης επί της αργίλου..…….…...……σελ.86
Εικόνα 4.6 Συγκόλληση μεμβρανών..……..…….…..…….σελ.87
Εικόνα 4.7 Τοποθέτηση γεωυφάσματος ..…….……σελ.89
Εικόνα 4.8 Τοποθέτηση προστατευτικής στρώσης άμμου……σελ.90
Εικόνα 4.9 Τελική κάλυψη ενός ΧΥΤΑ……σελ.92
Εικόνα 5.1 Συσχέτιση συντελεστή διαπερατότητας, απόστασης σωλήνων και ύψους στρώματος φίλτρου……...……σελ.95

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5$^{ο}$**

Εικόνα 5.1 Συσχέτιση συντελεστή διαπερατότητας, απόστασης σωλήνων και ύψους στρώματος φίλτρου……σελ.95
Εικόνα 5.2 Διατάξεις σωληνώσεων αποστράγγισης……..…σελ.96
Εικόνα 5.3 Σύστημα συλλογής στραγγισμάτων……σελ.96
Εικόνα 5.4 1$^{ος}$ τύπος συστήματος συλλογής στραγγισμάτων……σελ.97
Εικόνα 5.5 2$^{ος}$ τύπος συστήματος συλλογής στραγγισμάτων……σελ.98
Εικόνα 5.6 3$^{ος}$ τύπος συστήματος συλλογής στραγγισμάτων……σελ.99
Εικόνα 5.7 Σχηματική απεικόνιση των αγωγών……σελ.99
Εικόνα 5.8 Τάφρος στο κάτω μέρος της κυψέλης……..σελ.100
Εικόνα 5.9 Αγωγοί συλλογής στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Χανίων……σελ.100
Εικόνα 5.10 Κατάληξη κεντρικού αγωγού συλλογής στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Χανίων……σελ.101
Εικόνα 5.11 Γεωμετρία ροής σε αγωγό κυκλικής διατομής με μερική πλήρωση …….σελ.102

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6$^{ο}$**

Εικόνα 6.1 Διάγραμμα ροής της εγκατάστασης προεπεξεργασίας στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Λάρισας…….……..σελ.104
Εικόνα 6.2 Σχηματική απεικόνιση διεργασίας UASB……..…… σελ.136
Εικόνα 6.3 1$^{ο}$ ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων για νέους αλλά και μέσης ηλικίας ΧΥΤΑ……σελ.138
Εικόνα 6.4 1$^{ο}$ ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων για γηρασμένους ΧΥΤΑ……..σελ.139
Εικόνα 6.5 2$^{ο}$ ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων……..σελ.140
Εικόνα 6.6 3$^{ο}$ Ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων για νέους αλλά και μέσης ηλικίας ΧΥΤΑ……σελ.140
Εικόνα 6.7 3$^{ο}$ ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων για γηρασμένους ΧΥΤΑ…….σελ.141
Εικόνα 6.8 4$^{ο}$ ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων……σελ.141

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7$^{ο}$**

Εικόνα 7.1 Σύστημα επεξεργασίας στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Χανίων……σελ.145
Εικόνα 7.2 Κατασκευή τεχνητού υγροβιότοπου στο ΧΥΤΑ Χανίων……σελ.146

Εικόνα 7.3 Φάση πλήρωσης SBR……...σελ.150
Εικόνα 7.4 Φάση αερισμού SBR…….σελ.151
Εικόνα 7.5 Φάση καθίζησης SBR…….……..σελ.151
Εικόνα 7.6 Φάση απομάκρυνσης υπερκείμενου SBR…….σελ.152
Εικόνα 7.7 Φάση αδράνειας SBR……σελ.152
Εικόνα 7.8 Σχηματική απεικόνιση SBR…….σελ.153
Εικόνα 7.9 Απεικόνιση διαδικασίας ενεργούς ιλύος……...σελ.124
Εικόνα 7.10 Παράσταση φυσικού συστήματος……..σελ.163

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8$^{ο}$**

Εικόνα 8.1 Φρεάτιο παρακολούθησης υπογείων υδάτων……...σελ.170
Εικόνα 8.2 Σύστημα φρεατίων……σελ.171

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10$^{ο}$**

Εικόνα 10.1 1$^{ο}$ Σημείο Δειγματοληψίας, δεξαμενή εξισορρόπηση…….…σελ.182
Εικόνα 10.2 2$^{ο}$ Σημείο Δειγματοληψίας, έξοδος κεντρικού αγωγού……...σελ.183
Εικόνα 10.3 Ηλεκτρονικό θολόμετρο…….σελ.183
Εικόνα 10.4 Συσκευή διήθησης……...σελ.184
Εικόνα 10.5 Φορητό pH-μετρο……..……σελ.184
Εικόνα 10.6 Φορητό Αγωγιμόμετρο……...σελ.185
Εικόνα 10.7 Φορητό Φασματοφωτόμετρο……..σελ.185
Εικόνα 10.8 Σταθερό Φασματοφωτόμετρο…….…σελ.186
Εικόνα 10.9 Φιάλες BOD – Oxitop…….……σελ.186
Εικόνα 10.10 Θερμαντικό σώμα…….……σελ.187
Εικόνα 10.11 Αναλυτής TOC…….…….……σελ.187
Εικόνα 10.12 Συσκευή ατομικής απορρόφησης…….……σελ.188

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1$^{O}$
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ- ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΤΑΦΗ

## 1.1 Μη επικίνδυνα στερεά απόβλητα

Η ορθολογική διαχείριση των στερεών αποβλήτων εντάσσεται στην επιταγή του άρθρου 24 του Συντάγματος για προστασία του περιβάλλοντος με σύγχρονη εξυπηρέτηση του δημοσίου συμφέροντος, που στην περίπτωση αυτή είναι η υγεία των πολιτών. Ο σχεδιασμός της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων εκπονείται με βάση τις κοινωνικές, χωροταξικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής στο πλαίσιο εφαρμογής και εξειδίκευσης των γενικών κατευθύνσεων της πολιτικής διαχείρισης των αποβλήτων (άρθρο 7 ΦΕΚ 358, 17 Μαΐου 1996) και αποσκοπεί ειδικότερα στην μελέτη και στον καθορισμό των μεθόδων διαχείρισης που πρέπει να εφαρμόζονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή καθώς και στη χωροθέτηση των εγκαταστάσεων διάθεσης ή και αξιοποίησης των στερεών αποβλήτων.

Το πρόβλημα της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων είναι σήμερα αρκετά σοβαρό και περίπλοκο, αφού στη διαδικασία επίλυσής του εμπλέκονται τεχνολογικές, οικονομικές, κοινωνικές και θεσμικές παράμετροι, γεγονός που καθιστά δυσχερή τη λήψη αποφάσεων. Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας θα πρέπει να λαμβάνει πρωταρχικά υπ' όψη της το ρόλο που θα διαδραματίσουν οι πολίτες, τόσο διότι αυτοί είναι οι παραγωγοί των στερεών αποβλήτων, όσο και διότι αυτοί είναι οι αποδέκτες (οικονομικά και περιβαλλοντικά) των επιπτώσεων της εκάστοτε τεχνικής λύσης που επιλέγεται. [19]

Τα στερεά μη επικίνδυνα απόβλητα αποτελούν μεγάλο τμήμα των στερεών αποβλήτων και η διάθεση τους αποτελεί μια σύγχρονη πρόκληση καθώς ο όγκος τους, ιδιαίτερα στις μεγαλουπόλεις, βρίσκεται σε μια διαρκή ανοδική πορεία. Ως στερεά μη επικίνδυνα απόβλητα χαρακτηρίζονται τα στερεά απόβλητα τα οποία δεν περιλαμβάνονται στο παράρτημα της οδηγίας 91/689/ΕΟΚ. [9]

Τα αστικά στερεά απόβλητα είναι τα στερεά απόβλητα που παράγονται από τις δραστηριότητες των νοικοκυριών, των εμπορικών δραστηριοτήτων, των καθαρισμών οδών και άλλων κοινόχρηστων χώρων, καθώς και άλλα στερεά απόβλητα τα οποία μπορούν από την φύση τους ή τη σύνθεσή τους να εξομοιωθούν με τα οικιακά στερεά απόβλητα.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι συνήθεις πηγές και τα είδη των αστικών στερεών αποβλήτων.

| **Χαρακτηρισμός πηγής αποβλήτων** | **Δραστηριότητες ή εγκαταστάσεις παραγωγής** | **Τύποι & συστατικά αποβλήτων** |
|---|---|---|
| Οικιακά απόβλητα | Κατοικίες | Τροφικά υπολείμματα, χαρτιά, πλαστικά, δέρματα, γυαλιά, μέταλλα, ηλεκτρικά είδη, τοξικά οικιακά απορρίμματα κ.τ.λ. |
| Εμπορικά απόβλητα | Καταστήματα, εστιατόρια γραφεία, τυπογραφεία, συνεργεία κ.τ.λ. | Χαρτιά, πλαστικά, ξύλα, γυαλιά, μέταλλα, τροφικά υπολείμματα κ.τ.λ. |
| Απόβλητα ιδρυμάτων | Σχολεία, δημόσιες υπηρεσίες κ.τ.λ. | Χαρτιά, πλαστικά, γυαλιά κ.τ.λ. |
| Απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων | Κατεδαφίσεις, κατασκευές κτιρίων, δρόμων κ.τ.λ. | Σκυρόδεμα, τούβλα, καλώδια, δέρμα, μέταλλα, ξύλα κ.τ.λ. |
| Απόβλητα καθαρισμού δημόσιων χώρων | Καθαρισμός οδών, πάρκων, χώρων αναψυχής κ.τ.λ. | Χαρτιά, πλαστικά, γυαλιά, ξύλα κ.τ.λ. |
| Απόβλητα εγκαταστάσεων επεξεργασίας αποβλήτων | Βιολογικοί καθαρισμοί, σηπτικές δεξαμενές καύση αποβλήτων κ.τ.λ. | Τέφρα, ιλύς |

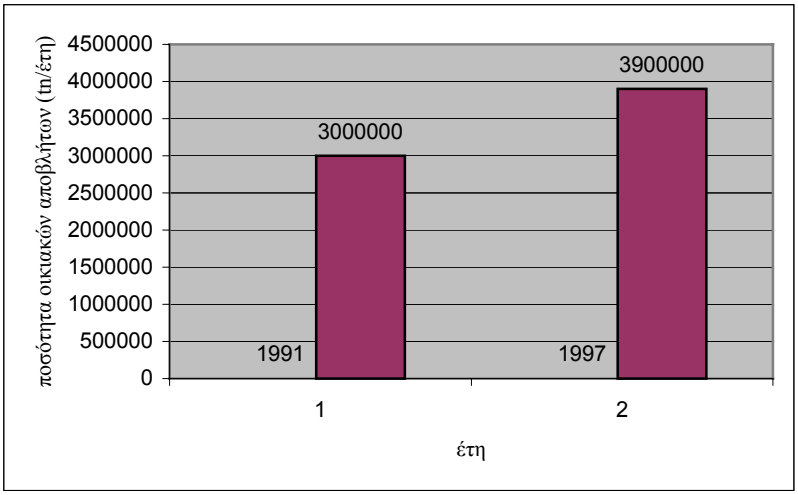
*Πίνακας 1.1 Πηγές και είδη αστικών στερεών αποβλήτων* [7]

Σύμφωνα με το ΦΕΚ 723/2000 τα μη επικίνδυνα στερεά απόβλητα διακρίνονται στις εξής κατηγορίες

i. Οικιακά απόβλητα
ii. Υλικά συσκευασίας
iii. Υλικά καθαρισμού ακτών
iv. Ιλύες από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων
v. Χρησιμοποιημένα ελαστικά
vi. Αποσυρόμενα αυτοκίνητα
vii. Αδρανή απόβλητα από οικοδομές
viii. Αποσυρόμενα φρούτα
ix. Κτηνοτροφικά απόβλητα
x. Μη επικίνδυνα βιομηχανικά απόβλητα

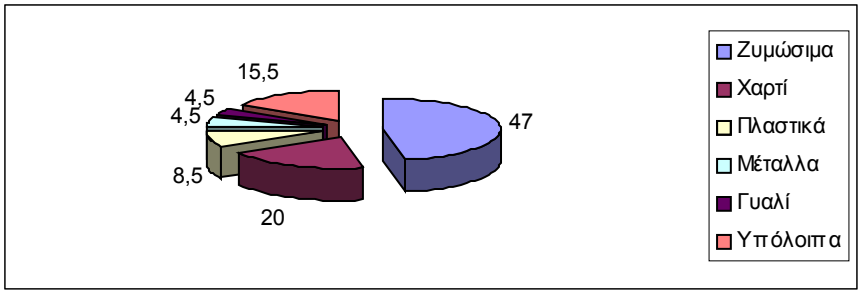
### 1.1.1 Οικιακά απόβλητα

Το 1997 η ποσότητα των παραγόμενων οικιακών αποβλήτων σε επίπεδο χώρας ανήλθε σε 3,9 εκατομμύρια τόνους. Τα οικιακά απόβλητα περιλαμβάνουν τα απόβλητα που προέρχονται από κατοικίες καθώς και ένα μέρος των αποβλήτων που παράγονται από τα εμπορικά καταστήματα. Η ποσότητα αυτή προσδιορίστηκε βάσει στοιχείων των Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων καθώς και εκτιμήσεων που στηρίχθηκαν σε συντελεστές που εκφράζουν την παραγωγή οικιακών αποβλήτων σε συνδυασμό με τα πληθυσμιακά στοιχεία της χώρας για το 1997 (συμπεριλαμβανομένων των μεταναστών και των τουριστών). Η μέση ημερήσια παραγωγή οικιακών αποβλήτων ανέρχεται σε 1 kg/κάτοικο. Στο επόμενα διάγραμμα δίνονται οι ποσότητες των παραγόμενων οικιακών αποβλήτων για τα έτη 1991 και 1997.




*Εικόνα 1.1 Παραγόμενες ποσότητες απορριμμάτων για τα έτη 1991 & 1997* [20]

Η υφιστάμενη μέση ποιοτική σύσταση των παραγόμενων οικιακών αποβλήτων δίνεται στην εικόνα 1.2 όπως προκύπτει από στοιχεία που έχουν συλλεχθεί για το 30% του πληθυσμού της χώρας καλύπτοντας αστικές, αγροτικές καθώς και τουριστικές περιοχές σε συνδυασμό με εκτιμήσεις για τον υπόλοιπο πληθυσμό.




*Εικόνα 1.2 Ποιοτική σύσταση οικιακών απορριμμάτων* [20]

Τα ειδικά επικίνδυνα απόβλητα που περιέχονται στα απορριπτόμενα οικιακά

περιλαμβάνουν κυρίως φάρμακα, υλικά καθαρισμού, χρώματα, βερνίκια, διαλυτικά, μπαταρίες και φυτοφάρμακα. Τα απόβλητα αυτά είναι είτε οικιακής προέλευσης είτε προέρχονται από διάφορες επαγγελματικές δραστηριότητες (π.χ. γραφεία, εμπορικά καταστήματα κλπ). Η συνολική ποσότητα των αποβλήτων αυτών για το 1997 εκτιμάται ότι ανήλθε στους 4.525 τόνους περίπου (0,12% επί των συνολικά παραγόμενων οικιακών αποβλήτων). Το παραπάνω ποσοστό περιλαμβάνεται στο τμήμα των 'υπολοίπων'.

Το πρόβλημα της διαχείρισης των οικιακών αποβλήτων έχει αποκτήσει ιδιαίτερη διάσταση τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα λόγω της ανάπτυξης των μεγάλων αστικών κέντρων, την συνεχή αύξηση του τουριστικού ρεύματος και την άνοδο του βιοτικού επιπέδου η οποία είχε σαν αποτέλεσμα την αλλαγή των καταναλωτικών συνηθειών. Συνεπώς σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του ΄80 και αρχές της δεκαετίας του ΄90 τα οποία προέκυψαν από τις εφαρμοζόμενες πρακτικές διαχείρισης.

Η κύρια πρακτική διαχείρισης που εφαρμοζόταν ήταν η εναπόθεση των οικιακών αποβλήτων ενώ η υγειονομική ταφή είχε περιορισμένη εφαρμογή. Συγκεκριμένα σε επίπεδο χώρας είχαν καταγραφεί 3430 χώροι ανεξέλεγκτης απόρριψης οι οποίοι δέχονταν το 35% των οικιακών απορριμμάτων, και σε πολλές περιπτώσεις βρίσκονταν σε ακατάλληλες περιοχές (κοντά σε ακτές ή ρέματα). Επιπλέον, υπήρχαν 1420 εγκεκριμένοι χώροι που δέχονταν το 65% περίπου της συνολικής ποσότητας των παραγόμενων απορριμμάτων. Σε σχετική μελέτη του 1993 εξετάσθηκαν 302 χώροι διάθεσης από τους 1420 εγκεκριμένους και κατατάχθηκαν σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος των πετρωμάτων, την κλίση των πρανών και τη μορφολογία του εδάφους. Κατά την μελέτη αυτή διαπιστώθηκε ότι:

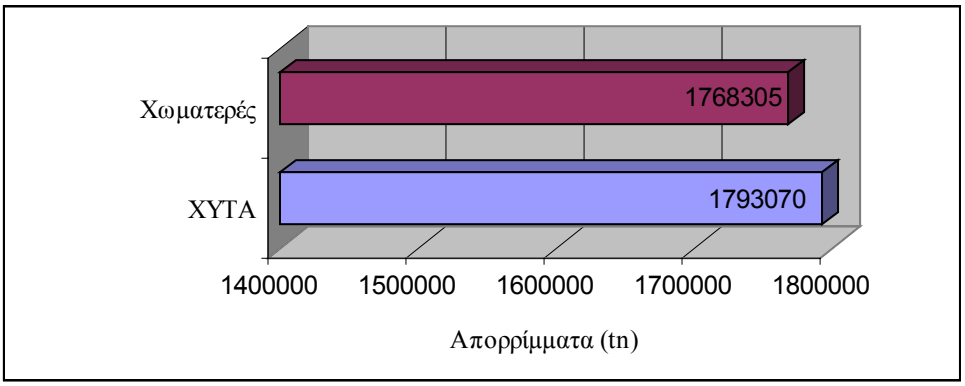
α) Στο 19% των χώρων τα υποκείμενα πετρώματα είναι ημιπερατά και η κατείσδυση των υγρών διαστάλλαξης είναι περιορισμένη. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται ειδική μελέτη για να διαπιστωθεί η καταλληλότητα περαιτέρω χρήσης. Το 31% των χώρων βρίσκεται σε αδιαπερατά πετρώματα και μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλοι. Το υπόλοιπο 50% των χώρων απόθεσης απορριμμάτων, βρίσκεται σε διαπερατά πετρώματα και θεωρούνται εντελώς ακατάλληλοι.[20]

β) Σε σχέση με τη μορφολογία του εδάφους, το 35,5% των χώρων βρίσκεται σε πεδινές περιοχές, το 36% σε χειμάρρους, το 3,5% σε ποτάμια, το 22,5% σε ακτές και το 3% σε έλη. Εντελώς ακατάλληλοι, από άποψη μορφολογίας, χαρακτηρίζονται οι χώροι που βρίσκονται σε επαφή με το επιφανειακό υδρογραφικό δίκτυο (ποτάμια και χείμαρροι) καθώς και με τον υδροφόρο ορίζοντα (όπως τα έλη). Από τους χώρους που εξετάστηκαν το 6,4% πληρεί όλες τις προϋποθέσεις καταλληλότητας, το 12,2% παρουσιάζει προβλήματα που μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη λήψη κατάλληλων μέτρων και το υπόλοιπο 81,4% των χώρων δεν πληρεί βασικούς και κρίσιμους όρους καταλληλότητας.

Σε αρκετούς από τους χώρους αυτούς υπήρχαν σημαντικά προβλήματα όπως σχηματισμός στραγγισμάτων, παραγωγή βιοαερίου, αυταναφλέξεις και δυσοσμία. Τα σημαντικά προβλήματα που υπήρχαν έκαναν επιτακτική την ανάγκη εφαρμογής νέων τρόπων διαχείρισης των οικιακών αποβλήτων με αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια να γίνονται σημαντικές προσπάθειες για την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος. [20]

Στον Ελληνικό χώρο οργανωμένη συλλογή και μεταφορά των οικιακών αποβλήτων πραγματοποιείται για το 85% κατά βάρος των παραγόμενων αποβλήτων, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αντιστοιχεί σε αγροτικές αραιοκατοικημένες καθώς και ορεινές περιοχές. Για την διευκόλυνση και καλύτερη οργάνωση της μεταφοράς των οικιακών αποβλήτων προς τους χώρους αξιοποίησης ή τελικής διάθεσης έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν σταθμοί μεταφόρτωσης στον ελληνικό χώρο, οι οποίοι καλύπτουν το 23,4% της συνολικής παραγόμενης ποσότητας.

Από το σύνολο των οικιακών αποβλήτων που παράγονται το 8,69% ανακυκλώνεται ενώ το υπόλοιπο 91,31% διατίθεται σε ΧΥΤΑ ή χωματερές (χώροι διάθεσης που πληρούν μερικώς ή καθόλου τις προδιαγραφές ΧΥΤΑ). Όσον αφορά την τελική διάθεση για το 1997, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3, το 50,3% της ποσότητας των οικιακών αποβλήτων που οδηγείται προς ταφή διατίθεται σε ΧΥΤΑ ενώ το υπόλοιπο 49,7% διαθέτονταν σε χωματερές.




*Εικόνα 1.3 Διάθεση απορριμμάτων κατά το έτος 1997 στην Ελλάδα* [20]

Τα δυνητικώς ανακυκλώσιμα υλικά περιλαμβάνουν το χαρτί, τα μέταλλα, το πλαστικό και το γυαλί τα οποία αντιπροσωπεύουν το 37,5% των συνολικά παραγόμενων οικιακών αποβλήτων καθώς και το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων (47%). Το ποσοστό ανακύκλωσης του χαρτιού, των μετάλλων, των πλαστικών και του γυαλιού ανέρχεται στο 21% επί των συνολικά απορριπτόμενων ποσοτήτων τους. Σχετικά με το οργανικό κλάσμα ανακύκλωση πραγματοποιείται σε μία μονάδα λιπασματοποίησης, ετήσιας δυναμικότητας 31.500 τόνων, όπου επεξεργάζεται το 1,72% του οργανικού κλάσματος που περιέχεται στα συνολικά παραγόμενα οικιακά απόβλητα.

Η παραγόμενη σε ετήσια βάση ποσότητα των στερεών αποβλήτων που προέρχονται από εμπορικές δραστηριότητες, ανέρχεται σε 312.000 – 390.000 τόνους (8 - 10% των συνολικά παραγόμενων στερεών οικιακών αποβλήτων).

*Υλικά καθαρισμού ακτών*

Η Ελληνική ακτογραμμή, μήκους περίπου 16.000 χλμ, γίνεται αποδέκτης πάσης φύσεως απορριμμάτων της ολοένα και πιο καταναλωτικής κοινωνίας. Το 60% του Ελληνικού πληθυσμού, το 70% της βιομηχανίας και το 90% του τουρισμού, φιλοξενούνται στις παράκτιες ζώνες.

Για την προστασία, ανάπλαση και καθαρισμό των ακτών εφαρμόζονται προγράμματα του Υπουργείου Περιβάλλοντος με την συνεργασία των Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων και ΟΤΑ στις περισσότερες τουριστικές περιοχές της χώρας. Στο πλαίσιο των προγραμμάτων καθαρισμού απομακρύνονται από τις ακτές στερεά απόβλητα, νεκρά φύκια και ογκώδη αντικείμενα τα οποία ευθύνονται για την πρόκληση σημαντικών προβλημάτων που οδηγούν στην υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος.

Το έτος 1996 καθαρίστηκαν 391 ακτές έκτασης 9.000 στρεμμάτων και απομακρύνθηκαν 90.000 τόνοι αποβλήτων τα οποία οδηγήθηκαν προς τελική διάθεση σε ΧΥΤΑ.

*Ιλύς από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων*

Μέχρι σήμερα η ιλύς των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων διατίθεται χωρίς να έχει υποστεί επεξεργασία σε χώρους ταφής οικιακών αποβλήτων και σε πολύ μικρό ποσοστό στη γεωργία, χωρίς όμως προγραμματισμό.

*Χρησιμοποιημένα ελαστικά*

Τα ελαστικά που ο κύκλος ζωής τους έχει περατωθεί συλλέγονται μαζί με τα ογκώδη οικιακά απόβλητα και μεταφέρονται συνήθως σε ΧΥΤΑ.

Από το σύνολο των ελαστικών που αποσύρονται από την κυκλοφορία το 3% αναγομώνεται και επαναχρησιμοποιείται, τεχνική που εφαρμόζεται από 25 εταιρείες στον ελληνικό χώρο. Επιπλέον, πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει ένα ποσοστό ελαστικών που δεν συλλέγονται μαζί με τα οικιακά απόβλητα, τα οποία είτε τοποθετούνται σε χώρους αποθήκευσης ελαστικών είτε απορρίπτονται ανεξέλεγκτα.

*Αδρανή απόβλητα από οικοδομές*

Η ποσότητα των αδρανών αποβλήτων που παράγονται από την κατασκευή και κατεδάφιση οικοδομών παρουσιάζει μεγάλη αύξηση. Οι ενέργειες αξιοποίησής τους χαρακτηρίζονται αποσπασματικές και έγκεινται στη δραστηριότητα των εργολάβων που έχουν αναλάβει τα αντίστοιχα έργα. Οι ποσότητες που δεν αξιοποιούνται καταλήγουν είτε σε ΧΥΤΑ είτε σε χωματερές.

*Αποσυρόμενα φρούτα*

Οι ποσότητες των αποσυρόμενων φρούτων βαίνουν συνεχώς μειούμενες μέχρι του ορίου του 10% της ποσότητας που διατίθεται στο εμπόριο σύμφωνα με όσα ορίζει η Ευρωπαϊκή Ένωση, ωστόσο η ποσότητα των φρούτων που αποσύρθηκαν στη χώρα μας το 1997 έφτασε τους 582 τόνους, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών κατέληξε σε ΧΥΤΑ ή σε ανεξέλεγκτους χώρους διάθεσης.

*Μη επικίνδυνα βιομηχανικά απόβλητα*

Στην Ελλάδα υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός βιομηχανικών μονάδων και άλλων δραστηριοτήτων, από την παραγωγική διαδικασία των οποίων προκύπτουν στερεά απόβλητα τα οποία σύμφωνα με την ταξινόμηση του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων δεν είναι επικίνδυνα. Οι κλάδοι οι οποίοι παράγουν μη επικίνδυνα απόβλητα στην Ελλάδα είναι οι εξής:

Βιομηχανίες παραγωγής τροφίμων
Βιομηχανίες παραγωγής ποτών και χυμών,
Ελαιουργεία
Βιομηχανίες παραγωγής πολτού και χαρτιού
Μονάδες εκτύπωσης έντυπου υλικού
Βιομηχανίες πρωτογενούς παραγωγής μετάλλων
Βιομηχανίες δευτερογενούς παραγωγής μετάλλων
Βιομηχανίες πλαστικών
Βιομηχανίες παραγωγής ανόργανων λιπασμάτων
Βιομηχανίες παραγωγής γυαλιού
Βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων ξυλείας
Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί
Μεταλλεία.

Οι κύριες πρακτικές που ακολουθούνται από τις βιομηχανικές μονάδες για την διαχείριση των παραγόμενων μη επικίνδυνων βιομηχανικών αποβλήτων είναι οι εξής:

Ανακύκλωση
Πρόσθετο στην τσιμεντοβιομηχανία
Ενεργειακή αξιοποίηση
Διάθεση-αποθήκευση σε χώρους των βιομηχανικών μονάδων
Τελική διάθεση σε ΧΥΤΑ ή σε ανεξέλεγκτους χώρους ταφής.

Σύμφωνα με την [13] (στοιχεία 2002) τα ποσοστά των υλικών που βρίσκονται στα στερεά απόβλητα και θα διατίθενται στο ΧΥΤΑ Χανίων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

| **Συστατικό** | **Ποσότητα στα απορρίμματα ( tn/yr)** |
|---|---|
| Οργανικά | 27600 |
| Χαρτί τυπωμένο | 2850 |
| Χαρτί συσκευασίας | 800 |
| Χαρτόνι | 1350 |
| Λοιπά χαρτιά | 4450 |
| Φύλλο πλαστικού | 2850 |
| PET | 150 |
| PVC | 50 |
| PE | 200 |
| Λοιπά πλαστικά | 1050 |
| Αλουμίνιο | 500 |
| Σιδηρούχα μέταλλα | 1400 |
| Ύφασμα | 850 |
| Δέρμα-λάστιχο | 250 |
| Ξύλα – χόρτα – ξηρά | 900 |
| Αδρανή | 1000 |
| Γυαλί | 1900 |
| Λοιπά | 1850 |

*Πίνακας 1.2 Σύνθεση απορριμμάτων που καταλήγουν στο ΧΥΤΑ Χανίων*

## 1.2 Υγειονομική Ταφή

Υγειονομική Ταφή καλείται η διαδικασία σύμφωνα με την οποία τα απορρίμματα εναποτίθενται σε στρώσεις, συμπιέζονται και επικαλύπτονται με χώμα.
Η υγειονομική ταφή έχει τρεις στόχους:
1. την προστασία της δημόσιας υγείας
2. την προστασία των υπόγειων νερών
3. τη διαχείριση του παραγόμενου βιοαερίου.

Η υγειονομική ταφή ως μέθοδος τελικής διάθεσης έχει αποδειχθεί η πιο οικονομική και συνηθέστερη για τη διάθεση των οικιακών απορριμμάτων. Τα τελευταία χρόνια έχει τόσο πολύ εξελιχθεί ως μέθοδος, ώστε πολύ μικρή σχέση έχει με την ως τώρα ακολουθούμενη πρακτική ταφής των απορριμμάτων. Με τον τρόπο αυτό έχει καταστεί μία απόλυτα αξιόπιστη και επιστημονικά αποδεκτή μέθοδος για τη διάθεση των αποβλήτων.
Όπως όλες οι μέθοδοι διάθεσης, έτσι και η υγειονομική ταφή συνοδεύεται από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, με βάση τα οποία αξιολογείται για τη διάθεση

των αποβλήτων μιας περιοχής.

Όπου υπάρχει διαθέσιμη έκταση γης, η υγειονομική ταφή είναι η πιο οικονομική μέθοδος καθότι:

1.η αρχική επένδυση είναι χαμηλή, σε σχέση με άλλες μεθόδους

2.είναι η πληρέστερη μέθοδος συγκρινόμενη με τις άλλες, οι οποίες απαιτούν συμπληρωματική διάθεση των υπολειμμάτων της επεξεργασίας

3.σε ένα ΧΥΤΑ μπορούν να διατεθούν (κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις) διαφόρων ειδών απόβλητα

4.είναι μέθοδος ευέλικτη σε ποσοτικές διακυμάνσεις, με πιθανή μόνο την αύξηση του προσωπικού ή του εξοπλισμού που απασχολείται στο ΧΥΤΑ κατά την περίοδο προσκόμισης των μέγιστων ποσοτήτων απορριμμάτων

5. υποβαθμισμένες περιοχές (όπως λατομεία κλπ) μπορούν να αξιοποιηθούν μετά το πέρας λειτουργίας τους ως ΧΥΤΑ

6. είναι απλή σχετικά μέθοδος, καθώς δεν απαιτείται εφαρμογή υψηλής τεχνολογίας, ούτε εξειδικευμένο προσωπικό

Ως μειονεκτήματα της μεθόδου καταγράφονται τα εξής:

1.σε πυκνοκατοικημένες περιοχές δεν είναι (εύκολα) διαθέσιμοι κατάλληλοι χώροι, μέσα σε μια οικονομικά αποδεκτή απόσταση μεταφοράς των απορριμμάτων

2.πρέπει να εφαρμόζονται καθημερινά και με επιμέλεια οι προδιαγραφές λειτουργίας του χώρου ταφής διαφορετικά ο χώρος εύκολα μετατρέπεται σε χώρο ελεύθερης απόρριψης

3. η υγειονομική ταφή κοντά σε κατοικημένες περιοχές μπορεί να προκαλέσει οξύτατες αντιδράσεις του κοινού λόγω του συνδρόμου NIMBY (Not In My Back Yard).

Οι συνήθεις επιπτώσεις που προκαλούνται από την κατασκευή και τη λειτουργία ενός ΧΥΤΑ είναι οι εξής:

- Στραγγίσματα από τον κύριο όγκο των απορριμμάτων.
- Σκόνη και σωματίδια από τις χωματουργικές εργασίες, την φόρτωση και εκφόρτωση αδρανών και απορριμμάτων και την κίνηση των οχημάτων.
- Οσμές από την αναερόβια αποσύνθεση των αποικοδομήσιμων οργανικών ουσιών.
- Εκπομπές μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα από την έκλυση του βιοαερίου.
- Καπνός από την τυχαία αυτανάφλεξη των απορριμμάτων .
- Καυσαέρια από την κίνηση των οχημάτων.
- Θόρυβος από την κίνηση των οχημάτων και τη λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού.

Ωστόσο, οι επιπτώσεις από τη λειτουργία του έργου μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι

μικρής κλίμακας και ότι τίθενται εύκολα υπό έλεγχο με εφαρμογή κατάλληλων τεχνολογιών όπως:

- η στεγανοποίηση του χώρου απόθεσης με μονωτικές μεμβράνες
- η επεξεργασία των στραγγισμάτων και
- η συλλογή και καύση του βιοαερίου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2$^{O}$

ΠΑΡΑΓΩΓΗ – ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΙΑΣΤΑΛΛΑΓΜΑΤΩΝ

## 2.1 Παραγωγή στραγγισμάτων

Πλήθος ορισμών έχει δοθεί τόσο από νομοθετικά όργανα όσο και από συγγραφείς ώστε να καθοριστεί με τον κατά το δυνατό καλύτερο τρόπο η έννοια των υγρών αποβλήτων που προέρχονται από ένα ΧΥΤΑ. Μερικοί από αυτούς παρατίθενται στη συνέχεια.

Ως αποπλύματα ορίζονται τα νερά που ρέουν και εκρέουν από το ΧΥΤΑ [19]. Στο ΦΕΚ1572/2002 τα στραγγίσματα ορίζονται ως εξής: Οποιαδήποτε υγρά ρέουν δια μέσου των αποτεθέντων αποβλήτων και εκρέουν από το χώρο ταφής ή περιέχονται μέσα του. [21]

Αρκετά πλήρεις εμφανίζονται και κάποιοι ορισμοί στην βιβλιογραφία, ‘ως διασταλλάγματα (ή στραγγίσματα ή αποπλύματα) ενός ΧΥΤΑ μπορούν να οριστούν τα υγρά που διαπερνούν την απορριμματική μάζα και τα οποία ανακύπτουν:

1.από επιφανειακά νερά (βροχόπτωση) που εισέρχονται στο σώμα του ΧΥΤΑ

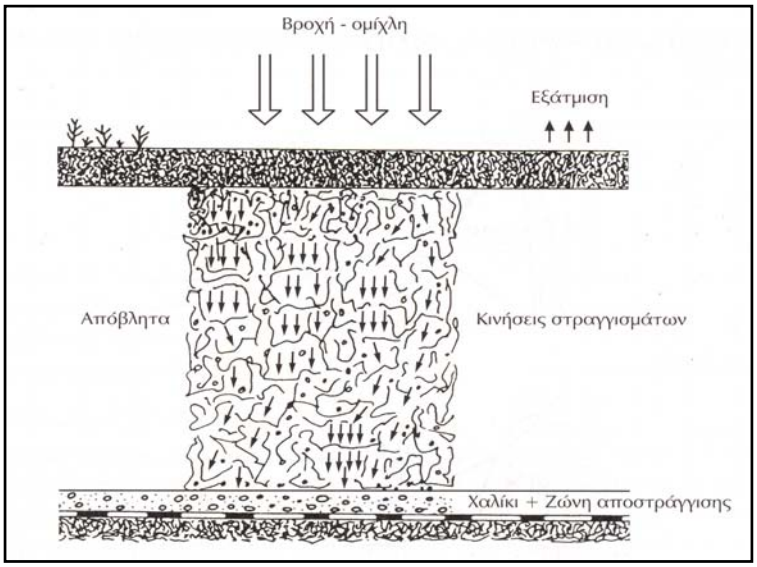
2.από υγρασία που έχουν τα ίδια τα αστικά στερεά απόβλητα ή άλλα πρόσθετα (π.χ. ιλύς) και αποβάλλεται λόγω συμπίεσής τους και με τη δημιουργία καναλιών διαφυγής

3.από υγρασία που περιέχεται στις επικαλύψεις’. [7]

Οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ υδατικού ισοζυγίου και βιολογικής αποσύνθεσης στα αστικά απόβλητα έχουν σαν συνέπεια την εμφάνιση μεγάλων διακυμάνσεων στην ποιοτική και ποσοτική σύσταση των στραγγισμάτων. Παρόλα αυτά είναι δυνατή η συλλογή αρκετών στοιχείων που επιτρέπουν μια εκτίμηση ποσοτική και ποιοτική της σύνθεσης των στραγγισμάτων σε μια εγκατάσταση ελεγχόμενης εναπόθεσης.

Η παραγωγή των στραγγισμάτων επηρεάζεται κυρίως από τις κλιματολογικές συνθήκες, τη μορφολογία της περιοχής και τον τρόπο λειτουργίας του χώρου διάθεσης των αστικών αποβλήτων. Στο ΦΕΚ 1572/2002 ορίζεται πως η σύσταση των στραγγισμάτων ενός εν λειτουργία ΧΥΤΑ θα πρέπει να γίνεται ανά τρίμηνο ενώ κατά την φάση μετέπειτα φροντίδας ανά εξάμηνο.

Η ετερογενής σύνθεση των αστικών αποβλήτων και η ταξινόμηση τους κατά μέγεθος τα κάνει να προσομοιάζουν σε μείγμα από χοντρή άμμο, χαλίκια και βότσαλα αναμεμειγμένα με οργανικές ουσίες. Η δομή αυτή σε συνάρτηση με τον εκάστοτε τρόπο λειτουργίας δυσκολεύει τη χρήση μαθηματικών μοντέλων για την περιγραφή της διακίνησης των στραγγισμάτων. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται η συμπεριφορά των στραγγισμάτων.




*Εικόνα 2.1 Κίνηση – δημιουργία στραγγισμάτων* [9]

Η παραγωγή των στραγγισμάτων από ένα ΧΥΤΑ αποτελεί ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα. Οι οργανικές ουσίες αποτελούν τη σημαντικότερη επιβάρυνση των στραγγισμάτων και είναι το κυριότερο κριτήριο για την εκτίμηση της ποιότητάς τους. Έτσι οι σπουδαιότερες παράμετροι θεωρούνται το $BOD_5$, το COD, το TOC και εξαρτώνται από την ηλικία της εγκατάστασης, το είδος της εφαρμοσμένης συμπίεσης και φυσικά τη σύνθεση των αποβλήτων.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η ανάπτυξη των στραγγισμάτων σε χώρο διάθεσης αστικών αποβλήτων. Οι οργανικές ουσίες δείχνουν τάση μείωσης της συγκέντρωσης τους όσο αυξάνεται η ηλικία της εγκατάστασης.

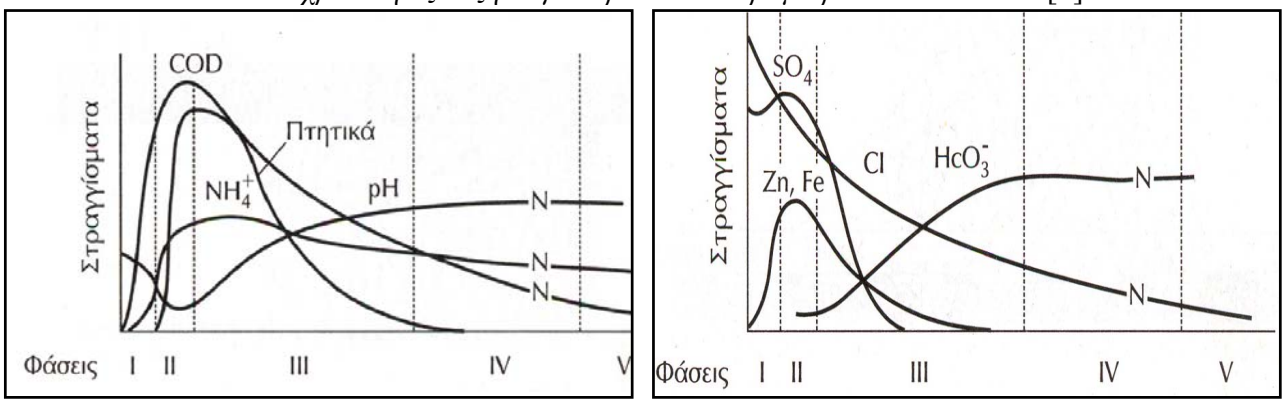
Τα ανόργανα στοιχεία των στραγγισμάτων χωρίζονται ανάλογα με την διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεών τους σε τρεις κατηγορίες:

α) παράμετροι με διαχρονική εξέλιξη συγκέντρωσης (Fe, Ca, Mg, Μη, Ζη),

β) παράμετροι με μακροπρόθεσμα ελαφρά αυξανόμενη συγκέντρωση (Cl, K,Na),

γ) παράμετροι με τυχαίες διακυμάνσεις συγκεντρώσεων ($NO_x$, P και βαρέα μέταλλα Pb, Ni, As, Cu, Cd, Cr, Co).

*Εικόνα 2.2 Διαχρονική εξέλιξη συγκεντρώσεων παραμέτρων ΧΥΤΑ* [9]



Καθώς το νερό διεισδύει μέσα από τα στερεά απόβλητα που αποσυντίθενται, τόσο τα υλικά της βιοαποικοδόμησης όσο και οι χημικές ενώσεις 'στραγγίζονται' σε ένα διάλυμα. Αντιπροσωπευτικές τιμές των χαρακτηριστικών των διασταλλαγμάτων δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

| **Παράμετροι** | **Τιμές (mg/L)** | | |
|---|---|---|---|
| | **Νέοι ΧΥΤΑ (ηλικίας<2 ετών)** | | **Ώριμοι ΧΥΤΑ (ηλικίας>10 ετών)** |
| | **Διακύμανση[1]** | **Τυπική τιμή[2]** | **Διακύμανση** |
| $BOD_5$ | 2.000-30.000 | 10.000 | 100-200 |
| TOC | 1.500-20.000 | 6.000 | 80-160 |
| COD | 3.000-60.000 | 18.000 | 100-500 |
| TSS | 200-2.000 | 500 | 100-400 |
| Οργανικό άζωτο | 10-800 | 200 | 80-120 |
| Αμμωνιακό άζωτο | 10-800 | 200 | 20-40 |
| νιτρικά | 5-40 | 25 | 5-10 |
| Ολικός φώσφορος | 5-100 | 30 | 5-10 |
| Ορθοφωσφορικά | 4-80 | 20 | 4-8 |
| Αλκαλικότητα-$CaCO_3$ | 1.000-10.000 | 3.000 | 20-1.000 |
| PH[3] | 4,5-7,5 | 6 | 6,6-7,5 |
| Ολική σκληρότητα - $CaCO_3$ | 300-10.000 | 3.500 | 200-500 |
| Ασβέστιο | 200-3.000 | 1.000 | 100-400 |
| Μαγνήσιο | 50-1.500 | 250 | 50-200 |
| Κάλιο | 200-1.000 | 300 | 50-400 |
| Νάτριο | 200-2.500 | 500 | 100-200 |
| Χλώριο | 200-3.000 | 500 | 100-400 |
| Θειικά άλατα | 50-1.000 | 300 | 20-50 |
| Ολικός Σίδηρος | 50-1.200 | 60 | 20-200 |

*Πίνακας 2.1 Τιμές χαρακτηριστικών παραμέτρων των διασταλλαγμάτων [39]*

**1.** Τυπικές τιμές διακύμανσης. Στην βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί και υψηλότερες μέγιστες τιμές.

**2.** Οι τυπικές τιμές για τους νέους ΧΥΤΑ θα ποικίλουν ανάλογα με την βιοαποικόδομηση που λαμβάνει χώρα.

**3.** Το pH δεν έχει μονάδες.

Λόγω της διακύμανσης των συγκεντρώσεων των παραμέτρων, ιδιαίτερα για τους νέους ΧΥΤΑ, θα πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή κατά τη χρήση των τυπικών τιμών. Τυπικές φυσικές, χημικές και βιολογικές παράμετροι παρακολούθησης-δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των στραγγισμάτων παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

| **Φυσικές παράμετροι** | **Οργανικά συστατικά** | **Ανόργανα συστατικά** | **Βιολογικές παράμετροι** |
|---|---|---|---|
| Εμφάνιση | Φαινόλες | SS, TDS | BOD |
| pH | COD | VSS, VDS | Βακτήρια (ολικά, στρεπτόκοκκοι,E-coli) |
| Αγωγιμότητα | TOC | Χλωρίδια | |
| Χρώμα | Πτητικά οξέα | Θεϊκά | |
| Θολότητα | Τανίνη – λιγνίνη | Φωσφορικά | |
| Θερμοκρασία | Οργανικό άζωτο | Αλκαλικότητα - Οξύτητα | |
| Οσμή | Διαλυτός αιθέρας | Νιτρικά - νιτρώδη άλατα | |
| Οξειδοαναγωγικό δυναμικό | Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες | Αμμωνιακό Άζωτο | |
| | Ενεργές ενώσεις μεθυλενίου (MBAS) | Νάτριο | |
| | | Ασβέστιο | |
| | | Κάλλιο | |
| | | σκληρότητα | |
| | | Β.μέταλλα (Pb,Cu,Ni,Cr,Zn,Cd,Fe,Mn, Hg,Ba,Ag) | |
| | | Αρσενικό | |
| | | Σελήνιο | |

*Πίνακας 2.2 Παράμετροι παρακολούθησης των διασταλλαγμάτων*

Η χημική σύσταση των στραγγισμάτων ποικίλει σε μεγάλο βαθμό εξαρτώμενη από την ηλικία του ΧΥΤΑ και των γεγονότων που έχουν προηγηθεί της διαδικασίας της δειγματοληψίας. Για παράδειγμα αν ένα δείγμα έχει ληφθεί κατά την φάση ΙΙΙ (από την εικόνα 2.2) τότε η τιμή του pH θα είναι χαμηλή ενώ οι τιμές των συγκεντρώσεων των $BOD_5$, TOC, COD, θρεπτικών και των βαρέων μετάλλων θα είναι πολύ υψηλές. Αν ωστόσο η δειγματοληψία γίνει κατά τη διάρκεια της φάσης IV τότε η τιμή του pH θα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 6,5-7,5 και οι τιμές των $BOD_5$, TOC, COD και των

θρεπτικών θα είναι αισθητά χαμηλότερες. Όμοια και οι τιμές στις συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων θα είναι χαμηλές καθώς τα περισσότερα μέταλλα είναι λιγότερο διαλυτά σε ουδέτερες τιμές του pH. Η τιμή του pH εξαρτάται όχι μόνο από την παρουσία των οξέων αλλά και από την μερική πίεση του $CO_2$ που βρίσκεται στο βιοαέριο και είναι σε επαφή με τα στραγγίσματα.

Η βιοαποικοδομησιμότητα των στραγγισμάτων είναι συνάρτηση του χρόνου. Η μεταβολή στην βιοαποικοδομησιμότητα μπορεί να ελεγχθεί από την μεταβολή του λόγου $BOD_5$/COD. Αρχικά η τιμή του λόγου είναι μεγαλύτερη ή ίση του 0,5. Λόγοι που κυμαίνονται κοντά στην περιοχή 0,4-0,6 αποτελούν ένδειξη ότι η οργανική ύλη του στραγγίσματος είναι εύκολα βιοαποικοδομήσιμη. Σε παλαιούς ΧΥΤΑ, η τιμή του λόγου $BOD_5$/COD κινείται συνήθως στην περιοχή 0,05-0,2. Ο λόγος αυτός είναι μειωμένος γιατί τα διασταλλάγματα των ώριμων ΧΥΤΑ περιέχουν φουλβικά και χουμικά οξέα τα οποία είναι χαμηλής βιοαποικοδομησιμότητας.[39]

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τιμές παραμέτρων διασταλλαγμάτων από μετρήσεις που έγιναν σε ΧΥΤΑ στον Ελλαδικό χώρο. Οι τιμές είναι δυνατόν να παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις από τις τιμές της διεθνούς βιβλιογραφίας λόγω κυρίως της διαφορετικής σύστασης των απορριμμάτων στην Ελλάδα.

| **Παράμετροι** | **Αθήνα** | **Πάτρα** | **Θεσσαλονίκη** | |
|---|---|---|---|---|
| | | | **παλαιά** | **νέα** |
| pH | 8-8,5 | | 7,3-8,8 | 4,9-6,7 |
| Αγωγιμότητα | | | 6,2-34 | 23-35,5 |
| Θολότητα | | | 76-1150 | 110-2700 |
| Χρώμα | 2720-9375 | | 955-15142 | 6250-20000 |
| Αλκαλικότητα | 1100-3500 | | 923-88070 | 3540-26200 |
| TS | 9000-19600 | | 3100-18000 | 32100-77000 |
| DS | 8740-191250 | | 3800-21800 | 31200-76000 |
| SS | 90-470 | 105-1220 | 10-5900 | 400-1900 |
| $Cl^-$ | 760-2350 | | 1162-9209 | 580-10100 |
| $N\text{-}NH_4$ | 474-3870 | 784-2744 | 39-1750 | 1400-10250 |
| Total Kjeldahl N | | | 370-1800 | 2023-10558 |
| Total P | 5-15 | 14,4-24,9 | 1,27-19,9 | 1,6-655 |
| COD | 3000-8810 | 3940-22930 | 685-15000 | 44000-115000 |
| BOD | 450-1150 | | 50-4200 | 9500-80795 |
| $NO_3^-$ | 14-91 | | 2,5-300 | 40-840 |
| $SO_4^{2-}$ | 70-350 | | 55-500 | 400-2500 |
| Fe | 5-22,2 | | 0,11-25 | 146-160 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Mn | | | 0,5-0,42 | 13,22-16,2 |
| $Zn^{-}$ | | 0,012-0,145 | 0,07-0,20 | 1,2-36,0 |
| Cr | 0,7-2,84 | 0,045-0,235 | 0,20-0,20 | 0,01-3,7 |
| Cu | 0,09-0,28 | 0,098-0,356 | 0,10-0,53 | 0,18-6,0 |
| Ni | 0,67-1,35 | 0,056-0,903 | 0,08-5,1 | 0,20-7,8 |
| Cd | | 0,015-0,079 | < αν. ορίου | 0,02-6,5 |
| Pb | | 0,038-0,467 | < αν. ορίου | 0,23-2,1 |
| $Ca^{+2}$ | | | 3,8-138 | 1727-3324 |
| $Mg^{+2}$ | 85,2-140 | | 0,02-193 | 285-443 |

*Πίνακας 2.3 Τιμές σύστασης των στραγγισμάτων στην Ελλάδα* [38]

## 2.2 Φάσεις Αποδόμησης Απορριμμάτων

Γενικά οι μηχανισμοί που ρυθμίζουν την μεταφορά μάζας από τα απορρίμματα στα στραγγίσματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες

- Υδρόλυση στερεών αποβλήτων και βιολογική αποδόμηση
- Διαλυτοποίηση αλάτων που περιέχονται μέσα στα απόβλητα
- Παρασυρμός σωματιδιακής ύλης.

*Φάσεις αερόβιας αποδόμησης*

Η πρώτη φάση της αερόβιας αποδόμησης των οργανικών ουσιών είναι γενικά περιορισμένης διάρκειας εξαιτίας της υψηλής απαίτησης σε οξυγόνο των αποβλήτων και της περιορισμένης ύπαρξης οξυγόνου μέσα στο ΧΥΤΑ. Το μόνο στρώμα του ΧΥΤΑ που εμπλέκεται στον αερόβιο μεταβολισμό είναι το ανώτερο όπου το οξυγόνο παγιδεύεται στα νέα απορρίμματα και εφοδιάζεται, σε οξυγόνο, μέσω της υδατικής κατακρήμνισης. Στην φάση αυτή (Φάση Ι, Εικόνα 2.2) έχει παρατηρηθεί πως οι πρωτείνες αποδομούνται σε αμινοξέα και στη συνέχεια σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό, νιτρικά και θειικά, τυπικά προϊόντα καταβολισμού στις αερόβιες διαδικασίες. Οι υδρογονάνθρακες μετατρέπονται σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό, ενώ τα λίπη σε λιπαρά οξέα και γλυκερίνη και στη συνέχεια αποδομούνται περαιτέρω σε περισσότερο απλά προϊόντα καταβολισμού μέσω ενδιάμεσου σχηματισμού πτητικών οξέων και οργανικών. Η κυτταρίνη που αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα του οργανικού υλικού των απορριμμάτων αποδομείται μέσω εξωκυτταρικών ενζύμων σε γλυκόζη που χρησιμοποιείται στη συνέχεια από βακτήρια και μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Συνήθως η αερόβια φάση είναι σύντομη και δεν υπάρχει ουσιαστικός σχηματισμός στραγγισμάτων.

Σε παλαιούς ΧΥΤΑ όταν έχει παραμείνει μόνο το ανθεκτικό τμήμα του οργανικού άνθρακα στα απόβλητα που έχουν αποτεθεί μια δεύτερη αερόβια φάση λαμβάνει

χώρα στο ανώτερο τμήμα του ΧΥΤΑ. Στην φάση αυτή (Φάση V) ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου είναι χαμηλός και ο αέρας αρχίζει να διαχέεται από την ατμόσφαιρα δίνοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης αερόβιων ζωνών και ζωνών με οξειοαναγωγικό δυναμικό πολύ υψηλό για το σχηματισμό μεθανίου.

*Φάσεις αναερόβιας αποδόμησης*

Τρεις διαφορετικές φάσεις μπορούν να αναγνωρισθούν στην αναερόβια αποδόμηση των απορριμμάτων. Η πρώτη φάση (Φάση ΙΙ) της αναερόβιας αποδόμησης είναι η ζύμωση των οξέων που προκαλεί μια μείωση στο pH των στραγγισμάτων, υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών οξέων και αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις ανόργανων ιόντων (για παράδειγμα $Cl^-$, $SO^{2-}_4$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Na^+$). Η αρχικά υψηλή συγκέντρωση των θειικών πιθανόν να αρχίσει σταδιακά να μειώνεται καθώς το οξειδοαναγωγικό δυναμικό μειώνεται. Τα σουλφίδια που παράγονται μπορούν να κατακρημνίσουν το σίδηρο, το μαγγάνιο και τα βαρέα μέταλλα που διαλύθηκαν κατά την όξινη ζύμωση. Η μείωση στο pH προκαλείται από την υψηλή παραγωγή των λιπαρών πτητικών οξέων και την υψηλή μερική πίεση $CO_2$. Η αυξανόμενη συγκέντρωση των ανιόντων και των κατιόντων οφείλεται στην πλύση του εύκολα διαλυτού υλικού που ήταν αρχικά διαθέσιμο στην μάζα των αποβλήτων και αυτού που προέκυψε από την αποδόμηση των οργανικών ουσιών. Οι αρχικές αναερόβιες διαδικασίες οφείλονται στον πληθυσμό των αναερόβιων μικροβίων που αποτελείται από τα αυστηρά αναερόβια βακτήρια και αυτά που κάτω από αυτές τις συνθήκες συμπεριφέρονται ως αναερόβια. Η δεύτερη κατηγορία βακτηρίων συμμετέχει στην αποδόμηση των υλικών και μειώνει το οξειδοαναγωγικό δυναμικό έτσι ώστε να μπορούν να αυξηθούν τα μεθανογόνα βακτήρια. Τα τελευταία είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στο οξυγόνο και απαιτούν οξειδοαναγωγικό δυναμικό μικρότερο των 330mV ώστε να επιτελέσουν τη λειτουργία τους. Τα στραγγίσματα στην φάση αυτή χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές του $BOD_5$ (συνήθως > 10000 mg/L), υψηλές αναλογίες $BOD_5$/ COD (συνήθως > 0,7) και όξινες τιμές του pH (τυπικές τιμές 5-6).

Η δεύτερη φάση (φάση ΙΙΙ,) ξεκινά με την αργή ανάπτυξη των μεθανογόνων βακτηρίων. Η ανάπτυξη αυτή είναι πιθανόν να εμποδιστεί από την υπερβολική αύξηση των οργανικών πτητικών οξέων που είναι τοξικά για τα μεθανογόνα βακτήρια σε συγκεντρώσεις 6000-16000 mg/L Η συγκέντρωση του μεθανίου στο βιοαέριο αυξάνει ενώ το υδρογόνο, το διοξείδιο του άνθρακα και τα λιπαρά πτητικά οξέα μειώνονται. Παράλληλα, η συγκέντρωση των θειικών μειώνεται εξαιτίας της βιολογικής αναγωγής. Η μετατροπή των λιπαρών οξέων προκαλεί αύξηση στις τιμές του pH και στην αλκαλικότητα με επακόλουθη μείωση στη διαλυτότητα του ασβεστίου, του σιδήρου, του μαγγάνιου και των βαρέων μετάλλων. Τα τελευταία κατακρημνίζονται πιθανώς ως σουλφίδια.

Η τρίτη φάση (φάση IV) της αναερόβιας αποδόμησης χαρακτηρίζεται από την μεθανογένεση από τα μεθανογόνα βακτήρια. Η περιοχή του pH μέσα στην οποία επιζούν τα βακτήρια είναι εξαιρετικά περιορισμένη και κυμαίνεται από 6 έως 8. Σε αυτό το στάδιο, τα στραγγίσματα χαρακτηρίζονται από περίπου ουδέτερες τιμές pH, χαμηλές συγκεντρώσεις πτητικών οξέων και ολικών διαλυμένων στερεών ενώ το βιοαέριο παρουσιάζει περιεκτικότητα σε μεθάνιο που είναι γενικά υψηλότερη του 50%. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η διαλυτότητα της πλειοψηφίας των οργανικών συστατικών έχει μειωθεί σε αυτό το στάδιο της λειτουργίας του ΧΥΤΑ, αν και η διαδικασία της σταθεροποίησης των αποβλήτων θα συνεχιστεί για αρκετά έτη.

Τα στραγγίσματα που παράγονται κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης χαρακτηρίζονται από τις σχετικά χαμηλές τιμές του BOD και χαμηλές αναλογίες BOD/COD.

Ο επόμενος πίνακας αναφέρει κάποιες παραμέτρους σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να ανιχνευθεί ο βαθμός σταθεροποίησης στον οποίο βρίσκονται τα απόβλητα στο ΧΥΤΑ.

| **Παράμετρος** | **Δείκτης** |
|---|---|
| **Φυσικές** | |
| pH | Όξινο –βασικό / Δείκτης φάσης σταθεροποίησης |
| ORP | Οξείδωση-αναγωγή / Δείκτης φάσης σταθεροποίησης |
| Αγωγιμότητα | Ιοντική Ισχύς / Δείκτης δραστικότητας |
| Θερμοκρασία | Δείκτης αντίδρασης |
| **Χημικές** | |
| COD, TOC, TVA, TKN, $NH_3$-N, $PO_4$_P | Δείκτης υποστρώματος |
| $SO_4$/S, $NO_3$-$NH_3$ | Δείκτες θρεπτικών |
| TS | Αραίωση/ Δείκτης κινητικότητας |
| ολική αλκαλικότητα | Δείκτης ρυθμιστικής ικανότητας |
| Βαρέα Μέταλλα | Τοξικότητα/ Δείκτης περιβαλλοντικής επιρροής |
| **Βιολογικές** | |
| $BOD_5$ | Υπόστρωμα/ Δείκτης βιοαποικοδομησιμότητας |
| Ολικά κολοβακτηρίδια | Δείκτης επιρροής υγείας |
| Στρεπτόκοκκοι | Δείκτης επιρροής υγείας |
| Ιοί | Δείκτης επιρροής υγείας |

*Πίνακας 2.3 Παράμετροι ανίχνευσης βαθμού σταθεροποίησης αποβλήτων*

## 2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη σύνθεση των στραγγισμάτων

Η χημική σύνθεση των στραγγισμάτων εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αφορούν την μάζα των απορριμμάτων και την περιοχή που προέρχονται αλλά και εκείνες που αφορούν τη διαχείρισή τους στο ΧΥΤΑ. Από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των στραγγισμάτων είναι:

*Η σύνθεση αποβλήτων*

Η φύση του οργανικού μέρους των αποβλήτων επηρεάζει την βιαποικοδόμησή τους και κατ΄ επέκταση την ποιότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων. Η παρουσία τοξικών, για τα βακτήρια, ουσιών μπορεί να επιβραδύνει ή να εμποδίσει τις βιολογικές διαδικασίες αποδόμησης. Το ανόργανο μέρος των στραγγισμάτων εξαρτάται από την επαφή μεταξύ των αποβλήτων και νερού που στραγγίζεται καθώς επίσης από το pH και τη χημική ισορροπία στη διεπιφάνεια στερεού - υγρού. Στην πλειονότητά τους τα μέταλλα απελευθερώνονται από τη μάζα των απορριμμάτων σε όξινο περιβάλλον.

*Το pH.*

Το pH επηρεάζει τις χημικές διαδικασίες που ευθύνονται κατά κύριο λόγο για τη μεταφορά μάζας, όπως η κατακρήμνιση, η διαλυτότητα, η οξειδοαναγωγή και η προσρόφηση. Γενικά, σε όξινες συνθήκες, που είναι χαρακτηριστικό της αρχικής φάσης της αναερόβιας αποδόμησης των αποβλήτων, αυξάνουν τη διαλυτότητα των χημικών συστατικών (οξείδια, υδροξείδια και ανθρακούχες ενώσεις), και μειώνουν την προσροφητική ικανότητα των αποβλήτων.

*Το οξειδοαναγωγικό δυναμικό*

Οι αναγωγικές συνθήκες, κατά τη δεύτερη και τρίτη φάση της αναερόβιας αποδόμησης, επηρεάζουν τη διαλυτότητα των θρεπτικών ουσιών και των μετάλλων των στραγγισμάτων.

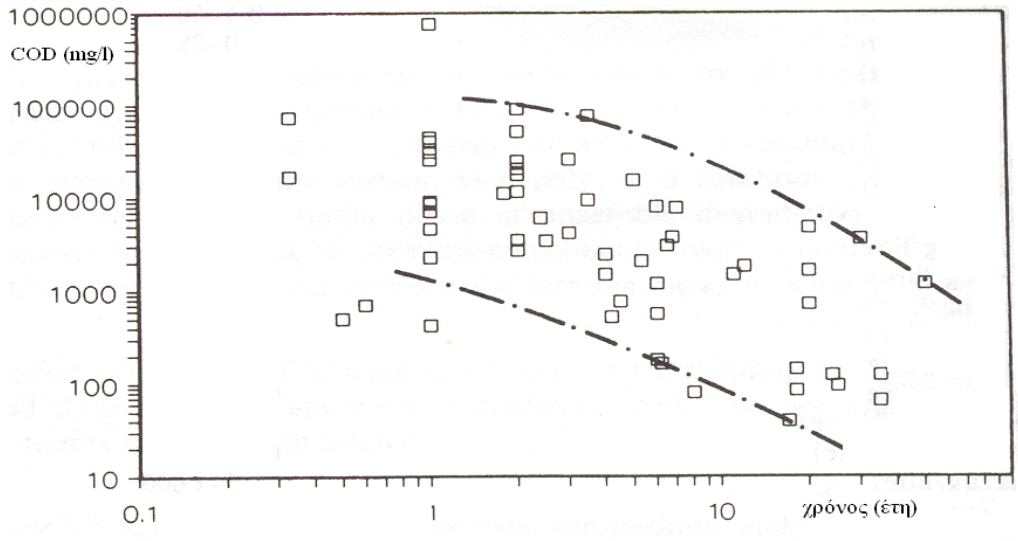
*Η ηλικία του ΧΥΤΑ*

Οι διακυμάνσεις στη σύνθεση και ποσότητα των στραγγισμάτων σε ρύπους που παρασύρονται από τα απορρίμματα είναι συχνά χαρακτηριστικό της ηλικίας του ΧΥΤΑ. Ο χρόνος αυτός μπορεί να μετρηθεί από τη χρονική στιγμή απόθεσης των αποβλήτων ή την στιγμή εμφάνισης των πρώτων στραγγισμάτων. Η ηλικία του ΧΥΤΑ παίζει σημαντικό ρόλο στα χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων που εξαρτώνται από τις διαδικασίες σταθεροποίησης. Το ρυπαντικό φορτίο των στραγγισμάτων φθάνει γενικά στις μέγιστες τιμές κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών

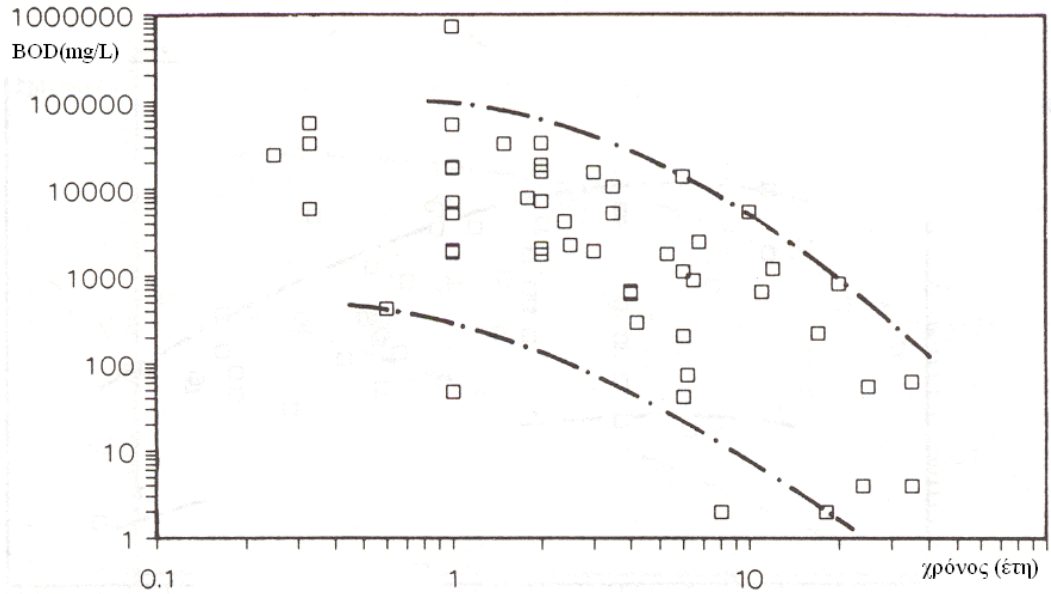
λειτουργίας του ΧΥΤΑ (2-3 έτη) και έπειτα βαθμιαία μειώνεται τα επόμενα έτη. Αυτή η τάση γενικά συναντάται στις οργανικές ενώσεις, κύριοι δείκτες των οποίων είναι το COD, το BOD και το TOC, ο μικροβιολογικός πληθυσμός και ανόργανα ιόντα (βαρέα μέταλλα, $Cl^-$ , $SO^{-2}_4$, κλπ).

## 2.4 Χημικά χαρακτηριστικά στραγγισμάτων

Τα διαγράμματα που ακολουθούν δείχνουν αναλυτικά την τάση σε σχέση με το χρόνο κάποιων βασικών παραμέτρων των στραγγισμάτων. [30]

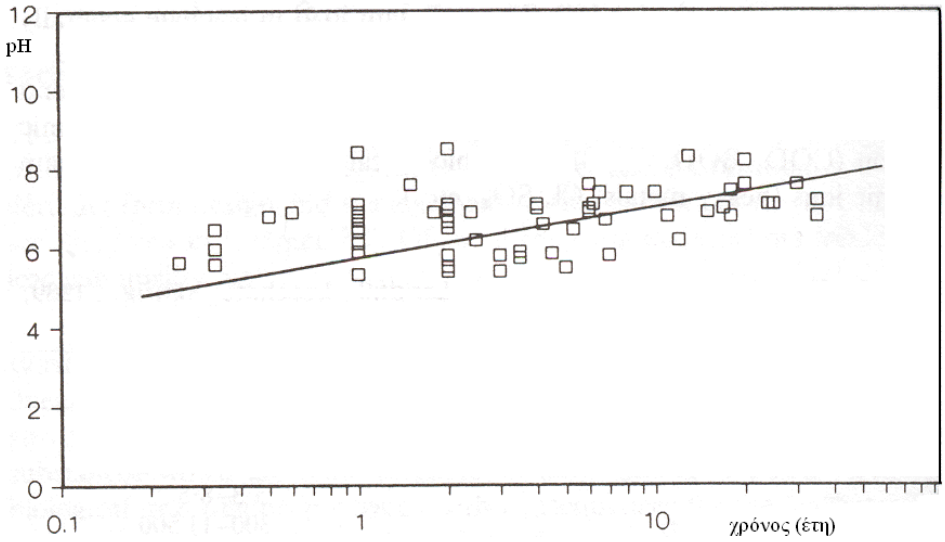



*Διάγραμμα 2.1 Χρονική εξέλιξη COD*



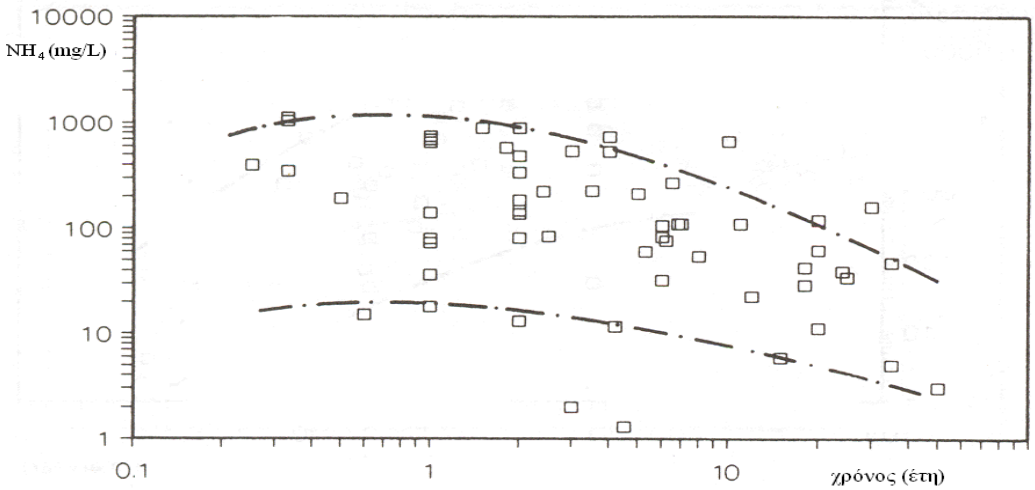

*Διάγραμμα 2.2 Χρονική εξέλιξη BOD*

Γενικά οι συγκεντρώσεις των οργανικών ενώσεων κατά το πέρασμα από την όξινη φάση στην φάση μεθανογέννεση σταδιακά μειώνονται. Όμοια, το pH παρουσιάζει μια τάση αύξησης σύμφωνα με την εξέλιξη των βιοχημικών διαδικασιών που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



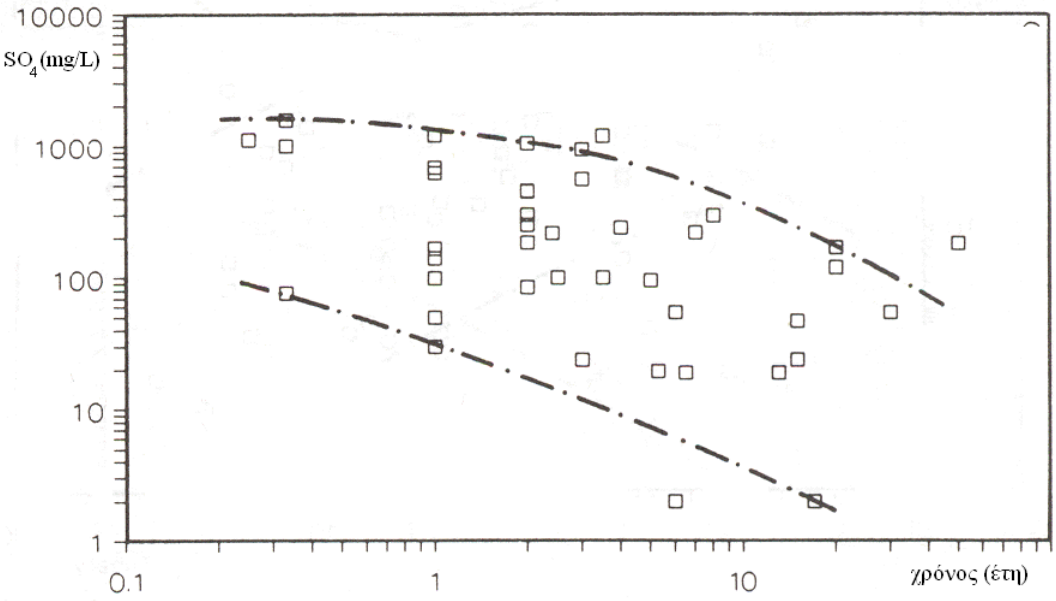

*Διάγραμμα 2.3 Χρονική εξέλιξη pH*

Η συγκέντρωση των αμμωνιακών είναι υψηλή στα στραγγίσματα και ακολουθεί την υδρόλυση και ζύμωση του πρωτεϊνικού τμήματος του βιοαποικοδομήσιμου υποστρώματος. Κατά την έναρξη της δεύτερης αναερόβιας φάσης η συγκέντρωση των αμμωνιακών τείνει να μειώνεται σταδιακά σύμφωνα με τη θεωρητική τάση του διαγράμματος 2.4.



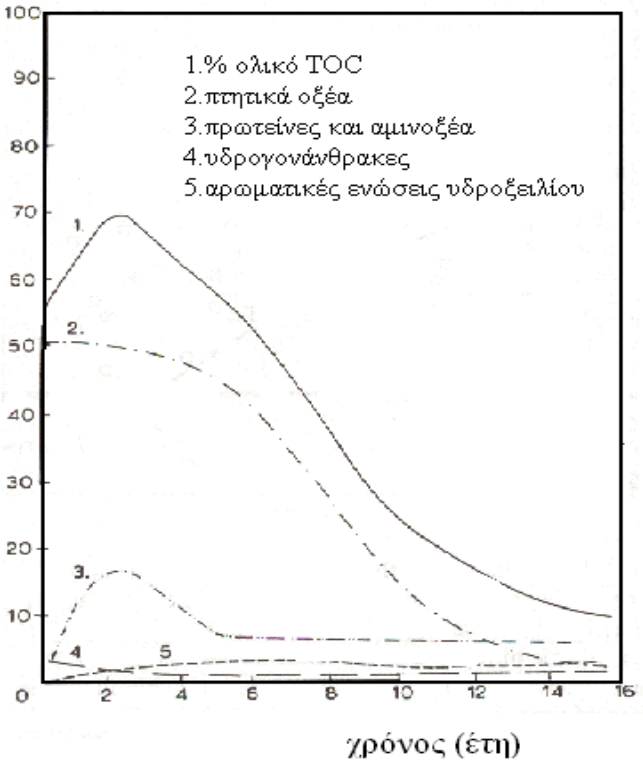

*Διάγραμμα 2.4 Χρονική εξέλιξη $NH_4$*

Παράλληλα, η συγκέντρωση των θειικών και των χλωριούχων σε ένα νέο ΧΥΤΑ είναι υψηλή. Η μείωση των σουλφιδίων σε ένα αναερόβιο περιβάλλον έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση των θειικών.




*Διάγραμμα 2.5 Χρονική εξέλιξη $SO_4$*

Η τάση της οργανικού τμήματος των στραγγισμάτων σε σχέση με την ηλικία του ΧΥΤΑ, εκφρασμένο ως ποσοστό του TOC παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.




*Διάγραμμα 2.6 Χρονική εξέλιξη TOC κ.α. παραμέτρων*

Στο διάγραμμα φαίνεται επίσης πως η παραγωγή των πτητικών οξέων, κατά το πρώτο στάδιο της αναερόβιας αποδόμησης, κυριαρχεί στα πρώτα έτη λειτουργίας του ΧΥΤΑ.

Παρόμοιες τάσεις με τα οργανικά παρουσιάζουν και οι συγκεντρώσεις μέταλλων που συναντώνται σε ένα ΧΥΤΑ όπως ο σίδηρος, ο ψευδάργυρος και το μαγγάνιο. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης λειτουργίας του ΧΥΤΑ υπάρχει ένας υψηλός βαθμός διαλυτότητας των μετάλλων που οφείλεται στις χαμηλές τιμές του pH που προκαλούνται από την υψηλή παραγωγή των οργανικών οξέων. Με το πέρασμα των ετών διαπιστώνεται αύξηση στο pH οπότε και μείωση της διαλυτότητας των μετάλλων.

Η σταθεροποίηση των οργανικών ενώσεων επηρεάζει την πλύση ιχνών των μετάλλων. Πολλές οργανικές ενώσεις που περιέχουν άζωτο, οξυγόνο και θείο μπορούν να σχηματίσουν διαλυτά σύμπλοκα με τα μέταλλα και να αυξήσουν έτσι τις συγκεντρώσεις των μετάλλων.

Τα χουμικά και φουλβικά οξέα είναι ισχυρά υποκατάστατα συμπλόκων και μπορούν να διαδραματίσουν έναν σημαντικό ρόλο στην μακροπρόθεσμη απελευθέρωση των βαρέων μετάλλων από το ΧΥΤΑ.

Τα φαινόμενα της προσρόφησης και συμπλοκοποίησης είναι κυρίως αρμόδια για τη μείωση ιχνών των μετάλλων στη μάζα των αποβλήτων. Κάτω από οξειδωτικές συνθήκες, η προσρόφηση μπορεί να ρυθμίσει τη συγκέντρωση ενός συστατικού σε συγκεντρώσεις χαμηλότερες από εκείνες που ελέγχονται από την χημική κατακρήμνιση. Οι στερεές ενώσεις τύπου λιγνίνης μπορούν να απορροφήσουν ίχνη μετάλλων από τα στραγγίσματα.

Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει συγκεκριμένες οργανικές ενώσεις που έχουν ανιχνευθεί σε στραγγίσματα.

| **Παράμετρος** | **Διακύμανση** | **Μέση τιμή** |
|---|---|---|
| Βενζόλιο | 1-1630 | 11,10mg/L |
| Βουτυλικός βενζυλεστέρας | 10-64,1 | 37,05 μg/L |
| Χλωροβενζόλιο | 3-188 | 25,20 μg/L |
| Χλωροαιθάνιο | 2-730 | 17 μg/L |
| Χλωροφόρμιο | 4,4-16 | 7,14 μg/L |
| Διβρωμοχλωρομεθάνιο | 22-160 | 91 μg/L |
| Διχλωροδιφθορομεθάνιο | 100-242,1 | 171,05 μg/L |
| Διχλωρομεθάνιο | 27,6-58200 | 483 μg/L |
| Διαιθυλεστέρας | 12-230 | 44μg/L |
| Αιθυλοβενζόλιο | 1-1680 | 43,50 μg/L |
| Φθοροτριχλωρομεθάνιο | 1-183 | 34 μg/L |
| Φορμαλδεΰδη | 1-1,4 | 1,20 mg/L |

| | | |
|---|---|---|
| Αλογόνα, ολικά οργανικά | 0,0039-33400 | 623,5 μg/L |
| Μεθυλοαιθυλοκετόνη | 2100-37000 | 19550 μg/L |
| Ναφθαλίνη | 4,6-186 | 33,75 μg/L |
| Ρ-διχλωροβενζόλιο | 2-250 | 14 μg/L |
| Φαινόλη | 1,1-2170 | 174 μg/L |
| Τανίνη και λιγνίνη | 0,12-264 | 1,94 mg/L |
| Τετραχλωροαιθυλένιο | 1-232 | 16,30 μg/L |
| Τετραϋδροφουράνη | 410-1400 | 730 μg/L |
| Τολουένιο | 1-11800 | 360 μg/L |
| Τριχλωροαιθυλένιο | 1-372,2 | 19 μg/L |
| Βινυλοχλωρίδιο | 10-3000 | 230 μg/L |
| Ξυλένιο | 9,4-240 | 72,5 μg/L |

*Σε αρκετές περιπτώσεις έχει ανιχνευθεί και ποσότητα AOX και PAH [30]

*Πίνακας 2.4 Τιμές οργανικών ενώσεων σε στραγγίσματα*

## 2.5 Μικροβιολογική σύνθεση στραγγισμάτων

Τα στοιχεία για την μικροβιολογική σύνθεση των στραγγισμάτων στην βιβλιογραφία είναι ελάχιστα.

Τα στερεά απόβλητα φέρουν έναν μεγάλο μικροβιακό πληθυσμό και μπορούν να είναι μολυσμένα από παθογόνους μικροοργανισμούς. Τα απόβλητα περιέχουν συχνά ζωικά περιττώματα, απόβλητα από ζωικά σφάγια, ιλύς από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων και μερικές φορές νοσοκομειακά απόβλητα.

Οι πρώτες έρευνες που αφορούσαν μικροβιολογικές παραμέτρους στράφηκαν γύρω από υγειονομικές εκτιμήσεις που αφορούσαν βακτήρια και ιούς περιττωματικής προέλευσης, που υπήρχαν αρχικά στα απορρίμματα και στη συνέχεια περνούσαν στα στραγγίσματα.

*Βακτήρια*

Ένας σημαντικός βακτηριακός πληθυσμός στα στραγγίσματα μεταβάλλεται ανάλογα με την ηλικία του ΧΥΤΑ. Η παρουσία περιττωματικών στρεπτοκόκκων αποτελεί δείκτη περιττωματικής μόλυνσης. Η παρουσία περιττωματικών κολοβακτηριδίων δείχνει τη μόλυνση που προκαλείται από ζωικά απόβλητα. Τα ολικά κολοβακτηρίδια χρησιμοποιούνται επίσης ως ένδειξη πιθανής παρουσία παθογόνων οργανισμών.

Η επιβίωση των βακτηρίων σε ένα ΧΥΤΑ εξαρτάται από τη θερμοκρασία ενώ εμποδίζεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 60$^{o}$C. Η συγκέντρωση των περιττωματικών βακτηρίων μειώνεται γενικά καθώς αυξάνεται η ηλικία του ΧΥΤΑ και φθάνει τελικά σε επίπεδα μη ανιχνεύσιμα (2 έτη περίπου μετά την απόθεση).

*Ιοί*

Αντίθετα με τα βακτήρια οι ιοί είναι παρασιτικοί οργανισμοί που δεν μπορούν να πολλαπλασιάσουν έξω από τον ξενιστή. Η παρουσία ιών στα στραγγίσματα αποδίδεται στην παρουσία περιττωματικού υλικού και η πηγή προέλευσης μπορεί να ποικίλει. Πάντως η παρουσία εντεροιών σε ΧΥΤΑ έχει αναφερθεί σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις

*Μύκητες*

Λιγοστές είναι και οι γνώσεις από την βιβλιογραφία για την παρουσία μυκήτων στα στραγγίσματα. Οι μύκητες που έχουν ανιχνευθεί από κάποιους ερευνητές είναι κυρίως σαπροφυτικοί (Aspergillus, Penicillum και Fusarium*)* που δεν είναι παθογόνοι.

Ο μοναδικός παθογόνος μύκητας που έχει ανιχνευθεί στα στραγγίσματα είναι ο Allescheriaboydii.

*Παράσιτα*

Όμοια και η βιβλιογραφία για τα παράσιτα είναι ελάχιστη. Παράσιτα όπως τα πρωτόζωα, οι παρασιτικοί σκώληκες και οι νηματοειδείς είναι δυνατόν να ανιχνευθούν στα στραγγίσματα εξαιτίας της παρουσίας περιττωμάτων αλλά και ιλύων από τις μονάδες καθαρισμού των λυμάτων.

## 2.6 Τοξικότητα στραγγισμάτων

Η συνήθης πρακτική για την μέτρηση της τοξικότητας είναι η επώαση ενός αριθμού οργανισμών σε μια σειρά διαλυμάτων του δείγματος. Μετά από μια ορισμένη περίοδο επώασης ο αριθμός των οργανισμών που υπόκειται σε μια μεταβολή (διακοπή ανάπτυξης, θάνατος κτλ) καταγράφεται, και το επί τοις εκατό ποσοστό αυτών των οργανισμών αναπαρίσταται γραφικά σε σχέση με τη συγκέντρωση. Τελικά λαμβάνεται μια σιγμοειδής καμπύλη.

Οι πλέον χρησιμοποιούμενες παράμετροι είναι το $LC_{50}$ που είναι η θανάσιμη συγκέντρωση για το 50% του εξεταζόμενου πληθυσμού των οργανισμών και το $EC_{50}$ που αποτελεί τη συγκέντρωση στην οποία το 50% του εξεταζόμενου πληθυσμού υπόκειται σε κάποια μεταβολή. Οι μέθοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τοξικότητας των στραγγισμάτων παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

| | **Οργανισμός** | **Παράμετρος που επηρεάζεται** | **Διάρκεια δοκιμής** |
|---|---|---|---|
| Βακτήρια | Photobacterium | αναστολή της εκπομπής φωτός | 5-30’ |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | phosphoreum | | |
| | Salmonela typhimurium | υποτροπή | 48hr |
| Άλγη | Selenastrum capricornutum | αναστολή της φωτοσύνθεσης | 6hr |
| | Nitzschia palea | αναστολή ανάπτυξης | 72hr |
| Φυτά | Lemma minor | αναστολή ανάπτυξης (χλωροφύλλη α και βάρος) | 96hr |
| | Radish Sorghum | μείωση ανάπτυξης | 24-96hr |
| Οστρακόδερμα | Daphnia magna | μείωση επιβίωσης νυμφών | 24-96hr |
| | Ceriodaphnia dubia | | |
| | Mysidopsis | | |
| Ιχθείς | Zebra Fish | μείωση επιβίωσης νυμφών | 96hr |
| | Guppy | | |
| | Rainbow trout | | |
| | Fathead minnow | | |

*Πίνακας 2.5 Μέθοδοι μέτρησης τοξικότητας των στραγγισμάτων*

Συνήθεις τοξικοί ρύποι που ανιχνεύονται στα στραγγίσματα είναι τα βαρέα μέταλλα, τα AOX, διάφοροι τύποι εντομοκτόνων η αμμωνία κτλ [30]

## 2.7 Μοντέλα ποιότητας στραγγισμάτων

Η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων για την πρόβλεψη της ποιότητας των στραγγισμάτων έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα.

- Αξιολόγηση των πιθανών επιδράσεις των στραγγισμάτων στους υδάτινους αποδέκτες.
- Παροχή χρήσιμων πληροφοριών για το σχεδιασμό της εγκατάστασης επεξεργασίας.
- Εκτίμηση της επιρροής που έχει η διάθεση αποβλήτων στο χώρο πέρα των αστικών απορριμμάτων

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται συνήθως για την περιγραφή και πρόβλεψη της ποιότητας των στραγγισμάτων έχουν συνήθως ένα υπομοντέλο για την πρόβλεψη της ποσότητας των στραγγισμάτων. Στην πραγματικότητα υπάρχει μια ισχυρή σχέση μεταξύ της ποιότητας των στραγγισμάτων και του ολικού όγκου των στραγγισμάτων που παράγονται. Γενικά υπάρχουν δύο μέθοδοι προσέγγισης στην προσπάθεια μοντελοποίησης της ποιότητας των στραγγισμάτων σαν συνάρτηση του χρόνου.

*Μοντέλα με χρήση στηλών*

Τα μοντέλα αυτά είναι γενικά πολύ σύνθετα, επειδή έχουν να περιγράψουν ένα δυναμικό σύστημα και για το λόγο αυτό γίνονται κάποιες απλουστευμένες υποθέσεις. Αρκετοί ερευνητές έχουν αναπτύξει μοντέλα χρησιμοποιώντας τόσο θεωρητικά όσο και εμπειρικά παραγόμενες εξισώσεις για την μεταφορά μάζας. Κάποια μοντέλα θεωρούν το ΧΥΤΑ ως μια κλειστή στήλη όπου ένα διάλυμα που διηθείται μέσω της στήλης συλλέγει τους ρύπους από τη στερεά φάση σε ένα ποσοστό ανάλογο προς τη διαφορά στη συγκέντρωση.

Οι Qasim και Burchinal εξέτασαν το μοντέλο σε ιόντα χλωρίου χρησιμοποιώντας πειραματικές στήλες. Το μοντέλο εξαρτιόταν από φυσικές παραμέτρους όπως το βάθος των αποβλήτων, τη συμπίεσή τους, και τη συσσώρευση του όγκου των στραγγισμάτων. Οι συγκεντρώσεις των διάφορων παραμέτρων (οξύτητα, αλκαλικότητα, σκληρότητα, BOD, N, P, Ca, Fe, Mg, K, Na, S, τανίνη και λιγνίνη) εκτιμήθηκαν βάσει της συμπεριφοράς των ιόντων χλωρίου. Οι πειραματικές και θεωρητικές συγκεντρώσεις, των συστατικών των στραγγισμάτων παρουσίασαν σχετική συμφωνία, με τις μέγιστες αποκλίσεις της τάξης του 30%.

Μια σειρά μοντέλων έχει αναπτυχθεί από τους Straub & Lynch που περιγράφουν χωριστά τις διαδικασίες των οργανικών και των ανόργανων συστατικών των στραγγισμάτων. Σε αντίθεση με προηγούμενα μοντέλα, εδώ διαπιστώνεται αύξηση της πολυπλοκότητας λόγω της χρήσης εξισώσεων που περιγράφουν τις υδραυλικές, φυσικές / χημικές και μικροβιακές διαδικασίες. Οι διαδικασίες που περιγράφονται από το μοντέλο περιλαμβάνουν την υδραυλική συμπεριφορά, τη σύνθεση του ανόργανου και του οργανικού τμήματος του στραγγίσματος. Οι συγκεντρώσεις και η σχετική σταθερότητα των ανόργανων ρύπων που αντιπροσωπεύονται από τα ολικά στερεά υπολογίζονται από δύο υπομοντέλα. Το ένα υπομοντέλο παρουσιάζει το ΧΥΤΑ ως ένα ενιαίο well-mixed αντιδραστήρα, που παρέχει τα ισοζύγια μάζας για την υγρασία και την απόδοση απομάκρυνσης των ρύπων. Η προσομοίωση για τους ανόργανους ρύπους γίνεται σαν συνάρτηση του καθαρού ρυθμού διήθησης της υγρασίας, του όγκου και της υδατοχωρητικότητας των αποβλήτων, και του ρυθμού παραγωγής διαλυμένων ουσιών. Το άλλο είναι ένα κάθετα κατανεμημένο μοντέλο μεταφοράς ρύπων σε ένα ακόρεστο πορώδες μέσο. Οι παράμετροι του μοντέλου περιλαμβάνουν τη μάζα των ρύπων που στραγγίζονται, την περιεκτικότητα σε υγρασία των αποβλήτων, τον όγκο, το βάθος, την πυκνότητα και την υδατοχωρητικότητα των στερεών αποβλήτων.

Οι Kouzeli et al. παρουσίασαν το 1999 ένα μοντέλο πρόβλεψης της εξέλιξης του COD μέσα σε ένα ΧΥΤΑ [29]. Το μοντέλο προέκυψε από την προσομοίωση σε στήλες (λυσίμετρα ύψους 2,5m και διαμέτρου 0,3m) του ΧΥΤΑ των Α. Λιοσίων στην Αθήνα. Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν 6 στήλες η 1$^{η}$ και η 3$^{η}$ πληρώθηκαν με φρέσκα απορρίμματα ενώ η δεύτερη και η τέταρτη με

τεμαχισμένα στερεά απόβλητα. Η 5$^{η}$ στήλη πληρώθηκε κατά το ήμισυ με φρέσκα απορρίμματα και η υπόλοιπη με απορρίμματα δύο ετών που συλλέχθηκαν από το ΧΥΤΑ. Η τελευταία στήλη περιείχε απορρίμματα και αναερόβια χωνευμένη ιλύ (από εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών λυμάτων) σε αναλογία 2/1. Επιπλέον, στις στήλες 3 και 4 πραγματοποιείτο ανακύκλωση των στραγγισμάτων. Η πειραματική διαδικασία είχε διάρκεια τριών ετών. Προέκυψαν λοιπόν, δυο μοντέλα για την πρόβλεψη του COD, το πρώτο στην περίπτωση μη ανακύκλωσης των στραγγισμάτων και το δεύτερο στην περίπτωση που πραγματοποιείται ανακύκλωση. Δύο βασικές διαδικασίες θεωρείται πως λαμβάνουν χώρα

1) η διαλυτοποίηση του οργανικού υλικού και η μεταφορά του από τη στερεή στην υγρή φάση και

2) η μείωση του διαλυμένου οργανικού υλικού λόγω της μικροβιακής δραστηριότητας.

Η συγκέντρωση του οργανικού υλικού αντιπροσωπεύεται από το COD.

Το ισοζύγιο στον αντιδραστήρα είναι:

$$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_e \quad (\text{εξ.2.1})$$

όπου

$Q_i$ : η παροχή εισόδου ($L^3\ T^{-1}$)

$Q_e$: η παροχή εξόδου ($L^3\ T^{-1}$)

V: ο όγκος του αντιδραστήρα ($L^3$)

Όταν αρχίζουν να παράγονται στραγγίσματα τα απορρίμματα έχουν φτάσει στη μέγιστη υδατοχωρητικότητά τους και θεωρείται πως η παροχή εισόδου γίνεται ίση με την παροχή εξόδου.

$$Q_i = Q_e = Q \quad (\text{εξ.2.2})$$

Ο ρυθμός μείωσης του οργανικού υλικού της στερεάς φάσης λόγω της διαλυτοποίησης $R_s$ ($MT^{-1}$) θεωρείται πως ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης.

$$R_s = \frac{dM_s}{dt} = -K_1 M_s \quad (\text{εξ.2.3})$$

όπου

$M_s$: η εναπομείνασα μάζα του COD που μπορεί να διηθηθεί (leachable COD), στη στερεή φάση (M)

$K_1$: σταθερά ($T^{-1}$)

Ολοκληρώνοντας την ( εξ.2.3) λαμβάνεται

$$M_s = M_{so} e^{-k_1 t} \quad (\text{εξ. 2.4})$$

όπου $M_{so}$ η αρχική μάζα του leachable COD. Το $M_{so}$ συχνά εκφράζεται σαν ένα ποσοστό της ολικής μάζας των απορριμμάτων (γ %) που βρίσκονται στη στήλη.

Ο ρυθμός μεταφοράς από την στερεή στην υγρή μάζα $R_{sl}$ ($MT^{-1}$) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$R_{sl} = -R_s = K_1 M_{so} e^{-k_1 t} \quad (\text{εξ. } 2.5)$$

Η μάζα του COD στην υγρή φάση *M* θεωρείται πως είναι το άθροισμα βιοαποικοδομήσιμου τμήματος M' και του μη βιοαποκοδομήσιμου M''.

$$M = M' + M'' \quad (\text{εξ. } 2.6)$$

Ο ρυθμός αποδόμησης του βιοαποικοδομήσιμου τμήματος στην υγρή φάση $R_{bl}$ θεωρείται επίσης πως ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης

$$R_{bl} = \frac{dM'}{dt} = -K_2 M' \quad (\text{εξ. } 2.7)$$

όπου $K_2$ : σταθερά ($T^{-1}$)

Το μη βιοαποικοδομήσιμο M'' θεωρείται πως αντιπροσωπεύεται από ένα ποσοστό λ της ολικής μάζας του COD *M* που εισέρχεται στην υγρή φάση.

$$M'' = \lambda M \quad (\text{εξ. } 2.8)$$

Από ισοζύγιο στον αντιδραστήρα ο ρυθμός αλλαγής του μη αποικοδομήσιμου M'' και της ολικής μάζας στην υγρή φάση προκύπτουν

$$\frac{dM''}{dt} = \lambda K_1 M_{so} e^{-k_1 t} - \frac{QM''}{V} \quad (\text{εξ. } 2.9)$$

$$\frac{dM}{dt} = R_{sl} - R_{bl} - \frac{QM}{V} = K_1 M_{so} e^{-k_1 t} - K_2 (M - M'') - \frac{QM}{V} \quad (\text{εξ. } 2.10)$$

Η πιο πάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί με όρους συγκέντρωσης ως εξής:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_1 M_{so} e^{-k_1 t}}{V} - K_2 (C - C'') - \frac{QC}{V} \quad (\text{εξ. } 2.11)$$

όπου C η συγκέντρωση του COD ($ML^{-3}$) στα στραγγίσματα και C'' η συγκέντρωση του μη βιοαποικοδομήσιμου COD στα στραγγίσματα ($ML^{-3}$)

Ολοκλήρωση της εξ 2.9 και αντικατάσταση στην 2.11, θα δώσει ως προς C

$$C_{(t)} = K_1 M_{so} \left( \frac{\lambda - 1}{Q + K_2 V - K_1 V} \right) \exp\left[ -\left( \frac{Q}{V} + K_2 \right) t \right]$$
$$+ \left( \frac{1}{Q + K_2 V - K_1 V} + \frac{\lambda K_2 V}{(Q + K_2 V - K_1 V)(Q - K_1 V)} \right) e^{-K_1 t}$$
$$- \frac{\lambda}{Q - K_1 V} \exp\left( -\frac{Q}{V} t \right) \quad (\varepsilon\xi.2.12)$$

Η εξίσωση αυτή μπορεί να απλοποιηθεί στην περίπτωση που αμεληθεί ο όρος λ λαμβάνοντας υπόψη πως το τμήμα του μη αποικοδομήσιμου COD είναι μικρότερο του 5% οπότε η εξ. 2.12 γίνεται

$$C_{(t)} = K_1 M_{so}\left(\frac{1}{Q + K_2 V - K_1 V}\right)\left(e^{-K_1 t} - \exp\left(-\frac{Q}{V} + K_2\right)\mathrm{t}\right) \qquad (\text{εξ. } 2.13)$$

Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση ανακύκλωσης των στραγγισμάτων μέσα στον απορριμματικό όγκο. Η αλλαγή στη συγκέντρωση του COD θα οφείλεται μόνο στην βιολογική αποδόμηση και επομένως οι εξ. 2.9 και 2.10 γράφονται ως εξής:

$$\frac{dM''}{dt} = \lambda K_1 M_{so} e^{-k_1 t} \quad (\text{εξ.}2.14)$$

$$\frac{dM}{dt} = K_1 M_{so} e^{-k_1 t} - K_2 (M - M'') \ (\text{εξ. } 2.15)$$

ενώ η ολική μάζα του COD εκφράζεται από την επόμενη εξίσωση:

$$M(t) = \frac{M_{so}}{K_2 - K_1}\left[(\mathrm{K}_2 - \mathrm{K}_1)e^{-\mathrm{K}_1 t} + (1-\lambda)e^{-\mathrm{K}_2 t} + (K_2 - K_1)\lambda\right] \ (\text{εξ. } 2.16)$$

στην περίπτωση που αγνοηθεί το λ η εξ.2.16 λαμβάνει την μορφή

$$M(t) = \frac{M_{so}}{K_2 - K_1}\left[\mathrm{K}_1 e^{-\mathrm{K}_1 t} + \mathrm{K}_2 e^{-\mathrm{K}_2 t}\right] \ (\text{εξ. } 2.17)$$

Στην ίδια μελέτη προσφέρονται ενδεικτικές τιμές για τις τιμές των γ, $K_1$ και $K_2$ οι οποίες προέκυψαν πειραματικά.

| **Τύπος Απορριμμάτων** | **γ (%)** |
|---|---|
| Περιεχόμενο σε οργανικά 20-30% | 8 |
| Περιεχόμενο σε οργανικά >40% | 12 |

*Πίνακας 2.6 Ενδεικτικές τιμές του ποσοστού γ* [29]

| | **$K_1$ ( έτη$^{-1}$)** | **$K_2$ ( έτη$^{-1}$)** |
|---|---|---|
| Νέα απορρίμματα, χωρίς ανακύκλωση | | |
| Παροχή 1-2 L/m$^2$/ημέρα | 1,0-1,4 | 0,6-0,7 |
| Παροχή 1-2 L/m$^2$/ημέρα | 1,6-2,0 | 1,0 |
| Νέα και παλαιά απορρίμματα | 2,5 | 1,8-2,0 |
| Με ανακύκλωση | 2,5-3,5 | 5,0-6,0 |

*Πίνακας 2.7 Ενδεικτικές τιμές των $K_1$ και $K_2$* [29]

*Μοντέλα παλινδρόμησης*

Ο δεύτερος τύπος μοντέλων βασίζεται σε εμπειρικές εξισώσεις προσαρμοσμένες με τον βέλτιστο τρόπο σε ιστορικά δεδομένα για την ποιότητα των στραγγισμάτων.

Αυτά τα μοντέλα είναι απλούστερα από τα προηγούμενα και είναι γενικά αποτελεσματικά για το ΧΥΤΑ από τον οποίο έχουν ανακτηθεί τα στοιχεία καθώς η ποιότητα των στραγγισμάτων επηρεάζεται τη σύνθεση των αποβλήτων και τις συνθήκες λειτουργίας του ΧΥΤΑ. Για το λόγο αυτό το μοντέλο αυτό μπορεί να μην ακριβές καθώς χρειάζεται πολύ συγκεκριμένα δεδομένα για να αναπτυχθεί.

Το πρώτο μοντέλο αυτού του τύπου αναπτύχθηκε από τους Revah και Avnimelech (1979) τις συγκεντρώσεις των ρύπων (TOC, TKN, $NH_4$, $NO_3$, Fe και Mn) μέσα σε στήλες με απορρίμματα. Η εμπειρική εξίσωση που περιγράφει την ποιότητα των στραγγισμάτων είναι μια απλή εκθετική.

$$C=a\cdot b^{t}$$

όπου

C= η συγκέντρωση του ρύπου του στραγγίσματος

t= χρόνος

a= η συγκέντρωση σε χρόνο t=0

b= εκθετική βάση

Γενικά υπάρχει ομοιότητα με τα αποτελέσματα του μοντέλου και τα στοιχεία που λαμβάνονται από τον εκάστοτε ΧΥΤΑ.

Ένα δεύτερο μοντέλο προτάθηκε από τον Wigh (1979), που ως βάση είχε μια πιο σύνθετη εμπειρική εξίσωση για την περιγραφή τη σχέσης μεταξύ της συγκέντρωσης ποικίλων παραμέτρων των στραγγισμάτων και του όγκου του στραγγίσματος που παράγεται

$$C = k_1 \cdot k_2 \cdot M/(k_2 - k_1) \cdot (e^{-k_1} \cdot V - e^{-k_2} \cdot V)$$

όπου

C = η συγκέντρωση του ρύπου του στραγγίσματος

M = ολική μάζα που στραγγίζεται ανά μονάδα επιφάνειας

V = ο όγκος των στραγγισμάτων που συλλέγεται ανά μονάδα επιφάνειας

$k_1, k_2$ = εμπειρικές σταθερές

Και αυτό το μοντέλο είχε μεγάλη ομοιότητα με τα εργαστηριακά δεδομένα που λαμβάνονται από τον ΧΥΤΑ. [22]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο
# ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΑΤΩΝ ΧΥΤΑ

Ο υπολογισμός των στραγγισμάτων που φτάνει στον πυθμένα ενός ΧΥΤΑ δεν μπορεί να είναι ακριβής λόγω έλλειψης είτε δεδομένων είτε τεχνογνωσίας. Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι υπολογισμού, με πλέον συνήθη αυτή του υδατικού ισοζυγίου, η οποία όμως επαρκεί μόνο για προκαταρκτικές εκτιμήσεις. Οι υποθέσεις που γίνονται εν προκειμένω δεν λαμβάνουν υπόψη τις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες (νέες στρώσεις, πρόσθετη συμπίεση, κ.ά.). Από την άλλη μεριά, το μοντέλο HELP ή τα παρεμφερή υπολογιστικά μοντέλα απαιτούν λεπτομερή δεδομένα που, τουλάχιστον στην χώρα μας, δεν είναι στη διάθεση του μελετητή. Στον τομέα αυτό αναμένονται οπωσδήποτε θετικές εξελίξεις στο μέλλον [7]. Πάντως κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ΧΥΤΑ ο όγκος των στραγγισμάτων θα πρέπει να μετράται μηνιαίως ενώ στην φάση της μετέπειτα φροντίδας του ΧΥΤΑ ανά εξάμηνο όπως ορίζεται στο ΦΕΚ 1572/2002.

## 3.1 Υδατικό Ισοζύγιο

Η βασική πηγή της υγρασίας στα απορρίμματα είναι η βροχόπτωση που συμβαίνει πάνω από το χώρο του ΧΥΤΑ. Ένα τμήμα της υγρασίας καταλήγει σε επιφανειακή απορροή, άλλο τμήμα επιστρέφει στη ατμόσφαιρα σε μορφή εξατμισοδιαπνοής από το έδαφος και από τη βλάστηση ενώ το υπόλοιπο καταλήγει μετατρέπεται σε υγρασία του εδάφους. Όταν η υγρασία υπερβεί την υδατοχωρητικότητα (field capacity) του εδάφους διεισδύει κάτω στον όγκο των απορριμμάτων. Η συνεχή προσθήκη ύδατος στον απορριμματικό όγκο έπειτα από κάποια περίοδο έχει σαν συνέπεια τον κορεσμό τους οπότε και η υγρασία εμφανίζεται με την μορφή των στραγγισμάτων. Ο ρυθμός της υγρασίας που διεισδύει στα απορρίμματα μετά την αρχική καθυστέρηση είναι ίσος με το ρυθμό παραγωγής των στραγγισμάτων.

Γενικά η εξίσωση που φαίνεται να περιγράφει το ετήσιο υδατικό ισοζύγιο ενός ΧΥΤΑ είναι $P + U_w = ET + L + R + \Delta U_w + \Delta U_s$ (εξ 3.1)

ET: εξατμισοδιαπνοή

L: το νερό που φεύγει από το ΧΥΤΑ υπό την μορφή στραγγισμάτων

R: απορροή= C·P

όπου C ο συντελεστής απορροής

$U_w$: η περιεχόμενη υγρασία των στερεών αποβλήτων

$\Delta U_w$: το νερό που απορροφάται και συγκρατείται από τα απορρίμματα

$\Delta U_s$: το νερό που απορροφάται και συγκρατείται από το εδαφικό υλικό κάλυψης

Σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν τον ρυθμό διείσδυσης είναι η βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή, η επιφανειακή απορροή, η απορρόφηση και η μέγιστη υδατοχωρητικότητα του εδάφους.

*Βροχόπτωση- Υδατική κατακρήμνιση*

Η έννοια περιλαμβάνει κάθε μορφή ύδατος που καταλήγει από την ατμόσφαιρα στην υπό μελέτη περιοχή, όπως για παράδειγμα βροχή, χιόνι και χαλάζι. Η τιμή της βροχόπτωσης ποικίλει ανάλογα με την γεωγραφία της περιοχής και ανάλογα με την εποχή, για το λόγο αυτό θα πρέπει τα δεδομένα βροχόπτωσης να προέρχονται από κοντινό στην τοποθεσία μετεωρολογικό σταθμό για να είναι αξιόπιστα.

*Επιφανειακή απορροή*

Τμήμα της βροχόπτωσης που απορρέει επιφανειακά από το χώρο πριν προλάβει να διηθηθεί. Το ποσοστό της επιφανειακής απορροής εξαρτάται από την ισχύ και τη διάρκεια της βροχόπτωσης, την κλίση της επιφανειακού εδάφους, την διαπερατότητα του εδαφικού καλύμματος και από το ποσοστό και τον τύπο της βλάστησης. Ποικίλες μέθοδοι υπάρχουν που υπολογίζουν την απορροή και περιλαμβάνουν μετρήσεις επί τόπου και εμπειρικές σχέσεις. Καθώς στους ΧΥΤΑ υπάρχουν κοίτες και σπηλαιώματα η επιφανειακή απορροή δεν συμβαίνει ελεύθερα όπως συμβαίνει σε φυσικά καλύμματα εδάφους. Η χρήση συγκεκριμένων συντελεστών απορροής λοιπόν μπορεί να οδηγήσει σε μια υπερεκτίμηση της επιφανειακής απορροής και σε μεγάλο βαθμό να υποτιμήσουν τον όγκο της διήθησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι συντελεστές επιφανειακής απορροής για ΧΥΤΑ κυμαίνονται από 0,07-0,2.
[37]

*Διήθηση*

Η τιμή του συντελεστή απορροής μπορεί να ποικίλει, ενώ ένας πίνακας που δείχνει κάποιες ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάλογα με την τοπογραφία και τον τύπο του εδάφους (τρεις τιμές από 3 διαφορετικές πηγές).

| **Τύπος εδάφους** | **Συντελεστής απορροής** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **κλίση<2%** | | | **κλίση 2-10%** | | | **κλίση>10%** | | |
| **γυμνό (χώμα ή λάσπη)** | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,66 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,82 | 0,80 |
| **λιβάδι ή βοσκότοποι (χώμα ή λάσπη)** | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,30 | 0,36 | 0,45 | 0,35 | 0,42 | 0,55 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **καλλιεργήσιμο – αδιαπέραστο (χώμα-πηλός)** | 0,50 | 0,40 | 0,50 | 0,55 | 0,55 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,70 |
| **καλλιεργήσιμο – διαπερατό (αμμώδες)** | 0,25 | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,16 | 0,30 | 0,35 | 0,22 | 0,40 |

*Πίνακας 3.1 Τιμές του συντελεστή απορροής* [24]

Οι παραπάνω τιμές έχουν προκύψει από ένα απλοποιημένο σκεπτικό καθώς δεν περιλαμβάνεται η ένταση της βροχόπτωσης και ο βαθμός κορεσμού του εδάφους. Έτσι λοιπόν όταν το έδαφος είναι κορεσμένο σε νερό η επιφανειακή απορροή θα είναι χαμηλότερη. Ωστόσο, είναι συνήθης η χρήση αυτών των συντελεστών σαν ένα πρακτικό εργαλείο τόσο από υδρογεωλόγους όσο και από μηχανικούς. Στο Ηνωμένο Βασίλειο η χρήση του MORECS (Meteorological Office's Rainfall and Evaporation Calculation System) δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της αλλαγής της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία και την επίδραση αυτής στην δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Σύμφωνα με τον Holmes η συνιστώσα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για ένα ΧΥΤΑ καθώς καθορίζει το ποσοστό του υγρού που διεισδύει μέσω του υλικού εδαφικής κάλυψης και των απορριμμάτων. Η διήθηση από το εδαφικό υλικό μπορεί να περιοριστεί περαιτέρω από την βλάστηση. Ο τύπος του νερού που διηθείται μπορεί να χωριστεί σε δυο κατηγορίες στο νερό που αρχικά λαμβάνει το χώρο που καταλαμβάνει ο αέρας στο έδαφος και στη συνέχεια λόγω της βαρυτικής δύναμης οδηγείται προς τα κάτω και στο νερό που κατακρατείται λόγω των τριχοειδών φαινομένων και παραμένει μετά την αποστράγγιση λόγω της βαρύτητας. Όταν στο έδαφος υπάρχει ο μέγιστος όγκος νερού που μπορεί να κρατηθεί εξαιτίας των τριχοειδών φαινομένων τότε το έδαφος βρίσκεται στη μέγιστη υδατοχωρητικότητά του. Όταν το έδαφος στεγνώνει τότε η εξάτμιση είναι μικρότερη της δυνητικής και εμφανίζεται ένα έλλειμμα στην υγρασία του εδάφους.

Μια μεγάλη αναλογία της βροχόπτωσης σε μήνες χαμηλής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής στην περίοδο του χειμώνα θα παράγει μεγαλύτερο ποσοστό ενεργής βροχόπτωσης συγκριτικά με ένα χρόνο με περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή βροχόπτωσης.

Μια εικόνα της σχέσης μεταξύ βροχόπτωσης και της υπολογιζόμενης διήθησης παρέχεται από ένα πειραματικό ΧΥΤΑ επιφάνειας 90m$^2$ που βρίσκεται στο Edmonton στο νότιο Λονδίνο. Η έρευνα διήρκεσε 5 χρόνια και ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται κατά το τρίτο έτος οπότε και η βροχόπτωση ήταν κατά 15% υψηλότερη από τα δυο προηγούμενα έτη ωστόσο η υπολογιζόμενη διήθηση ήταν

μικρότερη εξαιτίας φαινομένων έντονης βροχόπτωσης την περίοδο του καλοκαιριού οπότε και η εξάτμιση είναι μέγιστη.
Τα ποσοστά αυτά μπορούν να χαρακτηρισθούν τυπικά για ένα ΧΥΤΑ κατά την περίοδο λειτουργίας οπότε η επιφανειακή απορροή είναι ελάχιστη. Η αναλογία διήθησης βροχόπτωσης φτάνει το 50% ενώ η εποχιακή διακύμανση κυμαίνεται από 20-70% το καλοκαίρι και το χειμώνα αντίστοιχα. Τυπικές τιμές διήθησης για ΧΥΤΑ μετά το πέρας της λειτουργίας τους κυμαίνονται από 14-34% της ετήσιας βροχόπτωσης. [24]

*Απορρόφηση*
Προκειμένου να καθοριστεί η σχέση μεταξύ της υγρασίας και των ιδιοτήτων των οικιακών αποβλήτων χρησιμοποιείται πλήθος ορολογιών.

*Περιεχόμενη αρχική υγρασία*
Πρόκειται για την περιεχόμενη υγρασία των αστικών αποβλήτων όταν αυτά φτάνουν αρχικά στο ΧΥΤΑ. Αν και η υγρασία αυτή εξαρτάται από τον τύπο του απορρίμματος, την εποχή και την επεξεργασία μετά τη συλλογή μια τυπική τιμή είναι 35% του βάρους των απορριμμάτων.

*Field capacity- Υδατοχωρητικότητα*
Χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση του όγκου του νερού που παραμένει στα απορρίμματα μετά την επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως για ομογενή υλικά όπως εδάφη και κονιορτοποιημένα αστικά απορρίμματα. Ωστόσο στα ακατέργαστα αστικά απόβλητα τα υγρά απελευθερώνονται προτού προσεγγιστεί το field capacity.
Οι ορισμοί αυτοί υποδηλώνουν δυο βασικούς μηχανισμούς για τη διατήρηση της υγρασίας στα οικιακά απορρίμματα.

- την φυσική απορρόφηση του υγρού μέσα στο ΧΥΤΑ που καθορίζεται από τις δυνάμεις λόγω των τριχοειδών φαινομένων και
- την φαινομενική απορρόφηση του νερού στους κενούς χώρους των απορριμμάτων δίνοντας τοπικές περιοχές κορεσμού.

Οι παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν τον πρώτο από τους δυο μηχανισμούς είναι

- σε σύντομες διαδρομές του νερού μέσα στον απορριμματικό όγκο δεν υπάρχει χρόνος για να απορροφηθεί το νερό από τα στερεά απόβλητα.
- στις περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης ενισχύεται το πιο πάνω φαινόμενο των σύντομων διαδρομών.

Σε παρατεταμένες περιόδους διήθησης υγρών στο ΧΥΤΑ πιθανόν να πρέπει να αλλάξει το ποσοστό της αρχικής υγρασίας και από 35% να είναι 0,40-0,65m$^3$ ανά ξηρό τόνο στερεών αποβλήτων. Αν και ένα ποσοστό μπορεί τελικά να κινηθεί προς τα κάτω υπό τις δυνάμεις της βαρύτητας και να αποστραγγιστεί θα πρέπει να είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες κατά τη μελέτη του ισοζυγίου.

Προκειμένου να προβλεφθεί η ποσότητα των στραγγισμάτων που προκύπτει από τα οικιακά απορρίμματα μια ρεαλιστική εικόνα της απορρόφησης του διηθούμενου νερού έχει υπολογιστεί στον πειραματικό ΧΥΤΑ στο Edmonton. Η υπολογιζόμενη διήθηση εξισορροπήθηκε έναντι της μετρούμενης εκροής των στραγγισμάτων. Η διήθηση εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα πραγματικής βροχόπτωσης, εξάτμισης και εξατμισοδιαπνοής συνεκτιμώντας και την έλλειψη υγρασίας του εδάφους κατά τους θερινούς μήνες. Τους έξι πρώτους μήνες της λειτουργίας του ΧΥΤΑ η παραγωγή των στραγγισμάτων υπολογίσθηκε στο 6-10% της εκτιμούμενης διήθησης καθώς μεγάλο τμήμα των υγρών αποβλήτων οδηγήθηκε στα αποστραγγιστικά αναχώματα. Στο επόμενο εξάμηνο η ποσότητα των στραγγισμάτων άρχισε να αυξάνει και εξαιτίας της αποδόμησης των αποβλήτων και της επακόλουθης αύξησης της υγρασίας αυτών. [24]

*Εξατμισοδιαπνοή*

Το ποσοστό της υγρασίας που είναι διαθέσιμο για εξατμισοδιαπνοή σε ένα ΧΥΤΑ επηρεάζεται από τον τύπο του εδάφους και από την βλάστηση. Ένα επιθυμητό στοιχείο κατά το σχεδιασμό ενός ΧΥΤΑ είναι η αύξηση της εξατμισοδιαπνοής σε μια προσπάθεια μείωσης της παραγωγής των στραγγισμάτων [37]. Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής όπως αυτές των Penman, Blaney-Criddle, Blaney Morin, Turk κ.τ.λ. Ωστόσο η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι αυτή του Thornthwaite καθώς είναι αρκετά πιο εύχρηστη από πλήθος άλλων μεθόδων. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στη συνέχεια έχει χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα εργασία ως η μέθοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής στην περιοχή του Ακρωτηρίου Χανίων .

Ο Thornthwaite (1948) περιέγραψε την βιολογική και φυσική σημασία της εξατμισοδιαπνοής στην κλιματική ταξινόμηση και ανέπτυξε μια εξίσωση για την εκτίμηση της $ET_p$. Η μέθοδος Thornthwaite για την εκτίμηση μηνιαίων τιμών της $ET_p$ δίνεται από τη σχέση

$$ET_p = 16\left(\frac{l_1}{12}\right)\cdot\left(\frac{10T_i}{I}\right)^a\cdot\left(\frac{\mathrm{N}}{30}\right)$$

όπου

$ET_p$: η δυνητική εξατμισοδιαπνοή ( mm/μήνα)

$l_1$:οι πραγματικές ώρες της ημέρας (hr)

$T_i$: η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα ( $^{o}$C)
N: ο αριθμός των ημερών του μήνα
α: μια εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από τον δείκτη I

$$\alpha = 6{,}75\cdot10^{-7}I^3 - 7{,}71\cdot10^{-5}I^2 + 1{,}79\cdot10^{-2}I + 0{,}49$$

I: είναι ένας δείκτης θερμότητας που αποτελεί το άθροισμα των 12 μηνιαίων τιμών του δείκτη I που υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$i = \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}$$

[12]

*Υγρασία εδάφους*

Το ποσοστό υγρασίας στο έδαφος αλλάζει συνεχώς εξαιτίας της διήθησης του νερού από την μία και της εξατμισοδιαπνοής από την άλλη. Η μείωση της υγρασίας εξαιτίας λόγω της εξατμισοδιαπνοής περιορίζεται στο ανώτερο τμήμα του εδάφους. Το τμήμα αυτό ορίζεται ως ενεργό βάθος ριζών (effective root zone depth).

Η εξίσωση 3.1 μπορεί να απλοποιηθεί

$$P = ET + L + R + \Delta U_w + \Delta U_s \quad \text{(εξ. 3.2)}$$

Παράλληλα, ο παράγοντας R μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος για τα περισσότερα επεισόδια βροχόπτωσης, ενώ και η υγρασία που συγκρατείται από το έδαφος είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την υγρασία που κατακρατείται από τα απορρίμματα. [35]

Έτσι λοιπόν, περαιτέρω απλοποίηση της εξίσωσης και επίλυσή της ως προς τον όγκο των στραγγισμάτων που τελικά προκύπτουν ισχύει

$$L = P - ET - \Delta U_w \quad \text{(εξ. 3.3)}$$

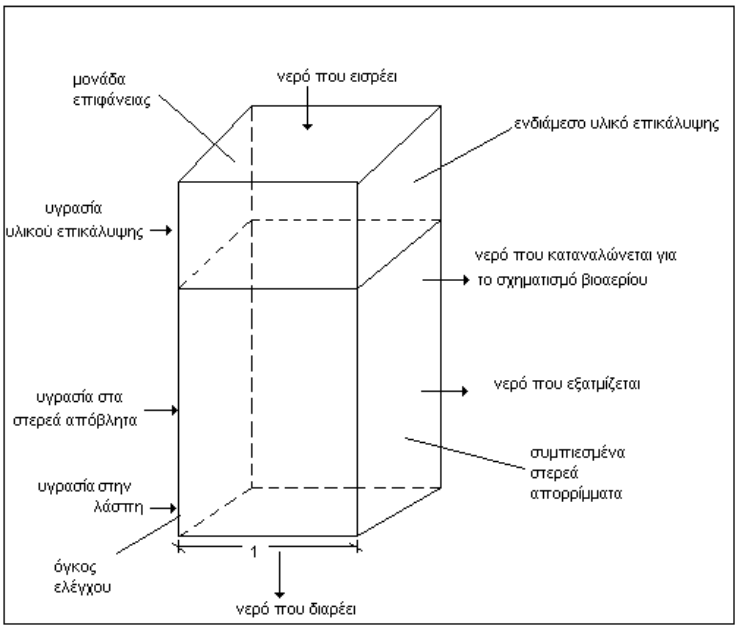
## 3.2 Υπολογιστικό μοντέλο εκτίμησης του όγκου των διασταλλαγμάτων

Η παραπάνω σχέση δεν είναι πάντα εφαρμόσιμη καθώς σε περιπτώσεις που η εξατμισοδιαπνοή είναι μεγάλη το ισοζύγιο των στραγγισμάτων εμφανίζεται πολύ συχνά μηδενικό, γεγονός που έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τα δεδομένα των υπό λειτουργία ΧΥΤΑ.

Έτσι για τον υπολογισμό της παραγωγής των στραγγισμάτων δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει την παραγωγή των στραγγισμάτων ανά τετραγωνική μονάδα επιφάνειας ταμπανιού, σύμφωνα με τον Tchobanoglous, et.al.[34] Το υπολογιστικό μοντέλο βασίζεται στις ποσότητες των απορριμμάτων που εισέρχονται στον χώρο, τα χαρακτηριστικά των απορριμμάτων, τα χαρακτηριστικά του ΧΥΤΑ (γενικά χαρακτηριστικά, χαρακτηριστικά του υλικού επικάλυψης, χαρακτηριστικά παραγωγής βιοαερίου, υδατο-χωρητικότητα του ταμπανιού), και τις εισερχόμενες ποσότητες των όμβριων.

Το θεωρητικό υπόβαθρο του υπολογιστικού αυτού μοντέλου παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Τα απορρίμματα χωρίζονται σε στήλες – ταμπάνια και το ισοζύγιο ύδατος του κάθενος εξετάζεται χωριστά. Το σχήμα δείχνει σε γενικές γραμμές το σκεπτικό του μοντέλου.




*Εικόνα 3.1 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου*

*Νερό που εισρέει*

Πρόκειται για το νερό που προέρχεται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και διεισδύει πάνω από το υλικό επικάλυψης

Νερό στα στερεά απόβλητα

Είναι η αρχική υγρασία των απορριμμάτων αλλά και η υγρασία που απορροφούν τα υλικά από την βροχόπτωση και γενικότερα από την ατμόσφαιρα. Σε ξηρά κλίματα τμήμα της αρχικής υγρασία μπορεί να χαθεί ανάλογα με τις συνθήκες ταφής.

*Νερό στο υλικό επικάλυψης*

Το ποσοστό του νερού στο υλικό επικάλυψης εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον τύπο του εδάφους και από την εποχή. Τυπικές τιμές της υγρασίας του εδάφους για την υγρασία του εδάφους είναι 6-12% για άμμο, και 23-31% για αργιλικά εδάφη.

*Νερό που διαρρέει*

Το νερό που διαρρέει από την στήλη των απορριμμάτων είναι τα παραγόμενα στραγγίσματα.

*Νερό που καταναλώνεται για την παραγωγή βιοαερίου*

Το νερό που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της αναερόβιας αποσύνθεσης του οργανικού τμήματος των αστικών απορριμμάτων. Η μάζα του νερού που καταναλώνεται ανά pound ξηρού οργανικού αποβλήτου μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως.

$$C_{68}H_{111}O_{50}N + 16H_2O \rightarrow 35CH_4 + 33CO_2 + NH_3$$

1741 288 560 1452 17

Η μάζα του νερού που καταναλώνεται ανά pound ξηρών γρήγορα βιοαποικοδομήσιμων πτητικών στερεών (RBVS) είναι

$$\text{νερό που καταναλώθηκε} = \frac{288}{1741} = 0{,}165\ \text{lb H}_2\text{O/lb RBVS}\ \text{που καταστρέφεται}$$

Χρησιμοποιώντας σαν τιμή παραγωγής βιοαερίου την τιμή 13,9 $ft^3$/ lb RBVS που καταστρέφεται, τελικά ο όγκος του νερού που καταναλώνεται ανά $ft^3$ θα είναι

$$\text{νερό που καταναλώθηκε} = \frac{0{,}165\ \text{lb H}_2\text{O/lb RBVS}}{13{,}9\ \text{ft}^3/\ \text{lb RBVS}} = 0{,}019\ \text{lb H}_2\text{O/ft}^3$$

*Νερό που χάνεται υπό μορφή ατμού*

Το βιοαέριο συχνά είναι κορεσμένο από τους ατμούς του νερού. Η ποσότητα των ατμών που φεύγουν από το ΧΥΤΑ υπολογίζεται θεωρώντας πως το βιοαέριο είναι κορεσμένο σε ατμούς και ακολουθεί τον νόμο των τέλειων αερίων.

$$P_vV = nRT$$

όπου

$P_v$: η πίεση των ατμών του νερού σε θερμοκρασία T, lb/in$^2$

V: όγκος, $ft^3$

n: ο αριθμός των moles

R: παγκόσμια σταθερά αερίων=1543ft·lb/(lb·mole) · $^{o}$R

T: η θερμοκρασία σε βαθμούς Rankine = (460+T, $^{o}$F) = $^{o}$R

Η τιμή της μάζας του νερού υπό μορφή ατμού ανά $ft^3$ βιοαερίου στους 90 $^{o}$F υπολογίζεται ως ακολούθως

$P_v$=0,7 lb/in$^2$=100,8 lb/ft$^2$

V=όγκος, $ft^3$

n=ο αριθμός των moles

R=1543ft·lb/(lb·mole) · $^{o}$R

T = (460+90, $^{o}$F) =550 $^{o}$R

$$n = \frac{PvV}{RT} = \frac{100{,}8 \cdot 1}{1543 \cdot 550} = 0{,}00012 lb \cdot moles = (0{,}00012 lb \cdot mole)(18 lb/lb \cdot mole) =$$

$= 0{,}0022 lbH_2O/ft^3$ βιοαερίου

Άλλες απώλειες και προσθήκες νερού.
Υπάρχουν απώλειες υγρασίας των στερεών αποβλήτων κατά τη διάρκεια της ταφής τους οι οποίες όμως είναι ιδιαίτερα χαμηλές και μπορούν να αγνοηθούν.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία λεπτομερής ανάλυση των υπολογισμών του κάθε ταμπανιού. Η μορφή του υπολογισμού είναι τέτοια που βγάζει τα παραγόμενα στραγγίσματα /$m^2$ ΧΥΤΑ, γεγονός που επιτρέπει την εύκολη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων. Ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου για το κάθε ταμπάνι αποτελείται από τους παρακάτω υπολογισμούς:

1. Υπολογισμός μάζας νερού που αξιοποιήθηκε για την παραγωγή βιοαερίου.
Η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου στο εξεταζόμενο ταμπάνι εκφρασμένη σε $m^3$ είναι ανάλογη του βάρους των στερεών αποβλήτων στο ταμπάνι καθώς επίσης και του ρυθμού βιοαποδόμησης των στερεών αποβλήτων εκφρασμένο σε $m^3$/tn. Γνωρίζοντας την παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου και γνωρίζοντας το ειδικό βάρος του βιοαερίου υπολογίζουμε την μάζα της παραγόμενης ποσότητας του βιοαερίου
Ακολουθεί μια μέθοδος προσδιορισμού της παραγόμενης ποσότητας του βιοαερίου από την περιεκτικότητα σε του άνθρακα
Κατά την πλήρη αεριοποίηση 1 kg οργανικού άνθρακα με τον νόμο των ιδανικών αερίων παράγονται 1,868 $m^3$ αερίου, το οποίο αποτελείται από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Στην πράξη όμως η παραγωγή του βιοαερίου είναι μικρότερη, γιατί λόγω των συνθηκών ένα μέρος άνθρακα εξυπηρετεί σχηματισμό κυτταρικής μάζας.
Σύμφωνα με τον Tabasaran η σχέση της δυνατής ποσότητας άνθρακα που μπορεί να αεριοποιηθεί είναι η ακόλουθη:

$$C_a = C_o\ (0{,}14\ T + 0{,}28)$$

Όπου:
$C_a$ = Συνολικός άνθρακας που μπορεί να αεριοποιηθεί
$C_o$ = Ολικός άνθρακας
T = Θερμοκρασίας ($^{o}$ C)
Σε ένα τόνο αστικών αποβλήτων ο οργανικός άνθρακας αναλογεί σε 200Kg. Άρα η συνολικά παραγόμενη ποσότητα ($C_\theta$) αντιστοιχεί σε 1,68 *$C_a$ = 1868 * $C_a$ ($m^3$/t απόβλητα).Η θερμοκρασία στα αστικά απόβλητα αρχικά (κατά την αερόβια διεργασία) είναι αυξημένη με την πάροδο όμως του χρόνου ελαττώνεται.
Με την παραδοχή ότι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται (λόγω της σύνθεσης, αλλά και των κλιματολογικών συνθηκών στη χώρα μας) έχει μια μέση τιμή 23 $^{o}$C τότε προκύπτει:
$C\beta = 5{,}23\ T + 104{,}61 = 225\ m^3$ /t απορρίμματα.

Από την μέχρι σήμερα εμπειρία η μεθανογέννεση βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη μετά από 2 χρόνια από την εναπόθεση και διαρκεί περίπου 20 χρόνια. Η παραγωγή μεθανίου μπορεί να διαρκέσει και πάνω από 60 χρόνια. (Στο τέλος του κεφαλαίου 3 παρατίθενται διαγράμματα με τη χρονική εξέλιξη του βιοαερίου στο ΧΥΤΑ Χανίων τα οποία έχουν προκύψει με τη χρήση του μοντέλου Landgem)

Τελικά για την εκτίμηση της παραγόμενης ποσότητας αερίου ισχύει η εξής εξίσωση:

$$Gt = G\beta\ (1 - e^{-Kt})$$

όπου:

Gt = Παραγωγή αερίων στο χρόνο t ($m^3$ /t απόβλητα)

Gβ = συνολική παραγωγή αερίων από 1t απόβλητα

t = χρόνος σε έτη (μετά την εναπόθεση)

K = συντελεστής αποδόμησης = $In^2/t_{1/2}$

$t_{1/2}$ = χρόνος ημιζωής (δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για την αποδόμηση 50% υλικού και την παραγωγή 50% αερίου).

Οι πραγματικές προϋποθέσεις σε ένα χώρο ελεγχόμενης εναπόθεσης προσδιορίζονται από την τιμή K. Οι τιμές K για 5 χρόνια είναι 0,06 ενώ για 10 χρόνια 0,03.

Η συνολική παραγωγή του αερίου στον χρόνο t είναι η ακόλουθη:

$$Gt = 225\ (1 - 10^{-0,03t})\ [m^3/t\ \text{απόβλητα}]$$

[9]

2. Υπολογισμός της μάζας νερού που καταναλώθηκε για την παραγωγή της παραπάνω ποσότητας του βιοαερίου.

Λαμβάνοντας υπόψη την απαιτούμενη ποσότητα νερού για την παραγωγή $1m^3$ βιοαερίου υπολογίζουμε την μάζα νερού που καταναλώθηκε στην διαδικασία παραγωγής του βιοαερίου.

3. Υπολογισμός μάζας νερού που βρίσκεται σε μορφή υδρατμών στο βιοαέριο.

Γνωρίζοντας την πυκνότητα του νερού σε μορφή υδρατμών στο βιοαέριο υπολογίζουμε την μάζα νερού που βρίσκεται υπό μορφή υδρατμών στο παραγόμενο βιοαέριο.

4. Υπολογισμός μάζας νερού στα στερεά απόβλητα ανά ταμπάνι.

Η μάζα νερού στα στερεά απόβλητα του εξεταζόμενου ταμπανιού ισούται με την μάζα του νερού που κατακρατήθηκε στο ταμπάνι στο τέλος του προηγούμενου έτους, αφαιρώντας τις ποσότητες νερού που αξιοποιήθηκαν κατά την παραγωγή του βιοαερίου και τις ποσότητες νερού που βρίσκονται υπό μορφή υδρατμών στο παραγόμενο βιοαέριο αλλά προσθέτοντας τις ποσότητες στραγγισμάτων που παράχθηκαν στο τέλος του προηγούμενου έτους.

Για το πρώτο έτος η μάζα του νερού στα στερεά απόβλητα του ταμπανιού αποτελείται από την περιεχόμενη υγρασία των στερεών αποβλήτων στο ταμπάνι και

την μάζα της εισερχόμενης ποσότητας των όμβριων στον χώρο.

5. Υπολογισμός ξηρού βάρους στερεών αποβλήτων ανά ταμπάνι μετά το τέλος του εξεταζόμενου χρόνου λειτουργίας,

Ο υπολογισμός του ξηρού βάρους των στερεών αποβλήτων του εξεταζόμενου ταμπανιού ισούται με την διαφορά του σύνολο του ξηρού βάρους στα Σ.Α (του προηγούμενου έτους-ταμπανιού) με την μάζα της παραγόμενης ποσότητας του βιοαερίου και την μάζα νερού που καταναλώθηκε κατά την παραγωγή του βιοαερίου.

6. Υπολογισμός της μέσης μάζας των στερεών αποβλήτων στο εξεταζόμενο ταμπάνι (Υπόθεση: Η μέση μάζα του εξεταζόμενου ταμπανιού βρίσκεται στο μέσο ύψος του ταμπανιού).

Ο υπολογισμός της μέσης μάζας ισούται με το άθροισμα της μέσης τιμής του ξηρού βάρους και της μάζας νερού στα στερεά απόβλητα του εξεταζόμενου ταμπανιού με το βάρος του υλικού επικάλυψης. Στην περίπτωση που υπάρχει υπερκείμενο ταμπάνι ο υπολογισμός της μέσης μάζας περιλαμβάνει και το συνολικό βάρος του προηγούμενου ταμπανιού.

7. Υπολογισμός του συντελεστή της Υδατοχωρητικότητας

Η σχέση που δίνει την υδατοχωρητικότητα ως συνάρτηση του βάρους υπερφόρτωσης είναι η εξής:

$$FC = 0{,}6 - 0{,}55\left(\frac{W}{10.000 + W}\right)$$

FC= ποσοστό νερού στα απορρίμματα βασισμένο σε συνθήκες ξηρού βάρους

W = το βάρος υπερφόρτωσης υπολογισμένο στο μέσο ύψος του ταμπανιού (σε lb)

8. Υπολογισμός μάζας νερού που μπορεί να κατακρατηθεί από τα στερεά απόβλητα.

Η μάζα νερού που μπορεί να κατακρατηθεί από τα στερεά απόβλητα του εξεταζόμενου ταμπανιού δίνεται από το γινόμενο της υδατοχωρητικότητας με το ξηρό βάρος των στερεών αποβλήτων ανά ταμπάνι.

9. Υπολογισμός παραγόμενων στραγγισμάτων.

Υπολογίζονται ως η διαφορά της μάζας νερού στα στερεά απόβλητα μείον την μάζα του νερού που μπορεί να κρατηθεί στα στερεά απόβλητα. Παραγωγή στραγγισμάτων υπάρχει στην περίπτωση που η μάζα νερού που μπορεί να κατακρατηθεί από τα στερεά απόβλητα στο εξεταζόμενο ταμπάνι είναι μικρότερη από την μάζα νερού σε αυτό.

10. Υπολογισμός της ποσότητας του νερού που παραμένει στο κάθε ταμπάνι στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου.
Πρόκειται για τη διαφορά της μάζας του νερού στα στερεά απόβλητα με την ποσότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων.

11. Υπολογισμός του ολικού βάρους του κάθε ταμπανιού.
Είναι το άθροισμα του βάρους των ξηρών αποβλήτων, του νερού που παραμένει στο ταμπάνι και του βάρους του υλικού επικάλυψης.

### 3.3 Δεδομένα υπολογιστικού μοντέλου

Οι υπολογισμοί παραγωγής στραγγισμάτων ανά ταμπάνι βασίζονται στις ακόλουθες παραδοχές:
1. Στο πρώτο έτος της λειτουργίας του ΧΥΤΑ δεν θα υπάρξει παραγωγή βιοαερίου και συνεπώς δεν καταναλώνεται μάζα νερού για την παραγωγή αυτού ενώ επιπλέον δεν θα υπάρξει ποσοστό νερού σε μορφή ατμών στο παραγόμενο βιοαέριο.
2. Το ανάγλυφο του χώρου έχει μετατραπεί σε ένα ισοδύναμο τελικό ανάγλυφο με 10 ταμπάνια που έχουν διάρκεια ζωής 1 χρόνο, έκταση όση και η έκταση της κυψέλης ($34.800 m^2$) και ύψος 1,5 μέτρα.
Για τον υπολογισμό των παραγόμενων στραγγισμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω δεδομένα.

- Η διάρκεια ζωής του χώρου απόθεσης των απορριμμάτων

Οι παραγόμενες ποσότητες απορριμμάτων στο νομό Χανίων είναι αυτές που προκύπτουν από τη σχετική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

| **Έτος λειτουργίας** | **Ετήσια ποσότητα απορριμμάτων ($m^3$/yr)** |
|---|---|
| $1^o$ | 42.949 |
| $2^o$ | 48.569 |
| $3^o$ | 53.077 |
| $4^o$ | 54.615 |
| $5^o$ | 56.154 |
| $6^o$ | 57.692 |
| $7^o$ | 59.231 |
| $8^o$ | 60.769 |
| $9^o$ | 62.308 |
| $10^o$ | 63.846 |

| | |
|---|---|
| Μ.Ο. | 55.921 |

*Πίνακας 3.2Ετήσιες ποσότητες απορριμμάτων στα Χανιά*

Θεωρείται πως τα απορρίμματα μετά την συμπίεση αποκτούν πυκνότητα 0,85tn/$m^3$ οπότε ο μέσος ετήσιος όγκος που θα καταλαμβάνουν στο ΧΥΤΑ θα είναι 47.533 tn/yr. Κάνοντας την απλοποιητική παραδοχή πως θα επικαλύπτεται αρχικά όλη η επιφάνεια του ΧΥΤΑ με στερεά απόβλητα και στη συνέχεια θα τοποθετείται η επόμενη στρώση απορριμμάτων και γνωρίζοντας πως η επιφάνεια της κυψέλης είναι 34800$m^2$ και το ύψος των αποβλήτων του ταμπανιού 1,4m (0,1m) προκύπτει πως κάθε χρόνο θα καλύπτεται η βάση της κυψέλης με απορρίμματα. Καθώς το βάθος της κυψέλης θα είναι 15 περίπου μέτρα προκύπτει πως η διάρκεια ζωής της κυψέλης θα είναι 10 περίπου έτη.

- Το μέσο μηνιαίο ύψος κατακρημνισμάτων της περιόδου 1959 - 1995 από τον μετεωρολογικό της Σούδας όπως αυτά παρουσιάζονται στην Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων του χώρου.
- Την μέση μηνιαία θερμοκρασία για την περίοδο 1959-1993
- Το μηνιαίο ποσοστό επί τις εκατό (Ρ) των ετησίων ωρών της ημέρας για το γεωγραφικό πλάτος του χώρου (Φ = $35^o$ $3^{'}$)
- Την ημερήσια απόθεση των απορριμμάτων. Η απόθεση των απορριμμάτων μεταβάλλεται ανάλογα με το έτος της λειτουργίας του χώρου, και συνεπώς και η ημερήσια απόθεση των απορριμμάτων μεταβάλλεται.

Γενικά χαρακτηριστικά των ταμπανιών

- Η αρχική ποσότητα υγρασίας των απορριμμάτων 20%.
- Ύψος ταμπανιών, 1,5 μέτρα
- Αναλογία των στερεών αποβλήτων με το υλικό επικάλυψης, 15: 1
- Χαρακτηριστικά του υλικού επικάλυψης

i. Το ειδικό βάρος του υλικού επικάλυψης θεωρήθηκε ίσο με 1,5 tn/$m^3$,

- Χαρακτηριστικά της παραγωγής του βιοαερίου

i.Η κατανάλωση νερού κατά την διάρκεια της παραγωγής του βιοαερίου 0,16 Kg/$m^3$.
ii.Η παρουσία νερού σε μορφή ατμών στο βιοαέριο 0,016 Kg/$m^3$.
iii.Το ειδικό βάρος του βιοαερίου 1,339 Kg/$m^3$.

- Η υδατο-χωρητικότητα του ταμπανιού υπολογίζεται όπως έχει ήδη προαναφερθεί

Μετεωρολογικά χαρακτηριστικά

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ποσότητας των στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ

απαιτούνται οι ποσότητες όμβριων που διαπερνούν το υλικό επικάλυψης και εισέρχονται στον απορριμματικό όγκο τόσο κατά την λειτουργία του χώρου απόθεσης των απορριμμάτων όσο και κατά την φάση της αποκατάστασης του χώρου. Για τον υπολογισμό της διηθούμενης ποσότητας όμβριων εντός του απορριμματικού όγκου υπολογίζεται η εξατμισοδιαπνοή με την μέθοδο του Thornthwaite όπως αυτή περιγράφηκε πιο πάνω.

Η εξατμισοδιαπνοή που προκύπτει για κάθε μήνα παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί

| **Μήνες** | **Μέση θερμοκρασία ($^{o}$C)** | **ET $_{\rho}$ (mm)** |
|---|---|---|
| Ιανουάριος | 10,5 | 19,2348 |
| Φεβρουάριος | 11 | 20,54383 |
| Μάρτιος | 12,6 | 32,54561 |
| Απρίλιος | 15,8 | 53,50161 |
| Μάιος | 19,9 | 92,54114 |
| Ιούνιος | 24,4 | 141,4723 |
| Ιούλιος | 26,3 | 160,9585 |
| Αύγουστος | 25,8 | 146,3973 |
| Σεπτέμβριος | 23 | 103,5596 |
| Οκτώβριος | 19,2 | 68,9562 |
| Νοέμβριος | 15,6 | 40,83884 |
| Δεκέμβριος | 12,6 | 26,67902 |

*Πίνακας 3.3 Μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και εξατμισοδιαπνοής*

Επιπλέον από την Μ.Π.Ε. έχουμε μηνιαία στοιχεία βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για 35 έτη τα οποία συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

| **Μήνες** | **Ύψος βροχόπτωσης (mm)** |
|---|---|
| Ιανουάριος | 133,34 |
| Φεβρουάριος | 108,05 |
| Μάρτιος | 79,14 |
| Απρίλιος | 33,25 |
| Μάιος | 13,94 |
| Ιούνιος | 4,52 |
| Ιούλιος | 1,11 |
| Αύγουστος | 1,23 |
| Σεπτέμβριος | 15,8 |

| | |
|---|---|
| Οκτώβριος | 72,86 |
| Νοέμβριος | 72,76 |
| Δεκέμβριος | 94,2 |

*Πίνακας 3.4 Μέσο μηνιαίο ύψος βροχόπτωσης*

Η διηθούμενη ποσότητα στο ταμπάνι είναι το ύψος της βροχής μείον το ύψος της εξατμισοδιαπνοής οπότε λαμβάνεται ο επόμενος πίνακας

| **Μήνες** | **Διηθούμενη ποσότητα στο ταμπάνι (mm)** |
|---|---|
| Ιανουάριος | 114,1052 |
| Φεβρουάριος | 87,50617 |
| Μάρτιος | 46,59439 |
| Απρίλιος | 0* |
| Μάιος | 0* |
| Ιούνιος | 0* |
| Ιούλιος | 0* |
| Αύγουστος | 0* |
| Σεπτέμβριος | 0* |
| Οκτώβριος | 3,9038 |
| Νοέμβριος | 31,92116 |
| Δεκέμβριος | 67,52098 |
| Συνολικά | 351,5 |

*Πίνακας 3.4 Τιμές διηθούμενης ποσότητας νερού ανά ταμπάνι κατά τη διάρκεια λειτουργίας του ΧΥΤΑ*

*Στις περιπτώσεις που η εξατμισοδιαπνοή είναι μεγαλύτερη της βροχόπτωσης η διηθούμενη ποσότητα στο ταμπάνι λαμβάνεται ίση με μηδέν

Η εισερχόμενη ποσότητα όμβριων εντός του απορριμματικού όγκου ανέρχεται σε περίπου 350 mm/yr.

Μετά το πέρας της λειτουργίας του ΧΥΤΑ (ολοκλήρωση και των 10 ταμπανιών) και λόγω της διαμόρφωσης του χώρου με κλίσεις 1:3 ο συντελεστής επιφανειακής απορροής θα είναι 0,7 οπότε η διηθούμενη ποσότητα στο ταμπάνι θα είναι το 30% των ποσοτήτων του προηγούμενου πίνακα δηλαδή,

| **Μήνες** | **Διηθούμενη ποσότητα** |
|---|---|

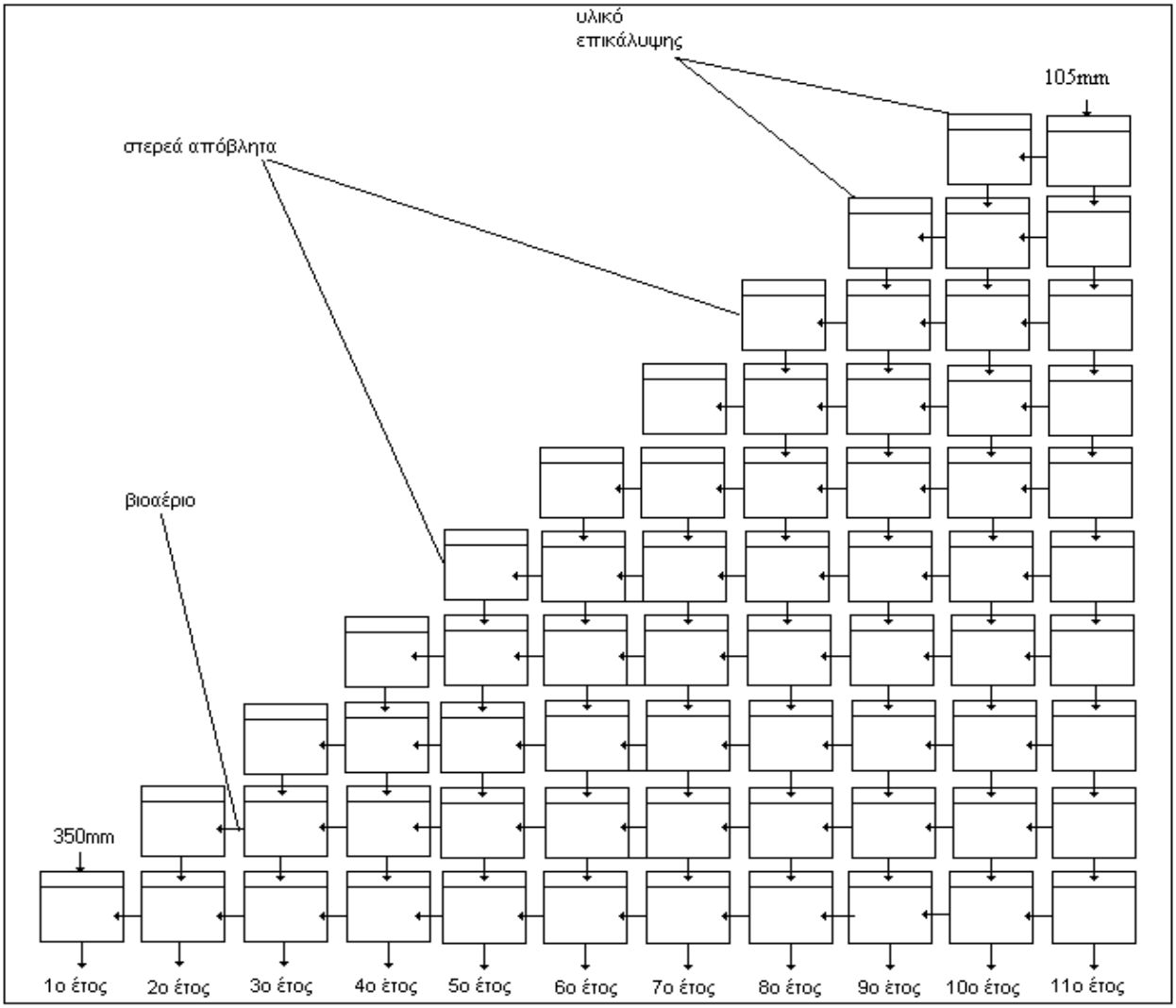
| | **στο ταμπάνι μετά το πέρας λειτουργίας(mm)** |
|---|---|
| Ιανουάριος | 34,23156 |
| Φεβρουάριος | 26,25185 |
| Μάρτιος | 13,97832 |
| Απρίλιος | 0 |
| Μάιος | 0 |
| Ιούνιος | 0 |
| Ιούλιος | 0 |
| Αύγουστος | 0 |
| Σεπτέμβριος | 0 |
| Οκτώβριος | 1,17114 |
| Νοέμβριος | 9,576348 |
| Δεκέμβριος | 20,25629 |
| Συνολικά | 105,4655 |

*Πίνακας 3.5 Τιμές διηθούμενης ποσότητας νερού ανά ταμπάνι μετά το πέρας λειτουργίας του ΧΥΤΑ*

Για τον υπολογισμό των ποσοτήτων των στραγγισμάτων, λαμβάνονται υπόψη τρεις βασικές παραδοχές:

1. Στην περίπτωση που το κύτταρο είναι σε λειτουργία για λόγους ασφαλείας όπως προαναφέρθηκε η επιφανειακή απορροή θεωρείται μηδενική, και η εισερχόμενη ποσότητα όμβριων εντός του απορριμματικού όγκου ανέρχεται σε 350 mm/Yr.
2. Δεν υπάρχουν διαφυγές προς τον υδροφόρο ορίζοντα, λόγω της στεγανοποίησης του πυθμένα του ΧΥΤΑ.
3. Δεν υπάρχουν εισροές όμβριων, από την ευρύτερη λεκάνη απορροής, λόγω της κατασκευής περιμετρικής τάφρου, η οποία εκτρέπει την επιφανειακή απορροή από το σώμα των απορριμμάτων.

Το ανάγλυφο του ΧΥΤΑ όπως έχει ήδη ειπωθεί μετατρέπεται σε ένα ισοδύναμο 10 ταμπανιών όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα. Στο 11$^{o}$ έτος ο αριθμός των ταμπανιών παραμένει ίδιος όμως εξαιτίας της διαμόρφωσης του ΧΥΤΑ κατά την αποκατάσταση θεωρείται μειωμένη η είσοδος των όμβριων στο εσωτερικό του.




Εικόνα 3.2 Σχηματική απεικόνιση των ταμπανιών

Ακολουθεί ενδεικτικά το πρώτο βήμα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των στραγγισμάτων

**1ο ταμπάνι**

1. Χαρακτηριστικά απορριμμάτων
   (α) ειδικό βάρος συμπιεσμένων απορριμμάτων =0.85tn/$m^3$
   (β) αρχική ποσότητα υγρασίας στα στερεά απορρίμματα = 20% κατά βάρος
2. Χαρακτηριστικά ΧΥΤΑ
   (α) γενικά
      i. ύψος ταμπανιού = 1,5m
      ii. επιφάνεια ταμπανιού = 1$m^2$
      iii. αναλογία ΣΑ με υλικό επικάλυψης = 15
   (β) υλικό επικάλυψης
      i. ειδικό βάρος υλικού επικάλυψης = 1,5 tn/$m^3$

ii. η ποσότητα υγρασίας του υλικού επικάλυψης περιλαμβάνεται στην υγρασία του χώρου

(γ) παραγωγή βιοαερίου

i.κατανάλωση νερού στην παραγωγή βιοαερίου = 0,16kg/$m^3$

ii. παρουσία νερού σε μορφή ατμών στο βιοαέριο = 0,016 kg/$m^3$

iii. ειδικό βάρος βιοαερίου = 1,339 kg/$m^3$

(δ) υδατο - χωρητικότητα

Η χωρητικότητα ως συνάρτηση του βάρους υπερφόρτωσης εκφράζεται ως εξής:

$$FC = 0{,}6 - 0{,}55\left(\frac{W}{10.000 + W}\right)$$

FC= ποσοστό νερού στα απορρίμματα βασισμένο σε συνθήκες ξηρού βάρους

W = το βάρος υπερφόρτωσης υπολογισμένο στο μέσο ύψος του ταμπανιού (σε lb)

3. ποσότητα όμβριων

εισερχόμενη ποσότητα όμβριων κατά την περίοδο που η κυψέλη δέχεται απορρίμματα = 350mm/yr

Για το πρώτο έτος

1.

(α) Υπολογισμός του υλικού επικάλυψης και των απορριμμάτων ανά ταμπάνι

i.βάρος υλικού επικάλυψης = 0,25tn

ii. βάρος στερεών αποβλήτων = 1,275tn

iii. συνολικό βάρος ταμπανιού = 1,525tn

(β) ξηρό βάρος των στερεών αποβλήτων = 0,80·1,275tn =1,02tn

(γ) περιεχόμενη υγρασία στερεών αποβλήτων = 0,20·1,275tn=0,255tn

(δ) μάζα εισερχόμενης βροχής στο πρώτο ταμπάνι = 0,35m·1$m^2$= 0,35tn

(ε) ολικό βάρος ανά ταμπάνι =1,525 tn +0,35 tn=1,875tn

**2.** Υπολογισμός υδατικού ισοζυγίου για το πρώτο ταμπάνι στο τέλος της πρώτης περιόδου και καθορισμός της ποσότητας στραγγισμάτων που αναμένονται από το πρώτο ταμπάνι

(α) i.παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου = 1,275tn · 0$m^3$/tn=0$m^3$

ii. μάζα παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου = 0$m^3$ ·1,339·$10^{-3}$ tn/$m^3$=0tn

(β) μάζα νερού που καταναλώθηκε κατά την παραγωγή του βιοαερίου =0$m^3$ · 0,16·$10^{-3}$ tn/$m^3$=0tn

(γ) μάζα νερού υπό μορφή ατμών στο νερό = 0$m^3$ · 0,016·$10^{-3}$ tn/$m^3$=0tn

(δ) μάζα νερού στα στερεά απόβλητα στο πρώτο ταμπάνι= 0,255tn+0,35tn=0,605tn

(ε) ξηρό βάρος στερεών αποβλήτων στο πρώτο ταμπάνι στο τέλος του πρώτου έτους = 1,02tn-0tn-0tn=1,02tn

(στ) μέσο βάρος των αποβλήτων = 0,5·(0,605+1,02)+0,25=1,0625tn

(ζ) υδατο- χωρητικότητα $= FC = 0{,}6 - 0{,}55\left(\frac{2.342}{10.000 + 2.342}\right) = 0{,}495$

*1,06tn ≈2.342lb

(η) μάζα νερού που κατακρατείται στο πρώτο ταμπάνι = 0,495·1,02tn=0,505tn

(θ) παραγωγή στραγγισμάτων = 0,605tn-0,504tn =0,099tn

(ι) μάζα νερού που κατακρατήθηκε στο πρώτο ταμπάνι = 0,605tn-0,099tn=0,505tn

(κ) συνολικό βάρος ταμπανιού = 1,02tn+0,505tn+0,18tn=1,705tn

(λ) 0,099tn / $m^2$ •34.800$m^2$=3.461$m^3$.

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται ο όγκος των στραγγισμάτων για τα επόμενα έτη οπότε προκύπτει ο πίνακας που ακολουθεί

| **Έτη** | **Στραγγίσματα** |
|---|---|
| 1 | 3461,202 |
| 2 | 7715,953 |
| 3 | 10172,76 |
| 4 | 12064,25 |
| 5 | 13329,53 |
| 6 | 14242,25 |
| 7 | 14795,33 |
| 8 | 15249,56 |
| 9 | 15506,29 |
| 10 | 15738,3 |
| 11 | 9689,35 |

*Πίνακας 3.6 Τιμές παραγόμενης ποσότητας στραγγισμάτων*

Στις επόμενες σελίδες ακολουθεί ένα πρόγραμμα της Ε.Ρ.Α. για την κατανομή της βροχόπτωσης σε ένα ΧΥΤΑ αλλά και του όγκου των παραγόμενων στραγγισμάτων.

## 3.4 Μοντέλο HELP

Το μοντέλο HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) είναι ένα πρόγραμμα το οποίο δέχεται στοιχεία μετεωρολογικά, εδάφους και κατασκευαστικά και χρησιμοποιεί τεχνικές επίλυσης που λαμβάνουν υπόψη τις επιδράσεις της επιφανειακής απορροής της διήθησης, της εξάτμισης, της υδατοχωρητικότητας και πλήθος άλλων παραμέτρων προκειμένου να προσδιορίσει το υδατικό ισοζύγιο ενός

ΧΥΤΑ και τελικά τον όγκο των στραγγισμάτων που προκύπτουν από αυτόν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι παράμετροι που χρησιμοποιεί το μοντέλο. [43]

Μετεωρολογικά δεδομένα

*Δεδομένα Εξατμισοδιαπνοής*

Τα στοιχεία που χρειάζεται το μοντέλο για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής είναι τα εξής

*Τοποθεσία.*

Το μοντέλο ζητάει να δοθεί η πιο κοντινή πόλη στο ΧΥΤΑ και η χώρα που βρίσκεται καθώς επίσης και το γεωγραφικό πλάτος.

*Βάθος ζώνης εξάτμισης.*

Η ζώνη εξάτμισης είναι το μεγαλύτερο βάθος από το οποίο το νερό μπορεί να αφαιρεθεί μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Ο χρήστης πρέπει να καθορίσει το βάθος της ζώνης εξάτμισης και μπορεί να χρησιμοποιήσει δεδομένες τιμές ή να καθορίσει ο ίδιος μια τιμή. Το μοντέλο δεν επιτρέπει το βάθος εξάτμισης να υπερβαίνει το βάθος του ανώτερου τμήματος της μόνωσης. Όμοια το βάθος της εξάτμισης δεν αναμένεται να φτάνει πολύ βαθιά στην ζώνη αποστράγγισης του τελικού στρώματος και θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το μηδέν. Η τιμή επηρεάζει την αποθηκευτικότητα του νερού κοντά στην επιφάνεια οπότε επηρεάζει απευθείας τους υπολογισμούς της εξατμισοδιαπνοής και της επιφανειακής ροής. Όταν υπάρχει βλάστηση η τιμή του βάθους εξάτμισης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το βάθος που φτάνουν οι ρίζες των φυτών. Η επιρροή των ριζών των φυτών συνήθως εκτείνεται σε βάθος μεγαλύτερο από το μήκος των ριζών εξαιτίας τριχοειδών φαινομένων. Η εκτίμηση πως η ζώνη εξάτμισης είναι ίση με το αναμενόμενο μέσο βάθος που φτάνουν οι ρίζες θα έχει την τάση να παράγει μια χαμηλή εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής και μια υψηλή εκτίμηση της απορροής μέσω της ζώνης εξάτμισης. Ένα βάθος εξάτμισης θα πρέπει να καθοριστεί από 'γυμνό' έδαφος για τον υπολογισμό της απευθείας εξάτμισης από το έδαφος. Το βάθος αυτό θα είναι μια συνάρτηση του τύπου του εδάφους, αλλά και της εξάτμισης και της ροής της θερμότητας στην επιφάνεια. Σε περίπτωση όπου δεν έχουμε βλάστηση το βάθος εξάτμισης θα είναι μερικές ίντσες για αμμοχάλικες έτσι για άμμο κυμαίνεται από 4 έως 8 in, σε λασπώδη εδάφη από 8 έως 18 in και σε αργιλικά από 12 έως 60 in. Το βάθος των ριζών και συνεπώς και το βάθος εξάτμισης εξαρτάται από πολλές παραμέτρους: το είδος βλάστησης, τη διαθεσιμότητα υγρασίας, το χρόνο ωρίμανσης, το είδος εδάφους, και την πυκνότητα βλάστησης. Σε υγρά κλίματα όπου η υγρασία είναι διαθέσιμη κοντά στην επιφάνεια το γρασίδι έχει βάθος ριζών από 6 έως 8 in. Σε ξηρά κλίματα αυτό το βάθος

εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος των φυτών και από το βάθος στο οποίο φτάνει η υγρασία και κυμαίνεται από 6 έως 48 in.

*Δείκτης περιοχής φυλλώματος-Leaf area index (LAI)*

Πρόκειται για έναν αδιάστατο αριθμό ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του εδάφους που καλύπτεται από το φύλλωμα της βλάστησης, σε σχέση με την συνολική περιοχή συναρτήσει της ποιότητας της βλάστησης. Ο LAI για γυμνό έδαφος είναι μηδέν. Για φτωχή βλάστηση (με γρασίδι) ο αριθμός μπορεί να φτάσει το 1,0, για μια σχετικά καλή κάλυψη μπορεί να φτάσει το 3,5 και για πολύ καλής ποιότητας κάλυψη με βλάστηση 5,0. Σε περίπτωση που έχουμε δέντρα ή θάμνους επίσης παίρνει μια τιμή κοντά στο 5,0. Το μοντέλο δεν ανταποκρίνεται ορθά σε τιμές μεγαλύτερες του 5. Αν το είδος του φυτού έχει χαμηλή εξατμισοδιαπνοή τότε θα ήταν ορθότερη η επιλογή μιας τιμής κοντά στις τιμές του LAI για επιφάνειες με γρασίδι. Οι περισσότεροι ΧΥΤΑ συνήθως έχουνε τιμή LAI στην καλύτερη περίπτωση 2,0 με πιο συνηθισμένη την τιμή 1,0 καθώς σπάνια οι χώροι αυτοί είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι για να στηρίξουν την ανάπτυξη μεγάλων φυτών. Τα επιφανειακά εδάφη είναι συχνά ρηχά και προσφέρουν ελάχιστη αποθήκευση υγρασίας στις ξηρές περιόδους. Τα ανώτερα καλύμματα συνήθως σχεδιάζονται με τρόπον ώστε το νερό να απορρέει σε μικρό χρονικό διάστημα ενώ σε κάποιες περιπτώσεις η μόνωση είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η διείσδυση των ριζών. Κάποιοι ΧΥΤΑ παράγουν μεγάλες ποσότητες βιοαερίου το οποίο αν δεν είναι ελεγχόμενο μειώνει τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου στην ζώνη των ριζών και περιορίζει την ανάπτυξη των φυτών.

*Ημερομηνίες έναρξης και λήξης της περιόδου ανάπτυξης της βλάστησης .*

Η έναρξη της περιόδου ανάπτυξης βασίζεται στην μέση ημερήσια θερμοκρασία αλλά και στο είδος των φυτών. Τυπικά η μέρα έναρξης της ανάπτυξης της βλάστησης για το γρασίδι είναι η μέρα κατά την οποία η μέση ημερήσια θερμοκρασία φτάνει τους 50 με 55 βαθμούς Fahrenheit. Ενώ η περίοδος λήξης είναι όταν η μέση ημερήσια θερμοκρασία πέσει κάτω από 50 με 55 Fahrenheit. Στα ψυχρότερα κλίματα οι ημερομηνίες αυτές θα ορίζονται για χαμηλότερες θερμοκρασίες ενώ για θερμότερα θα ορίζονται για υψηλότερες θερμοκρασίες Σε περιοχές στις οποίες έχουμε ανάπτυξη καθ' όλη τη διάρκεια του έτους οι ημερομηνίες έναρξης και τέλους θα ορίζονται ως το 0 και 365 αντίστοιχα.

*Μέση κανονική ετήσια ταχύτητα ανέμου.*

Εκφράζεται mph ή kph και είναι δυνατόν να βρεθεί από στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας.

*Κανονική μέση σχετική υγρασία τριμήνου.*

Εκφράζεται σε επί τοις εκατό τιμές και μπορεί να βρεθεί άμεσα ή έμμεσα από στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας.

*Δεδομένα Ατμοσφαιρικής Κατακρήμνισης.*

Το μοντέλο περιέχει στοιχεία για 102 πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών και για χρονική περίοδο 5 ετών τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει αν ο ΧΥΤΑ βρίσκεται κοντά σε αυτές. Διαφορετικά ο χρήστης μπορεί να εισαγάγει ημερήσια στοιχεία βροχόπτωσης για 1 έως 100 χρόνια. Τα χρόνια δεν χρειάζεται να είναι διαδοχικά και μπορεί να προσθέσει, να σβήσει ή να αλλάξει την σειρά των ετήσιων στοιχείων. Το ίδιο μπορεί να κάνει και με τα ημερήσια στοιχεία κάθε έτους έτσι ώστε να μπορεί να προσθέσει περιστατικά ισχυρών βροχοπτώσεων. Εναλλακτικά ο χρήστης μπορεί να εισάγει αρχεία ASCII με ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης. Το κάθε αρχείο πρέπει να έχει δεδομένα για μία χρονιά.

*Δεδομένα Θερμοκρασίας*

Το πρόγραμμα μπορεί να παράγει για 1 έως 100 χρόνια δεδομένα θερμοκρασίας στοχαστικά για την επιλεγμένη (στα όρια των Ηνωμένων Πολιτειών) τοποθεσία. Η τεχνητή παραγωγή δεδομένων θερμοκρασίας είναι συνάρτηση των δεδομένων βροχόπτωσης και για αυτό θα πρέπει να εισάγονται αυτά πρώτα. Τα δεδομένα της θερμοκρασίας περιορίζονται από τα δεδομένα της βροχόπτωσης και περιορίζονται στα έτη στα οποία έχουμε δεδομένα. Αν ο χρήστης επιθυμεί μπορεί να εισάγει στοιχεία κανονικών μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών για να βελτιώσει τα στατιστικά χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων των ημερήσιων τιμών.

Όμως όπως και με τα δεδομένα βροχόπτωσης ο χρήστης μπορεί χειρωνακτικά να εισάγει ημερήσιες μέσες θερμοκρασίες για ένα έως και εκατό έτη. Ο τρόπος εισαγωγής γίνεται όπως και με τα στοιχεία της βροχόπτωσης.

Δεδομένα ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας

Σε αυτήν την περίπτωση ισχύει ότι ακριβώς και για τα δεδομένα θερμοκρασίας.[43]

<u>Δεδομένα σχεδιασμού και εδάφους.</u>

Στην πρώτη σελίδα που εμφανίζεται ο χρήστης πρέπει να εισάγει την έκταση του ΧΥΤΑ (acres ή hectares) και το επί τοις εκατό ποσοστό της επιφάνειας όπου είναι δυνατή η απορροή. Επιπλέον υπάρχει η προαιρετική αναγραφή της αρχικής υγρασίας (διαφορετικά το μοντέλο θεωρεί μια τιμή κοντά σε αυτήν της σταθερής κατάστασης).

*Τύπος στρώματος*

Στην επόμενη σελίδα θα πρέπει να οριστούν τα στρώματα του ΧΥΤΑ και τη διάταξη αυτών.

Το πρόγραμμα αναγνωρίζει τέσσερις τύπους στρωμάτων τους οποίους ο χρήστης θα

πρέπει να ορίσει στην πρώτη στήλη που εμφανίζεται στη δεύτερη σελίδα (design and soil data). Οι τύποι αυτοί είναι οι εξής:

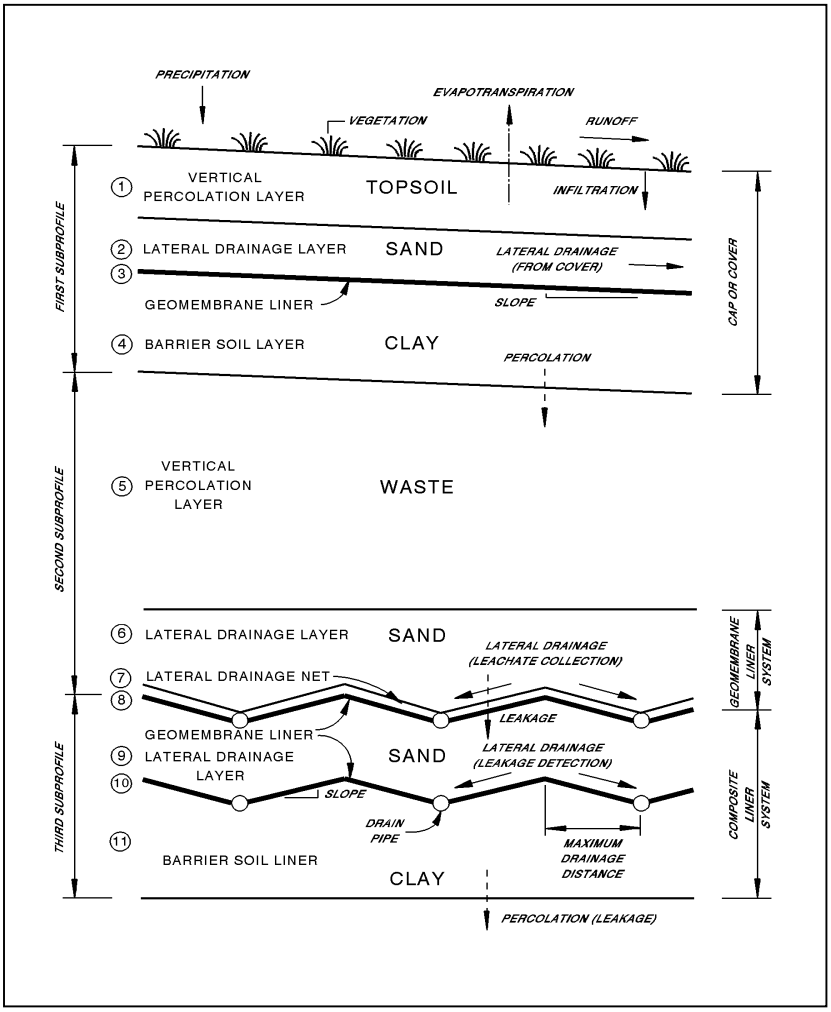
- στρώμα κάθετης διήθησης
- στρώμα αποστράγγισης
- στρώμα εδαφικής μόνωσης (στρώμα φραγμού) και
- στρώμα γεωμεμβράνης.

Είναι σημαντικό να γίνει σωστή ταξινόμηση των στρώσεων καθώς το πρόγραμμα μοντελοποιεί την ροή του νερού μέσω των τεσσάρων αυτών τύπων στρώματος με διαφορετικό τρόπο.

Με τον όρο στρώμα κάθετης διήθησης (στρώματα 1 και 5 στην εικόνα 3.3, της επόμενης σελίδας) το μοντέλο ορίζει τα τμήματα του ΧΥΤΑ στα οποία η ροή του ύδατος είναι κάθετη και πραγματοποιείται κυρίως υπό την επίδραση της βαρύτητας. Τέτοιες στρώσεις είναι η στρώση των απορριμμάτων ή η εξωτερική στρώση του ΧΥΤΑ, η οποία είναι σχεδιασμένη για την υποστήριξη της βλάστησης. Ο ρυθμός της διήθησης εξαρτάται από την υγρασία του στρώματος αλλά και από τα χαρακτηριστικά της. Όταν το μοντέλο ζητάει την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα τότε θα πρέπει να δίνεται η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα, σε περίπτωση ανισοτροπικού στρώματος.

Τα στρώματα αποστράγγισης (στρώματα 2,6,7 και 9 στην εικόνα 3.3) είναι τα στρώματα τα οποία βρίσκονται ακριβώς πάνω από τα στρώματα μόνωσης και είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να οδηγούν τα στραγγίσματα μέσω του συστήματος συλλογής εκτός του κυρίως σώματος του ΧΥΤΑ. Το μοντέλο ζητάει την κλίση του αποστραγγιστικού συστήματος το οποίο μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 50 %. Το μήκος της αποστράγγισης είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ της κορυφής της κλίσης και του αγωγού συλλογής. Επίσης σε αυτό το είδος των στρωμάτων το πρόγραμμα επιτρέπει να ορίσουμε ποιο ποσοστό των στραγγισμάτων που συλλέγει επανακυκλοφορείται και σε ποια στρώματα πηγαίνει το επανακυκλοφορούμενο απόβλητο.

Τα στρώματα μόνωσης (στρώματα 4, και 11 στην εικόνα 3.3) που ορίζει το μοντέλο είναι τα στρώματα που σκοπό έχουν να περιορίσουν την κάθετη διήθηση των στραγγισμάτων. Η υδραυλική αγωγιμότητα της μόνωσης θα πρέπει να είναι μικρότερη από αυτήν των άλλων στρώσεων. Το πρόγραμμα θεωρεί ότι οι στρώσεις της μόνωσης είναι κορεσμένες, ότι δεν υπάρχει εξατμισοδιαπνοή αλλά και ούτε οριζόντια κίνηση του ύδατος μέσα σε αυτές. Η κίνηση των στραγγισμάτων γίνεται μόνο σε κάθετη κατεύθυνση μέσα από το σώμα της μόνωσης.




*Εικόνα 3.3 Διάταξη στρωμάτων που θεωρεί το μοντέλο HELP* [43]

*Το πάχος του στρώματος*

Εισάγεται το πάχος του κάθε στρώματος σε in ή cm ανάλογα με τα ο σύστημα των μονάδων που έχει επιλέξει ο χρήστης.

*Σύσταση εδάφους*

Ο χρήστης μπορεί να εισάγει δεδομένα που παρέχει το μοντέλο για τύπους εδαφών και υλικών (για 42 τύπους) ή χειρονακτικά. Αν ο χρήστης επιλέξει τον πρώτο τρόπο τότε αυτόματα το πρόγραμμα παράγει πληροφορίες για το πορώδες (vol/vol), την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα (vol/vol), την υδατοχωρητικότητα (vol/vol), και για το σημείο φθοράς-wilting point (vol/vol), για τον επιλεγμένο τύπο εδάφους. Ο πίνακας με τους 42 τύπους εδαφών και υλικών (όπως παρουσιάζεται στο user's guide του προγράμματος) φαίνεται παρακάτω:

| Classification | Total Porosity | Field Capacity | Wilting Point | Saturated Hydraulic Conductivity |
|---|---|---|---|---|

| HELP | USDA | USCS | vol/vol | vol/vol | vol/vol | cm/sec |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CoS | SP | 0.417 | 0.045 | 0.018 | $1.0x10^{-2}$ |
| 2 | S | SW | 0.437 | 0.062 | 0.024 | $5.8x10^{-3}$ |
| 3 | FS | SW | 0.457 | 0.083 | 0.033 | $3.1x10^{-3}$ |
| 4 | LS | SM | 0.437 | 0.105 | 0.047 | $1.7x10^{-3}$ |
| 5 | LFS | SM | 0.457 | 0.131 | 0.058 | $1.0x10^{-3}$ |
| 6 | SL | SM | 0.453 | 0.190 | 0.085 | $7.2x10^{-4}$ |
| 7 | FSL | SM | 0.473 | 0.222 | 0.104 | $5.2x10^{-4}$ |
| 8 | L | ML | 0.463 | 0.232 | 0.116 | $3.7x10^{-4}$ |
| 9 | SiL | ML | 0.501 | 0.284 | 0.135 | $1.9x10^{-4}$ |
| 10 | SCL | SC | 0.398 | 0.244 | 0.136 | $1.2x10^{-4}$ |
| 11 | CL | CL | 0.464 | 0.310 | 0.187 | $6.4x10^{-5}$ |
| 12 | SiCL | CL | 0.471 | 0.342 | 0.210 | $4.2x10^{-5}$ |
| 13 | SC | SC | 0.430 | 0.321 | 0.221 | $3.3x10^{-5}$ |
| 14 | SiC | CH | 0.479 | 0.371 | 0.251 | $2.5x10^{-5}$ |
| 15 | C | CH | 0.475 | 0.378 | 0.265 | $1.7x10^{-5}$ |
| 16 | Barrier Soil | | 0.427 | 0.418 | 0.367 | $1.0x10^{-7}$ |
| 17 | Bentonite Mat (0.6 cm) | | 0.750 | 0.747 | 0.400 | $3.0x10^{-9}$ |
| 18 | Municipal Waste (900 lb/yd$^3$ or 312 kg/m$^3$) | | 0.671 | 0.292 | 0.077 | $1.0x10^{-3}$ |
| 19 | Municipal Waste (channeling and dead zones) | | 0.168 | 0.073 | 0.019 | $1.0x10^{-3}$ |
| 20 | Drainage Net (0.5 cm) | | 0.850 | 0.010 | 0.005 | $1.0x10^{+1}$ |
| 21 | Gravel | | 0.397 | 0.032 | 0.013 | $3.0x10^{-1}$ |
| 22 | L* | ML | 0.419 | 0.307 | 0.180 | $1.9x10^{-5}$ |
| 23 | SiL* | ML | 0.461 | 0.360 | 0.203 | $9.0x10^{-6}$ |
| 24 | SCL* | SC | 0.365 | 0.305 | 0.202 | $2.7x10^{-6}$ |
| 25 | CL* | CL | 0.437 | 0.373 | 0.266 | $3.6x10^{-6}$ |
| 26 | SiCL* | CL | 0.445 | 0.393 | 0.277 | $1.9x10^{-6}$ |
| 27 | SC* | SC | 0.400 | 0.366 | 0.288 | $7.8x10^{-7}$ |
| 28 | SiC* | CH | 0.452 | 0.411 | 0.311 | $1.2x10^{-6}$ |
| 29 | C* | CH | 0.451 | 0.419 | 0.332 | $6.8x10^{-7}$ |
| 30 | Coal-Burning Electric Plant Fly Ash* | | 0.541 | 0.187 | 0.047 | $5.0x10^{-5}$ |
| 31 | Coal-Burning Electric Plant Bottom Ash* | | 0.578 | 0.076 | 0.025 | $4.1x10^{-3}$ |
| 32 | Municipal Incinerator Fly Ash* | | 0.450 | 0.116 | 0.049 | $1.0x10^{-2}$ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 33 | Fine Copper Slag* | 0.375 | 0.055 | 0.020 | $4.1x10^{-2}$ |
| 34 | Drainage Net (0.6 cm) | 0.850 | 0.010 | 0.005 | $3.3x10^{+1}$ |

*Πίνακας 3.7 Τύποι εδαφών που διαθέτει το μοντέλο* [43]

*Πορώδες*

Ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών.

*Υδατοχωρητικότητα Field Capacity.*

Ο όγκος του νερού ως προς τον συνολικό όγκο του στρώματος μετά από μια παρατεταμένη περίοδο αποστράγγισης με βαρύτητα από κατάσταση κορεσμού αφού εφαρμοστεί κενό αέρος υποπίεσης 1/3 bar.

*Σημείο μαρασμού (Wilting Point).*

Η μικρότερη δυνατή κατά όγκο περιεκτικότητα του στρώματος σε νερό, που μπορεί να επιτευχθεί με την εξατμισοδιαπνοή των φυτών και αντιστοιχεί στην υγρασία του εδάφους στην οποία ένα φυτό θα ξεραθεί μόνιμα όταν το έδαφος υπόκειται σε κενό αέρος υποπίεσης 15 bars.

*Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα.*

Ο ρυθμός στον οποίο το νερό στραγγίζεται μέσα από ένα κορεσμένο έδαφος κάτω από συγκεκριμένη πίεση.

Το πορώδες, η υδατοχωρητικότητα, και το σημείο μαρασμού (wilting point) είναι αδιάστατοι αριθμοί και παίρνουν τιμές από 0 έως 1. Το πορώδες πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την υδατοχωρητικότητα που με τη σειρά της πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το σημείο μαρασμού.

Η διατήρηση της υγρασίας του εδάφους θα πρέπει να τροποποιείται και να μειώνεται έπειτα αν κάποιος όγκος του στρώματος δεν μετέχει στην αποστράγγιση και αποθήκευση του νερού που διεισδύει. Αυτό συναντάται συχνά σε ρηχά στρώματα των αστικών στερεών αποβλήτων καθώς αυτά χαρακτηρίζονται από μεγάλη ανομοιογένεια. Τα πλαστικά στα απορρίμματα δημιουργούν αυλακώσεις από όπου περνάει το νερό, περιορίζουν την εξάπλωση της διείσδυσης και αναστέλλουν την ύγρανση των άλλων αποβλήτων και επομένως υπάρχει μειωμένη αποθηκευτικότητα. Το μοντέλο θεωρεί πως μόνο το 25 % του όγκου εμπλέκεται ενεργά στην αποστράγγιση, στην αποθηκευτικότητα και την διήθηση. Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει την κατά όγκο περιεκτικότητα του στρώματος σε νερό. Αν επιλέξει να μην καθορίσει την τιμή αυτή το πρόγραμμα εκτιμά τιμές κοντά στην σταθερή κατάσταση και έπειτα τρέχει για ένα έτος βαθμονόμησης ώστε να εκλεπτύνει τις εκτιμήσεις πριν ξεκινήσει την προσομοίωση. Οι τιμές που λαμβάνονται θεωρούνται ως οι αρχικές τιμές για προσομοίωση μιας περιόδου.

Η αρχική υγρασία των αστικών στερεών αποβλήτων είναι συνάρτηση της σύστασής τους. Τιμές που έχουν αναφερθεί για την υγρασία 'φρέσκων απορριμμάτων'

κυμαίνονται από 0,08-0,20vol/vol. Η μέση τιμή είναι περίπου 0,12vol/vol για αστικά απορρίμματα τα οποία έχουν συμπιεστεί. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ο τύπος απορριμμάτων 19 όπου το 75% του όγκου των απορριμμάτων είναι ανενεργός, η περιεχόμενη αρχική υγρασία θα είναι μόνο του ενεργού τμήματος των απορριμμάτων δηλαδή το 25% των τιμών που προαναφέρθηκαν. Τα στοιχεία αυτά αναφέρονται προφανώς σε δεδομένα για αμερικανικά στερεά απόβλητα και σίγουρα οι τιμές διαφέρουν για τα απορρίμματα στον ελλαδικό χώρο.

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό θ, που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα δίνεται από τη σχέση,

$$\theta = w\frac{\rho_{db}}{\rho_w} = w\Gamma_{db}$$

Η υγρασία ($w$), εκφράζεται σαν η μάζα του νερού ($M_w$) ανά μάζα εδάφους($M_s$). Ο δύο μπορούν να συνδυαστούν γνωρίζοντας την πυκνότητα του ξηρού όγκου (dry bulk density) ($\rho_{db}$),το ειδικό βάρος (dry bulk specific gravity) ($\Gamma_{db}$) του εδάφους (λόγος του ($\rho_{db}$)), προς το ($\rho_w$)).

<u>Σχεδιαστικά δεδομένα πλευρικής στρώσης αποστράγγισης</u>

- Μέγιστο μήκος αποστράγγισης (ft ή m)
- Επί τοις εκατό κλίση ζώνης αποστράγγισης (%)
- Επί τοις εκατό ποσότητα στραγγισμάτων που συλλέγονται από το στρώμα απορροής και ανακυκλώνεται (%)
- Το στρώμα που δέχεται τα ανακυκλωμένα στραγγίσματα από το στρώμα αποχέτευσης

<u>Δεδομένα για τη γεωμεμβράνη</u>

Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τα χαρακτηριστικά της γεωμεμβράνης είτε μέσω των επιλογών του προγράμματος είτε χειρονακτικά. Επιπλέον, στοιχεία που χρειάζεται για να καθοριστεί η γεωμεμβράνη πέρα από το πάχος και την υδραυλική αγωγιμότητα είναι:

*Πυκνότητα μικροοπών (pinhole density) στο στρώμα της γεωμεμβράνης*

Πρόκειται για τον αριθμό των ελαττωμάτων (διάμετρος οπών ίση ή μικρότερη από το πάχος της γεωμεμβράνης, οι οπές εκτιμώνται σε διάμετρο 1mm) ανά μονάδα εμβαδού της μεμβράνης. Γενικά οι ατέλειες αυτές προέρχονται από κατασκευαστικά λάθη του πλαστικού. Οι τυπικές γεωμεμβράνες μπορεί να έχουν από 0,5 έως 1 μικροοπές ανά εκτάριο λόγω κατασκευαστικών λαθών.

*Ατέλειες στην εγκατάσταση της μεμβράνης*

Πρόκειται για τον αριθμό των ελαττωμάτων (διάμετρος οπών ίση μεγαλύτερη από το

πάχος της γεωμεμβράνης, οι οπές εκτιμώνται σε $1cm^2$ στην επιφάνεια) ανά acre (περίπου 4 στρέμματα). Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας όπου χαρακτηρίζεται η ποιότητα εγκατάστασης από τις ατέλειες της μεμβράνης και από τη συχνότητα που αυτές συναντώνται.

| **Ποιότητα Εγκατάστασης** | **Πυκνότητα ελαττωμάτων** | **Συχνότητα (%)** |
|---|---|---|
| Εξαιρετική | Έως 1 | 10 |
| Καλή | 1έως 4 | 40 |
| Επαρκής | 4 έως 10 | 40 |
| Κακή | 10 έως 20 | 10 |

*Πίνακας 3.8 Ποιότητα γεωμεμβράνης*

*Ποιότητας εγκατάστασης της γεωμεμβράνης (placement quality)*

Ο χρήστης πρέπει να εισάγει ακόμα μια παράμετρο στην περίπτωση που αναφερθούν κατασκευαστικές ατέλειες ή ατέλειες κατά την εγκατάσταση και είναι η ποιότητα εγκατάστασης της γεωμεμβράνης. Υπάρχουν πέντε διαφορετικοί τύποι χαρακτηρισμού της γεωμεμβράνης. Το πρόγραμμα επιλέγει ποια εξίσωση θα χρησιμοποιήσει για να υπολογίσει την γεωμεμβράνη χρησιμοποιώντας την παράμετρο της ποιότητας εγκατάστασης και της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού του κατώτερου εδάφους που συνδέεται με την γεωμεμβράνη. Το πρόγραμμά έχει διαφορετικές εξισώσεις για 3 τύπους υδραυλικής αγωγιμότητας, μεγαλύτερη ή ίση του 0,1 cm/sec, μικρότερη του 0,1 και μεγαλύτερη ή ίση του 0,0001 cm/sec, και μικρότερη του 0,0001 cm/sec.

- *Τέλεια:* Το μοντέλο υποθέτει ότι υπάρχει τέλεια επαφή μεταξύ της μεμβράνης και του εδάφους και πως δεν υπάρχει κανένα κενό.
- *Εξαιρετική:*Το μοντέλο υποθέτει εξαιρετική επαφή μεταξύ του εδάφους και της γεωμεμβράνης η οποία περιορίζει την διαρροή των στραγγισμάτων.
- *Καλή:* Το μοντέλο υποθέτει καλές συνθήκες εγκατάστασης, με καλά προετοιμασμένο και λείο έδαφος και έλεγχο της γεωμεμβράνης έτσι ώστε να βεβαιωθεί η καλή επαφή της με το έδαφος που εμποδίζει τις διαρροές
- *Ανεπαρκής:* Το μοντέλο υποθέτει ανεπαρκείς συνθήκες εγκατάστασης και όχι και τόσο καλή προετοιμασία του εδάφους έτσι ώστε να υπάρχει κακή επαφή της γεωμεμβράνης και του υποκείμενου εδάφους με αποτέλεσμα τη δημιουργία κενού και την πιθανότητα διαρροής.
- *Χειρότερη περίπτωση:* Το μοντέλο υποθέτει ότι η επαφή της γεωμεμβράνης με το έδαφος δεν περιορίζει την διαρροή στραγγισμάτων και ότι υπάρχει διαρροή.

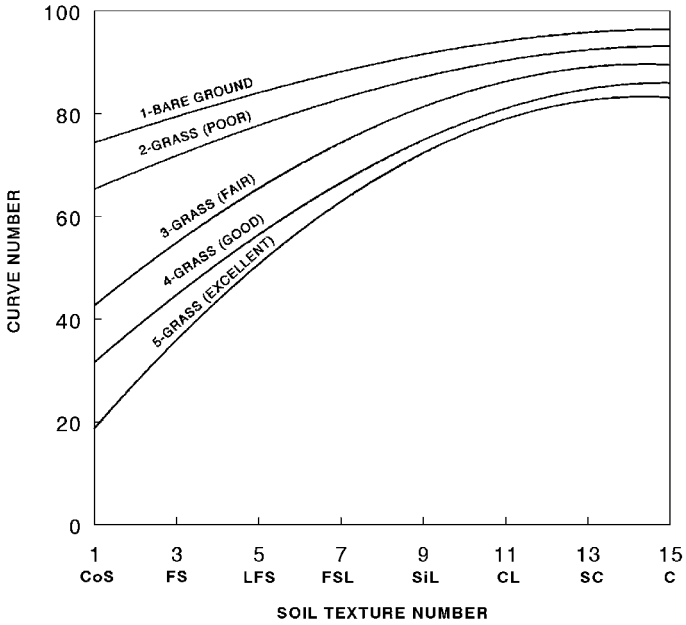
*SCS*

Ο χρήστης είναι αναγκαίο παράλληλα (στην τελευταία σελίδα που εμφανίζεται της επιλογής design&soil data), να δώσει μια τιμή στην παράμετρο SCS (Soil Conservation Service) στον αριθμό καμπύλη απορροής για το AMCII (Antecedent Moisture Condition) ή να παρέχει πληροφορίες ώστε να μπορεί να υπολογιστεί. Ο αριθμός καμπύλης είναι δυνατόν

1) να καθοριστεί απ' ευθείας από το χρήστη

2) να καθοριστεί από το χρήστη και να τροποποιηθεί ανάλογα με την κλίση της επιφάνειας και το μήκος κλίσης του ΧΥΤΑ

3) να υπολογιστεί από το μοντέλο βασιζόμενο στην κλίση της επιφάνειας του ΧΥΤΑ στο μήκος κλίσης στον τύπο του στρώματος στην που βρίσκεται στην κορυφή και την βλάστηση αυτού του στρώματος. Το επόμενο διάγραμμα δίνει ενδεικτικές τιμές αριθμών καμπύλης για δεδομένους τύπους εδαφών και βλάστησης.




*Εικόνα 3.4 Ενδεικτικές τιμές αριθμών καμπύλης* [43]

Η σχέση μεταξύ των κλίσεων του εδάφους και του αριθμού της καμπύλης αναπτύχθηκε για κλίσεις που κυμαίνονται από 1-50% και μήκη κλίσεων από 50-100ft

## 3.5 Υποθέσεις

Οι διαδικασίες που ακολουθεί το μοντέλο βασίζονται αναγκαστικά σε κάποιες απλουστευτικές υποθέσεις. Γενικά οι υποθέσεις αυτές είναι λογικές και σύμφωνες με τους στόχους του προγράμματος όταν πρόκειται για συνηθισμένες μεθόδους σχεδιασμού ΧΥΤΑ.

Όταν όμως γίνονται ασυνήθιστοι σχεδιασμοί κάποιες από αυτές τις υποθέσεις πιθανόν να μην είναι λογικές. Οι βασικές υποθέσεις και περιορισμοί του

προγράμματος συνοψίζονται παρακάτω.

Η απορροή των υδάτων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την SCS μέθοδο που βασίζεται σε καθημερινές μετρήσεις της βροχόπτωσης. Το πρόγραμμα υποθέτει πως οι γειτονικές στο χώρο της υγειονομικής ταφής, περιοχές δεν αποστραγγίζονται σε αυτόν. Η χρονική κατανομή της βροχής δεν λαμβάνεται υπόψη έτσι το πρόγραμμα δεν είναι δυνατόν να δώσει ακριβείς εκτιμήσεις για όγκους βροχόπτωσης που προέρχονται από μεμονωμένα περιστατικά καταιγίδων καθώς χρησιμοποιεί δεδομένα ημερήσιας βάσης. Όμως επειδή η σχέση SCS βροχόπτωσης απορροής στηρίζεται σε μεγάλο εύρος τιμών καθημερινών δεδομένων η εκτίμηση της απορροής είναι λογική. Η μέθοδος SCS δεν λαμβάνει απόλυτα υπόψη το μήκος και την κλίση της επιφάνειας πάνω από την οποία γίνεται η απορροή. Ο περιορισμός αυτός όμως έχει σχεδόν εξαλειφτεί αναπτύσσοντας και βελτιώνοντας το μοντέλο το οποίο υπολογίζει καμπύλες (curve numbers) που λαμβάνουν υπόψη την κλίση και το μήκος κλίσης της επιφάνειας απορροής. Ωστόσο, το πρόβλημα παραμένει στην περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει την πρώτη μέθοδο για να καθορίσει την καμπύλη απορροής. Όμως ο περιορισμός αυτός δεν είναι τόσο ανησυχητικός αφού η κλίση και το μήκος κλίσης της επιφάνειας δεν διαφέρουν τόσο δραματικά από τις πρότυπες καμπύλες στις οποίες στηρίζεται η μέθοδος SCS. Η χρήση της SCS μεθόδου πιθανόν υποτιμά την απορροή όταν το μήκος της απορροής είναι πολύ μικρό ή η κλίση της επιφάνειας είναι πολύ μεγάλη ή όταν η διάρκεια μιας βροχόπτωσης είναι μικρή αλλά η έντασή της μεγάλη.

Το μοντέλο HELP υποθέτει ροή κατά Darcy η οποία εξελίσσεται σε ομογενή εδάφη και ζώνες απορριμμάτων. Έτσι λοιπόν, δεν λαμβάνει υπόψη την προτίμηση της ροής για κίνηση μέσω σχισμάτων ή οπών που έχουν ανοιχτεί από τις ρίζες των φυτών ή από την πανίδα που κινείται στο χώρο

Επιπλέον το HELP υποθέτει πως

α) οι ιδιότητες συγκράτησης της υγρασίας του εδάφους και η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα μπορούν να υπολογιστούν από την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα και παραμέτρων της περιορισμένης υγρασίας του εδάφους (πορώδες, υδατοχωρητικότητα, και wilting point)

β) η σχέση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας με την υγρασία του εδάφους περιγράφεται από τη σχέση του Campell.

Η διαρροή από εδαφικούς φραγμούς προσομοιάζεται σαν ροή Darcy. Η διαρροή υποθέτεται μόνο εφόσον υπάρχει υγρό στην επιφάνεια του στρώματος. Το μοντέλο υποθέτει πως το υγρό που διηθείται αντιπροσωπεύεται από την μέση ποσότητα όλου του στρώματος. Επιπλέον, θεωρείται πως το κάθε στρώμα υπόκειται όλου του ΧΥΤΑ και στην περίπτωση που υπάρχει διαρροή θεωρείται πως η διαρροή προέρχεται από όλο το στρώμα. Παράλληλα, το μοντέλο δεν αξιολογεί την ηλικία (aging or drying) του στρώματος οπότε η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος δεν μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου.

Διαρροή μέσω των μεμβρανών γίνεται κατά κύριο λόγο από τις οπές. Η διαρροή απλώνεται ανάμεσα στη γεωμεμβράνη και το έδαφος έως ότου το απόβλητο να διασκορπιστεί. Η διαρροή στη συνέχεια διηθείται εξαρτώμενη από την υδραυλική αγωγιμότητα και την κλίση του εδάφους. Το πρόγραμμα υποθέτει ομοιόμορφη κατανομή των οπών στην μεμβράνη και το απόβλητο κατανέμεται επίσης ομοιόμορφα σε όλο στο στρώμα. Το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την φθορά των μεμβρανών στο πέρασμα του χρόνου οπότε ο αριθμός και το μέγεθος των οπών δεν αποτελούν συναρτήσεις του χρόνου.

Το μοντέλο πλευρικής αποστράγγισης στηρίζεται στην υπόθεση πως το προφίλ του κορεσμένου βάθους είναι χαρακτηριστικό του προφίλ της σταθερής κατάστασης για το δεδομένο μέσο βάθος, έτσι το μοντέλο υποθέτει πως ο ρυθμός πλευρικής αποστράγγισης σε σταθερή κατάσταση αποστράγγισης σε ένα δεδομένο βάθος κορεσμού είναι αντιπροσωπευτικό ενός ρυθμού πλευρικής αποστράγγισης μη σταθερής κατάστασης για το ίδιο μέσο κορεσμένο βάθος. Στην πραγματικότητα ο ρυθμός θα είναι ελάχιστα μεγαλύτερος όταν το βάθος αυξάνεται και αντίστοιχα θα είναι μικρότερος όταν το βάθος μειώνεται. Η σταθερή αποστράγγιση προϋποθέτει πως οι συνθήκες κορεσμού υπάρχουν πάνω από όλη την επιφάνεια του στρώματος σε συμφωνία με την υπόθεση για διαρροή από όλη την επιφάνεια του στρώματος.

Το πρόγραμμα υποθέτει πως η ανάπτυξη και η φθορά της βλάστησης μπορεί να προσομοιαστεί από ένα μοντέλο ανάπτυξης για ορισμένα φυτά και γρασίδι. Υποθέτει επιπλέον, ότι η βλάστηση διαπνέει νερό, σκιάζει την επιφάνεια, ανακόπτει την πορεία της βροχόπτωσης και μειώνει την απορροή στον ίδιο βαθμό με το γρασίδι ή όπως έχει καθοριστεί από το ισοδύναμο LAI.[43]

## 3.6 Περιορισμοί

Το μοντέλο μπορεί να χειριστεί έως και 20 στρώματα εδάφους και απορριμμάτων και η περίοδος προσομοίωσης μπορεί να γίνει για ένα έως εκατό έτη και έχει συγκεκριμένους περιορισμούς για τη διάταξη των στρωμάτων. Κάθε στρώμα θα πρέπει να χαρακτηριστεί σύμφωνα με τους τέσσερις τύπους που έχουν προαναφερθεί. Το μοντέλο δεν επιτρέπει να τοποθετεί στρώμα κάθετης διήθησης ακριβώς κάτω από ένα στρώμα πλευρικής αποστράγγισης. Ένα αδιαπέραστο στρώμα δεν μπορεί να τοποθετηθεί κάτω από παρόμοιο έδαφος. Γεωμεμβράνες δεν μπορούν να εγκλείουν αδιαπέραστο έδαφος αλλά ούτε αδιαπέραστα εδάφη μπορούν να εγκλείουν γεωμεμβράνη. Εάν ένα στρώμα δεν είναι τοποθετημένο απευθείας κάτω από το χαμηλότερο στρώμα αποστράγγισης τα επόμενα στρώματα αποστράγγισης θεωρούνται από το μοντέλο σαν στρώμα τύπου 1 (κάθετης διήθησης).

Επιτρεπτά μεγέθη κλίσης των στρωμάτων αποστράγγισης μπορούν να είναι από 0 έως 50% ενώ πρακτικά δεν υπάρχουν όρια για το μέγιστο μήκος αποστράγγισης. Το

πορώδες, η υδατοχωρητικότητα και το wilting point μπορούν θεωρητικά να κυμαίνονται από 0-1 (v/v). Ωστόσο θα πρέπει να ισχύει η επόμενη σχέση πορώδες > υδατοχωρητικότητα > wilting point. Η αρχική υγρασία του εδάφους θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το wilting point και μικρότερη ή ίση από το πορώδες. Για τα αδιαπέραστα στρώματα το μοντέλο δεν χρησιμοποιεί τιμές υδατοχωρητικότητας και wilting point. Τέλος οι τιμές του LAI μπορούν να κυμαίνονται από 0 έως 5.

## 3.7 Εφαρμογή μοντέλου HELP

Το μοντέλο εφαρμόζεται για το ΧΥΤΑ Χανίων βάσει των μετεωρολογικών δεδομένων του έτους 2002.

Στα δεδομένα της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκαν τα εξής στοιχεία

| | |
|---|---|
| Γεωγραφικό πλάτος | $35^{o}\ 30'$ |
| Βάθος ζώνης εξάτμισης | 50cm |
| L.A.I. | 1,0 |
| Ημ/νια έναρξης περιόδου βλάστησης | 310 |
| Ημ/νια λήξης περιόδου βλάστησης | 85 |
| Μέση ταχύτητα ανέμου | 19,6kph |
| Σχετική υγρασία $1^{ου}$τριμήνου | 66,32% |
| Σχετική υγρασία $2^{ου}$τριμήνου | 62,08% |
| Σχετική υγρασία $3^{ου}$τριμήνου | 64,49% |
| Σχετική υγρασία $4^{ου}$τριμήνου | 77,80% |

Πίνακας 3.9 Δεδομένα εξατμισοδιαπνοής μοντέλου

Στα στοιχεία της Ε.Μ.Υ. υπήρχαν μετρήσεις θερμοκρασίας υγρού και ξηρού θερμομέτρου από που υπολογίστηκε η ημερήσια υγρασία και στη συνέχεια ανάχθηκε ανά τρίμηνο όπως απαιτεί το πρόγραμμα.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να βρεθεί η υγρασία από τις ενδείξεις υγρού και ξηρού θερμομέτρου παρουσιάζεται στη συνέχεια:

1. Υπολογίζεται η πίεση P του αέρα σε kPa (kilopascals). Αν δεν είναι γνωστό το υψόμετρο της περιοχής χρησιμοποιείται P=101.325kPa.

   $$P=101.325\exp(1.0+0.0001184Elv)$$

2. Υπολογίζεται ο συντελεστής μετατροπής A

   $$A=0.00066(1.0+0.00115\ T_{wb})$$

3. Υπολογίζεται η κορεσμένη πίεση ατμού $es_{wb}$ στην θερμοκρασία $T_{wb}$.

   $$es_{wb}=\exp\left(\frac{16.78T_{wb}-116.9}{T_{wb}+237.3}\right)$$

4. Υπολογίζεται η πίεση ατμού ή η μερική πίεση του ατμού του νερού.

$e_d = es_{wb} - AP(T_{db} - T_{wb})$

5. Υπολογίζεται η κορεσμένη πίεση ατμού $es_{db}$ σε θερμοκρασία $T_{db}$.

$$es_{db} = \exp\left(\frac{16.78T_{db} - 116.9}{T_{db} + 237.3}\right)$$

5. Τελικά υπολογίζεται η σχετική υγρασία

$$RH = 100\frac{e_d}{es_{db}}$$

όπου

$es_{wb}$: κορεσμένη πίεση ατμού σε θερμοκρασία $T_{wb}$(kpa)

$es_{db}$: κορεσμένη πίεση ατμού σε θερμοκρασία $T_{db}$(kpa)

$es_d$: πίεση ατμού(kpa)

Elv: υψόμετρο (m)

P: πίεση αέρα (kpa)

$T_{wb}$: θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου ($^oC$)

$T_{db}$ : θερμοκρασία ξηρού θερμομέτρου ($^oC$)

[47]

Τα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας έχουν ληφθεί ανά εξάωρο οπότε ήταν αναγκαία η αναγωγή τους ανά ημέρα καθώς έτσι εισάγονται στο HELP.

Όσον αφορά τα δεδομένα για την ποιότητα της μεμβράνης αυτά συνοψίζονται ως εξής, σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν εκτενώς πιο πάνω:

- Πυκνότητα μικροοπών (pinhole density) στο στρώμα της γεωμεμβράνης : 1
- Ατέλειες στην εγκατάσταση της μεμβράνης : 5
- Ποιότητας εγκατάστασης της γεωμεμβράνης (placement quality) : 3

Παράλληλα, όσον αφορά τα κατασκευαστικά στοιχεία του χώρου ταφής, θεωρείται πως η κλίση της αποστραγγιστικής ζώνης της βάσης είναι 2% ενώ το μέγιστο μήκος της αποστράγγισης είναι 17,5 μέτρα καθώς έχει υπολογιστεί στο κεφάλαιο 5 η απόσταση μεταξύ των αγωγών αποστράγγισης στα 35 μέτρα.

Μετά την αποκατάσταση του χώρου η κλίση της αποστραγγιστικής ζώνης της τελικής κάλυψης διαμορφώνεται στο 30% ενώ το μέγιστο μήκος της αποστράγγισης είναι το μισό του πλάτους της λεκάνης δηλαδή 140/2=70m.

Ο συντελεστής επιφανειακής απορροής υπολογίστηκε για κλίση επιφάνειας 30% και μήκος αποστράγγισης 70m, όμοια δηλαδή με την αποστραγγιστική ζώνη τελικής κάλυψης ενώ ο τύπος του εδάφους είναι ο 6 (από τα δεδομένα του προγράμματος) και η βλάστηση 1.

Τα στρώματα που θεωρείται πως υπάρχουν στο ΧΥΤΑ εδαφικά ή απορριμμάτων παρουσιάζονται εκτενώς στους πίνακες που ακολουθούν. Η αρίθμηση των στρώσεων ξεκινά από το επιφανειακό στρώμα και καταλήγει στο στρώμα του πυθμένα.

Στη συνέχεια εξετάζονται ορισμένες αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις που συναντώνται κατά το κύκλο ζωής ενός ΧΥΤΑ.

*1η Περίπτωση*

Η 1η περίπτωση που μελετάται είναι 2 έτη μετά τη λειτουργία της κυψέλης οπότε και το ύψος των απορριμμάτων που έχουν εναποτεθεί στην κυψέλη είναι περίπου 3 μέτρα, ενώ πάνω από τα απορρίμματα υπάρχει μόνο το υλικό καθημερινής κάλυψης. Στην περίπτωση αυτή θεωρήθηκε πως δεν έχουν ακόμα διαμορφωθεί οι κατάλληλες κλίσεις ώστε να απορρέει κάποιο ποσοστό της βροχόπτωσης.

| **Αριθμός Στρώσης** | **Τύπος στρώσης** | **Πάχος στρώσης cm** | **Τύπος εδάφους No.** |
|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 10 | 6 |
| **2** | 1 | 150 | 19 |
| **3** | 1 | 10 | 6 |
| **4** | 1 | 150 | 19 |
| **5** | 2 | 50 | 21 |
| **6** | 2 | 10 | 2 |
| **7** | 4 | 0,15 | 35 |
| **8** | 3 | 50 | 25 |

*Πίνακας 3.10 Διαμόρφωση χώρου 2 έτη μετά τη λειτουργία της κυψέλης*

| | **mm** | **$m^3$** | **%** |
|---|---|---|---|
| **Βροχόπτωση** | 490,70 | 17076,369 | 100 |
| **Απορροή** | 0 | 0 | 0 |
| **Εξάτμιση** | 343,229 | 11944,385 | 69,95 |
| **Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 6** | 148,135 | 5155,092 | 30,19 |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 8** | 0,148 | 5,162 | 0,03 |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 7** | 22,873 | | |
| **Διαφορά στην αποθηκευτικότητα υγρασίας** | -0,813 | -28,283 | -0,014 |

*Πίνακας 3.11 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη*

| Μήνας | Βροχό-πτωση | Απορροή | Εξάτμιση | Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 6 | Διαρροή μέσω του στρώματος 8 | Μέσο ύψος στην κορυφή του 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ος | 94,2 | 0 | 45,604 | 85,574 | 0,047 | 9,100 |
| 2ος | 23 | 0 | 22,945 | 18,679 | 0,028 | 5,826 |
| 3ος | 53,4 | 0 | 25,658 | 10,256 | 0,016 | 2,890 |
| 4ος | 38,4 | 0 | 45,195 | 10,318 | 0,015 | 3,004 |
| 5ος | 0,2 | 0 | 0,2 | 9,347 | 0,015 | 2,634 |
| 6ος | 0 | 0 | 0 | 4,960 | 0,008 | 1,444 |
| 7ος | 16,7 | 0 | 16,243 | 2,771 | 0,005 | 0,781 |
| 8ος | 16,1 | 0 | 16,557 | 1,578 | 0,003 | 0,444 |
| 9ος | 34,4 | 0 | 22,272 | 0,960 | 0,002 | 0,279 |
| 10ος | 43,4 | 0 | 55,499 | 0,686 | 0,001 | 0,193 |
| 11ος | 58,4 | 0 | 42,062 | 0,493 | 0,001 | 0,143 |
| 12ος | 112,5 | 0 | 50,994 | 2,512 | 0,004 | 0,708 |

*Πίνακας 3.12 Αποτελέσματα μοντέλου για το μηνιαίο ισοζύγιο στην κυψέλη*

*2η Περίπτωση*

Στην επόμενη περίπτωση εξετάζεται η χρονική περίοδος ακριβώς μετά το πέρας της λειτουργίας της κυψέλης οπότε το ύψος των απορριμμάτων που έχουν εναποτεθεί στην κυψέλη είναι 15 μέτρα, και το επιφανειακό στρώμα αποτελείται από υλικό καθημερινής κάλυψης ύψους 60cm.

| Αριθμός Στρώσης | Τύπος στρώσης | Πάχος στρώσης cm | Τύπος εδάφους No, |
|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 60 | 6 |
| **2** | 1 | 1500 | 19 |
| **3** | 2 | 50 | 21 |
| **4** | 2 | 10 | 2 |
| **5** | 4 | 0,15 | 35 |
| **6** | 3 | 50 | 25 |

*Πίνακας 3.13 Διαμόρφωση χώρου αμέσως μετά το πέρας λειτουργίας*

| | mm | $m^3$ | % |
|---|---|---|---|
| **Βροχόπτωση** | 490,70 | 17076,369 | 100 |
| **Απορροή** | 15,978 | 444,7 | 3,26 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Εξάτμιση** | 367,722 | 11928,81 | 74,94 |
| **Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 4** | 106,4407 | 3704,1360 | 21,69 |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 6** | 0,1227 | 4,720 | 0,03 |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 3** | 19,02 | | |
| **Διαφορά στην αποθηκευτικότητα υγρασίας** | 0,437 | 15,197 | 0,09 |

*Πίνακας 3.14 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (2η περίπτωση)*

*3η περίπτωση*

Η 3η περίπτωση εξετάζει το ενδεχόμενο που η αποκατάσταση του χώρου και η μόνωση πάνω από τον απορριμματικό όγκο γίνει μόνο με φυσικά μέσα, χωρίς δηλαδή να τοποθετηθεί μεμβράνη HDPE.

| **Αριθμός Στρώσης** | **Τύπος στρώσης** | **Πάχος στρώσης cm** | **Τύπος εδάφους No,** |
|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 150 | 5 |
| **2** | 2 | 30 | 4 |
| **3** | 3 | 100 | 29 |
| **4** | 1 | 40 | 21 |
| **5** | 1 | 30 | 6 |
| **6** | 1 | 1600 | 19 |
| **7** | 2 | 50 | 21 |
| **8** | 2 | 10 | 2 |
| **9** | 4 | 0,15 | 35 |
| **10** | 3 | 50 | 25 |

*Πίνακας 3.15 Αποκατάσταση του χώρου χωρίς τη χρήση τεχνητής μόνωσης επιφανειακά*

| | **mm** | **$m^3$** | **%** |
|---|---|---|---|
| **Βροχόπτωση** | 490,70 | 17076,369 | 100 |
| **Απορροή** | 12,449 | 433,220 | 2,54 |
| **Εξάτμιση** | 334,072 | 11625,712 | 68,08 |
| **Συλλογή** | 15,607 | 543,128 | 3,18 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **στραγγισμάτων από το στρώμα 2** | | | |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 3** | 128,51 | 4472,251 | 26,19 |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 3** | 34,677 | | |
| **Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 8** | 123,227 | 4288,302 | 25,112 |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 10** | 0,195 | 6,774 | 0,0397 |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 9** | 29,382 | | |
| **Διαφορά στην αποθηκευτικότητα υγρασίας** | 5,150 | 179,23 | 1,050 |

*Πίνακας 3.16 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (3η περίπτωση)*

Η 4η περίπτωση εξετάζει το ενδεχόμενο η αποκατάσταση του χώρου και η μόνωση πάνω από τον απορριμματικό όγκο γίνει με άργιλο και μια στρώση μπετονίτη.

| **Αριθμός Στρώσης** | **Τύπος στρώσης** | **Πάχος στρώσης cm** | **Τύπος εδάφους No,** |
|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 150 | 5 |
| **2** | 2 | 30 | 4 |
| **3** | 3 | 0,6 | 17 |
| **4** | 1 | 50 | 29 |
| **5** | 1 | 40 | 21 |
| **6** | 1 | 30 | 6 |
| **7** | 1 | 1600 | 19 |
| **8** | 2 | 50 | 21 |
| **9** | 2 | 10 | 2 |
| **10** | 4 | 0,15 | 35 |
| **11** | 3 | 50 | 25 |

*Πίνακας 3.17 Αποκατάσταση του χώρου με χρήση συμπυκνωμένης αργίλου & μιας στρώσης μπετονίτη*

| | mm | $m^3$ | % |
|---|---|---|---|
| **Βροχόπτωση** | 490,70 | 17076,369 | 100 |
| **Απορροή** | 12,449 | 433,220 | 3,54 |
| **Εξάτμιση** | 334,072 | 11625,712 | 68,08 |
| **Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 2** | 86,700 | 3017,168 | 17,67 |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 3** | 30,072 | 4472,251 | 5,26 |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 3** | 189,26 | | |
| **Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 9** | 2,9386 | 4288,302 | 0,6 |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 11** | 0,005970 | 0,208 | 0 |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 10** | 0,6974 | | |
| **Διαφορά στην αποθηκευτικότητα υγρασίας** | 54,534 | 179,23 | 11,11 |

*Πίνακας 3.18 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (4η περίπτωση)*

*5η περίπτωση*

Στο σενάριο αυτό μελετάται η περίπτωση που η αποκατάσταση του χώρου γίνει κατά τον

καλύτερο δυνατό τρόπο και χρησιμοποιώντας εκτός από φυσική μόνωση και μεμβράνη HDPE.

| **Αριθμός Στρώσης** | **Τύπος στρώσης** | **Πάχος στρώσης cm** | **Τύπος εδάφους No.** |
|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 160 | 5 |
| **2** | 2 | 50 | 21 |
| **3** | 4 | 0,15 | 35 |
| **4** | 1 | 30 | 21 |
| **5** | 1 | 30 | 6 |
| **6** | 1 | 1600 | 19 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **7** | 2 | 50 | 21 |
| **8** | 2 | 10 | 2 |
| **9** | 4 | 0,15 | 35 |
| **10** | 3 | 50 | 25 |

*Πίνακας 3.19 Αποκατάσταση του χώρου χωρίς με χρήση τεχνητής μόνωσης HDPE*

| | **mm** | **$m^3$** | **%** |
|---|---|---|---|
| **Βροχόπτωση** | 490,70 | 17076,369 | 100 |
| **Απορροή** | 12,449 | 433,220 | 3,64 |
| **Εξάτμιση** | 334,072 | 11625,712 | 68,08 |
| **Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 2** | 144,0665 | 5013,512 | 28,26 |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 3** | 0,000070 | 0,002 | 0 |
| | | | |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 3** | 0,6708 | | |
| **Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 8** | 0 | 0 | 0 |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 10** | 0,000063 | 0,002 | 0,02 |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 9** | 0 | | |
| **Διαφορά στην αποθηκευτικότητα υγρασίας** | 0,112 | 3,911 | 0,02 |

*Πίνακας 3.20 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (4η περίπτωση)*

*6η Περίπτωση*

Εξετάζεται πάλι η περίπτωση 2 ετών μετά τη λειτουργία της κυψέλης αλλά στην περίπτωση αυτή πραγματοποιείται ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων που συλλέγονται από το στρώμα 6, στο στρώμα 1

| Αριθμός Στρώσης | Τύπος στρώσης | Πάχος στρώσης cm | Τύπος εδάφους No, |
|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 10 | 6 |
| **2** | 1 | 150 | 19 |
| **3** | 1 | 10 | 6 |
| **4** | 1 | 150 | 19 |
| **5** | 2 | 50 | 21 |
| **6** | 2 | 10 | 2 |
| **7** | 4 | 0,15 | 35 |
| **8** | 3 | 50 | 25 |

*Πίνακας 3.21 Διαμόρφωση χώρου 2 έτη μετά τη λειτουργία της κυψέλης*

| | mm | $m^3$ | % |
|---|---|---|---|
| **Βροχόπτωση** | 490,70 | 17076,369 | 100 |
| **Απορροή** | 0 | 0 | 0 |
| **Εξάτμιση** | 375,493 | 13063,273 | 76,5 |
| **Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 6** | 95,116 | 3310,031 | 19,38 |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 8** | 0,488 | 16,984 | 0,1 |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 7** | 80,016 | | |
| **Διαφορά στην αποθηκευτικότητα υγρασίας** | 19,329 | 642,636 | 3,94 |

*Πίνακας 3.22 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (6η περίπτωση)*

*7η Περίπτωση*

Τέλος, εξετάζεται πάλι η ανακυκλοφορίας (90% ανακυκλοφορία) των στραγγισμάτων σε ένα ΧΥΤΑ που λαμβάνει χώρα και απορροή. Η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων γίνεται από το στρώμα 3, στο στρώμα 1

| Αριθμός Στρώσης | Τύπος στρώσης | Πάχος στρώσης cm | Τύπος εδάφους No, |
|---|---|---|---|
| **1** | 1 | 60 | 6 |
| **2** | 1 | 1500 | 19 |
| **3** | 2 | 50 | 21 |
| **4** | 2 | 10 | 2 |
| **5** | 4 | 0,15 | 35 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **6** | 3 | 50 | 25 |

*Πίνακας 3.23 Διαμόρφωση χώρου αμέσως μετά το πέρας λειτουργίας*

| | **mm** | **$m^3$** | **%** |
|---|---|---|---|
| **Βροχόπτωση** | 490,70 | 17076,37 | 100 |
| **Απορροή** | 18,756 | 652,72 | 3,83 |
| **Εξάτμιση** | 370,38 | 12889,20 | 75,48 |
| **Συλλογή στραγγισμάτων από το στρώμα 4** | 60,93 | 2120,309 | 12,42 |
| **Διαρροή μέσω του στρώματος 6** | 0,505 | 17,57 | 0,103 |
| **Μέσο ύψος στην κορυφή του 5** | 82,89 | | |
| **Διαφορά στην αποθηκευτικότητα υγρασίας** | 39,89 | 1388,34 | 8,130 |

*Πίνακας 3.24 Αποτελέσματα μοντέλου για το ετήσιο ισοζύγιο στην κυψέλη (7η περίπτωση)*

### 3.8 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι τα εξής

- Όπως ήταν αναμενόμενο το μεγαλύτερο τμήμα των στραγγισμάτων παρουσιάζεται κατά τους χειμερινούς μήνες οπότε και λαμβάνουν χώρα οι ισχυρότερες και μεγαλύτερης διάρκειας βροχοπτώσεις. Η παραγωγή των στραγγισμάτων εξακολουθεί και μετά το χειμώνα οπότε και οι βροχοπτώσεις έχουν περιοριστεί γεγονός που οφείλεται στην αδιάκοπη διήθηση του νερού μέσα στον απορριμματικό όγκο.
- Ένα πολύ μεγάλο τμήμα της βροχόπτωσης φαίνεται πως εξατμίζεται ενώ ένα μικρότερο απορρέει επιφανειακά από το ΧΥΤΑ. Το ποσοστό της εξάτμισης φαίνεται να κυμαίνεται περίπου στο 70% ενώ η επιφανειακή απορροή στις περιπτώσεις που έχουν διαμορφωθεί κατάλληλες κλίσεις κινείται στο 2,5%.
- Κάποιους μήνες η εξατμισοδιαπνοή είναι μεγαλύτερη της βροχόπτωσης και αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αποθηκευτικότητας της υγρασίας προηγούμενου

μήνα κυρίως στα επιφανειακά εδαφικά στρώματα. π.χ. στην 1η περίπτωση κατά τους μήνες Αύγουστο και Οκτώβριο.

- Η μόνωση από HDPE στην βάση του ΧΥΤΑ φαίνεται πως αποδίδει καθώς ελάχιστα είναι τα στραγγίσματα που περνούν από αυτή εξαιτίας των ατελειών που υποθέσαμε.
- Μετά το πέρας της λειτουργίας της κυψέλης, στην περίπτωση που δεν τοποθετηθεί τεχνητή μόνωση πάνω από τον απορριμματικό όγκο αλλά μόνο φυσική άργιλος και άμμος παρατηρείται μείωση των στραγγισμάτων στην βάση που οφείλεται κυρίως στην αύξηση της εξατμισοδιαπνοής αλλά και στην αύξηση αποθηκευτικότητας της υγρασίας του εδάφους.
- Η φυσική μόνωση πάνω από τα στερεά απόβλητα δεν επιλύει το πρόβλημα της δημιουργίας στραγγισμάτων καθώς εξακολουθεί να διηθείται μεγάλη ποσότητα υγρών, έτσι λοιπόν στην κάτω αποστραγγιστική ζώνη συλλέγεται ποσοστό 25,112% της βροχόπτωσης ενώ αν προστεθεί και μια στρώση μπετονίτη το ποσοστό μειώνεται σημαντικά σε 5,26% μεγαλύτερο ποσοστό μπετονίτη είχε βέβαια ακόμα μεγαλύτερη μείωση της ποσότητας των στραγγισμάτων που συλλέγεται στην κάτω αποστραγγιστική ζώνη.
- Στην περίπτωση που τοποθετηθεί μόνωση με HDPE επιφανειακά και γενικά αποκατασταθεί ο ΧΥΤΑ κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο δεν παράγονται στραγγίσματα στην βάση αυτού. Τα υγρά που συλλέγονται στο πάνω μέρος του χώρου είναι περιορισμένα σε αυτό το χώρο και σίγουρα δεν χρειάζεται να υποστούν επεξεργασία.
- Σε κάθε περίπτωση πάντως είναι προτιμότερη η μόνωση επιφανειακά με HDPE καθώς
    - η άργιλος δύσκολα συμπυκνώνεται σε μαλακό υπέδαφος
    - στη συμπυκνωμένη άργιλο πιθανόν να δημιουργηθούν σχισμές λόγω διακυμάνσεων της θερμοκρασίας
    - σε περίπτωση καταστροφής είναι πολύ δύσκολο να επισκευαστεί.
- Γενικά δεν φαίνεται να δημιουργείται πρόβλημα συσσώρευσης στραγγισμάτων στην αποστραγγιστική ζώνη καθώς ακόμα και στην πρώτη περίπτωση όπου δεν υπήρχαν διαμορφωμένες κλίσεις επιφανειακά και η εξατμισοδιαπνοή ήταν χαμηλή το μέγιστο πιεζομετρικό ημερήσιο ύψος βροχής είναι 16,6cm περίπου δηλαδή το μισό από τα 30cm που θέτει η νομοθεσία.
- Με μια πρώτη ματιά το σύστημα της ανακύκλωσης των στραγγισμάτων φαίνεται να αποδίδει καθώς ο όγκος τους παρουσιάζεται μειωμένος, ωστόσο η μείωση αυτή οφείλεται στην μεγάλη αύξηση του ποσοστού υγρασίας των απορριμμάτων και του εδάφους, και όχι στην απορροή ή στην

εξατμισοδιαπνοή (αν και αυτή παρουσιάζεται αυξημένη). Στην 7η μάλιστα περίπτωση παρά την σημαντική αύξηση της εξατμισοδιαπνοής υπάρχει μια αρκετά μεγάλη διαφορά στην αποθηκευτικότητα της υγρασίας στο έδαφος. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως έπειτα από μερικά χρόνια πιθανόν να δημιουργηθεί πρόβλημα καθώς τα απορρίμματα και το έδαφος θα κορεστούν σε νερό και δεν θα μπορούν να διεισδύουν τα κατακρημνίσματα.

- Σημαντική διαφορά παρατηρείται στον όγκο των στραγγισμάτων που υπολογίστηκαν με την προηγούμενη μέθοδο σύμφωνα με την [29]. Στην προηγούμενη μέθοδο υπήρχε μια σημαντική αύξηση των στραγγισμάτων ετησίως εξαιτίας της αρχικής υγρασίας που είχε υποτεθεί πως υπάρχει στα απορρίμματα, ωστόσο το μοντέλο HELP δεν φαίνεται να αντιδρούσε σημαντικά στις αυξομειώσεις του απορριμματικού όγκου μέσα στην κυψέλη. Έτσι η ποσότητα των στραγγισμάτων που συλλέγονταν στην βάση ήταν παρεμφερής είτε τα απορρίμματα μέσα στην κυψέλη έφταναν σε ύψος τα 3 μέτρα είτε έφταναν τα 10 μέτρα. Επιπλέον, στην περίπτωση που η αποκατάσταση του χώρου γινόταν με τοποθέτηση επιφανειακά μεμβράνης HDPE χωρίς ελαττώματα, τελικά στην αποστραγγιστική ζώνη στην βάση της κυψέλης η παραγωγή στραγγισμάτων ήταν μηδενική. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο ότι η υγρασία των απορριμμάτων που θεωρεί το μοντέλο είναι πολύ χαμηλή καθώς, όπως ειπώθηκε, η τιμή της υγρασίας που θεωρεί το μοντέλο είναι περίπου 0,12vol/vol, για τον τύπο απορριμμάτων 19 που έχει επιλεγεί, ενώ επιπλέον θεωρώντας πως το 75% του όγκου των απορριμμάτων είναι ανενεργός, η περιεχόμενη αρχική υγρασία θα είναι μόνο του ενεργού τμήματος των απορριμμάτων δηλαδή το 25% της τιμής αυτής.

## 3.9 Μοντέλο Landgem (Landfill Gas Emissions Model)

Πρόκειται για ένα πρόγραμμα το οποίο υπολογίζει τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων από χώρους υγειονομικής ταφής στερεών αποβλήτων το οποίο χρησιμοποιεί κινητική πρώτου βαθμού για την αποδόμηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων. Το Landgem μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει τα ποσοστά εκπομπής μεθάνιου, διοξειδίου του άνθρακα, NMOC (non methane organic compounds), αλλά και μεμονωμένων ατμοσφαιρικών ρύπων. Το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει εάν ο ΧΥΤΑ πληρεί τις νομοθετικές διατάξεις που αφορούν την εκπομπή αερίων ρύπων.

Το Landgem. μπορεί να 'τρέξει' χρησιμοποιώντας τα συγκεκριμένα στοιχεία, από τον υπό μελέτη ΧΥΤΑ, για τις παραμέτρους που απαιτούνται προκειμένου να υπολογιστούν οι εκπομπές. Συγχρόνως όμως δίνει τη δυνατότητα εάν κανένα στοιχείο

δεν είναι διαθέσιμο για την περιοχή να χρησιμοποιηθούν προκαθορισμένες τιμές. Οι τιμές αυτές έχουν καθοριστεί από μελέτες της EPA. [44]
Οι παράμετροι που απαιτεί το πρόγραμμα είναι οι εξής:

- Η χωρητικότητα σχεδιασμού του ΧΥΤΑ
- Ο ετήσιος όγκος απορριμμάτων που δέχεται ο ΧΥΤΑ
- Η σταθερά ρυθμού μεθανογέννεσης (k)
- Η δυνητική ποσότητα μεθανίου που παράγεται από συγκεκριμένο όγκο στερεών αποβλήτων
- Τη συγκέντρωση των ολικών NMOC
- Τον αριθμό των ετών που πρόκειται να λειτουργήσει ο ΧΥΤΑ
- Αν στο ΧΥΤΑ συνδιατίθενται επικίνδυνα και τοξικά απόβλητα

Το μοντέλο υπολογίζει τις εκπομπές ως αποτέλεσμα της βιοδιάσπασης των απορριμμάτων στους ΧΥΤΑ. Η αναερόβια αποσύνθεση των απορριμμάτων καθώς το βιοαέριο περνά μέσα από τα απόβλητα παρασύρει NMOC και άλλους ρύπους. Η σύνθεση των εκπομπών υπολογίζεται από το μοντέλο περίπου 50 % $CH_4$ και 50% $CO_2$, με πρόσθετα, ίχνη NMOC.Το NMOC είναι δυνατόν να εκτιμηθούν είτε χρησιμοποιώντας τις δεδομένες τιμές που παρέχει το μοντέλο για κάποιες παραμέτρους είτε ορίζοντας αυτές τις παραμέτρους ο ίδιος ο χρήστης.
Η τιμή του συντελεστή k εξαρτάται από την περιεχόμενη υγρασία των απορριμμάτων, τη διαθεσιμότητα του υποστρώματος για τους μεθανογόνους μικροοργανισμούς, το pH και την θερμοκρασία. Οι τιμές για το k από την βιβλιογραφία κυμαίνονται από 0,003 έως 0,21 ( EPA, 1991a). Η τιμή που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι 0,05 l/yr. [44]

Η τιμή του $L_o$ εξαρτάται μόνο από τη σύσταση των αποβλήτων μέσα στο ΧΥΤΑ. Υψηλό περιεχόμενο κυτταρίνης δίνει υψηλές τιμές του $L_o$. Οι τιμές για το $L_o$ κυμαίνονται από 6,2$m^3$/Mg έως 270$m^3$/Mg ( EPA, 1991a). Η τιμή που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι 170 $m^3$/Mg
Η συγκέντρωση NMOC είναι συνάρτηση της σύνθεσης των απορριμμάτων και των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο ΧΥΤΑ. Οι συγκεντρώσεις NMOC από μελέτη σε 23 ΧΥΤΑ κυμάνθηκαν από 240 έως το14300 ppmv . Το μοντέλο διαθέτει 3 τιμές NMOC 4000 ppmv ως εξάνιο (κανονισμοί1991) εάν στο ΧΥΤΑ συνδιατίθενται και επικίνδυνα απόβλητα η τιμή ορίζεται στα 2420 ppmv (κανονισμοί 1997), ενώ αν δεν υπάρχει διάθεση τοξικών αποβλήτων η τιμή ορίζεται στα 595 ppmv . (EPA, 1997a)

### 3.10 Εφαρμογή Μοντέλου Landgem

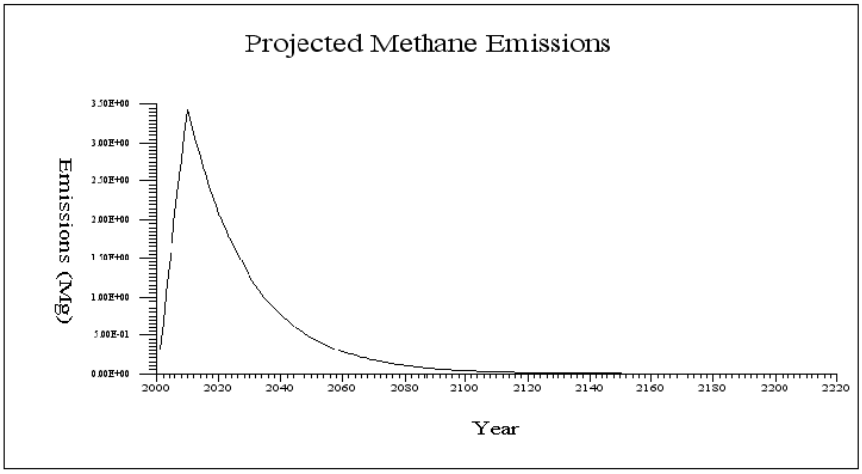
- Η χωρητικότητα κυψέλης: 480000$m^3$
- Ο ετήσιος όγκος συμπυκνωμένων απορριμμάτων που δέχεται η κυψέλη

| **Έτος λειτουργίας** | **Ετήσια ποσότητα συμπυκνωμένων απορριμμάτων ($m^3$/yr)** |
|---|---|
| 1ο | 36506,65 |
| 2ο | 41283,65 |
| 3ο | 45115,45 |
| 4ο | 46422,75 |
| 5ο | 47730,90 |
| 6ο | 49038,20 |
| 7ο | 50346,35 |
| 8ο | 51653,65 |
| 9ο | 52961,80 |
| 10ο | 54269,10 |

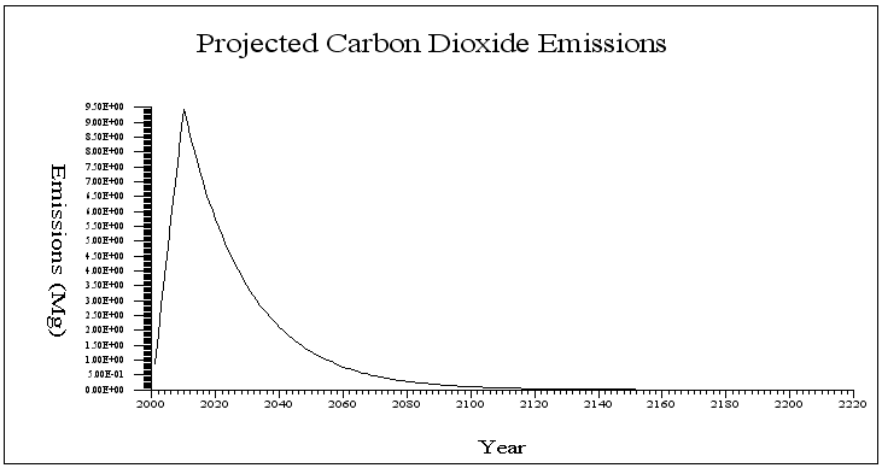
*Πίνακας 3.25 Ετήσιες ποσότητες απορριμμάτων που δέχεται ο ΧΥΤΑ*

- Η τιμή του k για 5 χρόνια είναι 0,06 ενώ για 10 χρόνια 0,03 [9] οπότε η τιμή 0,05 που διαθέτει το μοντέλο μπορεί να γίνει δεκτή
- Η δυνητική ποσότητα μεθανίου $L_o$ σύμφωνα με την [8] είναι 225$m^3$/tn αστικών απορριμμάτων
- Τη συγκέντρωση των ολικών NMOC. Λαμβάνεται τιμή των 4000 ppmv
- Ο αριθμός των ετών που πρόκειται να λειτουργήσει η κυψέλη υπολογίστηκε σε 10.
- Στο ΧΥΤΑ θεωρείται πως δεν διατίθενται επικίνδυνα και τοξικά απόβλητα λόγω της περιορισμένης βιομηχανίας των Χανίων.

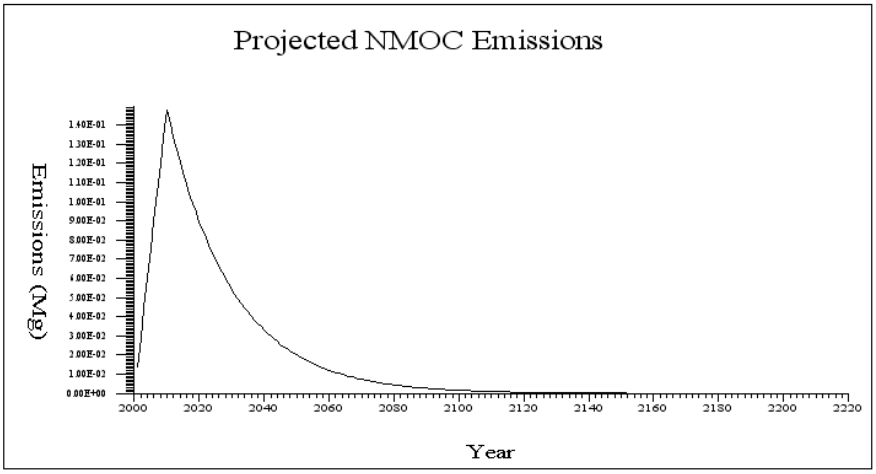
Τα γραφήματα που προκύπτουν βάσει των δεδομένων για την εξέλιξη του $CO_2$ , του $CH_4$, των NMOC και ενδεικτικά της προπανόλης –2 που ανήκει στα VOC παρουσιάζονται στη συνέχεια.



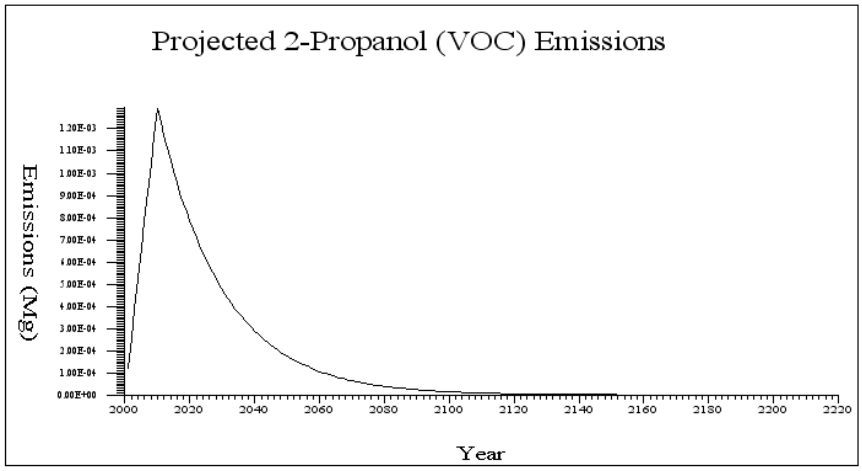

*Εικόνα 3.5 Παραγόμενες εκπομπές μεθανίου από την κυψέλη*




*Εικόνα 3.6 Παραγόμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την κυψέλη*




*Εικόνα 3.7 Παραγόμενες εκπομπές NMOC από την κυψέλη*




*Εικόνα 3.8 Παραγόμενες εκπομπές VOC από την κυψέλη*

Γενικά φαίνεται να ισχύει πως η παραγωγή των αερίων από ένα ΧΥΤΑ ξεκινάει λίγο μετά την έναρξη της λειτουργίας του και κορυφώνεται λίγο μετά το πέρας αυτής. Από το έτος αυτό και έπειτα η παραγωγή του βιοαερίου δείχνει να μειώνεται σταδιακά, ωστόσο είναι εντυπωσιακό πως εξακολουθεί για αρκετά έτη μετά. Πάντως σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να τονίζεται πως τα μοντέλα αυτά, αλλά και οι τυπικές τιμές που διαθέτουν, είναι προσαρμοσμένα στα απορρίμματα των Ηνωμένων Πολιτειών που διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από τα απορρίμματα μιας μεσογειακής χώρας όπως η Ελλάδα. Τα στερεά απόβλητα στις Η.Π.Α. αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από υλικά συσκευασίας και πλαστικά αντίθετα με τα απορρίμματα στην Ελλάδα που μπορούν να χαρακτηρισθούν ως κατεξοχήν βιοαποικοδομήσιμα οπότε είναι πολύ πιθανόν η παραγωγή του βιοαερίου να μην εξακολουθήσει για τόσα πολλά έτη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ – ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΣΗ

Για την εύκολη και ορθολογική λειτουργία του χώρου, προϋπόθεση αποτελεί η κατάλληλη διαμόρφωση του πυθμένα του ώστε να δημιουργηθούν ήπιες κλίσεις και να γίνεται άνετα η κυκλοφορία μέσα σε αυτόν. Κατά τη διαμόρφωση του χώρου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η κλίση του πυθμένα ώστε να οδηγούνται τα στραγγίσματα με φυσική ροή προς την εγκατάσταση επεξεργασίας. Οι κλίσεις κυμαίνονται περίπου στο 5%. Οι κλίσεις επιπλέον των πρανών θα είναι 1:3.

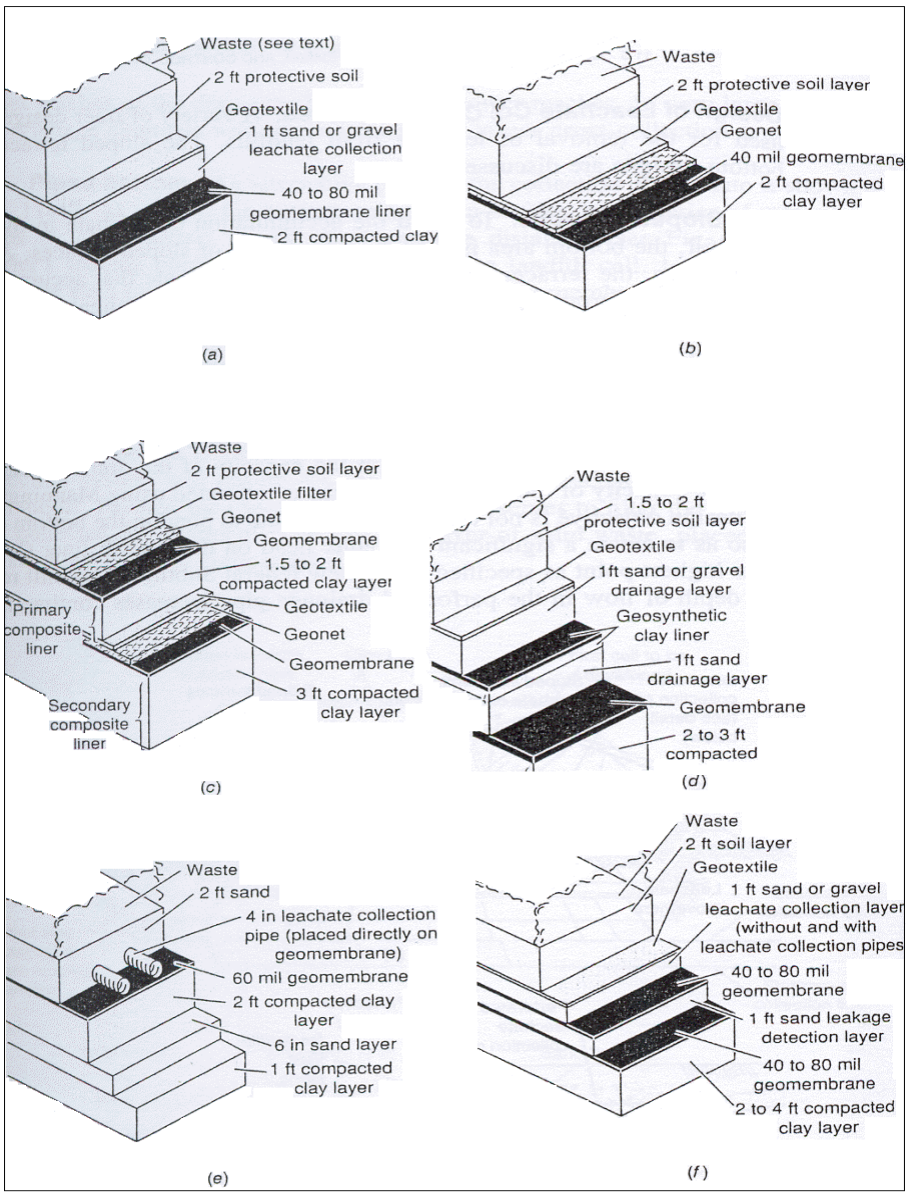
## 4.1 Στεγανοποίηση κυψέλης

Βασική προϋπόθεση για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατασκευή ενός ΧΥΤΑ είναι η σωστή μόνωση του χώρου που εναποτίθενται τα στερεά απόβλητα. Η μόνωση του ΧΥΤΑ αποτελείται από τρία μέρη την μόνωση της βάσης, την μόνωση της επιφάνειας και την μόνωση των πρανών. Μια μόνωση πρέπει να πληρεί τις εξής προϋποθέσεις:

- να κρατά στεγανό το χώρο από τις βροχοπτώσεις και τα επιφανειακά νερά
- να αντέχει σε θερμοκρασίες τουλάχιστον 70$^{o}$C
- να στεγανοποιεί τα παραγόμενα αέρια και στραγγίσματα.
- να αντέχει στις τυχόν καθιζήσεις και διαβρώσεις
- να αντέχει στην επίδραση των μικροοργανισμών
- να τοποθετείται απλά
- να μπορεί να επιδιορθωθεί εύκολα
- να μην κοστίζει υπερβολικά [9]

*Εικόνα 4.1 Γεωτρήσεις ελέγχου ποιότητας εδαφών*

Το σύστημα μόνωσης ενός ΧΥΤΑ αποτελείται συνήθως από α) τον τεχνητό γεωλογικό φραγμό, β) τη γεωμεμβράνη γ) το γεωύφασμα δ) τη στρώση άμμου και ε) τη στρώση αποστράγγισης.




*Εικόνα.4.2 Τύποι διαστρωμάτωσης ΧΥΤΑ* [39]

## 4.2 Αργιλική μόνωση

Ο γεωλογικός φραγμός σύμφωνα με την Κ.Υ.Α. 114218: 'Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων' θα πρέπει να έχει συνδυασμένο αποτέλεσμα ισοδύναμο από εκείνο που προκύπτει από $k=1\cdot10^{-9}$m/s με πάχος μεγαλύτερο του 1 μέτρου. Όπου k, ο συντελεστής του συνολικού γεωλογικού φραγμού φυσικού και τεχνητού. Η μέση τιμή του συντελεστή υδροπερατότητας του φυσικού γεωλογικού φραγμού λαμβάνεται ίση με $1\cdot10^{-9}$m/s

Για να επιτευχθεί αυτή η ισοδυναμία θα πρέπει

$$\frac{H_{\varphi\rho}}{K_{\varphi\rho}} + \frac{H_{\upsilon\lambda}}{K_{\upsilon\lambda}} \geq \frac{1,0}{10^{-9}}$$

Ηυλ : πάχος γεωλογικού υπόβαθρου

Κυλ: συντελεστής υδροπερατότητας γεωλογικού φραγμού

Ηφρ: πάχος στρώσης τεχνητού γεωλογικού φραγμού

Κφρ: συντελεστή υδροπερατότητας τεχνητού γεωλογικού φραγμού

Οι προϋποθέσεις ως προς τη σύνθεση της αργιλικής μόνωσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

| **Χαρακτηριστικά** | | **Τιμές- Όρια Τιμών** |
|---|---|---|
| Λεπτόκοκκο υλικό (2μm) | | ≥20% |
| Κλάσμα χονδρόκοκκου υλικού | | <40% |
| Όρια Attenberg | όριο υδαρότητας | <40% κ.β. |
| | δείκτης πλαστικότητας | 10<PI<25% |
| Μέγεθος κόκκων μόνωσης | | 32mm |
| Οργανικός άνθρακας | | <5% κ.β. |
| Περιεκτικότητα σε $CaCO_3$ | | <20% κ.β. |

*Πίνακας 4.1 Σύνθεση της αργιλικής μόνωσης* [19]

Συνήθως χρησιμοποιούνται υλικά της εκάστοτε περιοχής για την κατασκευή του γεωλογικού φραγμού.

*Εικόνα 4.3 Εργασίες συμπύκνωσης αργίλου το ΧΥΤΑ Χανίων*

Ωστόσο αν τα υλικά της περιοχής δεν επαρκούν ή το χονδρόκοκκο υλικό είναι μεγαλύτερο του 40% είναι πιθανή η ανάμιξη με μπετονίτη σε χαμηλό ποσοστό ( 1-5%) που προσδιορίζεται επακριβώς από εργαστηριακές αναλύσεις. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται ιδιότητες και ενδεικτικές τιμές του μπετονίτη ως ελάχιστες ενδεικτικές για την επιλογή του .

| **Ιδιότητα** | **Τιμή** |
|---|---|
| Ειδικό βάρος | 2,65(%) |
| Φυσική υγρασία | 10-15(%) |
| Κλάσμα <75 μm | 85(%) |
| Κλάσμα <2 μm | 75(%) |
| Όριο υδαρότητας | 450(%) |
| Δείκτης πλαστικότητας | 45(%) |
| Ενεργότητα | 5,3 |
| Ειδική επιφάνεια | 632($m^2$/g) |
| Προσροφημένα κατιόντα | |
| $Na^+$ | 53(meq/100gr) |
| $Ca^{+2}$ | 13(meq/100gr) |
| $Mg^{+2}$ | 13(meq/100gr) |
| Χαλαζίας | 2 |
| Ανθρακικά | 9 |
| Φαινόμενο ειδικό βάρος | 800(g/L) |
| Ικανότητα απορρόφησης νερού | 500% |
| Βαθμός διογκώσεως (m 1/2g) | 22min |
| Οργανικά | 0,5 |

*Πίνακας 4.2 Ιδιότητες μπετονίτη*

Η διαρροή των υγρών μέσα από την αργιλική μόνωση εκτιμάται από το νόμο του Darcy

$$q = \frac{Q}{A} = -K\frac{\partial h}{\partial x}$$

q: διαρροή ανά μονάδα επιφάνειας

Q: ποσότητα διαρροής

A: επιφάνεια κάθετη στη διεύθυνση της ροής

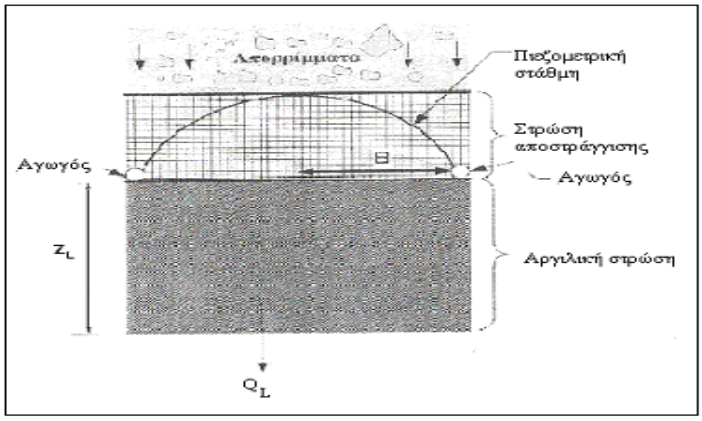
$\partial h/\partial x$ : υδραυλική κλίση στη διεύθυνση της ροής

K: υδραυλική αγωγιμότητα

Παράλληλα, έχει προταθεί και ο παρακάτω εμπειρικός τύπος [7]
για τη διαρροή των στραγγισμάτων δια μέσου αργιλικής μόνωσης.

$$Q_\lambda = [\mathrm{K}_L \cdot \pi \cdot \mathrm{B}/(4 \cdot \mathrm{Z}_L)][(Q_t - K_L)/K_d]^{1/2} + K_L$$

$Q_\lambda$ = διαρροή διασταλλάγματος (cm/sec)
$Q_t$ = συνολικό υδραυλικό φορτίο πάνω στη στρώση μόνωσης (cm/sec)
K= υδραυλική αγωγιμότητα της μονωτικής στρώσης (cm/sec)
Kd = υδραυλική αγωγιμότητα της στρώσης αποστράγγισης (cm/sec)
B = το μισό της απόστασης μεταξύ των αγωγών συλλογής διασταλλαγμάτων (cm)
$Z_L$ = πάχος στρώσης μόνωσης (cm).
Αν η επιφάνεια διαρροής είναι A $m^2$, τότε η συνολική παροχή (flux) του διασταλλάγματος θα είναι $Q_L$ όπου $Q_L = (Q_\lambda/100) \cdot A$ (σε $m^3$/sec).




*Εικόνα 4.4 Διαρροή διασταλλαγμάτων μέσω αργιλικής στρώσης* [7]

Οι δείκτες του μονωτικού υλικού που μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργία της μόνωσης είναι

- η υδροπερατότητα
- η χωροταξική κατανομή των σωματιδίων
- το φιλτράρισμα
- η δυνατότητα καθίζησης των βαρέων μετάλλων
- η προσροφητικότητα και απορροφητικότητα των επικίνδυνων ουσιών
- η καταλυτική αντίδραση των οργανικών στο υλικό

Γενικά η άργιλος θα πρέπει να παραμένει αδρανής σε χημικά που βρίσκονται στα στραγγίσματα και να έχει μεγάλη δυνατότητα ρόφησης των επιβλαβών. [9]
Το φυσικό υπόβαθρο αρχικά καθαρίζεται εξομαλύνεται και συμπιέζεται. Ο βαθμός συμπίεσης της επιφάνειας πρέπει να είναι DPr=0,95. Θα πρέπει επιπλέον να γίνεται έλεγχος της διαμορφωμένης επιφάνειας ώστε να μην υπάρχει χαλαρό και ξηρό έδαφος. Ο έλεγχος περιλαμβάνει τα εξής βήματα.

- οπτικός έλεγχος
- εξέτασης του βαθμού συμπίεσης ανά 1000$m^2$
- μέτρηση ύψους και μήκους της περιοχής
- μετρήσεις κλίσεων

Η διάστρωση της αργιλικής μόνωσης γίνεται εφόσον το επιτρέπουν οι καιρικές

συνθήκες και σε σύντομο χρονικό διάστημα καθώς θα πρέπει να αποφεύγεται η παρατεταμένη έκθεση της συμπυκνωμένης επιφάνειας στην ηλιακή ακτινοβολία.

Η φυσική υγρασία του αργιλικού υλικού, κατά τη συμπύκνωση, είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την βέλτιστη (κατά 2-3%) όταν δεν υπάρχει η κατάλληλη υγρασία η άργιλος είναι δυνατόν να σχηματίσει σβώλους με αποτέλεσμα μετά τη συμπίεση ένα μέρος από αυτούς να μην σπάσει και να δημιουργηθούν κενά στο στρώμα της μόνωσης.

Το ύψος της μονωτικής στρώσης πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,5m. Η στρώση συμπυκνωμένης αργίλου μπορεί να τοποθετηθεί σε δυο αλλεπάλληλες στρώσεις. Η συμπύκνωση του φραγμού γίνεται σε στρώσεις αρχικού πάχους 20-25cm και τελικού όχι μικρότερου των 15cm με βαθμό συμπύκνωσης ίσο ή μεγαλύτερο του 95% της μέγιστης ξηρής πυκνότητας κατά τη δοκιμή Proctor. Οι έλεγχοι των ιδιοτήτων του αργιλικού φραγμού που θα πρέπει να εκτελούνται μετά τη συμπύκνωση παρουσιάζονται στον πίνακα.

| **Δοκιμή** | **Συχνότητα** |
|---|---|
| Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινο | 1 δοκιμή /4 στ. |
| Βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης | 1 δοκιμή /4 στ |
| Εργαστηριακός προσδιορισμός διαπερατότητας | 1 καρότο/4 στ |
| Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας με ξήρανση σε κλίβανο | 1 δοκιμή /1 στ |
| Προσδιορισμός επί τόπου πυκνότητας (μέθοδος κώνου και άμμου) | 1 δοκιμή /1 στ |
| Προσδιορισμός επί τόπου διαπερατότητας | 1 δοκιμή /8000m$^3$ |

*Πίνακας 4.3 Έλεγχοι των ιδιοτήτων του αργιλικού φραγμού*

## 4.3 Μόνωση με γεωμεμβράνες

Πάνω από την αργιλική μόνωση τοποθετείται η γεωμεμβράνη. Πρόκειται για μεμβράνες από πολυμερή υλικά με υψηλό μοριακό βάρος όπως: θερμοπλαστικά (PVC), υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο και χλωριωμένο πολυαιθυλένιο (CPE) και ελαστομερή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της γεωμεμβράνης είναι, η χημική ανεκτικότητα, τα χαρακτηριστικά της αντοχής, η διάρκεια ζωής και η περατότητα. Παράλληλα, οι βασικές μηχανικές ιδιότητες της γεωμεμβράνης φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

| **Παράμετρος** | **Τιμή** |
|---|---|
| Εξωτερική μορφή | ξένες προσμίξεις |
| Πάχος | 1,5mm |
| Συμπεριφορά στην θερμοκρασία | ±2% |

| | |
|---|---|
| Συμπεριφορά στο νερό (αλλαγή βάρους) | <1% |
| Εφελκυστική αντοχή θραύσης | >24N/mm$^2$ |
| Εφελκυστική αντοχή διαρροής | >15N/mm$^2$ |
| Επιμήκυνση σε θραύση | >600% |
| Επιμήκυνση σε διαρροή | >8% |
| Αντοχή σε σχίσιμο | >500 N/mm$^2$ |
| Αντοχή σε διάτρηση | >300 N/mm$^2$ |
| Αντοχή σε εφελκυσμό κατά την θραύση | >120 N/mm$^2$ |
| Όριο σχισίματος | >500 N |
| Πολυαξονική επιμήκυνση σε θραύση | >15% |

*Πίνακας 4.4 Μηχανικές ιδιότητες της γεωμεμβράνης*

*Έλεγχοι ποιότητας πριν από την τοποθέτηση της γεωμεμβράνης*

Κάθε ρολό υλικού που θα παραδίδεται στο εργοτάξιο θα πρέπει να συνοδεύεται από καρτέλα όπου θα αναγράφεται:

- ο κατασκευαστής της μεμβράνης,
- η ημερομηνία παραγωγής,
- η χώρα προέλευσης,
- ο τύπος της μεμβράνης,
- η πρώτη ύλη παραγωγής,
- το πάχος της γεωμεμβράνης

Ανά παρτίδα παραγωγής που λαμβάνεται στο εργοτάξιο θα πρέπει να λαμβάνεται δείγμα και να γίνεται εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών.

*Εικόνα 4.5 Τοποθέτηση γεωμεμβράνης επί της αργίλου*

*Τοποθέτηση της γεωμεμβράνης*

Πριν τις συγκολλήσεις των γεωμεμβρανών θα πρέπει να ελέγχεται ο χώρος ώστε να είναι απαλλαγμένος από αιχμηρά αντικείμενα (πέτρες κτλ.) και στη συνέχεια να ελέγχεται η καθαρότητα της μεμβράνης. Η συγκόλληση γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό και το υλικό συγκόλλησης είναι πανομοιότυπης ποιότητας με το υλικό της μεμβράνης. Οι παράμετροι συγκόλλησης που ισχύουν είναι:

| | |
|---|---|
| θερμοκρασία τετηγμένου μίγματος | 220-240 $^oC$ |
| θερμοκρασία επιφάνειας αρμού | 220-240 $^oC$ |
| ελάχιστη πίεση επαφής | $1N/m^2$ |
| ταχύτητα συγκόλλησης | 0,3-2m/min |

*Πίνακας 4.5 Παράμετροι συγκόλλησης γεωμεμβρανών*[19]

Ο εξοπλισμός της συγκόλλησης θα έχει τη δυνατότητα προσαρμογής των θερμοκρασιών στη ζώνη επαφής, όπου το μηχάνημα λιώνει τη μεμβράνη, ώστε η μεταβολή των περιβαλλοντικών συνθηκών να αφήνει κατά το δυνατόν ανεπηρέαστες τις συγκολλήσεις. Η διαδικασία συγκόλλησης ωστόσο θα πρέπει να αποφεύγεται κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων ή όταν η θερμοκρασία είναι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων.

*Εικόνα 4.6 Συγκόλληση μεμβρανών*

Οι συγκολλήσεις σύμφωνα με την [8] γίνονται με δύο τρόπους με θερμοστοιχείο και με εξέλαση. Οι έλεγχοι των κολλήσεων είναι χωρίς καταστροφή και με καταστροφή και γίνονται σε ένα δείγμα ανά 150 μέτρα ραφών ή στο 10% των ραφών σε ελάχιστο πλάτος 10mm με μια από τις παρακάτω μεθόδους

- διπλές κολλήσεις με την μέθοδο αέρα υπό πίεση ή με την μέθοδο του κενού

- απλές κολλήσεις με την μέθοδο του κενού ή με την μέθοδο της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Η γεωμεμβράνη παραδίδεται σε ρολά με τις παρακάτω ενδεικτικές διαστάσεις

| | |
|---|---|
| Μήκος ρολού | 200m |
| Πλάτος ρολού | 10m |
| Εμβαδόν ρολού | 2000m$^2$ |
| Βάρος κάθε ρολού | 4 τόνοι |

*Πίνακας 4.6 Ενδεικτικές διαστάσεις ρολού γεωμεμβράνης*

*Έλεγχος συντελεστή ασφαλείας - υπολογισμός ευστάθειας*

Ο συντελεστής ασφάλειας έναντι της ολίσθησης ορίζεται ως

$$\sigma_\alpha = \frac{F_r}{F_o}$$

όπου $F_r = W \cdot \quad \phi \cdot \quad \delta$ : η δύναμη τριβής

και $F_o = W \cdot \sin\phi$ : η δύναμη ολίσθησης

επιπλέον φ: γωνία κλίσης πρανούς

δ: γωνία τριβής γεωμεμβράνης εδάφους και

W: το βάρος της γεωμεμβράνης (kgr)

συνεπώς η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί σε $\sigma_\alpha = \frac{\tan\delta}{\tan\phi}$

Σύμφωνα με όσα έχουν ειπωθεί για κλίση πρανών 1:3 (δηλαδή φ=18,4$^o$ ) και δ=23,5$^o$ προκύπτει $\sigma_\alpha$= 1,307 (ευστάθεια μεταξύ γεωμεμβράνης και αργιλικού φραγμού) . Ο ελάχιστα αποδεκτός συντελεστής ασφαλείας είναι το 1,3. Παρόμοιοι υπολογισμοί ευστάθειας μπορούν να γίνουν για τις διεπιφάνειες άμμου και γεωυφάσματος και άμμου και γεωυφάσματος.

## 4.5 Στρώσεις προστασίας της γεωμεμβράνης

Πάνω από τη γεωμεμβράνη τοποθετούνται προστατευτικές στρώσεις που σκοπό έχουν την μηχανική προστασία της επιφάνειας της γεωμεμβράνης.

*Γεωύφασμα*

Το γεωύφασμα είναι ίνες από πολυμερές υλικό, συνηθέστερα πρόκειται για πολυπροπυλένιο, συνεχούς νήματος μη υφαντό.

Οι προδιαγραφές των μηχανικών και φυσικών χαρακτηριστικών είναι οι εξής

| **Παράμετρος** | **Τιμή** |
|---|---|
| Βάρος | 350gr/ m$^2$ |

| | |
|---|---|
| Αντίσταση σε διάτρηση | 2700N |
| Αντοχή σε εφελκυσμό | 13,5-17KN/m |
| Επιμήκυνση στη θραύση | 50-80% |
| Apparent opening size | 0,1mm |
| Περατότητα σε 2kPa | 0,14cm/sn |

*Πίνακας 4.7 Χαρακτηριστικά γεωυφάσματος*

Τα φύλλα του γεωϋφάσματος πρέπει να καλύπτονται μεταξύ τους κατά 30-50cm ενώ η στερέωσή του έναντι του ανέμου γίνεται με βαρίδια από άμμο. Οι συνήθεις εργαστηριακές δοκιμές περιλαμβάνουν:

- δοκιμές προσδιορισμού εφελκυστικής αντοχής,
- δοκιμές αντοχής σε διάτρηση,
- δοκιμές διαπερατότητας,
- ενεργού μεγέθους πόρων και
- δοκιμή για αντίσταση στη χημική αλλοίωση.

Το γεωύφασμα ακολουθεί την αγκύρωση της γεωμεμβράνης εντός της τάφρου αγκύρωσης η οποία επιχώνεται με καλά συμπυκνωμένα υλικά.

*Εικόνα 4.7 Τοποθέτηση γεωυφάσματος*

Το γεωύφασμα παραδίδεται σε ρολά με τις παρακάτω ενδεικτικές διαστάσεις

| | |
|---|---|
| Μήκος ρολού | 100m |
| Πλάτος ρολού | 5m |
| Εμβαδόν ρολού | $500m^2$ |
| Βάρος κάθε ρολού | 165kg |

*Πίνακας 4.8 Ενδεικτικές διαστάσεις ρολού γεωυφάσματος*

*Στρώση άμμου*

Επιπλέον, για την προστασία της γεωμεμβράνης τοποθετείται στρώση άμμου πάχους 10cm. Το υλικό θα πρέπει να είναι φτωχό σε ανθρακικό ασβέστιο (<10% της συνολικής μάζας) και συνήθως προτιμάται άμμος θαλάσσης. Η διάστρωση του υλικού γίνεται σε μια στρώση και συμπυκνώνεται με ελαστιχοφόρο μηχάνημα (4- 6 περάσματα).

*Εικόνα 4.8 Τοποθέτηση προστατευτικής στρώσης άμμου*

## 4.6 Στρώση αποστράγγισης στραγγισμάτων

Πάνω από τη στρώση άμμου τοποθετείται η στρώση αποστράγγισης η οποία αποτελείται από χαλίκι με μεγάλο δείκτη κενών ώστε να εξασφαλίζεται υψηλή διαπερατότητα ώστε να αποφεύγεται το φράξιμο των πόρων και να ελαχιστοποιείται ο βαθμός καθίζησης των στερεών που περιέχονται στα στραγγίσματα. Τα χαρακτηριστικά του υλικού της ζώνης αποστράγγισης παρατίθενται στον επόμενο πίνακα:

| **Παράμετρος** | **Τιμή** |
|---|---|
| Υλικό διαμέτρου | 6/32 |
| Στρογγυλεμένο υλικό | τουλάχιστον κατά 75% |
| Συντελεστής υδροπερατότητας | $1\cdot10^{-2}$ - $1\cdot10^{-3}$ m/s |
| Κλίση ζώνης | ±2% |

*Πίνακας 4.9 Χαρακτηριστικά υλικού ζώνης αποστράγγισης*

Ο έλεγχος της ζώνης αποστράγγισης αφορά την κοκκομετρία του υλικού την περιεκτικότητα του σε ανθρακικό ασβέστιο, την μορφή και την αντοχή του. Το δείγμα λαμβάνεται ανά 5000m$^2$ ενώ το πάχος της στρώσης ελέγχεται ανά 1000m$^2$.

## 4.7 Τελική αποκατάσταση του χώρου

Με την ολοκλήρωση των επιμέρους τμημάτων ενός χώρου υγειονομικής ταφής αρχίζουν οι εργασίες τελικής κάλυψης και επανένταξης του χώρου στο φυσικό περιβάλλον. Η 'τελική κάλυψη' είναι ένα προστατευτικό και πολλαπλής λειτουργίας στρώμα σύνθετης διατομής από φυσικά ή/και συνθετικά υλικά κατάλληλων κλίσεων, το οποίο καλύπτει εξ' ολοκλήρου τη λειτουργική κάλυψη του ΧΥΤΑ και μειώνει δραστικά ή και αποκλείει την είσοδο ουσιών στο σώμα των απορριμμάτων όσο και την εκπομπή ρύπων (κυρίως βιοαερίου και στραγγισμάτων) από αυτό. [19].

Τα σύστημα τελικής κάλυψης συνήθως αποτελείται από

- επιφανειακό χώμα – έδαφος φυτεύσεων
- έδαφος προστασίας
- ζώνη αποστράγγισης
- στρώση φραγμού
- στρώση εκτόνωσης βιοαερίου

Ωστόσο τα ελάχιστα απαιτούμενα είναι

Στρώση φραγμού - έδαφος φυτοκάλυψης.

α. Το κύριο στοιχείο του είναι το αδιαπέραστο στρώμα από κατάλληλα συμπιεσμένη άργιλο, ή μίγματος αργιλομπετονίτη ή τεχνητής μόνωσης με συντελεστή διαπερατότητας K= $10^{-9}$ m/sec.

β. Στρώμα εδαφικού υλικού κατάλληλου για φύτευση πάχους περί το 1,5m, ανάλογα με το είδος της φυτοκάλυψης. [19]

Η τμηματική αποκατάσταση του χώρου προτιμάται γιατί ελαχιστοποιεί περαιτέρω τις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις και διευκολύνει την κοινωνική αποδοχή τέτοιων εγκαταστάσεων.

Οι στόχοι των έργων τελικής κάλυψης του ΧΥΤΑ είναι αναπόσπαστο κομμάτι της διαχείρισής του και περιλαμβάνουν:

i) Τη δραστική μείωση και τον έλεγχο όλων των εκπεμπόμενων ρύπων από το σώμα των απορριμμάτων.

ii) Την επανένταξη του χώρου στο φυσικό περιβάλλον και την κατά το δυνατό εγκατάσταση σε αυτό νέων χρήσεων.

Η σωστή αποκατάσταση ενός χώρου ελεγχόμενης εναπόθεσης μη επικίνδυνων

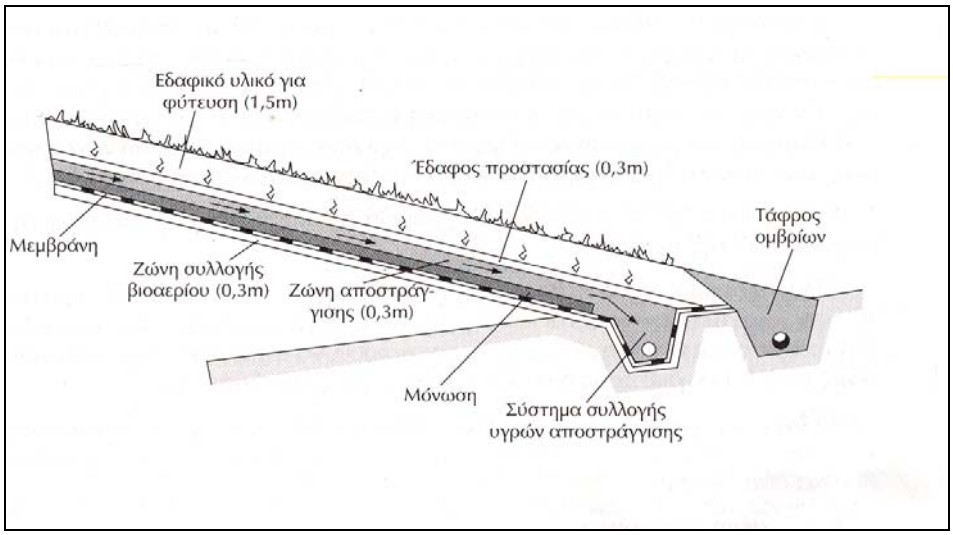
στερεών αποβλήτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα είδη βλάστησης. Βασική παράμετρος πρέπει να είναι η υπάρχουσα και η εν δυνάμει βλάστηση της ευρύτερης περιοχής.

Οι συνήθεις τύποι βλάστησης για την αποκατάσταση χώρων ελεγχόμενης εναπόθεσης στη χώρα μας είναι:

- Τα αρωματικά φυτά (π.χ θυμάρι, μέντα, ρίγανη, φασκόμηλο, λεβάντα)
- Ποικιλίες μεσογειακής γεωργίας (π.χ ελιές, αχλαδιές, ροδιές, βερικοκιές).
- Αειθαλή φυτά (π.χ μυρτιά, σχίνος, δάφνη, πουρνάρι) [9]

Η φύτευση μπορεί και πρέπει να λειτουργήσει και ως ανεμοφράχτης, για το σκοπό δε αυτό πρέπει να είναι πυκνή. Το 40% περίπου του αέρα πρέπει να διέρχεται από το φυτοφράχτη για να εμποδίζονται στροβιλισμοί στο χώρο διάθεσης.

Μια ορθή τελική αποκατάσταση του ΧΥΤΑ παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί




*Εικόνα 4.9 Τελική κάλυψη ενός ΧΥΤΑ* [9]

Γενικά πάντως στην ελληνική νομοθεσία όσον αφορά τη επιφανειακή στεγανοποίηση του ΧΥΤΑ παρατηρείται μια σχετική 'χαλαρότητα' καθώς αναφέρονται τα εξής 'Εάν η αρμόδια αρχή, αφού εξετάσει τους ενδεχόμενους κινδύνους για το περιβάλλον, κρίνει ότι απαιτείται πρόληψη της δημιουργίας στραγγισμάτων, δύναται να απαιτήσει την επιφανειακή στεγανοποίηση του χώρου'[21]. Για την επιφανειακή στεγανοποίηση ισχύουν οι ακόλουθες συστάσεις:

| **Κατηγορία ΧΥΤΑ** | Μη επικίνδυνα απόβλητα |
|---|---|
| Στρώμα απαγωγής των αερίων | Απαιτείται |
| Τεχνητή μεμβράνη στεγανοποίησης | Δεν απαιτείται |

| | |
|---|---|
| Αδιαπέραστο στρώμα πετρώματος | Απαιτείται |
| Στρώμα αποστράγγισης | Απαιτείται |
| Χωμάτινο κάλυμμα | Απαιτείται |

*Πίνακας 4.10 Επιφανειακή στεγανοποίηση* [21]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο
ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΤΙΚΗ ΖΩΝΗ – ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΓΩΓΩΝ

## 5.1 Ζώνη αποστράγγισης

Το σύστημα συλλογής των στραγγισμάτων αποτελεί παράγοντα σπουδαίας σημασίας για την προστασία του περιβάλλοντος σε ένα χώρο ελεγχόμενης εναπόθεσης στερεών μη επικίνδυνων αποβλήτων.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η ζώνη αποστράγγισης τοποθετείται πάνω από τη μόνωση και κάτω από τα στερεά απόβλητα. Το πάχος της ζώνης πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,30m και για την κατασκευή της χρησιμοποιείται υλικό διαμέτρου 16/32mm. [19]

Το υλικό (χαλίκι) πρέπει να είναι στρογγυλεμένο (τουλάχιστον κατά 75%) και ξεπλυμένο. Απαιτείται επιπλέον, να είναι χημικώς και μηχανικώς σταθερό και η περιεκτικότητά του σε ανθρακικό ασβέστιο να μην ξεπερνά κατά βάρος το 20%. Ο συντελεστής υδροπερατότητας της ζώνης αποστράγγισης κυμαίνεται μεταξύ $1\cdot10^{-2}$ m/sec έως $1\cdot10^{-3}$m/sec, και η κλίση της ζώνης να μην ξεπερνά το 2%.[19]

Η τοποθέτηση της ζώνης αποστράγγισης πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην προκαλούνται βλάβες παραμόρφωσης στη ζώνη προστασίας και κατά συνέπεια στη μεμβράνη. Παράλληλα όμως, θα πρέπει να διευκολύνεται η συλλογή των στραγγισμάτων. Ο έλεγχος της ζώνης αποστράγγισης μπορεί να γίνεται σε δύο φάσεις:

α) Έλεγχος του υλικού πριν την τοποθέτηση του και

β) Επιτόπιος δειγματοληπτικός έλεγχος της ζώνης αποστράγγισης.

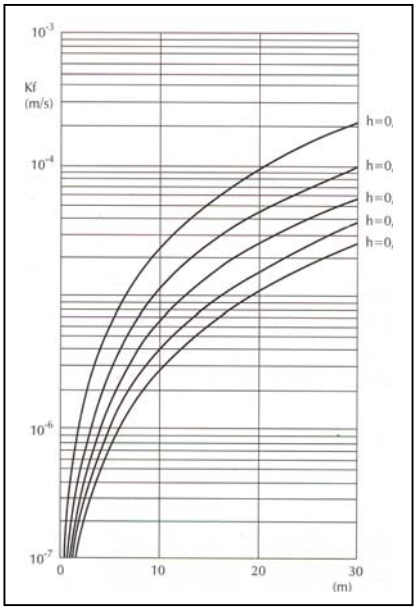
Το υλικό εξετάζεται ως προς την κοκκομετρία του (DIN 18123), την περιεκτικότητα του σε ανθρακικό ασβέστιο (DIN 18129) τη μορφή (DIN 52144) και αντοχή του (DIN 52115). Ως προς τον επιτόπιο δειγματοληπτικό έλεγχο του υλικού λαμβάνεται δείγμα ανά 5000 $m^2$, ενώ ελέγχεται το πάχος της στρώσης ανά 1000 $m^2$.

Μεταξύ της ζώνης αποστράγγισης και της ζώνης προστασίας της μεμβράνης μπορεί να τοποθετηθεί γεωύφασμα. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται και η ανάμειξη των δύο υλικών.

## 5.2 Αγωγοί στραγγισμάτων

Έχει αποδειχθεί στην πράξη ότι η μόνωση της βάσης χωρίς συλλογή και απομάκρυνση των στραγγισμάτων από τον χώρο τελικά βλάπτει περισσότερο από ότι ωφελεί. Η συλλογή και μεταφορά των στραγγισμάτων πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα στραγγίσματα χωρίς δυσκολία να οδηγούνται στα φρεάτια και κατόπιν στη μονάδα επεξεργασίας.

Οι αγωγοί πρέπει να έχουν κυκλική διατομή, να είναι ανθεκτικοί σε χημικές ουσίες, σταθεροί και υδραυλικά αποδοτικοί. Οι οπές ή σχισμές των αγωγών καλύπτουν τα 2/3 της επιφάνειας τους και η ελάχιστη εσωτερική διάμετρος να είναι 150 mm.
Θα πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε να μην υφίστανται καμία στρέβλωση τόσο κατά την κατασκευή, όσο και κατά την λειτουργία του χώρου. Συνήθως χρησιμοποιούνται αγωγοί από HDPE ή PVC.
Για τον σχεδιασμό των αγωγών απαιτείται:
1. Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ροής των στραγγισμάτων βάσει των διατομών και του όγκου του αγωγού.
2. Ο υπολογισμός του απαιτούμενου μεγέθους βάσει της αναμενόμενης ροής και μέγιστης κλίσης,
3. Ο προσδιορισμός της δυνατής ευελιξίας (αντοχής) σε οποιαδήποτε καταπόνηση.
Τέλος η διαστασιολόγηση των αγωγών γίνεται σε συνάρτηση με την μέγιστη διάρκεια και ένταση της βροχόπτωσης της τελευταίας εικοσαετίας και αφού ληφθεί υπόψη και η μορφολογία του χώρου.
Ένα σύστημα συλλογής αποτελείται από τους αγωγούς απορρόφησης και μεταφοράς. Κατά την κατασκευή του συστήματος συλλογής και μεταφοράς των στραγγισμάτων συνίσταται οι αγωγοί να είναι ευθυγραμμισμένο.
Η κλίση των αγωγών πρέπει να είναι τουλάχιστον 2,5% (οι τεχνικές προδιαγραφές σύμφωνα με την ΚΥΑ απαιτούν 5%). Οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 40m. Ενώ ανά διαστήματα (τουλάχιστον 300 m), πρέπει να κατασκευάζεται φρεάτιο ελέγχου. Στα φρεάτια ελέγχου εντός του χώρου δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή τους, έτσι ώστε να μην προκληθεί ζημιά στη μόνωση. Οι αγωγοί περιβάλλονται από στρώμα φίλτρου (αδρανές υλικό) της ζώνης αποστράγγισης. Τη σχέση μεταξύ συντελεστή διαπερατότητας ($k_f$) του πάχους του στρώματος προστασίας και απόστασης μεταξύ σωλήνων απορρόφησης παρουσιάζει η επόμενη εικόνα. [9]

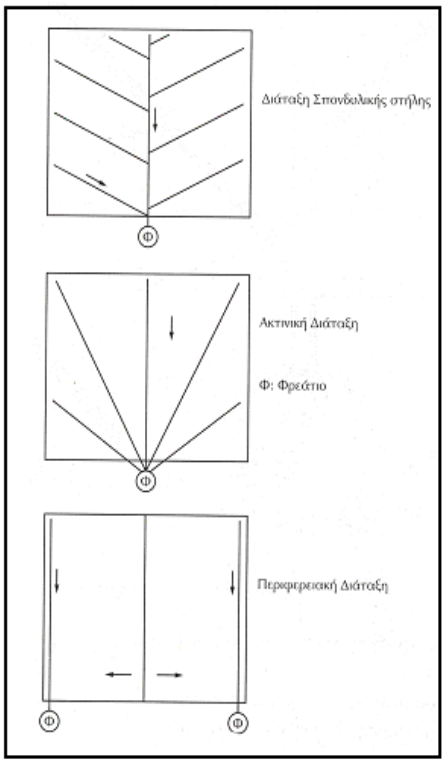



$k_f$: συντελεστής διαπερατότητας
α: απόσταση μεταξύ σωλήνων απορρόφησης
h:ύψος στρώματος φίλτρου

*Εικόνα 5.1 Συσχέτιση συντελεστή διαπερατότητας, απόστασης σωλήνων και ύψους στρώματος φίλτρου*

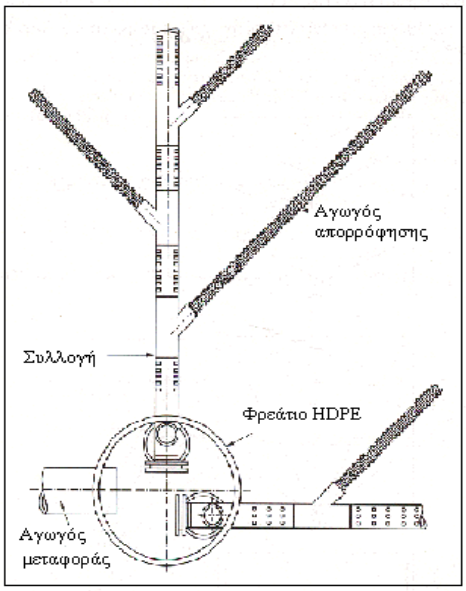
Από την εικόνα εξάγεται το συμπέρασμα ότι π.χ. για ένα πάχος 15cm του στρώματος προστασίας και μια απόσταση μεταξύ σωλήνων απορρόφησης 10m ο συντελεστής διαπερατότητας ($k_f$) του στρώματος προστασίας πρέπει να είναι περίπου $1 \cdot 10^{-5}$ m/sec για να εμποδιστεί η συσσώρευση στραγγισμάτων στα απόβλητα.

Η διάταξη των αγωγών μπορεί να είναι σε σχήμα σπονδυλικής στήλης ή ακτινική ή περιφερειακή




*Εικόνα 5.2 Διατάξεις σωληνώσεων αποστράγγισης* [9]

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται οι αγωγοί και το φρεάτιο συλλογής στραγγισμάτων.




*Εικόνα 5.3Σύστημα συλλογής στραγγισμάτων*[9]

## 5.3 Συστήματα συλλογής στραγγισμάτων

Αν η ζώνη κάτω από τα απορρίμματα είναι επίπεδη, η ροή των στραγγισμάτων γίνεται σε επίπεδη ορθογωνική αποστραγγιστική ζώνη, η μόνωση είναι αδιαπέραστη, ενώ η κατείσδυση q των στραγγισμάτων είναι ομοιόμορφη τότε το ύψος h μεταξύ των δύο αγωγών αποστράγγισης (Εικ. 5.4) θα δίνεται από τη σχέση

$$h = \Omega^{1/2}[(L-x)x]^{1/2} \quad \text{(εξ. 5.1)}$$

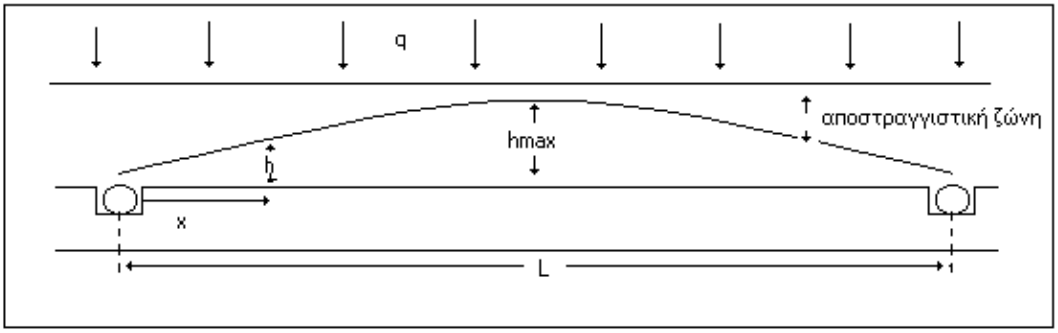
όπου $\Omega = \dfrac{q}{K_w}$

L: η απόσταση μεταξύ των αγωγών [L]

x: η απόσταση από έναν από τους δυο αγωγούς[L]

q: το τμήμα της διείσδυσης σταθερούς κατάστασης που συλλέγεται από τους αγωγούς [$LT^{-1}$]

$K_w$: η υδραυλική αγωγιμότητα του υλικού μεταξύ των δυο αγωγών [$LT^{-1}$]




*Εικόνα 5.4 1ος τύπος συστήματος συλλογής στραγγισμάτων* [34]

Στο μέσο της απόστασης των δυο αγωγών η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$h_{\max} = 0{,}5L\Omega^{1/2} \quad \text{(εξ. 5.2)}$$

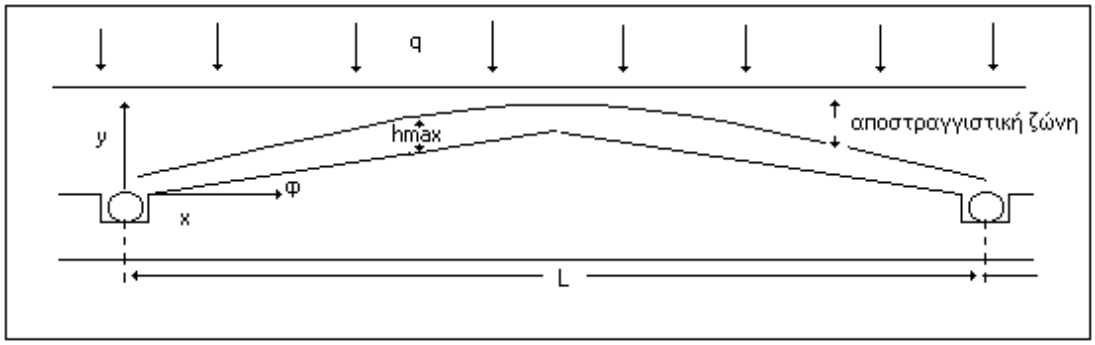
όπου $h_{max}$ είναι το μέγιστο ύψος της υδραυλικής στήλης πάνω από τον απορριμματικό όγκο. Βασιζόμενοι στους ποικίλους συνδυασμούς των h και x μπορεί να παραχθεί η επόμενη σχέση για το μέσο h

$$\bar{h} = 0{,}785h_{\max} = 0{,}393L\Omega^{1/2} \quad \text{(εξ. 5.3)}$$

Χρησιμοποιώντας τις ίδιες υποθέσεις με πριν στην περίπτωση πτυχωτού συστήματος μόνωσης (Εικόνα 5.5) ώστε να διευκολύνονται τα διασταλλάγματα να οδηγούνται στους αγωγούς το $h_{max}$ θα δίνεται από τη σχέση:

$$h_{\max} = 0{,}5L\left[\left(\Omega + s^2\right)^{1/2} - s\right] \quad (\text{εξ } 5.4)$$

όπου s=tanφ και φ: η γωνία κλίσης της πτύχωσης




*Εικόνα 5.5 2ος τύπος συστήματος συλλογής στραγγισμάτων* [34]

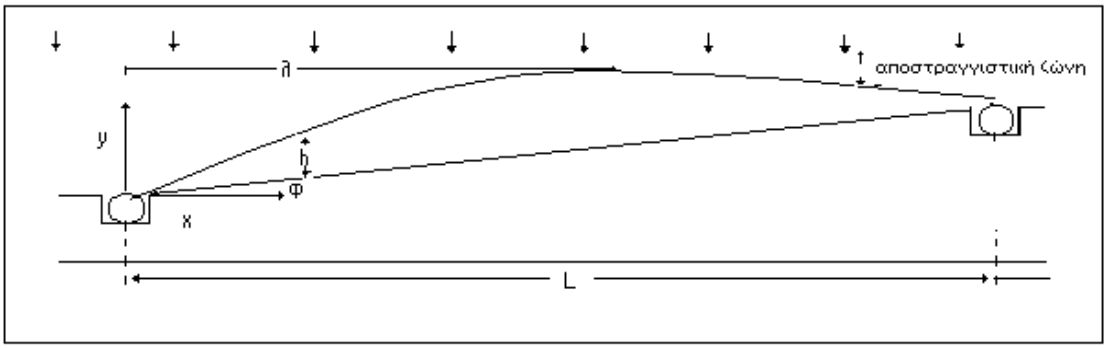
Στην περίπτωση που θέλουμε να υπολογίσουμε την απόσταση L μεταξύ των δυο αγωγών η πιο πάνω σχέση μετατρέπεται

$$L = \frac{2\left(h_{\max} + s\right)}{\left(\Omega + s^2\right)^{1/2}} \quad (\text{εξ } 5.5)$$

Στην εικόνα 5.6 παρουσιάζεται ένα άλλο είδους πτυχωτό σύστημα το οποίο είναι αρκετά πιο περίπλοκο και δεν είναι δυνατόν να γραφούν απλές και σαφείς εξισώσεις που να δίνουν το ύψος h. Ωστόσο, υποθέτοντας μηδενικό πιεζομετρικό ύψος στους αγωγούς αποστράγγισης το ύψος h και η απόσταση στην οποία αυτό συμβαίνει μπορεί να δοθεί από τη σχέση x= λ(1-AexpB)

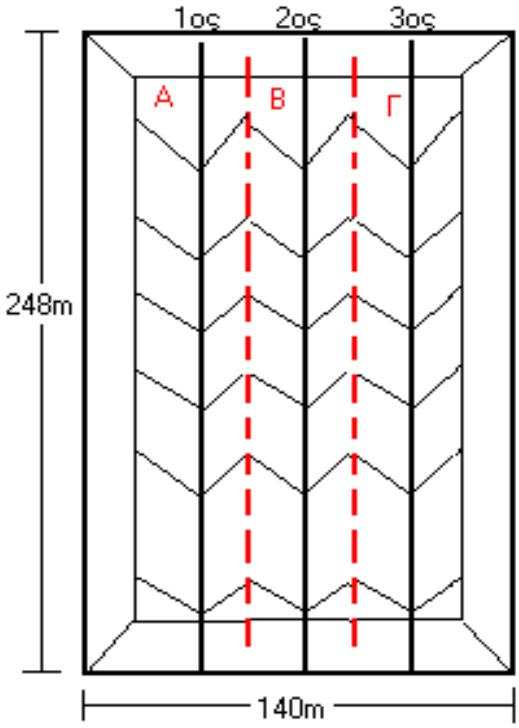
όπου $$\mathrm{A} = \frac{\Omega^{1/2}}{\left(\frac{h^2}{(\lambda - x)^2} - \frac{sh}{(\lambda - x)} + \Omega\right)^{1/2}}$$ και

$$\mathrm{B} = \frac{s}{\left(4\Omega + s^2\right)^{1/2}}\left[\tan^{-1}\left(\frac{-s}{\left(4\Omega + s^2\right)^{1/2}}\right) - \tan^{-1}\frac{\left(\frac{2h}{(\lambda - x)} - s\right)}{\left(4\Omega + s^2\right)^{1/2}}\right] \quad (\text{εξ } 5.6)$$



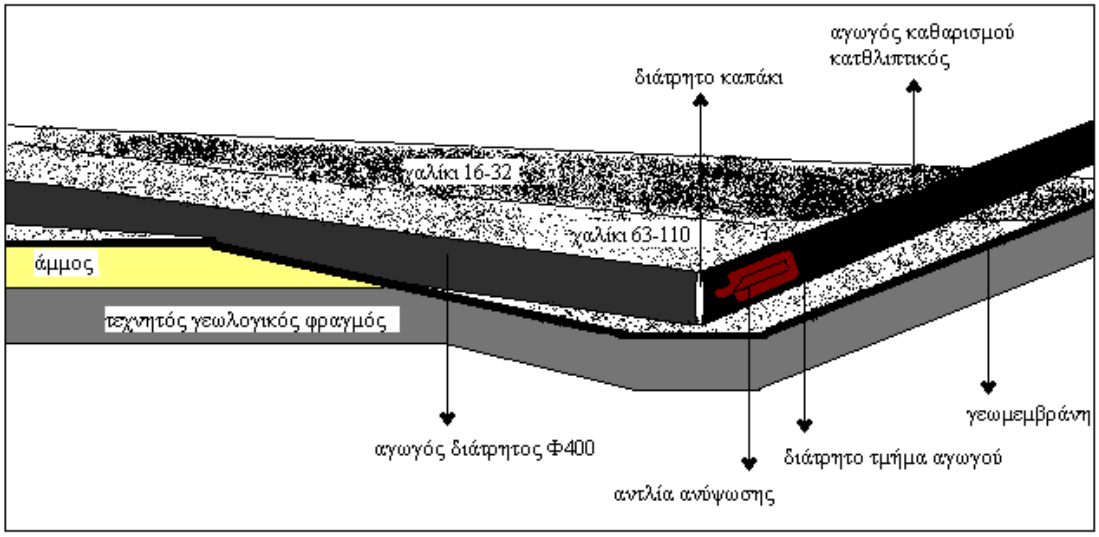

*Εικόνα 5.6 3ος τύπος συστήματος συλλογής στραγγισμάτων* [34]

Στην περίπτωση του ΧΥΤΑ Χανίων έχει χρησιμοποιηθεί ο 2ος τύπος όπως αυτός φαίνεται στην εικόνα 5.5. Αν υποτεθεί πως ο ΧΥΤΑ είναι σχήματος ορθογωνίου 248m x 140 m τότε μπορούν να τοποθετηθούν 3 αγωγοί παράλληλα κατά μήκος της κυψέλης ανά 35m (η νομοθεσία ορίζει πως οι αγωγοί πρέπει να τοποθετούνται ανά απόσταση το πολύ 40 μέτρων μεταξύ τους) ώστε να λαμβάνουν τα στραγγίσματα.




*Εικόνα 5.7 Σχηματική απεικόνιση των αγωγών*

Ο αγωγός 1 θα παραλαμβάνει τα στραγγίσματα από το τμήμα Α και οι αγωγοί 2 και 3 από τα τμήματα Β και Γ αντίστοιχα. Το εμβαδόν του κάθε τμήματος είναι περίπου 11600m$^2$. Στο κατώτερο τμήμα της κυψέλης υπάρχει τάφρος στην οποία καταλήγουν τα στραγγίσματα και από εκεί στη συνέχεια μεταφέρονται με την βοήθεια αντλίας στο σύστημα επεξεργασίας.




*Εικόνα 5.8 Τάφρος στο κάτω μέρος της κυψέλης*

*Εικόνα 5.9 Αγωγοί συλλογής στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Χανίων*

*Εικόνα 5.10 Κατάληξη κεντρικού αγωγού συλλογής στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Χανίων*

*Υπολογισμός παροχής αιχμής*

Για τη διαστασιολόγηση του δικτύου θα πρέπει να υπολογιστεί η παροχή αιχμής που δίνεται από τη σχέση

$$Q_{\max} = C \cdot I \cdot A \quad (\text{εξ } 5.7)$$

όπου

C: αδιάστατος συντελεστής απορροής

I : μέγιστο ύψος βροχόπτωσης

A: επιφάνεια απορροής στραγγισμάτων.

Αν και στην πραγματικότητα ο συντελεστής απορροής είναι πάντα μικρότερος της μονάδας εξαιτίας του ανάγλυφου του ΧΥΤΑ εντούτοις λαμβάνεται ίσος με την μονάδα για λόγους ασφαλείας. Επιπλέον, το μέγιστο ωριαίο ύψος βροχόπτωσης στην περιοχή σύμφωνα με την Μ.Π.Ε. είναι 20mm/hr=0,02m/hr. Οπότε η εξίσωση 5.7 μπορεί να γραφεί για το κάθε αγωγό ως εξής:

$$Q_{\max} = 1 \cdot 0{,}02\text{m/hr} \cdot 11600\text{m}^2 = 232\text{m}^3/\text{hr} = 0{,}064\ \text{m}^3/\text{sec}$$

*Υπολογισμός παροχετευτικότητας στραγγισμάτων*

Σύμφωνα με την εξίσωση του Manning ισχύει

$$Q = \frac{C_m}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{εξ } 5.8)$$

όπου

Q: παροχή στραγγισμάτων( $L^3/T$)

A: εμβαδόν διατομής της ροής

R= A/P: υδραυλική ακτίνα

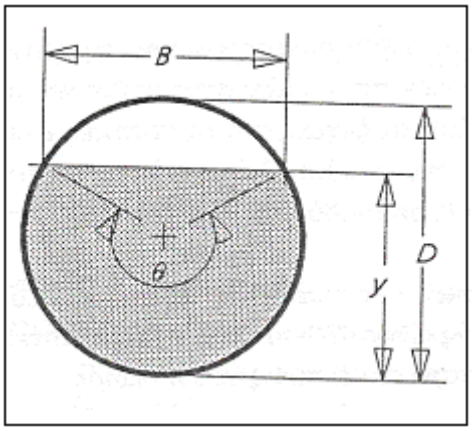
P: βρεχόμενη περίμετρος

S: οι απώλειες ανά μονάδα βάρους και ανά μονάδα μήκους του ανοικτού αγωγού ή η κλίση του πυθμένα του αγωγού
n: συντελεστής τραχύτητας κατά Manning
$C_m$: μια εμπειρική σταθερά ($L^{1/3}/T$) ίση με 1 σε μονάδες S.I.
[36]
Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας σύμφωνα με την [4] κυμαίνεται από 0,011 μέχρι 0,016 για αγωγούς (από σκυρόδεμα, αμιαντοτσιμέντο, πλαστικοί ή αργιλοπυριτικοί) σε καλή κατάσταση. Συνήθης τιμή του συντελεστή τραχύτητας είναι n=0,013.
Προκειμένου να ρέουν τα στραγγίσματα προς τα κατάντη της κυψέλης υπάρχει κατάλληλη κλίση 6,5% καθώς το υψόμετρο από το οποίο ξεκινούν βρίσκεται στα 91m περίπου και αυτό σημείο που καταλήγουν στα 76,5m.
Οι αγωγοί που επιλέγονται είναι Φ400, HDPE. Για αυτούς τους αγωγούς ισχύουν τα εξής χαρακτηριστικά όσον αφορά την ονομαστική τους διάμετρο.

| | **Εσωτερική διάμετρος** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ονομαστική διάμετρος (mm)** | 10 atm (mm) | 12,5 atm (mm) | 16 atm (mm) | 20 atm (mm) | 25 atm (mm) | 32 atm (mm) |
| **400** | 352,6 | 341,2 | 327,4 | 310,6 | 290,6 | - |

*Πίνακας 5.1 Αγωγοί Φ400 από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας* [2]

Έστω πως επιλέγονται αγωγοί Φ400 16atm οπότε η εσωτερική διάμετρος θα είναι 0,3274m
Για ένα αγωγό κυκλικής διατομής με μερική πλήρωση ισχύουν τα εξής:




*Εικόνα 5.11 Γεωμετρία ροής σε αγωγό κυκλικής διατομής με μερική πλήρωση* [5]

| **Γεωμετρικά χαρακτηριστικά** | **Μερική πλήρωση (y<D)** |
|---|---|
| Γωνία, θ | $\theta=2\arccos(1-2y/D)$ |
| Εμβαδόν υγρής διατομής, A | $A=(\theta-\sin\theta)D^2/8$ |

| | |
|---|---|
| Βρεχόμενη περίμετρος, P | P=θD/2 |
| Υδραυλική ακτίνα, R | R=(1-sinθ/θ)D/4 |

*Πίνακας 5.2 Σχέσεις γεωμετρικών χαρακτηριστικών ροής σε αγωγό κυκλικής διατομής με μερική πλήρωση*

Σύμφωνα με τον προηγούμενο πίνακα για πλήρωση αγωγού ίση με y/D=1/3
η γωνία θ, θα είναι θ= 2arccos (1-2/3)=2,462
το εμβαδόν υγρής διατομής, A =(2,462-sin2,462)$0,3274^2$/8=0,025$m^2$
η βρεχόμενη περίμετρος, P=(2,462·0,3274)/2=0,40m και
τέλος η υδραυλική ακτίνα, R=(1-sin2,462/2,462)0,3274/4=0,061

Έτσι σύμφωνα με την εξίσωση 5.8 προκύπτει

$$Q = \frac{1}{0,013} 0,025 \cdot 0,061^{2/3} \cdot 0,065^{1/2} = 0,08 m^3 / \sec$$

Συνεπώς ο κάθε αγωγός μπορεί να παροχετεύσει με ασφάλεια 0,064 $m^3$/sec
που είναι η παροχή αιχμής.

## 5.4 Έλεγχος απόστασης αγωγών

Από την εξίσωση 5.4 δίνεται το $h_{max}$ το οποίο όμως θα πρέπει να είναι μικρότερο των 30cm .

Η τιμή του συντελεστή $\Omega = \frac{q}{K_w}$ υπολογίστηκε ως εξής:

q=P=630mm=630·$10^{-3}$m/yr όπου P η μέγιστη ποσότητα στραγγισμάτων που κατεισδύει στην αποστραγγιστική ζώνη και ισούται με την ποσότητα των ετήσιων κατακρημνισμάτων.
Επιπλέον η τιμή του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας K ισούται με $10^{-3}$ m/sec=31536m/yr.
Έτσι θα είναι

$$\Omega = \frac{0,630 m/yr}{31536 m/yr} = 2 \cdot 10^{-5}$$

Οπότε $h_{\max} = 0,5 \cdot 35\left[\sqrt{(2 \cdot 10^{-5} + 0,02^2)} - 0,02\right] = 8,6 \cdot 10^{-3} m$ <0,3m.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο
ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΑΤΩΝ

Λόγω της ποικιλίας σύστασης και ποσότητας των παραγόμενων στραγγισμάτων είναι αναγκαίος ένας αρκετά μεγάλος αριθμός διεργασιών για την ορθή διάθεσή τους χωρίς την δημιουργία περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ο απαιτούμενος βαθμός καθαρισμού εξαρτάται από τον τελικό αποδέκτη των επεξεργασμένων στραγγισμάτων. Η επεξεργασία στην οποία υπόκεινται τα στραγγίσματα θα πρέπει να ακολουθεί τα γενικά πρότυπα της επεξεργασίας σύνθετων βιομηχανικών αποβλήτων. Ωστόσο τα στραγγίσματα από ΧΥΤΑ μπορούν να χαρακτηρισθούν πολυπλοκότερα εξαιτίας των μεγάλων διακυμάνσεων στις τιμές των παραμέτρων τους αλλά και στον όγκο παραγωγής τους. Η επιλογή της μεθόδου επεξεργασίας θα πρέπει να είναι μια πολύ προσεχτική διαδικασία καθώς τόσο τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής όσο και τα απορρίμματα που καταλήγουν τελικά στο ΧΥΤΑ έχουν μεγάλη σημασία.

## 6.1 Κατηγορίες επεξεργασίας στραγγισμάτων

Οι μέθοδοι επεξεργασίας των στραγγισμάτων μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες [35] :

*Διοχέτευση των Στραγγισμάτων*
1.Επεξεργασία εκτός της τοποθεσίας
2. Ανακύκλωση
3. Άρδευση

*Φυσική και Χημική Επεξεργασία*
1. Χημική εξάτμιση
2. Χημική οξείδωση
3. Χημική κατακρήμνιση
4. Προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα
5. Ακτινοβολία γ
6. Αντίστροφη όσμωση
7. Αφαίρεση αμμωνίας

*Βιολογική Επεξεργασία*
1. Αερόβια επεξεργασία
2. Αναερόβια επεξεργασία

Συνδυασμός φυσικών/ χημικών/ βιολογικών συστημάτων

## 6.2 Διοχέτευση των Στραγγισμάτων

### 6.2.1 Επεξεργασία εκτός της τοποθεσίας

Εάν η περιοχή που χωροθετείται ο ΧΥΤΑ έχει το πλεονέκτημα, να βρίσκεται κοντά σε μια μεγάλη μονάδα επεξεργασίας αστικών λυμάτων με δυναμικότητα ικανή να δεχτεί τα στραγγίσματα, τότε αυτά μπορούν να μεταφερθούν εκεί με αγωγούς για επεξεργασία μαζί με τα αστικά λύματα. Γενικά, αυτός ο τρόπος επεξεργασίας αποτελεί τη πιο απλή διαχειριστική προσέγγιση και όταν είναι δυνατόν την προτιμούμενη μέθοδο διάθεσης. Η επιλογή αυτή είναι κατάλληλη καθώς τα στραγγίσματα περιέχουν μεγάλες ποσότητες αζώτου, ενώ τα αστικά λύματα περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις φωσφόρου. Έτσι λοιπόν εξασφαλίζεται η επάρκεια αυτών των θρεπτικών, που είναι απαραίτητα για τη μικροβιακή αποδόμηση του οργανικού μέρους των αποβλήτων. Οι Pohland και Harper αναφέρουν ότι τα συστήματα αυτά είναι ικανά για την απομάκρυνση του $BOD_5$ και του COD με αποδόσεις που ξεπερνούν το 90%. Ωστόσο, χαμηλότερα είναι τα ποσοστά μείωσης των συγκεντρώσεων της αμμωνίας που αναφέρονται (80%).

Συχνά, η προεπεξεργασία πριν τη διάθεση στο αστικό αποχετευτικό δίκτυο είναι αναγκαία. Αυτό καθορίζεται από τα συστατικά που πρέπει να απομακρυνθούν και το κόστος. Παράλληλα, είναι αναγκαίο να δίνεται βάρος και στην ποσότητα του οξυγόνου αλλά και στην δυνατότητα κίνησης αυτού ώστε να εξασφαλίζονται αερόβιες συνθήκες στην δεξαμενή αερισμού. Τα θρεπτικά, και κυρίως ο φώσφορος, πρέπει να βρίσκονται σε απεριόριστες συγκεντρώσεις για να εξασφαλίζουν τις απαραίτητες συνθήκες λειτουργίας. Άλλα προβλήματα είναι πιθανόν να προκύψουν από την φύση των στραγγισμάτων, σε συνθήκες χαμηλής οξύτητας, και υψηλών οργανικών και ανόργανων συγκεντρώσεων, που καθορίζονται από την ηλικία του ΧΥΤΑ. Πρόβλημα επίσης, μπορεί να προκαλέσει η παρουσία τοξικών οργανικών ενώσεων οι οποίες πιθανόν να μην διασπώνται σε συμβατικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων. [35]

Σε κάποιες περιπτώσεις έχει αναφερθεί ότι το κόστος της αποχέτευσης και μεταφοράς των οργανικών αποβλήτων, είναι μεγαλύτερο από το κόστος κατασκευής μιας εγκατάστασης προεπεξεργασίας. Γενικά, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πως όταν ο όγκος των στραγγισμάτων που εισέρχεται στο σύστημα είναι μεγαλύτερος από 5% της συνολικής εισερχόμενης παροχής του συστήματος, και τα στραγγίσματα που εισέρχονται έχουν COD μεγαλύτερο από $10 gr O_2/L$ δημιουργείται πρόβλημα στην επεξεργασία. Κύριος λόγος της δυσλειτουργίας είναι οι υψηλές συγκεντρώσεις σε αμμωνία. Προβλήματα μπορεί επίσης να προκύψουν εξαιτίας της τοξικότητας στοιχείων των στραγγισμάτων στους μικροοργανισμούς επηρεάζοντας την ορθή χώνεψη των λυμάτων. Επιπλέον πρόβλημα, μπορεί να δημιουργήσει η καθίζηση των

οξειδίων του σιδήρου με αποτέλεσμα τη διάβρωση. Το τελικό αποτέλεσμα σε περίπτωση δυσλειτουργίας πιθανόν να είναι ένας ακάθαρτος αφρός με υψηλές συγκεντρώσεις $NH_3$. Συγχρόνως, η υψηλή περιεκτικότητα μετάλλων είναι δυνατόν να αναστείλει την βιολογική δραστηριότητα της λάσπης μειώνοντας ή εκμηδενίζοντας την πιθανότητα χρήσης της ως λίπασμα.

### 6.2.2 Ανακυκλοφορία

Υπάρχει διαφωνία σχετικά με το πόσο επιθυμητή είναι η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων ακόμα και σήμερα έπειτα από ένα μεγάλο αριθμό μελετών. Οι υπέρμαχοι της ανακυκλοφορίας θεωρούν πως προσφέρει μια επιλογή διαχείρισης που μπορεί να οδηγήσει στην μείωση μακροχρόνιων αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Η επανακυκλοφορία μέσω της μάζας των απορριμμάτων επιδρά ουσιαστικά στην ανάγκη επεξεργασίας των στραγγισμάτων και είναι πιθανόν να μειώσει σημαντικά τις συγκεντρώσεις των ρύπων σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Κατά την επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων πίσω στην κυψέλη, λαμβάνει χώρα βιολογική επεξεργασία με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερη επεξεργασία στη συνέχεια. Εάν ο σκοπός είναι να εξασφαλισθεί επιταχυνόμενη σταθεροποίηση του ΧΥΤΑ μέσα σε ένα πιο εύκολα διαχειριζόμενο και προβλέψιμο χρονικό πλαίσιο καθώς επίσης και η ανάκτηση αερίου ως εγγυημένη πηγή ενέργειας, τότε η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων εμφανίζεται ως η επιθυμητή εναλλακτική λύση.

Η επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων διαμέσου των στερεών αποβλήτων προσφέρει ενδεχόμενα πλεονεκτήματα μειώνοντας τον όγκο των υγρών αποβλήτων λόγω της επιφανειακής εξάτμισης, αλλά και το φορτίο τους μέσω αναερόβιας επεξεργασίας. Οι Robinson et al. υποστηρίζουν πως η καλύτερη συνεισφορά στον έλεγχο του όγκου των στραγγισμάτων είναι η εναπόθεση του υγρού μέσα σε κυψέλη του ίδιου του χώρου. Η αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας ενισχύει την σταθεροποίηση των απορριμμάτων και προάγει την παραγωγή βιοαερίου. Ο Poland αναφέρει πως η ανακύκλωση των στραγγισμάτων βελτιώνει την ομοιογένεια των αντιδράσεων με αποτέλεσμα την μείωση στις μεταβολές των περιβαλλοντικών παραμέτρων και την ταχύτερη επίτευξη των συνθηκών σταθεροποίησης για τις βιολογικές και χημικές διεργασίες. Η ανακύκλωση των στραγγισμάτων, ειδικά σε ξηρές περιοχές, όπου οι διεργασίες σταθεροποίησης χρειάζονται 30 με 50 χρόνια μπορεί να επιτευχθούν σε 5 με 10 χρόνια. Έτσι, ο χρόνος που απαιτείται για βιολογική σταθεροποίηση των ασταθών συστατικών των στραγγισμάτων μειώνεται γενικά κατά μια τάξη μεγέθους. Η επανακυκλοφορία βοηθάει στη μείωση της ετήσιας ποσότητας των στραγγισμάτων λόγω της εξάτμισης που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου όπου περισσότερο από 80% των στραγγισμάτων επανακυκλοφορείται και οι απώλειες από την εξάτμιση είναι μεταξύ 30 και 35%.

Οι υπαίθριες δοκιμές (field–scale trials) έδειξαν ότι η ανακύκλωση, με ορθή επιλογή τοποθεσίας και σχεδιασμό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχώς ως τμήμα της διαχείρισης των στραγγισμάτων, αν και μια δευτερεύουσα επιλογή ως τελική διάθεση του υγρού, συχνά είναι απαραίτητη. Σε πιλοτικές μονάδες, διαπιστώθηκε μείωση του COD κατά 97% αλλά σε μεγαλύτερης κλίμακας χώρους παρατηρήθηκε μείωση μόνο κατά 40% σε 20 μήνες. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα που φαίνεται να έχει η ανακύκλωση των στραγγισμάτων σε πιλοτικές μονάδες μπορούν να επιτευχθούν και σε πραγματικές μονάδες αλλά απαιτούνται μεγαλύτερες περίοδοι ανακύκλωσης για να παραχθεί χαμηλής ισχύος στραγγίσματα. Ο Pohland αναφέρει ότι η ανακύκλωση των στραγγισμάτων επιφέρει μεγάλες μειώσεις στις συγκεντρώσεις του COD σε ένα μικρό χρονικό διάστημα (περίπου 300 μέρες), ενώ οι Lackie et al. υποστηρίζουν πως η επανακυκλοφορία προκαλεί μια αρχική αύξηση στο COD, που ακολουθείται στη συνέχεια από μια μείωση σε πολύ χαμηλές τιμές σε σχεδόν 2 χρόνια. Έχει επίσης αναφερθεί ότι το COD, με την επανακυκλοφορία, πέφτει περίπου κατά 70% σε 3 χρόνια ενώ και πως ο χρόνος που απαιτείται πριν ξεκινήσει η σταθερή μεθανογένεση είναι διπλάσιος όταν δεν υπάρχει επανακυκλοφορία.

Ένα σαφές πλεονέκτημα της αυξημένης περιεκτικότητας σε υγρασία ως αποτέλεσμα της επανακυκλοφορίας είναι ότι η παραγωγή μεθανίου βελτιστοποιείται και μεγαλύτεροι όγκοι αερίου είναι ανακτήσιμοι και εκμεταλλεύσιμοι.

Απαραίτητος στη διαδικασία θεωρείται ο έλεγχος του pH των στραγγισμάτων ενώ προτείνεται και επεξεργασία με ασβέστη σαν μέρος της διαδικασίας της επανακυκλοφορίας, για μερική ουδετεροποίηση και απομάκρυνση των μετάλλων. Οι μεγάλες διακυμάνσεις στο pH είναι δυνατόν να μειώσουν τον αναερόβιο μικροβιακό πληθυσμό, επιμηκύνοντας έτσι τις διεργασίες βιολογικής σταθεροποίησης. Η ρύθμιση του pH σε μια ουδέτερη τιμή διευκολύνει την ταχύτερη εδραίωση ενός ενεργού μεθανογονικού πληθυσμού και την επακόλουθη παραγωγή αερίου. Βελτιώσεις στη ρύθμιση του pH είναι πιθανόν να βελτιώσουν την απόδοση της επεξεργασίας και να μειώσουν την περίοδο βιολογικής σταθεροποίησης.

Η υδρολογία της περιοχής πρέπει επίσης να εξετάζεται προσεκτικά, και κυρίως στον τρόπο που αυτή επηρεάζεται από τη χρήση υλικών επικάλυψης. Μετρήσεις που γίνονται ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή διανομή του ανακυκλωμένου στραγγίσματος, είναι πολύ σημαντικές και για την αποτροπή δημιουργίας καναλιών αλλά και την αποτροπή περιφερειακής κίνησης στη γύρω επιφάνεια και στο υπόγειο νερό. Δυστυχώς, οι συμβατικές μέθοδοι κατασκευής και λειτουργίας των χώρων ταφής με καθημερινή κάλυψη δεν διαθέτουν βέλτιστα υδραυλικά χαρακτηριστικά για τη διευκόλυνση της ανακύκλωσης των στραγγισμάτων μέσω της μάζας των στερεών αποβλήτων.

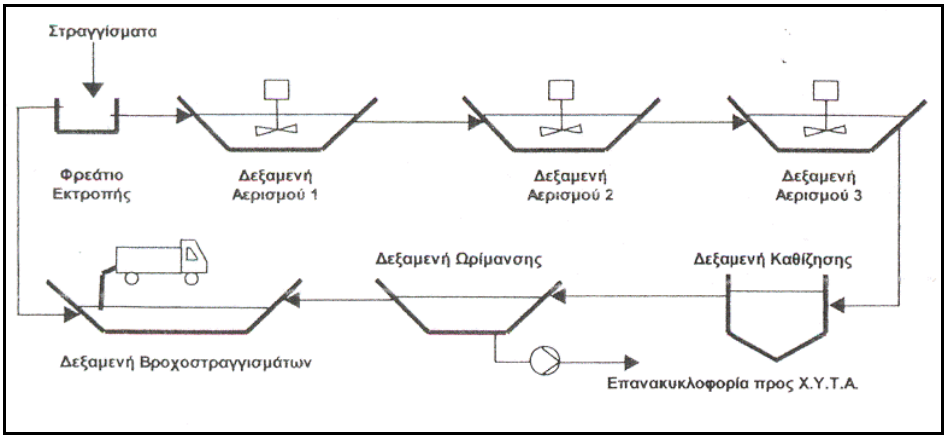
Σε ορισμένες περιοχές, η επανακυκλοφορία μπορεί να μην είναι εφικτή αν το αρχικό υδατικό ισοζύγιο δείχνει συσσώρευση υγρών στην περιοχή. Όταν δεν υπάρχει

συσσώρευση υγρών, αποτελεί μια από τις φθηνότερες επιλογές που είναι διαθέσιμες. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν μικρότερο κόστος στην ανακύκλωση των στραγγισμάτων σε σταθεροποιημένους ΧΥΤΑ συγκρινόμενο με την απευθείας βιολογική επεξεργασία. [35]

Χρήσιμα ωστόσο είναι και τα αποτελέσματα που κατέληξαν οι Barber et al. οι οποίοι μελέτησαν την ανακύκλωση των στραγγισμάτων σε μια πιλοτική μονάδα στο Ηνωμένο Βασίλειο:

- διαπιστώθηκαν μειώσεις στα χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων αλλά προκειμένου να ληφθεί τελικά ένα αδύναμο στράγγισμα έπρεπε να περάσουν 2-3 έτη και όχι 18 μήνες όπως είχε ληφθεί σε μελέτη μικρής κλίμακας.
- Το ποσοστό της ανακύκλωσης κυμάνθηκε από 80-100% του συνολικά παραγόμενου όγκου, ωστόσο διαπιστώθηκαν σημαντικά προβλήματα κατά τη διάρκεια της αυξημένης ανακύκλωσης καθώς δημιουργήθηκαν λιμνάζοντα ύδατα στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ τα οποία δεν ήταν δυνατόν να διηθούν. Το πρόβλημα ξεπεράστηκε με την βοήθεια μηχανημάτων που δημιουργούσαν αυλακώσεις στο έδαφος.
- Μικρός ήταν ο όγκος των στραγγισμάτων που χάθηκε μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Το μεγαλύτερο τμήμα αυτών συσσωρεύτηκε σε βάθος 2 μέτρων από την επιφάνεια του ΧΥΤΑ και έπειτα από τρία χρόνια δημιουργήθηκε πρόβλημα το οποίο ξεπεράστηκε με την κατασκευή νέων αναχωμάτων περιμετρικά του χώρου.
- Μείωση της ισχύος των στραγγισμάτων μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας την υγρασία των απορριμμάτων, με την μεγαλύτερη μείωση να διαπιστώνεται όταν τα απορρίμματα είναι πλήρως κορεσμένα.
- Ενώ το βιοαποικοδομήσιμο μέρος του COD μειώθηκε με την ανακυκλοφορία το επίμονο κλάσμα του COD διατηρήθηκε ενώ υψηλές ήταν οι συγκεντρώσεις των αμμωνιακών και των χλωριούχων ενώσεων. Επομένως η απευθείας διάθεση, χωρίς αραίωση σε κάποιον υδάτινο αποδέκτη ήταν ανέφικτη. [23]

Στον Ελλαδικό χώρο η μέθοδος της ανακύκλωσης των μερικώς επεξεργασμένων αποβλήτων χρησιμοποιείται στο ΧΥΤΑ Λάρισας. Το λειτουργικό σύστημα της Εγκατάστασης Προεπεξεργασίας Στραγγισμάτων (Ε.Π.Σ.) βασίζεται σε τρεις εν σειρά αεριζόμενες λιμνοδεξαμενές (lagoons) των 500$m^3$ η κάθε μια, οι οποίες αφαιρούν τον οργανικό ανθρακούχο ρύπο, κάνουν νιτροποίηση και μερική απονιτροποιήση, μια δεξαμενή σταθεροποίησης 800$m^3$ και μια λιμνοδεξαμενή αποθήκευσης των βροχοστραγγισμάτων 3.300$m^3$ για να συγκρατεί τα βροχοστραγγίσματα σε περιπτώσεις καταρρακτωδών βροχοπτώσεων. Οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από HDPE η οποία εξασφαλίζει πλήρη στεγανοποίηση.




*Εικόνα 6.1 Διάγραμμα ροής της εγκατάστασης προεπεξεργασίας στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Λάρισας* [10]

Τα επεξεργασμένα στραγγίσματα είτε επανακυκλοφορούνται με ειδικό αντλιοστάσιο στο απορριμματικό ανάγλυφο της κυψέλης είτε όταν επέρχεται κορεσμός, σε υγρασία του απορριμματικού ανάγλυφου λόγω των βροχοπτώσεων διατίθενται στον βιολογικό καθαρισμό της πόλης της Λάρισας μεταφερόμενα με βυτιοφόρο, με την απαίτηση να έχουν φορτίο μικρότερο από 150kgr BOD ανά ημέρα.

Στα πέντε έτη παρακολούθησης του ΧΥΤΑ (1998-2002) παρατηρήθηκε σταδιακή μείωση του BOD των εισερχόμενων στραγγισμάτων από 7650 σε 2660 mg/L και μείωση της αναλογίας BOD/COD από 0,48 σε 0,24. [10]

Γενικά φαίνεται πως η επανακυκλοφορία από μόνη της δεν μπορεί να αποτελέσει μια τελική λύση για τη διαχείριση των στραγγισμάτων. Καθώς λοιπόν, η τελική εκροή είναι δυνατόν να μην ικανοποιεί τα όρια τελικής διάθεσης, ένα επιπλέον βήμα επεξεργασίας πρέπει να λαμβάνει χώρα όταν η απευθείας απόρριψη στο περιβάλλον μελετάται. Όσον αφορά στην ελληνική νομοθεσία, τονίζεται πως η επανακυκοφορία στραγγισμάτων στο απορριμμάτικό ανάγλυφο δεν επιτρέπεται εφόσον δεν πρόκειται για προεπεξεργασμένα στραγγίσματα που θα χρησιμοποιηθούν μόνο για ελεγχόμενη διατήρηση της επιθυμητής υγρασίας στο ΧΥΤΑ. [19]

### 6.2.3 Άρδευση

Η ιδέα του ψεκασμού συγκεκριμένων χώρων με στραγγίσματα βασίζεται στην ιδέα της χρήσης γειτονικών περιοχών ως φυσικό μέσο για βιολογική και φυσικοχημική επεξεργασία. Αυτή η μέθοδος προτείνεται από κάποιους ερευνητές αλλά δεν είναι λίγοι εκείνοι που την θεωρούν μη αποδεκτή και την αντιμετωπίζουν σαν επιβλαβή πρακτική. Ως κύριος λόγος προβάλλεται οι υψηλές συγκεντρώσεις των τοξικών στοιχείων που υπάρχουν στα στραγγίσματα και είναι δυνατόν να καταστήσουν το έδαφος ακατάλληλο για γεωργική χρήση και ενδεχομένως να προκαλέσουν ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων νερών.

Όμως, σύμφωνα με τον Saint Fort, η άρδευση με στραγγίσματα μπορεί να προσφέρει μια οικονομική και εφαρμόσιμη εναλλακτική επιλογή, με την προϋπόθεση όμως ότι υπάρχουν κατάλληλες εκτάσεις και είναι διαθέσιμες. Ωστόσο, πριν την άρδευση πρέπει να αναλύεται η επίδραση κάθε συστατικού των στραγγισμάτων στο έδαφος.
Η άρδευση γειτονικών περιοχών ή ακόμα και ενός χώρου ταφής απορριμμάτων κατά την περίοδο της αποκατάστασης, έχει αποδειχθεί επιτυχής και χαμηλού κόστους μέθοδος στο Ηνωμένο Βασίλειο. Υδραυλικά φορτία των 56 $m^3$/ha/d έχει βρεθεί ότι είναι αποδεκτά, ενώ για φορτία 45 $m^3$/ha/d έχει διαπιστωθεί μείωση του BOD έως και 95%. Από την βιβλιογραφία γίνεται φανερό ότι η άρδευση είναι κατάλληλη από χαμηλής ισχύος στραγγίσματα και δεν μπορεί να εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών όπου ο υπερψεκασμός μπορεί να οδηγήσει σε πλημμύρες.
Όταν υπάρχει φυτική κάλυψη, μπορεί να επιτευχθούν περαιτέρω μειώσεις του όγκου εξαιτίας της λήψης από τα φυτά και της διαπνοής. Έχει βρεθεί επίσης ότι κατά τους καλοκαιρινούς μήνες είναι δυνατή η εξάτμιση και διαπνοή σημαντικών ποσοτήτων στραγγισμάτων με το ψεκασμό τους σε διάφορες εκτάσεις λειμώνων. Ωστόσο, τα στραγγίσματα μεγάλης ισχύος, ακόμα και σε μικρές τιμές ροής, είναι δυνατόν να προκαλέσουν μεγάλες καταστροφές στη βλάστηση. Όμως, οι Gordon et al. υποστηρίζουν ότι η άρδευση σε δενδρύλλια κόκκινου σφένδαμου (red maple), με στράγγισμα σε επίπεδα ανάλογα με την απαιτούμενη εξατμισοδιαπνοή των φυτών, κατέληξε σε μερικά ανεπιθύμητα αποτελέσματα μικρής διάρκειας, ενώ η αύξηση των ρυθμών άρδευσης ήταν δυνατόν να προκαλέσει 100% καταστροφή.[35] Άλλες μελέτες αναφέρουν ότι η άρδευση με στραγγίσματα αύξησε την παραγωγή της φυτικής βιομάζας σημαντικά, αλλά αυτό εξαρτήθηκε από την ποιότητα και την ποσότητα των στραγγισμάτων, καθώς και από τον τύπο του φυτού. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι φυτείες που εναλλάσσονται σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να εγκατασταθούν επιτυχώς σε ΧΥΤΑ που βρίσκεται σε λειτουργία με σκοπό τον έλεγχο του όγκου των στραγγισμάτων με την εξατμισοδιαπνοή. Έχει επίσης δειχθεί πως εάν οι ρυθμοί που διατίθενται τα στραγγίσματα, δεν ρυθμίζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εξατμισοδιαπνοής και τις υδατικές κατακρημνίσεις, θα υπάρξει αναπόφευκτα υπερβολική ροή νερού στο έδαφος και φτωχός αερισμός του εδάφους που τελικά θα οδηγήσει στον θάνατο του φυτικού πληθυσμού. Παράλληλα, στην περίπτωση που οι μετρήσεις δείχνουν την πιθανότητα ανάπτυξης ιζήματος, η προεπεξεργασία θεωρείται απαραίτητη. Αυτό πιθανόν να αποτελέσει πρόβλημα κατά τη διάρκεια των χειμερινών περιόδων όπου μεγάλοι όγκοι στραγγισμάτων πρέπει να επεξεργαστούν παρουσία χαμηλών ρυθμών εξατμισοδιαπνοής και χαμηλής μικροβιακής δράσης. Οι Gordon et al. αναφέρουν επίσης ότι η άρδευση των στραγγισμάτων έχει αρνητικές επιδράσεις στην μικροβιακή βιομάζα του εδάφους. Η εφαρμογή των στραγγισμάτων σε δασικά εδάφη μπορεί να προκαλέσει μεταβολή στη

διαφοροποίηση των ειδών της μικροβιακής κοινότητας πιθανά εξαιτίας των αλλαγών στη μικροβιακή αποικοδόμηση και στις διαδικασίες του κύκλου των θρεπτικών.
Επιπλέον, η παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων μπορεί να οδηγήσει σε φυτοτοξικότητα στη βλάστηση και καταστροφή αυτής αφού η ενεργή απορρόφηση τοξικών μετάλλων όπως είναι ο μόλυβδος, το κάδμιο και το νικέλιο δεν αποφεύγεται από τα φυτά. Έτσι, πιθανόν να χρειάζεται να λάβει χώρα προεπεξεργασία πριν την απόθεση. Σημαντική σημασία, πριν το ψεκασμό στο έδαφος, θα πρέπει να δίνεται επίσης σε παράγοντες όπως ο τύπος εδάφους, η παρουσία κατιόντων, η περιεκτικότητα σε υγρασία, η παρουσία οργανικού υλικού, το βάθος του υπόγειου νερού, και η παρουσία θρεπτικών. Τα κυριότερα μειονεκτήματα είναι οι μεγάλες εκτάσεις που χρειάζονται και οι ελάχιστες γνώσεις των μακροχρόνιων επιδράσεων της εφαρμογής των στραγγισμάτων στο έδαφος. Μειονέκτημα επίσης αποτελεί η πιθανή παραγωγή οσμών στον γειτονικό χώρο της περιοχής άρδευσης. [35]

## 6.3 Φυσική και Χημική Επεξεργασία

### 6.3.1 Χημική εξάτμιση.

Σκοπός είναι να συγκεντρωθεί η ρυπασμένη ουσία σε μια στερεή φάση και να ληφθεί ένα υγρό ρεύμα, αρκετά καθαρό, έπειτα από συμπύκνωση ώστε να μπορεί να διατεθεί χωρίς πρόβλημα. [23]
Έρευνες σχετικά με την εξάτμιση έχουν δείξει ότι μπορεί να υπάρξουν θετικά αποτελέσματα στα στραγγίσματα. Έχει βρεθεί ότι μια απόσταξη δύο σταδίων, με υψηλό pH που ακολουθείται από μια όξινη κατεργασία, είχε σαν αποτέλεσμα χαμηλές συγκεντρώσεις οργανικών και μετάλλων στη τελευταία απόσταξη. Ωστόσο, η επιλογή αυτή αποτελεί μια πολύ ακριβή μέθοδο επεξεργασίας.

### 6.3.2 Χημική Οξείδωση

Σκοπός της χημικής οξείδωσης είναι η μετατροπή των ρύπων των στραγγισμάτων σε αδιάλυτους, ή η αεριοποίησή τους, ή η σταθεροποίησή τους σε σχετικά αβλαβή συστατικά. Αν και υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία σχετικά με τη χημική οξείδωση των στραγγισμάτων, αρκετά συστήματα έχουν μελετηθεί. Αυτά περιλαμβάνουν την υγρή οξείδωση, την επεξεργασία με όζον, και την επεξεργασία με υπεροξείδιο.
Οι Ho et al. μελέτησαν τις επιδράσεις του χλωρίου, του όζοντος του $Ca(ClO)_2$ και του $KMnO_4$. [26] Η μείωση του COD στα στραγγίσματα και για τα τέσσερα χημικά, ακόμα και σε μεγάλες δόσεις, ήταν μικρότερη του 50%. Ωστόσο, επιτυγχανόταν εξαιρετική μείωση του σιδήρου και των χρωμάτων, αν και με την επεξεργασία του υποχλωριώδους ασβεστίου βρέθηκε ότι η σκληρότητα του τελικού διαλύματος γενικά

αυξάνεται. Με το χλώριο, διαπιστώθηκαν πολύ χαμηλές απομακρύνσεις του COD περίπου 20 με 30%, ενώ σε υψηλότερες δόσεις χλωρίου άρχισαν να δημιουργούνται νέα προβλήματα λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης των χλωριούχων. Ομοίως, βρέθηκε ότι με το υπεροξείδιο του υδρογόνου (30% w/w) επιτυγχανόταν μια μείωση περίπου 35%, με μόνο το 20% της αμμωνίας να οξειδώνεται. Έτσι θεωρείται πως το υπεροξείδιο του υδρογόνου είναι κατάλληλο για επεξεργασία μικρών όγκων αραιωμένων στραγγισμάτων και πρέπει να διαχειρίζεται με προσοχή. Ένα πλεονέκτημα είναι ότι η απομάκρυνση του υδρόθειου μπορεί να επηρεαστεί θετικά με την προσθήκη 1,5 μερών $H_2O_2$ σε 1 μέρος υδρόθειου σε pH >8,5 και χρόνο επαφής 30 έως 60 λεπτά. Θεωρείται λοιπόν το υπεροξείδιο του υδρογόνου αρχικά σαν επιλογή 'εξυγίανσης' και προτείνεται η χρήση του τόσο για τον έλεγχο όσο και για την επεξεργασία της δυσοσμίας.

Έχει αναφερθεί επίσης, ότι για την προεπεξεργασία των στραγγισμάτων, οξειδωτικά όπως το $H_2O_2$ και το $KMnO_4$, είναι δυνατόν να μειώσουν τις συγκεντρώσεις νικελίου, αλλά τα στραγγίσματα τελικώς πιθανόν να δημιουργούν αφρούς. Υπερβολικό άφρισμα, ειδικά σε πλήρους κλίμακα επεξεργασία, είναι ανεπιθύμητη. Αναφέρεται επίσης, πως εκτός της δημιουργίας αφρών, η επεξεργασία με το υπερμαγγανικό κάλιο είναι δυνατόν να παράγει υψηλά ποσοστά λάσπης.

Τόσο το όζον όσο και το υπεροξείδιο του υδρογόνου προτιμώνται σε σχέση με τη χλωρίωση για την οξείδωση των στραγγισμάτων αφού δεν παράγονται χλωριωμένα παραπροϊόντα. Τα χημικά οξειδωτικά είναι τα πιο ακριβά για χρήση γι' αυτό και είναι οικονομικά αποδεκτά μόνο για στραγγίσματα χαμηλής αναλογίας BOD/COD και χαμηλές συγκεντρώσεις οργανικών. Η χρήση αλογονομένων οξειδωτικών έχει αναφερθεί ότι παράγει υψηλής τοξικότητας αλογονομένες οργανικές ενώσεις

### 6.3.3 Χημική Κατακρήμνιση

Η μέθοδος στηρίζεται στη συσσωμάτωση και κροκίδωση των κολλοειδών σωματιδίων που υπάρχουν αρχικά ή δημιουργούνται κατά την επεξεργασία.

Αρκετές μέθοδοι έχουν δοκιμαστεί για τη χημική καθίζηση των συστατικών των στραγγισμάτων και περιλαμβάνουν επεξεργασία με υδροξείδιο του ασβεστίου $Ca(OH)_2$, θειικό αργίλιο $Al_2(SO_4)$, χλωριούχο σίδηρο $FeCI_3$, θειούχο νάτριο $Na_2S$ και θειικό σίδηρο $FeSO_4$. Κατά τη διάρκεια της κατακρήμνισης κύριος στόχος είναι η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων καθώς και ενός μέρους των οργανικών. Οι υψηλές συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων μπορεί να αναστείλουν την βιολογική δράση ή να υπερβούν τα απαιτούμενα όρια και γι' αυτό το As, Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, Ag, Hg, Cr, και Fe θα πρέπει να βρίσκονται υπό συνεχή παρακολούθηση.

Οι διεργασίες κροκκίδωσης και διήθησης χρησιμοποιούνται επίσης για την απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών, της σταθεροποιημένης λάσπης ή των ιζημάτων των στραγγισμάτων. Η απομάκρυνση των στερεών μειώνει το οργανικό

φορτίο σε ένα βιολογικό σύστημα. Επαρκής χρόνος είναι αναγκαίο να δοθεί ώστε να λαμβάνει χώρα καθίζηση των στερεών, ενώ κρίνεται σημαντική και η προσθήκη κροκιδωτικών (στυπτηρίας ή ηλεκτρολυτών μεγάλου μοριακού βάρους), που οδηγούν στο σχηματισμό συσσωματωμάτων για την επιτάχυνση της διαδικασίας. Όσον αφορά τη μείωση του COD, η κατακρήμνιση δεν είναι αποτελεσματική και έχουν αναφερθεί τιμές κάτω από 30% και γι' αυτό δεν θεωρείται επαρκής μέθοδος επεξεργασίας από μόνη της. Ωστόσο διαπιστώνονται καλές απομακρύνσεις στα αιωρούμενα στερεά, το $NH_4^+$ και στα βαρέα κατιόντα.

Οι μηχανισμοί με τους οποίους δρουν τα κυριότερα χημικά μέσα κατά την κροκίδωση και χημική κατακρήμνιση περιγράφονται αναλυτικά ως εξής.

*Θεεικό αργίλιο*

Με την προσθήκη θεεικού αργιλίου γίνεται αρχικά διάλυση και ιονισμός του κατά την αντίδραση:

$$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O \leftrightarrow 2Al^{3+} + 3SO_4^{2-} + 18H_2O$$

Τα διαθέσιμα $Al^{3+}$ εξουδετερώνουν με το θετικό τους φορτίο, το αντίστοιχο αρνητικό φορτίο των κολλοειδών. Επιπλέον, τα ανιόντα αργιλίου αντιδρούν με τα υδροξυλιόντα του νερού κατά την αντίδραση:

$$2Al^{3+} + 6OH^- \leftrightarrow Al_2O_3 \cdot xH_2O\downarrow$$

Επίσης το θεεικό αργίλιο μπορεί να αντιδράσει με τα όξινα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου (και μαγνησίου) κατά την αντίδραση:

$$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O + 3Ca(HCO_3)_2 \leftrightarrow 3CaSO_4 + 2Al(OH)_3\downarrow + 6CO_2 + 18H_2O$$

Τα σχηματιζόμενα αδιάλυτα ιζήματα παρασύρουν τα αιωρούμενα σωματίδια (συσσωμάτωση με σάρωση)

Κατά παρόμοιο τρόπο με το θειικό αργίλιο δρα και ο θειικός σίδηρος. Αντιδρά με τα όξινα ανθρακικά άλατα του ασβεστίου κατά την αντίδραση

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \leftrightarrow 3CaSO_4 + 2Fe(OH)_3\downarrow + 6CO_2$$

Ενώ με υδράσβεστο

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 \leftrightarrow 3CaSO_4 + 2Fe(OH)_3\downarrow + 6CO_2$$

Το $Fe(OH)_3\downarrow$ συμπαρασύρει τα αιωρούμενα κολλοειδή. [8]

Εκτεταμένη βιβλιογραφία υπάρχει για την χημική κατακρήμνιση ως τεχνική προεπεξεργασίας των στραγγισμάτων. Η αύξηση του pH ως αποτέλεσμα της προσθήκης υδροξειδίου του ασβεστίου, οδηγεί στη θρόμβωση και στο σχηματισμό αδιάλυτων μεταλλικών υδροξειδίων και ανθρακικού ασβεστίου. Η μάζα που δημιουργείται βοηθά στην καθίζηση του κολλοειδούς υλικού. Η μέθοδος με υδροξείδιο του ασβεστίου με χρήση έως και 1000 mg/L $Ca(OH)_2$, όταν συνδυάζεται με υπερμαγγανικό κάλιο επιτυγχάνει μια ουσιαστική μείωση περίπου 60% στο COD. Η αποτελεσματικότητα της κατακρήμνισης των μετάλλων όταν χρησιμοποιείται υδροξείδιο του ασβεστίου εξαρτάται από την ικανότητα διαχωρισμού του ιζήματος από τα υγρά απόβλητα. Η κατακρήμνιση όταν συνδυάζεται με τη διήθηση μέσω

άμμου έχει αναφερθεί ότι επιτυγχάνει μείωση των μετάλλων έως και 60%. Η χρήση στάχτης έχει αναφερθεί σαν μέθοδος προεπεξεργασίας με εξαιρετικά αποτελέσματα στην απομάκρυνση των μετάλλων και περίπου 33% μείωση του COD.
Η χρήση του θειικού αργιλίου στην καθίζηση έχει μελετηθεί σε εργαστηριακή και σε πραγματική κλίμακα. Το θειικό αργιλίο συνδυασμένο με ηλεκτρολύτη μεγάλου μοριακού βάρους έδωσε απομάκρυνση COD περίπου 31% ενώ ο συνδυασμός με υδροξείδιο του ασβεστίου είχε σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση 39% COD.
Η κατακρήμνιση των βαρέων μετάλλων είναι μια πολύπλοκη χημική διεργασία με αλληλεπιδράσεις ιόντων και ηλεκτρολυτών που προκαλούν μεγάλες αποκλίσεις από τις θεωρητικές προβλέψεις.

### 6.3.4 Προσρόφηση σε Ενεργό Άνθρακα

Η προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα είναι μια πολύ καλά ανεπτυγμένη μέθοδος επεξεργασίας, με αναφορές για υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης σε πολλές ανόργανες ενώσεις.
Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της προσρόφησης είναι αυτά των Langmuir και Freundlich με πιο χρησιμοποιήσιμο το δεύτερο. Η σχέση που περιγράφει τη διαδικασία είναι γνωστή σαν ισόθερμη Freundlich

$$X/M= KC^{1/n} \quad (\text{εξ. } 6.1)$$

όπου
X: η μάζα της προσροφημένης ουσίας που προσροφάται στην επιφάνεια του προσροφητή σε συνθήκες ισορροπίας και σταθερής θερμοκρασίας
M: η μάζα του προσροφητή σε συνθήκες ισορροπίας και σταθερής θερμοκρασίας
C: η μάζα της προσροφημένης ουσίας που βρίσκεται στο διάλυμα
K: η σταθερά του Freundlich, ένδειξη της ποσότητας που δύναται να προσροφηθεί
1/n: σταθερά, ένδειξη της ενέργειας προσρόφησης
Οι παράμετροι της εξίσωσης του Freundlich ποσοτικοποιήθηκαν από τον Pohland το 1976 οπότε και πρότεινε την παρακάτω σχέση που αφορά τα στραγγίσματα

$$X/M= 1,78*10^{-4}\ C^{1,57} \quad (\text{εξ. } 6.2)$$

Το 1989 ο Ehrig πρότεινε μια διαφορετική εξίσωση

$$X/M= 1,32*10^{-4}\ C^{3,72} \quad (\text{εξ. } 6.3)$$

και στις δυο περιπτώσεις C είναι το εναπομείναν COD (mg/L) [23]
Η προσρόφηση σε άνθρακα είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος φυσικοχημικός τρόπος απομάκρυνσης των οργανικών από τα στραγγίσματα. Το κύριο μειονέκτημα είναι η ανάγκη για συχνή ανανέωση των στηλών ενεργού άνθρακα ή μιας σκόνης άνθρακα με ισοδύναμα υψηλή κατανάλωση. Ο χρησιμοποιημένος άνθρακας ανανεώνεται με ρεύματα θερμού αέρα από τα προσροφημένα οργανικά και την αποτέφρωση που υπόκεινται. Η προσρόφηση μπορεί επίσης να συνδυαστεί με φιλτράρισμα σαν προεπεξεργασία για την αποφυγή έμφραξης των στρωμάτων του ενεργού άνθρακα.

Η προσροφητική δυναμικότητα εξαρτάται από τις αποθηκευτικές συνθήκες, το μέγεθος των πόρων, την επιφάνεια και το pH του διαλύματος. Τα λειτουργικά και ενεργειακά έξοδα είναι υψηλά και κάνουν αυτή τη μέθοδο οικονομικά εφαρμόσιμη μόνο για την απομάκρυνση υπολειμματικών οργανικών κυρίως όταν τα ολικά διαλυμένα στερεά στο διάλυμα είναι λιγότερα από 200 mg/L. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συνηθέστερα για την επεξεργασία στραγγισμάτων από παλιούς χώρους ταφής ή ως τριτοβάθμια επεξεργασία της τελικής εκροής από βιολογικές μονάδες όπου μπορεί να επιτευχθεί τελική μείωση του COD κατά 85%. Πρόκειται για μια απλή και αποτελεσματική μέθοδο με χαμηλές απαιτήσεις αρχικού κεφαλαίου.

### 6.3.5 Ακτινοβολία γ

Η διάσπαση των επίμονων συστατικών των στραγγισμάτων με χρήση ακτινοβολίας που

επιφέρει οξείδωση κάτω από αερόβιες συνθήκες, έχει μελετηθεί. Βρέθηκε ότι ο ολικός οργανικός άνθρακας (TOC) μπορεί να μειωθεί με τελική μετατροπή του σε διοξείδιο του άνθρακα. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της επεξεργασίας με ακτινοβολία είναι η ικανότητα διάσπασης των περισσότερων οργανικών, χωρίς να παράγεται λάσπη. Για υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών, απαιτούνται αντίστοιχα υψηλές δόσεις ακτινοβολίας, γι' αυτό θεωρείται και μια αρκετά ακριβή επιλογή επεξεργασίας. Η μέθοδος με συνδυασμό ακτινοβολίας γ (79 kGy σε pH=3) και κατακρήμνισης με χλωριούχο σίδηρο υπό αναερόβιες συνθήκες έχει αναφερθεί ότι έχει μικρότερο κόστος και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, με μείωση περίπου 80% στα οργανικά.[35]

### 6.3.6 Αντίστροφη Όσμωση

Η αντίστροφη όσμωση επιτυγχάνει διαχωρισμό και απομάκρυνση των ρύπων με τη χρήση ειδικών ημιπερατών μεμβρανών οι οποίες πρακτικά δεν επιτρέπουν τη διέλευση των διαλυμένων συστατικών αλλά μόνο του διαλύτη (νερό). Η τροφοδοσία ρέει παράλληλα προς τη μεμβράνη ενώ το καθαρό νερό (διήθημα) περνά κάθετα μέσα από την μεμβράνη.

Το φαινόμενο της όσμωσης παρατηρείται όταν εκατέρωθεν μιας ημιπερατής μεμβράνης υπάρχουν διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων, οπότε εμφανίζεται τάση εξισορρόπησης των συγκεντρώσεων που μπορεί να πραγματοποιηθεί με το πέρασμα διαλύτη από το αραιότερο προς το πυκνότερο διάλυμα. Αντίστροφα για την απόληψη του καθαρού νερού από διάλυμα θα πρέπει να ασκηθεί πίεση στο διάλυμα με την μεγαλύτερη περιεκτικότητα, η οποία θα πρέπει να υπερνικά την οσμωτική πίεση. Το καθαρό νερό που απομακρύνεται από το διάλυμα δίνεται από τη σχέση :

$$Fv = A \cdot (\Delta P - \Delta \Pi)$$

όπου Fv: ο ρυθμός ροής του νερού σε $g/cm^2$ sec

Α: η διαπερατότητα της μεμβράνης σε νερό ($g/cm^2$ sec atm)

ΔΡ: η εφαρμοζόμενη διαφορά πίεσης (atm)

ΔΠ: η διαφορά οσμωτικής πίεσης (atm) εκατέρωθεν της μεμβράνης

Η ροή των συστατικών μέσω της μεμβράνης δίνεται από τη σχέση

$$F\sigma = B \cdot (C_1 - C_2)$$

όπου Fσ: ο ρυθμός ροής του συστατικού σε $g/cm^2$ sec

Β: η διαπερατότητα της μεμβράνης στο συγκεκριμένο συστατικό (cm /sec )

$C_1$ και $C_2$ οι συγκεντρώσεις του συστατικού εκατέρωθεν της μεμβράνης.

Με την αύξηση της πίεσης επιτυγχάνεται αύξηση της απόληψης καθαρού νερού και δεν επηρεάζεται η ροή των συστατικών που εξαρτάται από τη διαφορά περιεκτικοτήτων στην τροφοδοσία και το προϊόν. Με τον τρόπο αυτό το διάλυμα απαλλάσσεται από τα συστατικά του σε ποσοστό απόρριψης που φτάνει και το 100% και ορίζεται ως

$$\text{Απόρριψη} = 100 \cdot \frac{(\text{περιεκτικότητα τροφοδοσίας}) - (\text{περιεκτικότητα προϊόντος})}{(\text{περιεκτικότητα τροφοδοσίας})}$$

[16]

Η τιμή των διαλυμένων συστατικών στα στραγγίσματα κυμαίνεται από 2-15g/L. Από αυτά το ποσοστό των οργανικών συστατικών θεωρείται πως κυμαίνεται από 0,1-0,3g/L συμπεριλαμβανομένων των αμμωνιακών με τιμές από 0,3-2g/L.Οι σύγχρονες μεμβράνες αντίστροφης όσμωσης έχουν τη δυνατότητα να συγκρατούν τόσο τους οργανικούς όσο και τους ανόργανους ρύπους με ρυθμούς απόρριψης που φτάνουν το 98-99%. Οι διαλυμένοι οργανικοί και ανόργανοι ρύποι συγκεντρώνονται στο συμπύκνωμα ενώ το καθαρό νερό συμπιέζεται μέσω της μεμβράνης. Με τη διαδικασία αντίστροφης ώσμωσης το επεξεργασμένο ρεύμα νερού που δημιουργείται περιέχει μόνο πολύ χαμηλά επίπεδα ρύπων. Η εκροή βρίσκεται πολύ κοντά στα όρια του πόσιμου νερού αφού ο κύριος όγκος των στραγγισμάτων προέρχεται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

Καθώς η μεμβράνη της αντίστροφης όσμωσης λειτουργεί σαν ένα καλά καθορισμένο φράγμα η διαδικασία καθαρισμού μπορεί να αυτοελέγχεται συνεχώς και με ένα υψηλό βαθμό ασφαλείας από μια απλή και ακριβή μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Επιπλέον, η διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης προσφέρει υψηλή λειτουργική σταθερότητα καθώς η έναρξη και διακοπή λειτουργίας αυτής πραγματοποιείται μέσα σε μερικά λεπτά. Η διαδικασία επίσης είναι σε διαρκή ‘ετοιμότητα’ καθώς αρκεί μόνο η παροχή πίεσης μέσω αντλιών για την ενεργοποίησή της.

Παράλληλα, εξαιτίας των εξαιρετικών αποδόσεων απομάκρυνσης η διαδικασία μπορεί να έχει πολύ καλά αποτελέσματα ακόμα και σε περιπτώσεις έντονων διακυμάνσεων των ρυπαντικών φορτίων. Η ίδια προσαρμοστικότητα στην

επεξεργασία επιτυγχάνεται και στην περίπτωση μεγάλης διακύμανσης του εισερχόμενου όγκου των στραγγισμάτων. Ο σχεδιασμός των μεμβρανών γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο βαθμός καθαρισμού να μπορεί να ρυθμιστεί προσθέτοντας ή αφαιρώντας επιφάνεια μεμβράνης.

Οι Krug και McDougall σε διαδικασία μικροδιήθησης αντίστροφης όσμωσης που εφάρμοσαν, διαπίστωσαν 95% απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων. Παρατηρήθηκε επίσης ότι η επεξεργασία των στραγγισμάτων με αντίστροφη όσμωση ήταν η πιο αποτελεσματική φυσικοχημική μέθοδος για την απομάκρυνση του COD. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας στη Γερμανία σχεδιάζονται πλέον με μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης. Γενικά με τη διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης έχει αναφερθεί ότι παρατηρείται απομάκρυνση των οργανικών και των ολικών στερεών έως και 97%. Μέταλλα με συγκεντρώσεις μέχρι 860 μg/L μειώθηκαν κάτω από τα όρια ανίχνευσης και το διήθημα ήταν εξαιρετικά υψηλής ποιότητας. Μια βέλτιστη πίεση λειτουργίας της αντίστροφης όσμωσης βρέθηκε ότι είναι 250 psi σε πιλοτική κλίμακα για μια εγκατάσταση ικανή να επεξεργαστεί 10.000 gallons ανά ημέρα με το συμπύκνωμα να ανακυκλώνεται πίσω στο χώρο ταφής. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι που έγιναν στο διήθημα για συγκεντρώσεις As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni και Zn έδειξαν τιμές κάτω από τα όρια ανίχνευσης. Βρέθηκε ότι καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονταν όταν τα στραγγίσματα επεξεργαζόταν αμέσως μετά την συλλογή και πριν οποιαδήποτε βιολογική δράση λάβει χώρα στις δεξαμενές αποθήκευσης, διαφορετικά, αναπτύσσονταν οσμές, εξαιτίας του υδρόθειου, στο διήθημα. Επίσης, η δημιουργία αερίου σε παλιότερα στραγγίσματα ως αποτέλεσμα της βιολογικής δράσης παρουσίασε προβλήματα στην έναρξη της διαδικασίας της αντίστροφης όσμωσης. Αυτό το πρόβλημα μπορεί επίσης να εξαλειφθεί με την επεξεργασία των στραγγισμάτων αμέσως μετά τη συλλογή. Σε μία άλλη έρευνα πιλοτικής και πραγματικής κλίμακας, βρέθηκε ότι το 92% της εισροής μετατράπηκε σε διήθημα και απομακρύνσεις 95 έως 99% των οργανικών, αζώτου, φωσφόρου και μετάλλων επιτεύχθηκαν. Πολλοί είναι οι μελετητές που προτείνουν μια κατάλληλη προεπεξεργασία πριν από τη διεργασία της αντίστροφης όσμωσης η οποία θα απέτρεπε την έμφραξη της μεμβράνης. Η παράταση γενικά του χρόνου ζωής της μεμβράνης μπορεί να επιτευχθεί με εξουδετέρωση των αιωρούμενων στερεών και του κολλοειδούς υλικού. Το συμπύκνωμα όπου συγκεντρώνονται όλα τα συστατικά των στραγγισμάτων και αποτελεί συνήθως το υπόλοιπο 10-30% της αρχικής τροφοδοσίας, μπορεί να υποστεί διάφορους εναλλακτικούς τρόπους διάθεσης, όπως

i. καύση σε κατάλληλα εξοπλισμένα συστήματα για διάθεση υψηλά μολυσμένων ρευστών
ii. στερεοποίηση με διάφορα συνδετικά υλικά και επακόλουθη απόθεση στο ΧΥΤΑ

iii. ελεγχόμενη διήθηση εντός του ΧΥΤΑ, με στόχο την βελτίωση της συμπεριφοράς του ως βιο-αντιδραστήρα .

Συχνότερα επιλέγεται η ελεγχόμενη διήθηση στο ΧΥΤΑ καθώς εμφανίζει πλεονεκτήματα από ενεργειακή (π.χ. η οργανική ύλη δεν αποπλένεται από το ΧΥΤΑ, και παραμένει εκεί συμβάλλοντας στην παραγωγή βιοαερίου), οικολογική (οι ρυπαντές επιστρέφουν στην πηγή) αλλά και οικονομική σκοπιά (έχει το χαμηλότερο κόστος). Αν και φαίνεται πως η ελεγχόμενη διήθηση στο ΧΥΤΑ μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της περιεκτικότητας των ρύπων των στραγγισμάτων, στην πράξη δεν έχει διαπιστωθεί κάτι τέτοιο αλλά σταθεροποίηση της περιεκτικότητας των ρύπων που αποδίδεται στους εξής λόγους

- ο ΧΥΤΑ λειτουργεί ως βιοαντιδραστήρας, ώστε επιφέρει βιοχημική αποικοδόμηση στο συμπύκνωμα.
- οι μικροοργανισμοί κατά τον μεταβολισμό των απορριμμάτων προκαλούν αποσύνθεση ανόργανης και οργανικής ύλης με μορφή επικαθήσεων (βακτηριογένεση) που αποτελούνται από οξείδια, σουλφίδια και οργανικές ενώσεις.
- τα βαρέα μέταλλα συγκρατούνται με προσρόφηση στις επιφάνειες των περιεχομένων του ΧΥΤΑ, όπως στα αργιλικά ορυκτά ή στις χουμικές ενώσεις.
- συμβαίνουν διεργασίες κρυστάλλωσης, και δημιουργίας ορυκτών, κατά τις οποίες σχηματίζονται και επικάθονται στο ΧΥΤΑ αδιάλυτα άλατα.
- λαμβάνουν χώρα χημικές ανόργανες διεργασίες, κατά τις οποίες δημιουργούνται ιζήματα ανθρακικών, θειούχων και θειικών ενώσεων.

Η επιτυχής λειτουργία της επεξεργασίας των στραγγισμάτων με την μέθοδο της αντίστροφης όσμωσης είναι εμφανής στο ΧΥΤΑ κοντά στην πόλη Lubeck της Γερμανίας. Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει την απόδοση αυτού του συστήματος:

| **Παράμετρος** | **Τιμή εισροής** | **Τιμή 1ης εκροής** | **Τιμή 2ης εκροής** | **Απόδοση%** |
|---|---|---|---|---|
| pH | 7,7 | 6,8 | 6,6 | |
| Αγωγιμότητα (μS/cm) | 17250 | 382 | 382 | 99,9 |
| COD (mg/L) | 1797 | <15 | <15 | >99,2 |
| Αμμώνιο (mg/L) | 366 | 9,8 | 0,66 | 99,9 |
| Χλωριούχα (mg/L) | 2830 | 48,4 | 1,9 | 99,9 |
| Νάτριο (mg/L) | 4180 | 55,9 | 55,9 | 99,9 |
| Β. μέταλλα (mg/L) | 0,25 | <0,005 | <0,005 | >98 |

*Πίνακας 6.1 Απόδοση συστήματος με μεμβράνες στο ΧΥΤΑ Lubeck* [32]

Η εγκατάσταση αυτή έχει δυνατότητα επεξεργασίας $36m^3$ στραγγισμάτα ανά ώρα και χρησιμοποιεί δυο στάδια επεξεργασίας. Η ροή διείσδυσης στις μεμβράνες είναι περίπου $15L/m^2/h$. Η εγκατάσταση τέθηκε σε λειτουργία το 1989 ενώ οι μεμβράνες αντικαταστάθηκαν το 1993 μετά από 3 χρόνια λειτουργίας καθώς διαπιστώθηκε μείωση της ροής διείσδυσης. Η ανάπτυξη των τεχνολογιών των μεμβρανών οδήγησε στην κατασκευή συστημάτων αντίστροφης όσμωσης υψηλής πίεσης (120bar) και επιπλέον αναπτύχθηκαν διαδικασίες ελεγχόμενης κατακρήμνισης για την περίπτωση που υπάρχει συσσώρευση αλάτων στην μεμβράνη, έτσι κρύσταλλοι $CaSO_4$ για παράδειγμα, κατακρημνίζονται και καταλήγουν σε μια δεξαμενή σαν λάσπη η οποία τελικά επιστρέφει στο ΧΥΤΑ.

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία με την νανοδιήθηση έχουν διάμετρο πόρων περίπου ίση με ένα νανόμετρο και έχουν ως αποτέλεσμα την μερική συγκράτηση των αλάτων.

Εξαιρετικά ενδιαφέροντα είναι και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από συνδυασμό νανοδιήθησης και υψηλής πίεσης αντίστροφη όσμωση. Η νανοδιήθηση επιτρέπει το διαχωρισμό των διαλυμένων στο νερό υλικών σε μονοσθενή και δισθενή καθώς επιτρέπουν τη διέλευση ενός μεγαλύτερου ποσοστού μονοσθενών ιόντων αλάτων από ότι δισθενών ή τρισθενών αλάτων. Η πολύ μεγάλη απόδοση των μεμβρανών στα θειικά ιόντα και στα διαλυμένα οργανικά και η πολύ μικρή απόρριψη χλωρίου και νατρίου μειώνει τον όγκο του συμπυκνώματος. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα από ΧΥΤΑ στη Γερμανία όπου χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός νανοδιήθησης και υψηλής πίεσης αντίστροφη όσμωση.

| **Παράμετρος** | **Τιμή εισροής** | **Τιμή εκροής** | **Απόδοση%** |
|---|---|---|---|
| pH | 6,23 | 6,31 | |
| Αγωγιμότητα (μS/cm) | 120 | 100 | 20 |
| COD (mg/L) | 6400 | 600 | >98,63 |
| Αμμώνιο (mg/L) | 2260 | 1020 | 54,87 |
| Χλωριούχα (mg/L) | 29780 | 35629 | -19,64 |
| Νάτριο (mg/L) | 41000 | 20390 | 50,27 |
| Ασβέστιο (mg/L) | 243 | 31 | 87,24 |
| Μαγνήσιο (mg/L) | 952 | 133 | 86,03 |

*Πίνακας 6.2 Απόδοση συστήματος νανοδιήθησης και υψηλής πίεσης αντίστροφης όσμωσης* [32]

Στους δύο επόμενους πίνακες παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της αντίστροφης όσμωσης και της νανοδιήθησης.

| **Αντίστροφη όσμωση** | |
|---|---|
| **Πλεονεκτήματα** | **Μειονεκτήματα** |

| | |
|---|---|
| Εξαίρετη ποιότητα παραγόμενου διηθήματος | Δυσκολίες στη λειτουργία και τη συντήρηση |
| Αυτόματη λειτουργία | Υψηλό κόστος λειτουργίας |
| Χαμηλά εργατικά | Παραγωγή συμπυκνώματος ως παραπροϊόν |

*Πίνακας 6.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αντίστροφης όσμωσης* [3]

| **Νανοδιήθηση** | |
|---|---|
| **Πλεονεκτήματα** | **Μειονεκτήματα** |
| Καλή ποιότητα παραγόμενου διηθήματος | Δυσκολίες στη λειτουργία και τη συντήρηση |
| Αυτόματη λειτουργία | Περνούν άλατα μαζί με το νερό |
| Χαμηλό κόστος λειτουργίας | Παραγωγή συμπυκνώματος ως παραπροϊόν |
| | Ευαισθησία στις αλλαγές σύστασης του στραγγίσματος |

*Πίνακας 6.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα νανοδιήθησης* [3]

### 6.3.7 Αφαίρεση αμμωνίας (Stripping)

Πρόκειται για μια φυσικοχημική διαδικασία κατάλληλη για την απομάκρυνση αμμωνιακών από τα υγρά απόβλητα. Αυξάνοντας το pH των στραγγισμάτων σε τιμές 10,5-11,5 με υδροξείδιο του ασβεστίου, με σκοπό τη δημιουργία αέριου $NH_3$, και διοχέτευση φυσαλίδων αέρα μέσα από το σύστημα, μπορεί να επιτευχθεί απομάκρυνση της αμμωνίας στην ατμόσφαιρα μέχρι και 100% ( μετατροπή από υγρή σε αέρια μορφή).

$$NH_4+3/2\ O_2 \rightarrow NH_3\uparrow + H_2O$$

Η αέρια απομάκρυνση ως χημική μέθοδος μπορεί έτσι να χρησιμοποιηθεί για την ρύθμιση υπερβολικών συγκεντρώσεων αμμωνίας.

Οι Keenan et al. συνδύασαν την αέρια απομάκρυνση με ένα σύστημα λιμνοδεξαμενής (lagoon) (950 $m^3$) και ανέφεραν απομάκρυνση αμμωνίας έως και 50%. Άλλοι ερευνητές ανέφεραν, μια σχεδόν 100% απομάκρυνση σε εργαστηριακή κλίμακα με στραγγίσματα περιεκτικότητας 570 mg/L $NH_3$-N. Οι Presad et al. ανέφεραν μείωση κατά 90% του ολικού αζώτου μετά από 8 ώρες αερισμού σε pH ίσο με 10, θερμοκρασία 20°C και μέσο ρυθμό ροής 150 $cm^3$/s/L. Τελικά παράχθηκε διάλυμα περιεκτικότητας μεταξύ 2,2 και 5,2 mg/L αμμωνίας. Η βέλτιστη απομάκρυνση με αέρα επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία, τη ταχύτητα του ανέμου, το ρυθμό αερισμού, τη διαμόρφωση της δεξαμενής, τη ρύθμιση του pH, και την αρχική καθώς και την απαιτούμενη τελική συγκέντρωση στα στραγγίσματα. [35]

Η απομάκρυνση με αέρα θεωρείται γενικά οικονομικά αποδεκτή και απλή μέθοδος, αλλά οι πύργοι απομάκρυνσης είναι ακριβοί στη κατασκευή και οι πιθανότητες λειτουργικών προβλημάτων υψηλές καθώς επικάθονται εύκολα στερεά. Αντίθετα, οι

λιμνοδεξαμενές δείχνουν ως χαμηλότερου κόστους εναλλακτική λύση, και είναι ιδιαίτερα επιθυμητές σε επί τόπου επεξεργασία. Ένα τυπικό σύστημα απομάκρυνσης με αέρα περιλαμβάνει μια λιμνοδεξαμενή, ένα σύστημα αερισμού, ένα ρυθμιστή pH και μια μονάδα τροφοδοσίας. Το υψηλό pH αποτελεί επιπλέον πλεονέκτημα στην απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων με την κατακρήμνιση και μετά με την απομάκρυνση με αέρα της αμμωνία από τα στραγγίσματα, ελαχιστοποιώντας έτσι τις ανεπιθύμητες επιπτώσεις της αμμωνίας και των μετάλλων.

Τα πλεονεκτήματα των εφαρμοσμένων φυσικών και χημικών μεθόδων περιλαμβάνουν την ευελιξία και τις σύντομες περιόδους εκκίνησης και ρυθμούς αντίδρασης, έτσι μειώνουν το μέγεθος της εγκατάστασης, συγκρινόμενο με αυτό της βιολογικής επεξεργασίας, ενώ επιπλέον είναι συνήθως ανεπηρέαστες στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Τα μειονεκτήματα είναι ότι οι φυσικές-χημικές επιλογές είναι συνήθως δαπανηρές, τα λειτουργικά έξοδα είναι υψηλά και επιπλέον υπάρχει παραγωγή λάσπης που πρέπει να απομακρυνθεί καθώς είναι ενδεχομένως επικίνδυνη και πρέπει να διατίθεται σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία. Για πλήρη επεξεργασία, οι περισσότερες φυσικοχημικές διεργασίες είναι ανεπαρκείς καθώς τα περισσότερα στραγγίσματα δεν μπορούν να υποστούν αποτελεσματική επεξεργασία.

## 6.4 Βιολογική Επεξεργασία

Η βιολογική αποικοδόμηση είναι μια από τις πολλά υποσχόμενες μεθόδους όσον αφορά την απομάκρυνση των οργανικών από τα στραγγίσματα. Ωστόσο, ο σχηματισμός ιλύος, ειδικά κατά τη διάρκεια της αερόβιας διαδικασίας βιοαποικοδόμησης, μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα ως προς τη διάθεσή της. Το πρόβλημα μπορεί να ενταθεί περαιτέρω εξαιτίας της ικανότητας της λάσπης να προσροφά συγκεκριμένα οργανικά συστατικά και τοξικά βαρέα μέταλλα. Ωστόσο, τα βιολογικά συστήματα έχουν το πλεονέκτημα της μικροβιακής μετατροπής πολύπλοκων οργανικών και πιθανής απορρόφησης βαρέων μετάλλων από κατάλληλους μικροοργανισμούς.

### 6.4.1 Αερόβια επεξεργασία

#### 6.4.1.1 Αερόβιοι αντιδραστήρες

Οι αερόβιες βιολογικές μέθοδοι επεξεργασίας εξαρτώνται από την ανάπτυξη των μικροοργανισμών σε ένα πλούσιο σε οξυγόνο περιβάλλον με στόχο την οξείδωση των οργανικών σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και βιομάζα.

Η αερόβια επεξεργασία δείχνει να είναι αξιόπιστη και οικονομικά αποδεκτή για την παραγωγή μιας υψηλής ποιότητας εκροή. Κατά την έναρξη συνήθως απαιτείται μια περίοδος εγκλιματισμού για τη διευκόλυνση της ανάπτυξης μιας ανταγωνιστικής μικροβιακής κοινότητας. Το αμμωνιακό άζωτο στα στραγγίσματα από τους νέους

χώρους ταφής απορριμμάτων μπορεί να απομακρυνθεί με επιτυχία με στόχο την αποφυγή ακόλουθων προβλημάτων διάθεσης. Τα προβλήματα που συνήθως σχετίζονται με τις αερόβιες διεργασίες περιλαμβάνουν τη δημιουργία αφρών και τον περιορισμένο διαχωρισμό στερεών υγρών. Η προσθήκη φωσφόρου (BOD:N:P = 100:3:1 ή 100:3,2:1,1) είναι απαραίτητη και ο όγκος λάσπης που παράγεται (1 kg SS/Kg ανά kgr BOD που απομακρύνεται) είναι περίπου διπλάσιος από αυτόν των αστικών αποβλήτων. Ο όγκος αυτός μπορεί να περιέχει υψηλά επίπεδα βαρέων μετάλλων και χρειάζεται διάθεση ως επικίνδυνα απόβλητα σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία.

#### 6.4.1.2 Εγκαταστάσεις ενεργούς ιλύος

Κατά τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται δεξαμενή αερισμού στην οποία τα στραγγίσματα αναμιγνύονται και αερίζονται με παροχή οξυγόνου. Τη δεξαμενή αερισμού ακολουθεί η δεξαμενή καθίζησης. Η υπερχείλιση της δεύτερης δεξαμενής είναι η έξοδος του επεξεργασμένου στραγγίσματος ενώ από τον πυθμένα αυτής απομακρύνεται η ιλύς τμήμα της οποίας ανακυκλώνεται στη δεξαμενή αερισμού.

Το σύστημα λειτουργεί επιτυχώς όταν ο λόγος BOD/N/P=100/5/1. Συνήθως κατά την επεξεργασία στραγγισμάτων σε εγκατάσταση ενεργούς ιλύος απαιτείται προσθήκη φωσφόρου εξαιτίας του μεγάλου ποσοστού των αμμωνιακών. Το pH στις δεξαμενές θα πρέπει να είναι από 6,5 έως 8 ώστε να μην υπάρχει αναστολή της δράσης των μικροοργανισμών.

Ο σχεδιασμός συστημάτων επεξεργασίας στραγγισμάτων μπορεί να αναδειχθεί σε ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία εξαιτίας των διακυμάνσεων του φορτίου των στραγγισμάτων.

Σύμφωνα με την [8] για την επεξεργασία στραγγισμάτων με BOD=4500mg/L και MLSS=3000mg/L απαιτείται λόγος F/M=0,25 kg BOD/kg MLSS·ημέρα (για θερμοκρασία 10 $^{o}$C και χρόνο παραμονής των στραγγισμάτων στη δεξαμενή αερισμού 6 ημέρες) ώστε να επιτευχθεί απομάκρυνση BOD μεγαλύτερη του 90%, ενώ αν μεταβληθεί έστω και στο ελάχιστο κάποια από τις παραπάνω παραμέτρους παρατηρείται σημαντική μείωση στην απόδοση.

Σε αρκετά δημοσιευμένα κείμενα αναφέρονται απομακρύνσεις στο COD που κυμαίνονται από 30 έως 99% κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και παροχής φορτίου. Η χρήση εγκατάστασης ενεργούς ιλύος που περιλαμβάνει δεξαμενές αερισμού και δευτερεύοντες διαχωριστές είναι ιδιαίτερα επιτυχής, σύμφωνα με τους Lema et al. καθώς τόσο σε σειρά όσο και σε παράλληλες λειτουργικές καταστάσεις οι απομακρύνσεις του $BOD_5$, του COD, και της αμμωνίας ήταν 99%, 95% και 90% αντίστοιχα. Έχει προταθεί επίσης, ότι ως κατευθυντήρια γραμμή, με σκοπό την επίτευξη πλήρους αποικοδόμησης και παραγωγής εκροής με

$BOD_5$<25 mg/L σε μια εγκατάσταση ενεργούς ιλύος η ογκομετρική οργανική φόρτιση θα πρέπει να είναι μικρότερη των 0,15 kg $BOD_5/m^3/d$.
Με τα συστήματα ενεργούς ιλύος, τα προβλήματα που προκύπτουν γενικά είναι η παραγωγή αφρών, η καθίζηση σιδήρου και ανθρακικών αλάτων, η υπερβολική παραγωγή λάσπης (0,6 kg ξηρής λάσπης/kg απομακρυνόμενου $BOD_5$) και μια μείωση στην απόδοση κατά τις χειμερινές περιόδους.

### 6.4.1.3 Αερόβια Φίλτρα

Τα συμβατικά φίλτρα ροής, με αερόβιους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται σε πέτρα ή χαλίκι (φυσικά μέσα), είναι περιορισμένα σε βάθος περίπου 2m, πιο βαθιά δημιουργούνται συνθήκες που ευνοούν την αναερόβια ανάπτυξη με επακόλουθα προβλήματα οσμών. Αντίθετα, φίλτρα με συνθετικά μέσα είναι πλήρως αερόβια μέχρι και τα 8m.
Οι Knox et al. χρησιμοποίησαν ένα συμβατικό φίλτρο σε πραγματική κλίμακα για να επεξεργαστεί παλιά στραγγίσματα με χαμηλό $BOD_5$ και υψηλές συγκεντρώσεις $NH_3$. Ο υδραυλικός χρόνος παραμονής κυμάνθηκε μεταξύ 15 ωρών και 4,5 ημερών, με την απομάκρυνση του $NH_3$-N να κινείται μεταξύ 36 και 309gr N/μονάδα επιφάνειας ($m^2$). Το φίλτρο είχε λιγότερα λειτουργικά προβλήματα απ' ότι τα συστήματα ενεργούς ιλύος και ήταν πιο απλό στη λειτουργία όσον αφορά την επεξεργασία στραγγισμάτων με μικρό λόγο $BOD_5/NH_3$. Ωστόσο, ένα πρόβλημα είναι ότι τα φίλτρα ροής μπορεί να φράξουν με την καθίζηση υδροξειδίων του σιδήρου και ανθρακικών αλάτων, με ακόλουθη μείωση της μικροβιακής δράσης. Έχει αναφερθεί ότι τα βιολογικά φίλτρα δεν είναι κατάλληλα για την επεξεργασία ισχυρών στραγγισμάτων καθώς τα φίλτρα επικαλύπτονται από αποθέσεις οργανικών. Ωστόσο, ερευνητές που χρησιμοποίησαν σε πιλοτική κλίμακα, βυθισμένο αερόβιο βιολογικό φίλτρο, για να επεξεργαστούν στραγγίσματα με υψηλά επίπεδα αμμωνίας, βρήκαν μια μέγιστη δυναμικότητα αζωτοποίησης των 0,57 kg $NH_4$-N/$m^3$/d στους 20 °C με μείωση κατά 66% των αιωρούμενων στερεών, 81% της οργανικής ύλης και 88% του COD. Ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης των βιολογικών φίλτρων έναντι των συστημάτων ενεργούς ιλύος.

| Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα |
|---|---|
| Χαμηλή απαιτούμενη ενέργεια | Η εκροή μετά την επεξεργασία με βιόφιλτρο περιέχει μεγάλες ποσότητες μερικώς αποδομημένων ουσιών και επομένως απαιτείται επιπλέον επεξεργασία πριν από τη διάθεση. |
| Απλούστερη λειτουργία | |
| Ευκολότερη εξομάλυνση της λειτουργίας του έπειτα από απότομη μεταβολή του ρυπαντικού φορτίου | |
| | Η παραγόμενη λάσπη μετά την τελική |

| | |
|---|---|
| Δεν υπάρχουν προβλήματα συσσωμάτωσης της βιολογικής λάσπης | καθίζηση περιέχει υψηλό ποσοστό οργανικού φορτίου |
| Το εναπομένον BOD οφείλεται κυρίως στην αιωρούμενη βιολογική λάσπη και επομένως η περαιτέρω εφαρμογή χημικής καθίζησης οδηγεί σε υψηλά επίπεδα απορρύπανσης | Έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στην περιεκτικότητα των στραγγισμάτων σε κολλοειδή στερεά (φράξιμο πληρωτικού υλικού) |
| Είναι οικονομικότερο όταν απαιτείται μείωση του BOD μικρότερη από 60% | Για μείωση του BOD μεγαλύτερη από 60% είναι αντιοικονομικό |

*Πίνακας 6.5 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα βιολογικών φίλτρων έναντι συστημάτων ενεργούς ιλύος* [3]

#### 6.4.1.4 Συνεχούς-Ροής Αερόβιοι Αντιδραστήρες

Οι αερόβιοι αντιδραστήρες συνεχούς ροής σταθεροποιούν τα στραγγίσματα επιτυχώς και μπορούν να επιτύχουν καλές απομακρύνσεις στο COD (92%) και στο BOD (97%) στους 5 με 10°C με προσθήκη φωσφόρου σε χρόνους παραμονής των στερεών περίπου 20 ημερών. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, ωστόσο, η διεργασία αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα.

#### 6.4.1.5 Περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι, RBC (Rotating Biological Contactors)

Οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας με τα αερόβια φίλτρα με τη διαφορά ότι έρχονται σε επαφή με τον αέρα και το στράγγισμα περιοδικά. Οι δίσκοι είναι βυθισμένοι στα στραγγίσματα κατά 40-45% και περιστρέφονται πολύ αργά. Κατά την περιστροφή λαμβάνεται και το απαραίτητο οξυγόνο. Κατά τη σύγκριση ενός συστήματος RBC με ένα συμβατικό σύστημα ενεργούς ιλύος για την επεξεργασία ενός ρεύματος στραγγισμάτων, βρέθηκε ότι οι αποδόσεις της απομάκρυνσης μεταβάλλονταν από 50 μέχρι 95% τόσο για τα οργανικά όσο και για τα τοξικά συστατικά. Το σύστημα RBC είχε μεγαλύτερη απόδοση κατά την απομάκρυνση οργανικών και βαρέων μετάλλων και παρουσίασε μεγαλύτερη ευελιξία στις απότομες αυξήσεις των οργανικών και των τοξικών φορτίων απ' ότι τα συστήματα ενεργούς ιλύος. Ακόλουθες μελέτες έδειξαν ότι σε οργανικά φορτία των 1,59 με 1,54 $kg/m^3/d$ μπορούν να επιτευχθούν απομακρύνσεις του $BOD_5$ μέχρι και 95 έως 99%.

Παράλληλα, η χρήση των δίσκων σε πιλοτική κλίμακα για την επεξεργασία στραγγισμάτων που περιείχαν φαινόλες, σίδηρο και κυανίδια είχε 98, 97 και 92% αποδόσεις απομάκρυνσης αντίστοιχα και απομάκρυνση $BOD_5$ μέχρι και 98%. Η

επεξεργασία στραγγισμάτων από παλιό χώρο ταφής απορριμμάτων με χαμηλό $BOD_5$ (26mg/L) και υψηλή αμμωνία (154mg/L) εξετάστηκε και σε σταθερή κατάσταση βρέθηκε απομάκρυνση 80% στο $BOD_5$, 38% στο COD και 98% στην αμμωνία. Ωστόσο χρησιμοποιήθηκαν χαμηλού υποστρώματος φορτία (1,2-7,3 gr NH3-N /$m^3$/d και 2,8-18,5gr COD /$m^3$/d). Έτσι, ένα σημαντικό μέρος μη αποικοδομήσιμου COD (συχνά υπεύθυνο για το χρώμα των στραγγισμάτων) παρέμεινε μετά την επεξεργασία και περαιτέρω βήματα επεξεργασίας χρειάζονταν εάν τα όρια της εκροής δεν ικανοποιούνται σχετικά με τα φορτία του COD.

Η χρήση πάντως των περιστρεφόμενων βιολογικών δίσκων για την επεξεργασία των στραγγισμάτων δεν φαίνεται να είναι τόσο διαδεδομένη αλλά παρατηρούνται σε εργαστηριακές έρευνες κυρίως σε συνδυασμό με εγκαταστάσεις ενεργού ιλύος. Στην περίπτωση αυτή η βιολογική επεξεργασία στηρίζεται σε ένα σταθερό βακτηριακό πληθυσμό που αναπτύσσεται στην επιφάνεια των δίσκων και ένα αιωρούμενο πληθυσμό που υπάρχει στη δεξαμενή ενεργούς ιλύος. [8]

Οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι φαίνεται να πλεονεκτούν σε σχέση με τη διαδικασία που ακολουθείται σε εγκατάσταση ενεργούς ιλύος κυρίως σε στραγγίσματα που προέρχονται από παλιούς ΧΥΤΑ. Βασικό πλεονέκτημα αποτελεί η ευκολία στην λειτουργία και υποστήριξη. Επιπλέον, δεν απαιτείται αναρρόφηση με αντλία, αερισμός και ανακύκλωση της ιλύος με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαία η συνεχής παρακολούθηση. Η απομάκρυνση του αζώτου είναι επιπλέον απλή και η συντήρηση συνίσταται στην απλή επιτήρηση και λίπανση.

#### 6.4.1.6 Αντιδραστήρες SBR (Sequencing Batch Reactor)

Ο SBR χρησιμοποιεί την ίδια δεξαμενή για αερισμό, καθίζηση και ανακύκλωση στερεών και φαίνεται ως καλή επιλογή για εφαρμογές μικρής ροής. Σε πιλοτική κλίμακα, ο SBR έχει αποδειχτεί αποδοτικός σε απομακρύνσεις του BOD που ξεπερνούν το 99%, απομακρύνσεις του αζώτου να κυμαίνονται από 75-95% και πολύ υψηλή απομάκρυνση του φωσφόρου, από τις συνεχείς κατακρημνίσεις, σε λιγότερο από 1,5 ppm.

Στη συνέχεια παρατίθενται δυο παραδείγματα χρήσης SBR το πρώτο αναφέρεται σε πραγματικό ΧΥΤΑ ενώ το δεύτερο σε αντιδραστήρα SBR πειραματικού επιπέδου που δέχεται μικτά υγρά απόβλητα.

Πρόκειται για το ΧΥΤΑ Georgswerder ο οποίος βρίσκεται 5 χιλιόμετρα νοτίως του Αμβούργου. Η διαδικασία επεξεργασίας των στραγγισμάτων περιλαμβάνει 1) προεπεξεργασία συσσώρευσης (coagulation), επίπλευσης και καθίζησης 2) δύο στάδια SBR, 3) στήλη απορρόφησης, 4) μονάδα αποτέφρωσης της λάσπης.

Η διαδικασία της επίπλευσης/καθίζησης χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των ελαιωδών, των οργανικών και των χημικών κατακρημνισμάτων από το κυρίως ρεύμα των στραγγισμάτων. Πολλές τοξικές οργανικές ενώσεις συμπεριλαμβανομένων

πετρελαιοειδών, υδρογονανθράκων (βενζόλιο, τολουένιο, ξυλένιο, φαινόλες) και χλωριωμένων ενώσεων (διοξίνες, τριχλωροαιθυλένιο) συγκεντρώνονται στην υπερχείλιση της επίπλευσης οι οποίες στη συνέχεια αποτεφρώνονται. Τα κατακρημνίσματα των μετάλλων οδηγούνται προς πάχυνση, ξήρανση και τελικά αποτεφρώνονται.

Η εκροή του προηγούμενου σταδίου περιέχει υψηλές ποσότητες οργανικών. Δύο στάδια SBR χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση των οργανικών και στη συνέχεια ακολουθεί προσρόφηση σε άνθρακα των 'επίμονων' οργανικών. Τα αέρια του συστήματος της βιολογικής επεξεργασίας οδηγούνται σε φίλτρα άνθρακα.. Η εισροή και εκροή στον συγκεκριμένο αντιδραστήρα παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

| **Παράμετροι mg/L** | **Εισροή** | **Εκροή** | | **Συνολική απόδοση** |
|---|---|---|---|---|
| | | **στάδιο 1** | **στάδιο2** | |
| COD | 1170 | 155 | 75,9 | 93,5% |
| TOC | 380 | 60,3 | 31,1 | 91,8% |
| TOX* | 1085 | 98,8 | 63,8 | 94,1% |
| $NH_4$-N | 300 | <1 | <1 | 99,9% |
| $NO_3$-N | 0 | 175,3 | 172 | - |

*χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες

*Πίνακας 6.6 Απόδοση SBR στο ΧΥΤΑ Georgswerder* [37]

Πολύ καλές θεωρούνται και οι αποδόσεις αντιδραστήρων SBR οι οποίοι δέχονται μικτά υγρά απόβλητα. Σε πειραματικό επίπεδο έχει εξεταστεί από τους Diamadopoulos et. al. συνδυασμός οικιακών λυμάτων και στραγγισμάτων. [28] Η συνδυασμένη αυτή επεξεργασία μπορεί να προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένου του καλύτερου έλεγχου των χαρακτηριστικών της απορροής, καθώς τα ρυπαντικά φορτία και οι απορροές των στραγγισμάτων έχουν ιδιαίτερα υψηλές διακυμάνσεις με το χρόνο. Η πειραματική διαδικασία αφορούσε υγρά απόβλητα της Θεσσαλονίκης. Η αναλογία οικιακών λυμάτων / στραγγισμάτων είναι 9/1 κατ' όγκο. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων και των στραγγισμάτων όπως και των αποβλήτων που εισέρχονται τελικά στον SBR παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

| **Παράμετροι (mg/L)** | **Στραγγίσματα** | **Λύματα** | **Εισροή στον SBR** | |
|---|---|---|---|---|
| | | | **Μέση τιμή** | **Διακύμανση** |
| $BOD_5$ | 2000-4700 | 60-270 | 430 | 336-600 |
| COD | 4700-12000 | 120-500 | 1090 | 790-1490 |
| TKN | 640-1020 | 19-78 | 133 | 106-155 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $N\text{-}NH_3$ | 405-920 | 11-48 | 107 | 29-112 |
| $N\text{-}NO_3^-$ | 4-25 | 2-5 | 3 | 1,3-6,5 |
| $P\text{-}PO_4^{-3}$ | 0-12,5 | 1-10 | 4,9 | 1-9,4 |

*Πίνακας 6.7Ποιοτικά χαρακτηριστικά των λυμάτων και των στραγγισμάτων που εισέρχονται στον SBR* [28]

Η πειραματική διαδικασία εκτυλίχθηκε σε ένα κυλινδρικό αντιδραστήρα από Plexiglas. Ο αέρας διοχετευόταν στο σύστημα από ένα διαχυτήρα στην βάση του αντιδραστήρα. Ο αντιδραστήρας λειτουργούσε σε 24-ωρους batch κύκλους.
Οι μετρήσεις έγιναν σε 4 διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του αντιδραστήρα.

| **Φάση** / **Κατάσταση** | **Διάρκεια λειτουργίας ( ώρες)** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **1η** | **2η** | **3η** | **4η** |
| Πλήρωση | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Ανοξικές συνθήκες | - | 3 | 6 | 6 |
| Αερισμός | 20 | 17 | 14 | 11 |
| Ανοξικές συνθήκες | - | - | - | 3 |
| Καθίζηση&υπερχείλιση | 1 | 1 | 1 | 1 |

*Πίνακας 6.8 Καταστάσεις λειτουργίας SBR*

Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων οδήγησαν στις αποδόσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα της επόμενης σελίδας.

| | **Απόδοση** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Κατάσταση 1** | **Κατάσταση 2** | **Κατάσταση 3** | **Κατάσταση 4** |
| $BOD_5$ | 98,7% | 98,6% | 98,3% | 70,8% |
| COD | 85,5% | 81,9% | 79,3% | 67,7% |
| Total Nitrogen | 48,8% | 47,7% | 35,5% | 63,2% |

*Πίνακας 6.9 Απόδοση SBR* [28]

Το σύστημα είχε ιδιαίτερη επιτυχία στην μείωση του BOD (>95%), και η απομάκρυνση του αζώτου κατά τις περιόδους έλλειψης οξυγόνου ήταν ιδιαίτερα υψηλή (περίπου 99%) εξαιτίας της απονιτροποιήσης, ωστόσο η ολική απομάκρυνση του αζώτου μετά το πέρας ενός κύκλου ήταν χαμηλή (περίπου 50%).
Αναλυτικότερα περιγράφεται στη συνέχεια (κεφάλαιο 7) ο SBR καθώς πρόκειται για το σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί στον εξεταζόμενο ΧΥΤΑ.

#### 6.4.1.7 Τεχνητές αεριζόμενες λίμνο-δεξαμενές (aerated lagoons) / Επιφάνειες με καλλιέργειες καλαμιών

Σε περιοχές όπου υπάρχουν διαθέσιμα εδάφη, οι αεριζόμενες λίμνες αποτελούν μια από τις λιγότερο δαπανηρές μεθόδους βιολογικής επεξεργασίας. Ως αποτέλεσμα της απλότητάς τους και της απουσίας μιας εγκατάστασης ανακύκλωσης λάσπης, οι λίμνες είναι μια αποδοτική μέθοδος για την επεξεργασία των στραγγισμάτων. Οι αεριζόμενες λίμνες εγκαθίστανται εύκολα και η επίβλεψή τους δεν απαιτεί ειδικευμένο προσωπικό. Επιπλέοντα συστήματα αερισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενώ απαιτείται και η δημιουργία ενός αδιαπέραστου στρώματος στον πυθμένα της τεχνητής λίμνης.

Οι λίμνες αυτές είναι αβαθείς και η στεγανοποίηση του πυθμένα γίνεται συνήθως με άργιλο, μπετόν ή πλαστικά φύλλα PVC. Αν και οι λίμνες είναι εύκολες στη λειτουργία αποτελούν τα πιο περίπλοκα συστήματα που έχουν σαν βάση την βιολογική αποικοδόμηση. Στα συστήματα αυτά, λαμβάνουν χώρα τόσο αερόβιοι όσο και αναερόβιοι μεταβολισμοί καθώς και φαινόμενα φωτοσύνθεσης και καθίζησης.

Σε θερμότερα κλίματα η χρήση των τεχνητών λιμνών αναδεικνύεται ως μια κατάλληλη και οικονομική επιλογή επεξεργασίας. Ωστόσο υπάρχει το ενδεχόμενο επιφανειακής και υπόγειας ρύπανσης νερού, δυσοσμίας και εντόμων που μπορεί να γίνουν ενοχλητικά.

Γενικά σε ένα ισχυρό στράγγισμα (COD = 57900 mg/L) σε μία αεριζόμενη λίμνη, μπορεί να επιτευχθούν απομακρύνσεις οργανικών μεταξύ 93 και 97% χωρίς προεπεξεργασία, σε χρόνους παραμονής από 7 έως 86 ημέρες και οργανικές φορτίσεις από 0,244 έως 1,65 kg/m$^3$/d. Έχει αναφερθεί ότι ακόμα και οι απλές μέθοδοι αερισμού απομάκρυναν τα άμεσα αποικοδομήσιμα συστατικά σε χαμηλές θερμοκρασίες μέχρι και 5 °C. Αν δεν προστεθεί φώσφορος, η αερόβια επεξεργασία είναι αργή. Η απομάκρυνση των λιπαρών οξέων συνοδευόταν από 85% μείωση στο COD και μέχρι και 98% μείωση στο BOD, με περίπου 10% μείωση στο $NH_4$-N. Έχει αναφερθεί επίσης εξαιρετική απομάκρυνση στο BOD κατά 98% αλλά βρέθηκαν μικρότερες απομακρύνσεις στο COD (79%) και στο TOC (73%) ως αποτέλεσμα της παρουσίας αδιάσπαστων οργανικών. Μόνο το 36% του $NH_4$-N μετατράπηκε σε αέριο άζωτο αλλά μετά από συνδυασμένη επεξεργασία με μια δεξαμενή αερισμού, επιτεύχθηκε απομάκρυνση του $NH_4$-N μεγαλύτερη από 99%.

Μελέτες έδειξαν ότι οι αεριζόμενες λίμνες μπορούν να λειτουργήσουν επιτυχώς κατά τη διάρκεια δύσκολων χειμερινών μηνών με χρόνους παραμονής μεγαλύτερους από 10 ημέρες, ενώ επεξεργάζονται μέχρι και 150 m$^3$/d στραγγίσματος σε υψηλά στάνταρ, με ελάχιστο προσωπικό επίβλεψης. Πλήρης οξείδωση και νιτροποίηση έχουν αναφερθεί αλλά σε υδραυλικούς χρόνους μεγαλύτερους από 100 ημέρες.

Οι προτεινόμενες παράμετροι σχεδιασμού ποικίλουν σημαντικά και εξαρτώνται από την ποιότητα των στραγγισμάτων, τον απαιτούμενο βαθμό αποικοδόμησης και την θερμοκρασία λειτουργίας. Η επεξεργασία των αποβλήτων σε μικρές λίμνες

ταξινομούνται με τον τρόπο βιοδιάσπασης (αερόβιο ή αναερόβιο), την παρουσία ή απουσία εξοπλισμού αερισμού και άλλα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά.[35]
Τα συστήματα υγροβιότοπων με καλάμια έχουν επίσης ευρεία εφαρμογή. Τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα για να επεξεργάζονται τα στραγγίσματα περνώντας τα μέσα από τις ρίζες κοινών καλαμιών σε μια ρηχή επιφάνεια από χώμα ή χαλίκι. Τα καλάμια εισάγουν οξυγόνο και καθώς τα στραγγίσματα διεισδύουν, αερόβιοι μικροβιακοί πληθυσμοί εγκαθίστανται στις ρίζες και διασπούν του ρύπους. Το άζωτο και ο φώσφορος προφανώς απομακρύνονται απευθείας από τα καλάμια. Τα συστήματα αυτά, ωστόσο, δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην απομάκρυνση αμμωνίας και οι υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας αποτελούν ισχυρό περιοριστικό παράγοντα καθώς μπορεί να είναι ιδιαίτερα φυτοτοξικές. Οι καθιζήσεις μεγάλων ποσοτήτων σιδήρου, μαγγανίου και ασβεστίου μέσα στις φυτείες των καλαμιών επηρεάζουν την ανάπτυξη των ριζών και τελικά μειώνουν την διαπερατότητα του εδάφους.

Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται οι εφαρμογές της αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας των στραγγισμάτων. [8]

| **Τροφοδοσία** | | **Συνθήκες λειτουργίας** | | **Απόδοση** | **Αναφορά** |
|---|---|---|---|---|---|
| **COD (mg/L)** | **BOD/ COD** | **Τύπος επεξεργασίας** | **Χρόνος παραμονής (ημέρες)** | **% απομάκρυνση του COD** | |
| 3500 | 0,64 | Αεριζόμενη λίμνη | 0,6 | 77 | Karr, 1972 |
| 510 | - | Αεριζόμενη λίμνη (από εκροή αναερόβιου φίλτρου) | 1 | 22 | Foree & Reid, 1973 |
| 3000-9000 | - | Διαλείποντος έργου | 1-5 | 30-90** | Boyle & Ham, 1974 |
| 8800 | 0,8 | Αεριζόμενη λίμνη | 5 | 74 | Boyle & Ham, 1974 |
| - | 0,18 | Αεριζόμενη λίμνη (από εκροή αναερόβιας χώνευσης) | 5 | 40 | Boyle& Ham, 1974 |
| 15800 | 0,45 | Αεριζόμενη λίμνη | 10 | 98 | Cook& Foree, 1974 |
| 500 | 0,52 | Αεριζόμενη λίμνη | 0,3 | 58 | Polland& Kay, 1975 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 30000 | 0,65 | Αεριζόμενη λίμνη | 7 | 99 | Chian& Dewale, 1976 |
| 1000 | - | Αεριζόμενη λίμνη (από εκροή αναερόβιου φίλτρου) | 7 | 17 | Chian& Dewale, 1976 |
| 48000 | - | Διαλείποντος έργου | 10-60 | 51,5-75,7* 96,8-99,2** | Uloth& Mavinic,1977 |
| 35000 | - | Διαλείποντος έργου | 7,15,30 | 97** | Chian& Dewale, 1977 |
| 19000<br>9000 | -<br>- | Διαλείποντος έργου<br>Διαλείποντος έργου | 6,9,20<br>6-12 | 51-74*<br>95-99**<br>30-60* | Zalp-Gilje& Mavinic, 1981 |
| 13000 | - | Διαλείποντος έργου | 5-20 | 93-99** | Wong& Mavinic,1981 |
| 12000 | 0,37 | Διαλείποντος έργου | 35 | 95,8 | Bull et al. 1982 |
| 4805<br>4805 | 0,6<br>0,6 | Συνεχούς ροής<br>Συνεχούς ροής | >5<br>>10 | 94<br>96,7 | Robinson& Maris, 1983 |
| 7000 | - | Δεξαμενή ανάδευσης | 1-4 | 86** | Keenan et al., 1984 |
| 500 | 0,2 | Ενεργός ιλύς | 6-10 | 95 | Chian& Polland, 1985 |
| >3000 | 0,66 | Ενεργός ιλύς | - | 90 | Ehrig, 1985 |
| 888<br>812<br>781<br>1297<br>1160<br>1304 | -<br>-<br>-<br>-<br>-<br>- | Ενεργός ιλύς (στράγγισμα / αστικά λύματα 1:5)<br>Ενεργός ιλύς (στράγγισμα / αστικά λύματα 2:5) | 5<br>10<br>20<br>5<br>10<br>20 | 90,7<br>91,1<br>90<br>93,3<br>94,3<br>93,9 | Raina& Mavinic, 1985 |
| 13296<br>11929<br>17717<br>11831<br>6240<br>4141 | 0,80<br>0,81<br>0,66<br>0,64<br>0,47<br>0,40 | Ενεργός ιλύς | 20,6<br>14<br>10,7<br>7<br>5<br>3 | 98,3<br>96,2<br>97<br>96,3<br>91<br>91,2 | Maris, 1985 |
| 48000 | 0,35 | Αεριζόμενη λίμνη | - | 99 | Millot et al, |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 1987 |
| 5400<br>9750<br>5518 | 0,65<br>0,72<br>0,66 | Αεριζόμενη λίμνη | 10<br>10<br>10 | 96<br>97,8<br>97,2 | Robinson& Grantham, 1988 |
| 1930 | 0,65 | Αερόβιο φίλτρο | 20 | 69,4 | Gourdon et al, 1989 |
| - | 0,2 | Ενεργός ιλύς | 30 | 80-90 | Venkatarama ni et al, 1990 |
| 322-385 | 0,07 | Βιολογικός δίσκος | - | 38 | Spengel et al., 1991 |
| 4000-1000 | 0,25-0,3 | Ενεργός ιλύς | - | 69 | Ouyang et al, 1991 |
| 500-1000 | - | Διαλείποντος έργου | 10-30 | 60-90 | Keenan et al., 1993 |

*μη διηθημένο **διηθημένο

*Πίνακας 6.10 Εφαρμογές αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας στραγγισμάτων* [8]

#### 6.4.1.8 Νιτροποίηση/ Απονιτροποίηση

Τα στραγγίσματα από παλιότερους χώρους ταφής απορριμμάτων έχουν συνήθως υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας και χαμηλές σε βιοδιασπάσιμο άνθρακα με αποτέλεσμα να λαμβάνεται εκροή που είναι τοξική λόγω της υψηλής συγκέντρωσης αμμωνίας και υψηλό ποσοστό θρεπτικών που είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε ευτροφικές συνθήκες. Η βιολογική νιτροποίηση-απονιτροποίηση θεωρείται μια από τις πλέον κατάλληλες μεθόδους απομάκρυνσης της αμμωνίας από τα στραγγίσματα. Ωστόσο, εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, μια επιπλέον πηγή άνθρακα πρέπει να προστεθεί για να διευκολύνει την αποτελεσματική απονιτροποίηση. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές, πολλά ανθρακικά απόβλητα είναι κατάλληλα αλλά πρέπει να επιλεχθούν προσεκτικά. Όταν χρησιμοποιείται γλυκόζη σε ένα απλό σύστημα λάσπης, με στραγγίσματα περιεκτικότητας 170 έως 230 mg/L αμμωνίας, έχει αναφερθεί απονιτροποίηση της οποίας τα αποτελέσματα δεν ήταν σταθερά (10 έως 100%), αλλά με μεθανόλη σαν πηγή άνθρακα η απονιτροποίηση βρέθηκε πλήρης.

Η απονιτροποίηση των στραγγισμάτων με βιοαέριο (περιεκτικότητα σε μεθάνιο 50%) ως μοναδική πηγή άνθρακα, είναι επίσης εφικτή. Μπορεί έτσι να θεωρηθεί το βιοαέριο ως μια μακράς διάρκειας, αξιόπιστη, άμεσα εκμεταλλεύσιμη και φθηνή πηγή άνθρακα για την επίτευξη πλήρους απονιτροποίησης. Μαζί με τα απαραίτητα συμπληρώματα άνθρακα, οι συγκεντρώσεις σε οξυγόνο και $CO_2$ παίζουν σημαντικό ρόλο στην βελτιστοποίηση της διεργασίας.

Αποδόσεις απονιτροποίησης πάνω από 90% έχουν αναφερθεί. Μελέτες πεδίου, που χρησιμοποίησαν πιλοτικές εγκαταστάσεις ενεργούς ιλύος και φίλτρων, έδειξαν ότι η απομάκρυνση της αμμωνίας ήταν επιτυχής μεταξύ 13 και 16 °C, με ρυθμό απομάκρυνσης πάνω από 300 mg $N/m^3/d$.

Εκτιμήσεις έχουν γίνει σχετικά με την χρησιμότητα των αερόβιων και αναερόβιων RBCs στην επεξεργασία στραγγισμάτων με χαμηλό BOD (26 mg/L), χαμηλό COD (358 mg/L) και υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας (154 mg/L $NH_3$-N). Οι μικροοργανισμοί στον αερόβιο RBC απομάκρυναν 80% BOD, 38% COD και 98% αμμωνία. Με το αναερόβιο σύστημα αποδείχτηκε ότι τα νιτρικά που παράγονταν με την νιτροποίηση μπορούσαν να απομακρυνθούν επιτυχώς.

Τα συστήματα επεξεργασίας νιτροποίησης-απονιτροποίησης που εκτίθενται σε μέταλλα ικανά να κατακρημνίζουν το φώσφορο πρέπει να παρακολουθούνται για να εξασφαλίζεται η επαρκής διαθεσιμότητα θρεπτικών. Θα πρέπει λοιπόν, να υπάρχει μια ελάχιστη συγκέντρωση διαλυμένου φωσφόρου περίπου 0,5 mg/L Η νιτροποίηση δεν πρέπει να αποτελεί πρόβλημα, με την έννοια ότι ένας ενεργός πληθυσμός νιτροποίησης είναι παρόν σε αυτή τη διαδικασία και ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες για αυτούς τους αυτότροφους οργανισμούς είναι κατάλληλες. Ωστόσο, υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων είναι δυνατόν να αναστείλουν τη διεργασία.

### 6.4.2 Αναερόβια Βιολογική Επεξεργασία

Η επεξεργασία αυτή βασίζεται στη μικροβιακή συσχέτιση που αναπτύσσεται υπό αναερόβιες συνθήκες και διαδοχικά, μετατρέπει τα οργανικά συστατικά σε μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και άλλα προϊόντα μεταβολισμού. Έχει συχνά αναφερθεί ότι οι αναερόβιες μέθοδοι επεξεργασίας των στραγγισμάτων είναι πολύ αργές, αναξιόπιστες, ευαίσθητες στις μεταβολές του pH καθώς και στην παρουσία βαρέων μετάλλων. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την βιβλιογραφία στην οποία αναφέρεται ότι η αναερόβια χώνεψη είναι μια πολλά υποσχόμενη επιλογή επεξεργασίας. Σύμφωνα με κάποιες έρευνες τα ισχυρά στραγγίσματα αποτελούν εξαιρετικό υποστρώματα για τη ζύμωση του μεθανίου. Με τη χρήση των χωνευτήρων υψηλών ρυθμών, η αναερόβια επεξεργασία των στραγγισμάτων μπορεί να θεωρηθεί ως εναλλακτική της αερόβιας επεξεργασίας.

Η επεξεργασία αποτελείται από δυο φάσεις. Στην πρώτη κυριαρχεί η παραγωγή οξέων, όπου αναερόβια βακτήρια διασπούν σύνθετες οργανικές ενώσεις σε απλούστερες π.χ. οξικό οξύ και άλλα οξέα χαμηλού μοριακού βάρους. Στη δεύτερη φάση τα μεθανογενή βακτήρια παράγουν μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα με τη διάσπαση των απλών οργανικών οξέων. Η παραγωγή οξέων κατά το πρώτο στάδιο οδηγεί σε μείωση του pH, ενώ το στάδιο της μεθανογένεσης απαιτεί pH από 6,5-7,0. Έτσι θα πρέπει, να εξασφαλίζεται η αναγκαία περιοχή του pH ώστε να είναι

σταθεροποιημένη η παραγωγή του μεθανίου. Η επεξεργασία γίνεται σε σταθεροποιημένο περιβάλλον, αφού η ανάπτυξη και δράση των αναερόβιων μικροοργανισμών ευνοείται σε μεσόφιλες περιοχές ( T=35$^{o}$C) [8]

Τα αναερόβια συστήματα θεωρούνται γενικά ως πιο οικονομικά για βιολογική σταθεροποίηση των στραγγισμάτων καθώς δεν έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις που σχετίζονται με τον αερισμό στην αερόβια επεξεργασία. Η αναερόβια χώνεψη αποδίδει μεθάνιο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή θέρμανσης ή ενέργειας. Παράλληλα, παράγεται μικρότερο ποσό λάσπης μειώνοντας έτσι τα προβλήματα που σχετίζονται με τη διάθεση της. Οι απαιτήσεις σε θρεπτικά (N, P) είναι πολύ μικρότερες από αυτές των αερόβιων συστημάτων, οι παθογόνοι οργανισμοί συνήθως καταστρέφονται και η τελική λάσπη μπορεί να αποτελέσει βελτιωτικό εδάφους υψηλής ποιότητας με την προϋπόθεση ότι δεν περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Η δυνατότητα επεξεργασίας στραγγισμάτων με υψηλό COD χωρίς προηγουμένως να έχει διαλυθεί, όπως απαιτείται από τα αερόβια συστήματα, μειώνει τις απαιτήσεις του χώρου και με αυτό τον τρόπο το συνολικό κόστος. Οι δυσοσμίες είναι γενικά ανύπαρκτες εάν το σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικά. Σε πρόσφατη ωστόσο βιβλιογραφία, αναφέρεται ότι πολλά τοξικά οργανικά συστατικά μπορούν να βιομετασχηματιστούν κάτω από αναερόβιες συνθήκες.

Τα μειονεκτήματα που συνδέονται με τα αναερόβια συστήματα είναι οι υψηλές αρχικές απαιτήσεις κεφαλαίου, οι μεγάλες περίοδοι εκκίνησης, ο αυστηρός έλεγχος των συνθηκών λειτουργίας, η σχετικά μεγάλη ευαισθησία στα μεταβαλλόμενα φορτία, στις απότομες αυξήσεις των οργανικών και στα τοξικά συστατικά. Η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να διατηρείται μεταξύ 33 με 37 °C για αποδοτικές κινητικές ενώ είναι σημαντικό να ρυθμίζεται το pH σε μια τιμή γύρω από το 7, λόγω της ευαισθησίας των μεθανογόνων πληθυσμών στις χαμηλές τιμές. Η απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων μπορεί να είναι καλή αλλά δεν είναι τόσο αποδοτική όσο είναι στις αερόβιες διεργασίες. Καθώς η $NH_4$-N δεν απομακρύνεται σε ένα αναερόβιο σύστημα, αποβάλλεται με την εκροή από το χωνευτή, δημιουργώντας έτσι μια επιπλέον απαίτηση σε οξυγόνο στο τελικό υδάτινο αποδέκτη. Οπότε υπάρχει επίσης η ανάγκη για συμπληρωματική επεξεργασία ώστε να επιτευχθούν τα επιτρεπτά όρια διάθεσης.

Κατά την αναερόβια διαδικασία, σχηματίζεται υδρόθειο το οποίο αποτελεί μέσο κατακρήμνισης για τα περισσότερα μέταλλα. Τα κατακρημνίσματα συσσωρεύονται σαν αδρανή στερεά εντός του στρώματος λάσπης ή μέσα στα φίλτρα. Όμοια, το ασβέστιο κατακρημνίζεται ως ανθρακικό ή φωσφορικό άλας και συσσωρεύεται επίσης στο σύστημα. Το δημιουργούμενο άλας αλλά και τα μεταλλικά ιζήματα, πρέπει να απομακρύνονται από το χωνευτή.

Προβλήματα που σχετίζονται με τα φωσφορικά άλατα σαν θρεπτικά συστατικά στα αναερόβια συστήματα έχουν μελετηθεί εκτενώς. Βρέθηκε ότι για μικρά οργανικά φορτία, στραγγίσματα με λιγότερο από 1 mg/L $PO_4$ μπορούν να υποστούν επιτυχή επεξεργασία. Ωστόσο, έχει αναφερθεί ότι σε μεγαλύτερα φορτία η προσθήκη φωσφορικών είναι απαραίτητη. Έχει προταθεί ένα θεωρητικό εύρος των COD:N:P από 2000:7:1 έως 400:7:1 για την αποτελεσματική αναερόβια χώνεψη. Σύμφωνα με τον Thirimurthi αυτό το εύρος είναι συντηρητικό και αναφέρει ότι η προσθήκη $PO_4$, οδηγούσε σε περαιτέρω απομάκρυνση του COD. Αναφέρει επιπλέον, ότι για οργανική φόρτιση των 8 kg COD/$m^3$/d και χρόνο παραμονής ίσο με 2,6 ημέρες, η μέγιστη αποδεκτή αναλογία COD:P στο τροφοδοτούμενο στράγγισμα ήταν 30.300: 1. Αντίστοιχα η ελάχιστη ολική συγκέντρωση φωσφορικών στην εκροή ήταν 0,7 mgP/L. Απομάκρυνση του COD κατά 91% επετεύχθη όταν οι αναλογίες COD:P ήταν μεταξύ 21.600 και 30.300/1. Η απομάκρυνση του COD βρέθηκε μειωμένη σε αναλογίες πάνω από 30.300/1. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, προτάθηκε ότι, για οικονομικούς λόγους, οι ελάχιστες συγκεντρώσεις $PO_4$ που απαιτούνται για την επιτυχή επεξεργασία πρέπει να καθορίζονται πριν σχεδιαστούν τα τελικά συστήματα χώνεψης.

#### 6.4.2.1 Συμβατικοί Χωνευτήρες

Η διαδικασία χρησιμοποιεί μηχανική ανάμειξη μέσα στον αντιδραστήρα ώστε να υπάρξει επαφή ανάμεσα στους μικροοργανισμούς και στο υπόστρωμα. Η ανάκτηση της λάσπης γίνεται με την καθίζηση και μερικές φορές ανακυκλώνεται πίσω στο χωνευτή. Κατά τη χρησιμοποίηση συμβατικού αναερόβιου σχεδίου, έχει αναφερθεί απομάκρυνση του COD από 90 έως 96% σε φορτίσεις των 0,43 έως 2,2 kg COD/$m^3$/d και χρόνους παραμονής 5 έως 20 ημέρες και θερμοκρασίες από 23 έως 30 °C. Με χρήση μιας απλής αναερόβιας λίμνης έχει αναφερθεί απομάκρυνση του COD από 80 με 90% μετά από εκτεταμένη περίοδο παραμονής 40 έως 50 ημέρες στους 25 °C. Η διαδικασία γενικά είναι πολύ ευαίσθητη στις μεταβολές της θερμοκρασίας, ακόμα και με εκτεταμένους χρόνους παραμονής. [35]

#### 6.4.2.2 Αναερόβια Φίλτρα

Οι ρυθμοί φόρτισης εξαρτώνται από το ποσό της ενεργής βιομάζας που μπορεί να συγκρατηθεί στον αντιδραστήρα. Η συγκέντρωση της βιομάζας είναι ανάλογη του πάχους και της ολικής επιφάνειας ανάπτυξης του βιοφίλμ. Τα φίλτρα προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα στα οποία περιλαμβάνονται η χαμηλή παραγωγή λάσπης, το σχετικά χαμηλό κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας, ο απλός σχεδιασμός και η σχετικά απλή λειτουργία.

Η αποδοτικότητα της επεξεργασίας των στραγγισμάτων με αναερόβιες μεθόδους έχει περιγραφεί από ερευνητές που χρησιμοποίησαν ένα πλήρως αναερόβιο φίλτρο με ανατροφοδότηση. Έχουν αναφερθεί ικανοποιητικές απομακρύνσεις του COD για ένα μεγάλο εύρος ρυθμών οργανικού φορτίου.

Σχετικά με τη χρήση των αναερόβιων φίλτρων (με ροή προς τα πάνω και ανακύκλωση), για την επεξεργασία στραγγισμάτων (σε εργαστηριακή κλίμακα) από νέους και παλιούς χώρους ταφής, με χρόνους παραμονής από 1,85 μέχρι 10,67 ημέρες εκτιμήθηκε ότι με ένα μέγιστο ρυθμό φόρτισης των 1,92 kg COD/$m^3$/d και χρόνο παραμονής 1,85 ημέρες επιτεύχθηκε μείωση του COD κατά 36% με παραγωγή μεθανίου 0,313 $m^3$/kg απομακρυνόμενου COD. Παράλληλα, η διεύθυνση της ροής (πάνω ή κάτω) δεν φαίνεται να προκαλεί αξιοσημείωτες διαφορές στην απομάκρυνση του COD και των πτητικών στερεών, αλλά ούτε και στην παραγωγή αερίου και στην περιεκτικότητα αυτού σε μεθάνιο. Οι Henry et al. αναφέρουν μείωση στο COD πάνω από 90% με τη χρήση αναερόβιου φίλτρου και για επεξεργασία στραγγισμάτων διαφορετικής ηλικίας σε ρυθμούς φόρτισης των 1 έως 2 kgr COD/$m^3$/d, σε θερμοκρασία δωματίου, με χρόνο παραμονής 24 με 96 ώρες, και χωρίς την επιπλέον προσθήκη φωσφόρου. Βέβαια, από την άλλη ο Atwater αναφέρει μεγαλύτερη απαίτηση σε φώσφορο (COD:P = 115:1 με 330:1) για την αναερόβια επεξεργασία των στραγγισμάτων. [35]

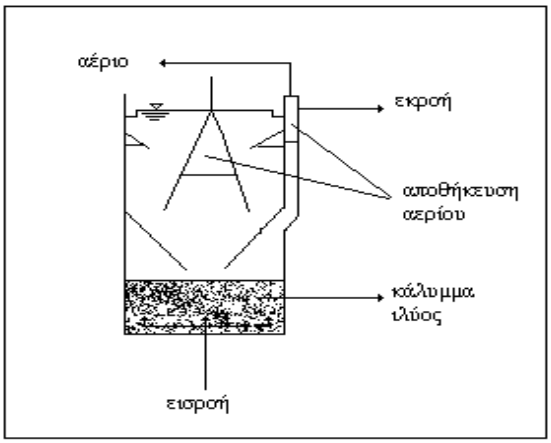
Μια μετατροπή στα αναερόβια φίλτρα χωρίς ανακύκλωση, ώστε να περιλαμβάνουν ένα στρώμα λάσπης στους 35 °C, οδήγησε σε απομάκρυνση του COD πάνω από 90% σε οργανικές φορτίσεις περί των 13 kgCOD/$m^3$/d και χρόνο παραμονής περίπου 216 ημέρες. Οι απομακρύνσεις των θειικών και του διαλυτού σιδήρου που επιτεύχθηκαν ήταν 90 με 96% αντίστοιχα. Περίπου το 68% των στερεών λάσπης που παράχθηκαν συσσωρεύτηκαν στο σύστημα. Παρόμοιες έρευνες για φορτίσεις των 33 kgCOD/$m^3$/d έδωσαν απομάκρυνση του COD κατά 95%. Αναφέρεται επίσης ότι αυτό το σύστημα έδειξε ιδιαίτερη ευελιξία σε μεγάλες διακυμάνσεις οργανικών φορτίων και επανερχόταν σε ένα λογικό χρονικό διάστημα. Ένας αντιδραστήρας με φίλτρο στρώμα λάσπης σε πιλοτική κλίμακα βρέθηκε ότι είναι ικανός να απομακρύνει περισσότερο από 85% COD για οργανικές φορτίσεις μέχρι και 10 kgCOD/$m^3$/d. Ωστόσο, συνεχής λειτουργία της πιλοτικής εγκατάστασης οδήγησε στην συσσώρευση σημαντικών ποσοτήτων ανόργανων ιζημάτων, που προκάλεσαν αρκετά λειτουργικά προβλήματα. Η προεπεξεργασία γενικά ενδείκνυται για την απομάκρυνση των μετάλλων, τα οποία σχηματίζουν αδιάλυτα ιζήματα κάτω από αναερόβιες συνθήκες.

#### 6.4.2.3 UASB

Η βασική διαδικασία που ακολουθείται σε ένα UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) φαίνεται στην εικόνα 6.2. Τα υγρά απόβλητα που εισρέουν διανέμονται στο

κάτω μέρος του UASB και κινείται σε μια κατακόρυφη ροή μέσα από τη στρώση ιλύος.

Ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποίησαν το σύστημα αυτό για να επεξεργαστούν στράγγισμα που περιείχε υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας, με οργανική φόρτιση περί τα 6,8 kg COD/$m^3$/d και χρόνο παραμονής 2,4 ημέρες και πέτυχαν 88% απομάκρυνση COD και απόδοση μεθανίου 0,340 $m^3$/ kg απομακρυνόμενου COD.




*Εικόνα 6.2 Σχηματική απεικόνιση διεργασίας UASB* [40]

Ήταν, ωστόσο, απαραίτητη η συνεχής οξίνιση και αυτό ίσως αποτελεί οικονομικό μειονέκτημα για μεγάλης κλίμακας επεξεργασίες. Η αναερόβια προεπεξεργασία σε ένα UASB οδήγησε σε απομακρύνσεις COD πάνω από 90% σε φορτίσεις των 9,4 kg COD/$m^3$/d και περισσότερο από 99% απομάκρυνση του Ca, Fe, Cd, Cu, Pb και Zn. Η προσθήκη θρεπτικών δεν ήταν απαραίτητη στα οργανικά φορτία που χρησιμοποιήθηκαν.

Μελετητές επεξεργάστηκαν ένα ισχυρό στράγγισμα (COD = 18 kg/L) χρησιμοποιώντας ένα χωνευτή UASB με σταθερό κάλυμμα με χρόνο παραμονής 1ημέρας στους 35 °C και ρυθμό φόρτισης 18,6 kg COD/$m^3$/d. Απομάκρυνση του COD κατά 82% επιτεύχθηκε ενώ αποδόθηκε μεθάνιο κατά 0,281 $m^3$/kg απομακρυνόμενου COD. Ανέφεραν ωστόσο ότι η υπερφόρτωση του συστήματος χαρακτηριζόταν από τη συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων λιπαρών οξέων και ειδικά προπιονικού οξέος.

Μελέτες πιλοτικής κλίμακας με UASB στο Ηνωμένο Βασίλειο απέδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί μέχρι και 85% απομάκρυνση του BOD με μια μέση οργανική φόρτιση περίπου 12 kg COD/$m^3$/d με μέσο χρόνο παραμονής 1,75 ημέρες και με βιοαέριο με περιεκτικότητα σε μεθάνιο 70 - 80% (v/v).

Ο επόμενος πίνακας συνοψίζει εφαρμογές της αναερόβιας επεξεργασίας των στραγγισμάτων [8]

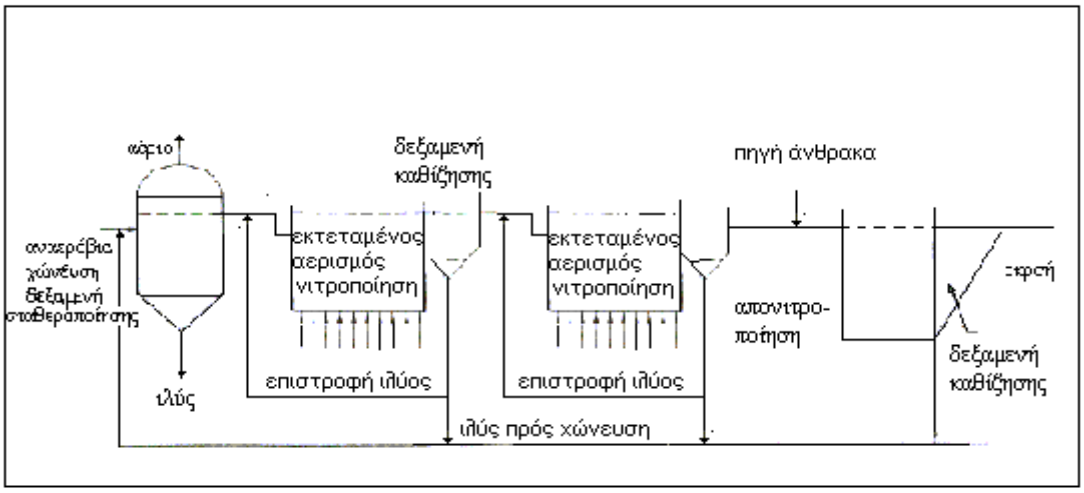
| Τροφοδοσία | | Συνθήκες λειτουργίας | | Απόδοση | Αναφορά |
|---|---|---|---|---|---|
| **COD (mg/L)** | **BOD/ COD** | **Τύπος επεξεργασίας** | **Χρόνος παραμονής (ημέρες)** | **% απομάκρ. του COD** | |
| 16500<br>5500 | 0,64<br>0,78 | Αναερόβιος χωνευτήρας | 15<br>10 | 99<br>93 | Karr, 1972 |
| 12900 | 0,45 | Αν. χωνευτήρας | 10 | 92 | Foree&Reid, |
| 10600<br>8300-8556 | 0,8<br>0,67-0,7 | Διαλείποντος έργου | 10-12,5<br>12,5-20 | 93-95<br>22-87 | Boyle & Ham, 1974 |
| 30000 | 0,65 | Αναερόβιο Φίλτρο | 27 | 97 | Chian& Dewale, 1976 |
| 20000/30000 | - | Δεξαμενή Ανάδευσης | - | 65-80 | Cameron& Cock,1980 |
| 25000-30000 | - | UASB | 6,4/6,6 | 70-96 | Bekker& Casper, 1981 |
| 8000 | 0,77 | Αναερόβιος Χωνευτήρας | 86 | 95 | Bull et al. 1983 |
| 25000/35000 | - | UASB | 0,3-0,5 | 80-90 | Van der Scoreff,1986 |
| 22000 | - | Δεξαμενή Ανάδευσης | 5,2-35 | 44-85 | Lema et al,1987 |
| 13800 | 0,7 | Αναερόβιο Φίλτρο | 0,5-4 | 68-95 | Henry et al., 1989 |
| 1930 | 0,65 | Αναερόβιος Χωνευτήρας | 20 | 35,7 | Gourdon et al., 1989 |
| 18000 | - | Αναερόβιος Χωνευτήρας | 1-9 | 90 | Britz et al., 1990 |
| 1930 | 0,65 | Αναερόβιο Φίλτρο | - | 46-55,2 | Gourdon et al., 1990 |
| 500-1000<br>500-1000 | -<br>- | UASB<br>Αναερόβιο Φίλτρο | 1-3,5<br>- | 60-90<br>85 | Keenan et al.,1993 |
| 26500<br>29000 | -<br>- | Αναερόβιος Χωνευτήρας | 1<br>1 | 95<br>80 | Myburg& Britz 1993 |

*Πίνακας 6.11 Εφαρμογές αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας στραγγισμάτων*[8]

## 6.5 Ολοκληρωμένα συστήματα επεξεργασίας στραγγισμάτων

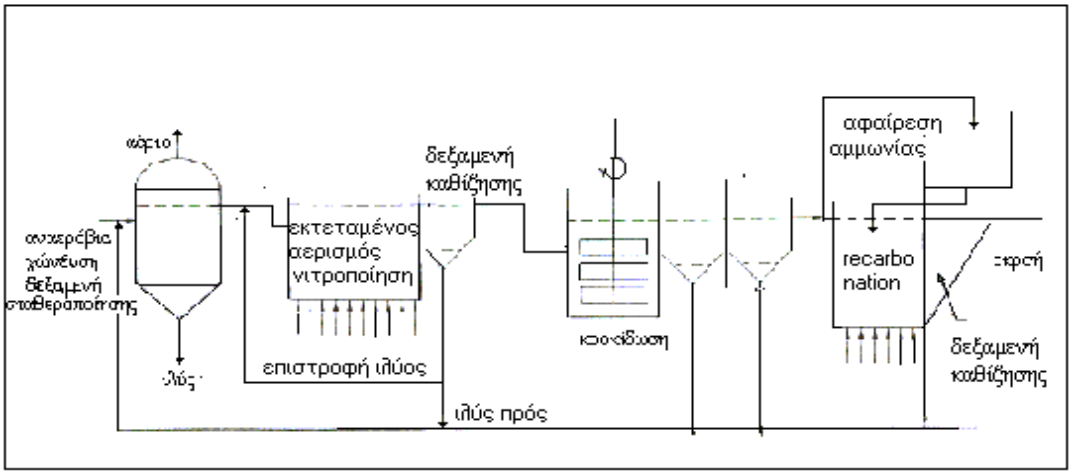
*Διαδικασία 1η*

Η βιολογική επεξεργασία είναι σχετικά αποτελεσματική στην απομάκρυνση των οργανικών από στραγγίσματα νέων ΧΥΤΑ. Ωστόσο η επεξεργασία ενεργούς ιλύος μιας βαθμίδας δεν είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση επίμονων υπολειμμάτων οργανικών που παραμένουν μετά την βιοαποικοδομήση του οργανικού υλικού. Ο κύριος λόγος είναι πως οι μικροοργανισμοί που μπορούν να διασπάσουν το επίμονο οργανικό υλικό δεν αναπτύσσονται πλήρως σε διαδικασία ενεργούς ιλύος μιας βαθμίδας. Μια δεύτερη βαθμίδα δίνει τη δυνατότητα στους μικροοργανισμούς να προσαρμοστούν στο οργανικό αυτό τμήμα. Ένα σύστημα σχεδιασμένο βάσει αυτής της ιδέας φαίνεται στις
εικόνες που ακολουθούν. Για νέους αλλά και μέσης ηλικίας ΧΥΤΑ στη διαδικασία υπάρχει ένας αναερόβιος αντιδραστήρας που χρησιμοποιείται και σαν δεξαμενή εξισορρόπησης (Εικ 6.3).




*Εικόνα 6.3 1ο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων για νέους αλλά και μέσης ηλικίας ΧΥΤΑ* [37]

Στην πρώτη δεξαμενή αερισμού ένα μεγάλο ποσοστό του BOD απομακρύνεται. Τα επίμονα οργανικά κλάσματα απομακρύνονται στο 2ο στάδιο. Εάν κρίνεται αναγκαίο μετά το 2ο στάδιο γίνεται προσθήκη ενεργού άνθρακα για να βελτιωθεί η απομάκρυνση των οργανικών. Πλήρης νιτροποίηση αναμένεται μετά το 2ο στάδιο, ενώ η μονάδα απονιτροποιήσης τοποθετείται στο τέλος της διαδικασίας. Με το πέρασμα των ετών μεταβάλλονται και τα χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων. Η δεύτερη δεξαμενή μετατρέπεται σε δεξαμενή κροκίδωσης και προστίθεται μια δεξαμενή καθίζησης και ένα σύστημα αφαίρεσης αμμωνίας. Το σύστημα απονιτροποίησης μετατρέπεται σε σύστημα προσθήκης άνθρακα. Η ιλύς που παράγεται επιστρέφει στο ΧΥΤΑ. Οι μετατροπές αυτές φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



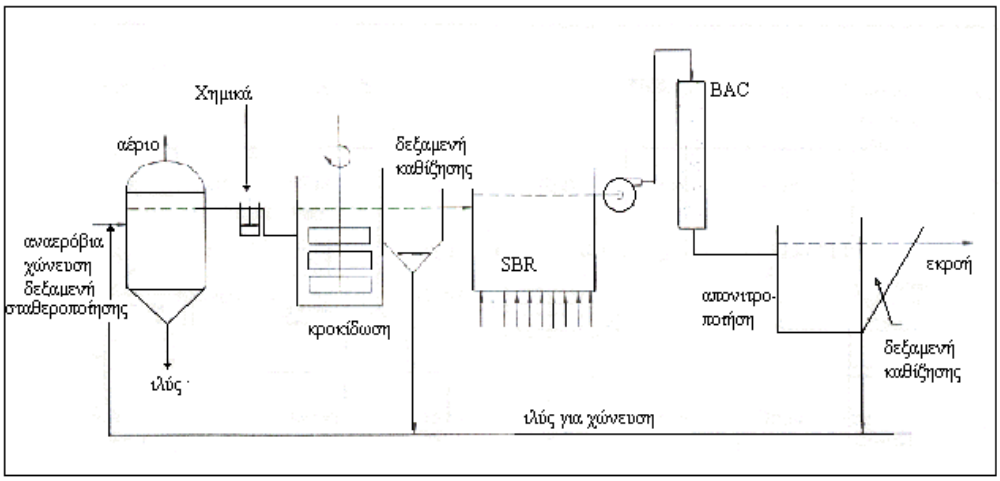

*Εικόνα 6.4 1ο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων για γηρασμένους ΧΥΤΑ* [37]

Γενικά το σύστημα αυτό είναι ικανό να παρέχει αποτελεσματική απομάκρυνση των οργανικών, των βαρέων μετάλλων, των νιτρικών και φωσφορικών καθ' όλο τον κύκλο ζωής του έργου. Ωστόσο δεν παρέχει ικανοποιητική απομάκρυνση των διαλυμένων αλάτων.

*Διαδικασία 2η*

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί ένα αναερόβιο χωνευτή / δεξαμενή εξισορρόπησης, κροκίδωση και καθίζηση για προεπεξεργασία, SBR, μονάδα ενεργού άνθρακα και απονιτροποίησης.

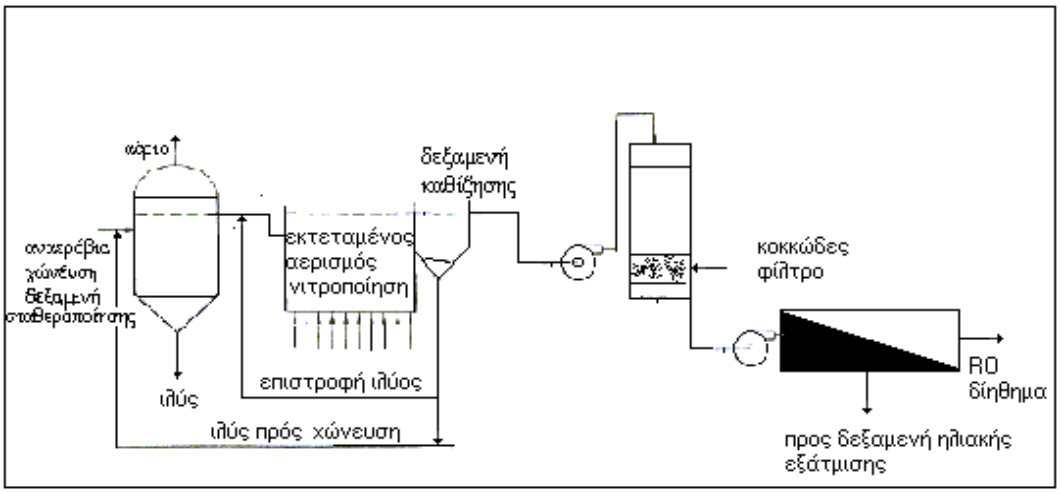
Ο αναερόβιος αντιδραστήρας παρέχει εξισορρόπηση. Η συσσωμάτωση / κατακρήμνιση έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων. Αρχικά μπορεί να απαιτηθεί προσθήκη φωσφόρου στο σύστημα SBR στο οποίο γίνεται απομάκρυνση των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών αλλά και του επίμονου οργανικού υλικού. Στην μονάδα βιολογικά ενεργού άνθρακα γίνεται περαιτέρω απομάκρυνση οργανικών και μείωση σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις αλλά και νιτροποιήση της εναπομένουσας αμμωνίας. Τα νιτρικά απομακρύνονται στην μονάδα απονιτροποιήσης. Με το πέρασμα των ετών μπορεί να προστεθεί μια μονάδα κοκκώδους ενεργού άνθρακα.




*Εικόνα 6.5 2ο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων* [37]

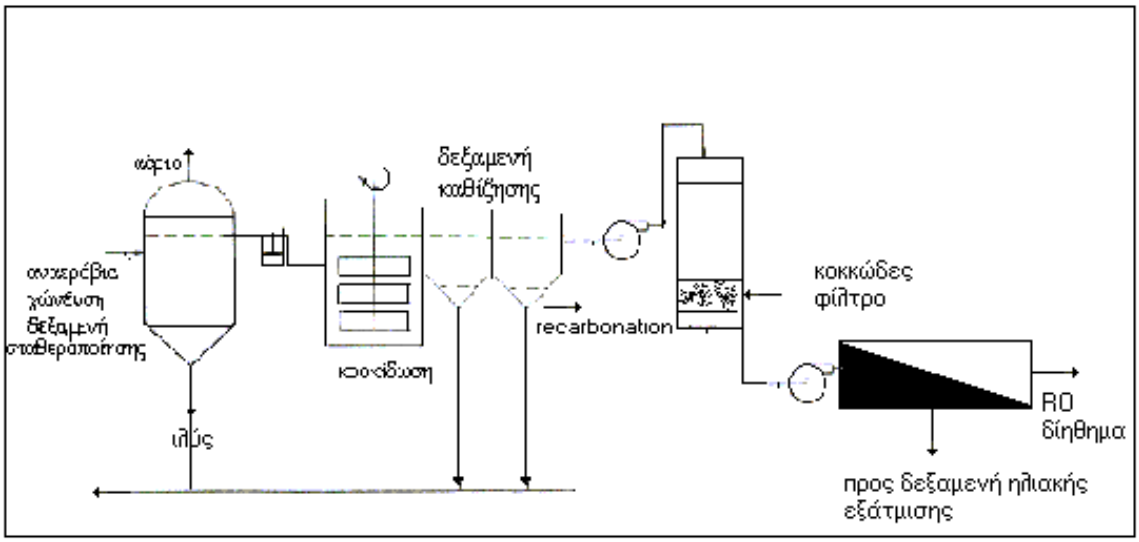
*Διαδικασία 3η*

Η επόμενη διαδικασία περιλαμβάνει δεξαμενή εξισορρόπησης, δεξαμενή αερισμού, καθίζηση, και μονάδα αντίστροφης ώσμωσης. Στην 1η δεξαμενή αυξάνεται η διαλυτότητα των οργανικών και παράλληλα γίνεται εξισορρόπηση της παροχής. Στη δεξαμενή αερισμού γίνεται αποσύνθεση του οργανικού κλάσματος των στραγγισμάτων, ενώ η εκροή αυτής οδηγείται σε φίλτρο βαρύτητας και από εκεί στην μονάδα αντίστροφης όσμωσης. Η υψηλής ποιότητας εκροή θα είναι χαμηλή σε οργανικά και διαλυμένα άλατα. Τα άλατα και η λάσπη οδηγούνται πίσω στο ΧΥΤΑ ή σε δεξαμενή προς περαιτέρω εξάτμιση της υγρασίας.




*Εικόνα 6.6 3ο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων για νέους αλλά και μέσης ηλικίας ΧΥΤΑ* [37]

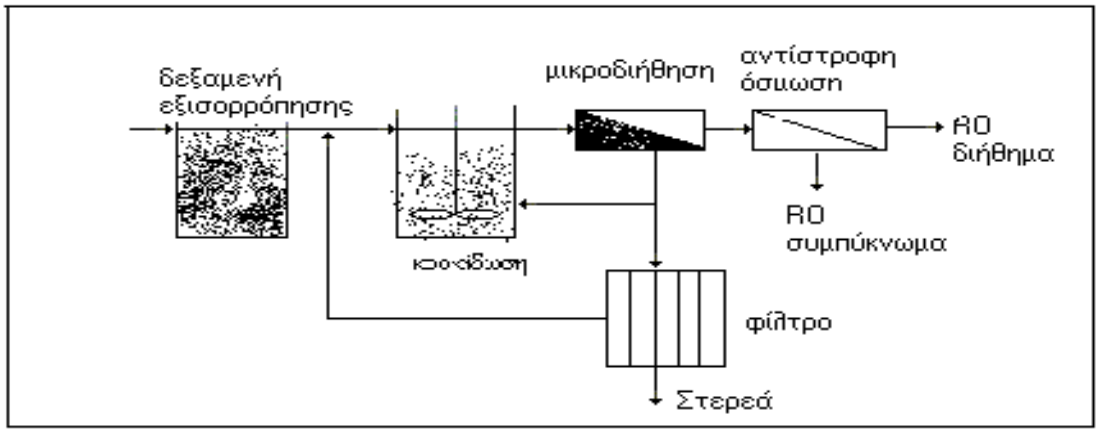
Με το πέρασμα των ετών το παραπάνω σύστημα είναι αναγκαίο να υποστεί κάποιες αλλαγές έτσι η βιολογική διαδικασία θα πρέπει να αντικατασταθεί από μονάδα συσσωμάτωσης/κατακρήμνισης ακολουθούμενη από μονάδα επιπλέον προσθήκης άνθρακα, καθίζησης και αντίστροφης όσμωσης.




*Εικόνα 6.7 3ο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων για γηρασμένους ΧΥΤΑ* [37]

*Διαδικασία 4η*

Η διαδικασία αυτή δεν έχει ακόμα εφαρμοστεί σε πραγματικό ΧΥΤΑ αλλά μόνο σε πιλοτική εγκατάσταση. Τα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι η υψηλής ποιότητας εκροή και το γεγονός πως λειτουργεί το ίδιο καλά σε όλα τα στάδια λειτουργίας του ΧΥΤΑ. Στο σύστημα αυτό γίνεται χρήση κατακρήμνισης και μικροδιήθησης για την απομάκρυνση των τοξικών μετάλλων και των αιωρούμενων στερεών και επεξεργασία μέσω αντίστροφης όσμωσης για την απομάκρυνση των οργανικών. Το πρώτο βήμα αποτελεί ουσιαστικά προεπεξεργασία για την μονάδα αντίστροφης όσμωσης. Η χημική κατακρήμνιση απομακρύνει μέταλλα, ασβέστιο και μαγνήσιο. Η εκροή από την μεμβράνη μικροδιήθησης έχει συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων μικρότερη από 10mg/L το οποίο υφίσταται πλήρη επεξεργασία στη μονάδα αντίστροφης όσμωσης.




*Εικ.6.8 4ο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων* [37]

## 6.6 Συμπεράσματα

Πριν από την επιλογή οποιασδήποτε μεθόδου επεξεργασίας, θα πρέπει να εφαρμόζεται μια πλήρης διαδικασία εκτίμησης της υπάρχουσας κατάστασης που θα συνοδεύεται από μια οικονομική ανάλυση. Είναι αναγκαίο λοιπόν, να μελετάται η σύνθεση και οι συγκεντρώσεις των στραγγισμάτων ο όγκος τους και οι περιβαλλοντικές επιδράσεις στη στρατηγική που θα υιοθετηθεί. Πάντως πρέπει να θεωρείται σίγουρο πως μια στρατηγική επεξεργασίας στραγγισμάτων κατάλληλη για κάποιον ΧΥΤΑ δεν καθίσταται αυτόματα κατάλληλη για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων όλων των ΧΥΤΑ.

Γενικά οι πιο χρήσιμες διεργασίες είναι αυτές που μπορούν να εφαρμοστούν με ελάχιστη επίβλεψη και είναι φθηνές στην κατασκευή. Η φύση των στραγγισμάτων, με τις έντονες διακυμάνσεις στην ποιότητα και ποσότητα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό. Από τη βιβλιογραφία φαίνεται πως οι βιολογικές μέθοδοι είναι οι πλέον οικονομικά εφικτές για την απομάκρυνση των οργανικών. Επιπλέον, φαίνεται να είναι πιο εύκολες στο χειρισμό, ενώ οι αναερόβιες μέθοδοι δείχνουν να έχουν λιγότερες ενεργειακές απαιτήσεις και μικρότερους ρυθμούς παραγωγής λάσπης. Οι φυσικοχημικές μέθοδοι έχουν δείξει ότι είναι αποτελεσματικές στην απομάκρυνση βαρέων μετάλλων και κολλοειδών υλικών. Εφόσον δεν υπάρχει καμία επεξεργασία που από μόνη της να είναι ικανή να ικανοποιεί τις ελάχιστες απαιτήσεις διάθεσης, είναι αναγκαίο να επιλέγεται μια συνδυασμένη διεργασία ειδικά σχεδιασμένη ώστε να επεξεργάζεται συγκεκριμένο στράγγισμα παρόμοια με αυτή που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Κάποιες από τις διεργασίας είναι πιθανόν να πρέπει να τροποποιηθούν κατά τη διάρκεια της ζωής του ΧΥΤΑ λόγω της διαφοροποίησης της ποιότητας των διασταλλαγμάτων σε συνάρτηση με το χρόνο. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η διαρκής παρακολούθηση της σύστασης των στραγγισμάτων έτσι ώστε να ελέγχεται η εύρυθμη λειτουργία του συστήματος και η καλής ποιότητας εκροή ώστε να ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες εμφάνισης προβλήματος στον αποδέκτη.

Ο πίνακας που ακολουθεί στις επόμενες σελίδες αποτελεί μια σύνοψη ποικίλων παραμέτρων που θεωρούνται σημαντικοί στην επιλογή του συστήματος επεξεργασίας στραγγισμάτων.

| **Επεξεργασία** | **Απαίτηση γης** | **Επιρροή από κλιματικές συνθήκες** | **Ικανότητα επεξεργασίας ποικίλων παροχών** | **Ικανότητα επεξεργασίας εισροών διαφορετικής σύνθεσης** | **Σταθερότητα/ αξιοπιστία μεθόδου** | **Ευκολία λειτουργίας και συντήρησης** | **Ευκολία αναβάθμισης διαδικασίας** | **Λειτουργικοί κίνδυνοι** | **Αέρια ρύπανση** | **Απόβλητα** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Φυσική** | | | | | | | | | | |
| Επίπλευση | μικρή | χαμηλή | ανεπαρκής | ανεπαρκής | επαρκής | ανεπαρκής | επαρκής | χημικά | VOC | ακάθαρτος αφρός |
| Αφαίρεση αμμωνίας | μικρή | υψηλή | επαρκής | επαρκής | καλή | ανεπαρκής | ανεπαρκής | | VOC αμμωνία | Αμμωνία |
| Καθίζηση | μικρή | χαμηλή | ανεπαρκής | επαρκής | καλή | καλή | καλή | | | backwash |
| Διαδικασίες μεμβρανών | μικρή | μέση | ανεπαρκής | καλή | καλή | επαρκής | επαρκής | χημικά | | άλατα |
| **Χημική** | | | | | | | | χημικά | | |
| Κροκίδωση/ Κατακρήμνιση | μέση | χαμηλή | καλή | καλή | καλή | επαρκής | καλή | χημικά | | |
| Χημική οξείδωση | μικρή | μέση | επαρκής | επαρκής | επαρκής | | επαρκής | | χημική οσμή | |
| Ιοντοανταλλαγή | μικρή | χαμηλή | | επαρκής | επαρκής | επαρκής | επαρκής | | | |
| Προσρόφηση άνθρακα | μικρή | χαμηλή | | | καλή | επαρκής | επαρκής | έκρηξη φωτιάς | αέρια | χρησιμ. άνθρακας |
| **Βιολογική** | | | | | | | | | | |
| Αερόβια suspended growth | μέση | μέση | καλή | επαρκής | καλή | καλή | καλή | | VOC | ιλύς |
| Αερόβιο fixed film | μεγάλη | χαμηλή | επαρκής | καλή | καλή | καλή | ανεπαρκής | | VOC | ιλύς |
| Αναερόβια suspended growth | μεγάλη | υψηλή | καλή | επαρκής | επαρκής | επαρκής | καλή | έκρηξη φωτιάς | | ιλύς |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Αναερόβια fixed growth | μέση | υψηλή | επαρκής | καλή | καλή | καλή | ανεπαρκής | έκρηξη φωτιάς | | ιλύς |
| SBR | μέση | μέση | επαρκής | καλή | επαρκής | ανεπαρκής | ανεπαρκής | | VOC | ιλύς |

[37]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο
SBR & ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΒΙΟΤΟΠΩΝ

## 7.1 Εγκατάσταση επεξεργασίας στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Χανίων

Η εγκατάσταση επεξεργασίας στραγγισμάτων που πρόκειται να λειτουργήσει τους ερχόμενους μήνες στο ΧΥΤΑ Χανίων περιλαμβάνει τρία στάδια
1ο στάδιο: βιολογική επεξεργασία σε δεξαμενές SBR
2ο στάδιο: τεχνητός υδροβιότοπος
3ο στάδιο: φίλτρα ενεργού άνθρακα (το σύστημα δεν πρόκειται να λειτουργήσει άμεσα)
Τα στραγγίσματα που παράγονται θα οδηγούνται προς το αντλιοστάσιο ανύψωσης και μέσω αντλίας στη δεξαμενή εξισορρόπησης.
Στη δεξαμενή εξισορρόπησης, που έχει χωρητικότητα 1200m$^3$, θα πραγματοποιείται ομογενοποίηση των ρευμάτων, και εξισορρόπηση της ροής. Εντός της δεξαμενής υπάρχει αναδευτήρας, εγκατεστημένος ισχύος 7,6 kw.
Τα στραγγίσματα θα αντλούνται, μέσω μίας αντλίας, με σταθερή παροχή προς τις δύο δεξαμενές βιολογικής επεξεργασίας SBR. Οι δύο αυτές δεξαμενές που λειτουργούν παράλληλα αποτελούν αντιδραστήρες διαδοχικής φορτίσεως διαλείποντος έργου, είναι πλήρους αναμείξεως και περιλαμβάνουν όλα τα στάδια μιας συμβατικής βιολογικής επεξεργασίας. Για τον αερισμό των στραγγισμάτων υπάρχουν σε κάθε δεξαμενή από τρεις αεριστήρες .

*Εικόνα 7.1 Σύστημα επεξεργασίας στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Χανίων*

Τα επεξεργασμένα στραγγίσματα από τις δεξαμενές SBR θα αντλούνται προς τις δεξαμενές των υδροχαρών φυτών (τεχνητός υδροβιότοπος), για περαιτέρω επεξεργασία και βελτίωση των χαρακτηριστικών τους. Στις δεξαμενές αυτές γίνεται

παράλληλα βιολογική επεξεργασία και διύλιση των στραγγισμάτων διαμέσου των υποστρωμάτων (διαβάθμιση χαλικιών και άμμου) που τοποθετούνται στο εσωτερικό των λεκανών του υδροβιότοπου, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μείωση τόσο του οργανικού φορτίου όσο και της συγκέντρωσης των αιωρούμενων στερεών.

Με δίκτυο σωληνώσεων τα επεξεργασμένα στραγγίσματα θα συλλέγονται από τον υδροβιότοπο και θα οδηγούνται στο αντλιοστάσιο τροφοδοσίας του ενεργού άνθρακα. Στο αντλιοστάσιο αυτό υπάρχουν δύο αντλίες ξηρού τύπου που τροφοδοτούν την μονάδα του ενεργού άνθρακα.

*Εικόνα 7.2 Κατασκευή τεχνητού υγροβιότοπου στο ΧΥΤΑ Χανίων*

Η μονάδα του ενεργού άνθρακα θα περιλαμβάνει:

α) ένα φίλτρο άμμου - ανθρακίτη, για την κατακράτηση των αιωρούμενων στερεών, το οποίο καθαρίζεται με αντίστροφη έκπλυση.

β) δύο φίλτρα ενεργού άνθρακα, παράλληλης λειτουργίας, μέσω των οποίων γίνεται η τριτοβάθμια επεξεργασία των στραγγισμάτων.

Στο φίλτρο άμμου - ανθρακίτη θα κατακρατούνται τα εναπομείναντα αιωρούμενα στερεά και στα φίλτρα ενεργού άνθρακα θα γίνεται, προσρόφηση οργανικών ρυπαντών, μη πολικών, χαμηλής διαλυτότητας και υψηλού μοριακού βάρους ενώ πραγματοποιείται και σημαντικός αποχρωματισμός, των στραγγισμάτων.

Στην συνέχεια τα επεξεργασμένα στραγγίσματα θα καταλήγουν στην δεξαμενή αποθήκευσης - άρδευσης, απ' όπου μέσω πιεστικού αντλητικού συστήματος θα τροφοδοτούνται προς το δίκτυο άρδευσης των χώρων πρασίνου του έργου.

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ανάγκη άρδευσης τα επεξεργασμένα στραγγίσματα υπερχειλίζουν από την δεξαμενή άρδευσης προς την δεξαμενή επανακυκλοφορίας,

απ' όπου μέσω δύο αντλιών θα επανακυκλοφορούν προς τον χώρο του ΧΥΤΑ.
Η περίσσεια ιλύος, που δημιουργείται στην βιολογική-βαθμίδα, θα αντλείται στην δεξαμενή αποθήκευσης και πάχυνσης και στην συνέχεια η παχυμένη και χωνευμένη ιλύς θα οδηγείται προς τον χώρο του ΧΥΤΑ.
Η ποιότητα της εκροής σύμφωνα με όσα ορίζει η νομοθεσία θα πρέπει να πληρεί τα όρια του επόμενου πίνακα (οι τιμές αναφέρονται σε mg/L).

| **Παράμετρος** | **Συγκέντρωση** |
|---|---|
| $BOD_5$ | ≤ 25 |
| COD | ≤ 80 |
| TSS | ≤ 25 |
| $N\text{-}NH_4$ | ≤ 8 |
| $N\text{-}NO_3$ | ≤ 3 |
| TN | ≤ 3 |
| TP | ≤ 2 |

*Πίνακας 7.1 Όρια εκροής επεξεργασμένων στραγγισμάτων*

Στη συνέχεια εξετάζονται αναλυτικότερα η λειτουργία του SBR αλλά και των φυσικών συστημάτων

## 7.2 Διαδοχικός Batch αντιδραστήρας (SBR)

Αρχικά τα υγρά απόβλητα περνούν από εσχάρα και έπειτα κινούνται προς τον SBR. Η διαδικασία του κύκλου του SBR περιλαμβάνει μια σειρά διαδοχικών βημάτων που κατά κύριο λόγο είναι τα εξής: πλήρωση, αντίδραση, καθίζηση, απομάκρυνση διαυγούς, σταθεροποίηση, (fill, react, settle, decant, idle). Όταν είναι επιθυμητή η βιολογική απομάκρυνση των θρεπτικών τα βήματα του κύκλου τροποποιούνται ώστε να προσφέρουν ανοξικές ή αναερόβιες περιόδους μέσα στο συνήθη κύκλο.
Μετά την SBR διάταξη τα απόβλητα οδηγούνται σε μια δεξαμενή εξισορρόπησης, και από εκεί πιθανά φιλτράρονται για την περαιτέρω κατακράτηση κάποιων στερεών και τέλος χλωριώνονται.

*Συνήθεις τροποποιήσεις SBR*

Ο SBR μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να παρέχει β'βάθμια επεξεργασία, νιτροποίηση, απονιτροποίηση και βιολογική απομάκρυνση θρεπτικών. Κάποια συστήματα SBR χρησιμοποιούν συνεχή ροή ώστε να ελαχιστοποιούν τους σύντομους κύκλους. Οι SBR αρχικά λειτουργούσαν σε ζεύγη έτσι ώστε ο ένας αντιδραστήρας πλήρωνε τη δεξαμενή κατά τη διάρκεια μισού κύκλου ενώ τα απόβλητα στον άλλο αντιδραστήρα αερίζονταν και καθίζαναν. Οι σύγχρονες τροποποιήσεις

περιλαμβάνουν ένα SBR με μια surge/holding δεξαμενή, ένα σύστημα τριών SBR στον οποίο ο χρόνος πλήρωσης είναι το ένα τρίτο του ολικού χρόνου του κύκλου, και έναν SBR συνεχούς ροής.
Τα μεγέθη των SBR μπορούν να ποικίλουν έτσι υπάρχουν SBR που μπορούν να επεξεργάζονται από 3000gpd έως πάνω από MGD. Οι τεχνολογίες είναι εφαρμόσιμες για απομάκρυνση BOD, TSS, νιτροποίηση, απονιτροποίηση και βιολογική απομάκρυνση φωσφορικών.

*Περιορισμοί*
Τα συστήματα αερισμού πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να καλύπτουν τις ολικές ανάγκες σε αέρα κατά τα βήματα του αερισμού, της πλήρωσης και των αντιδράσεων. Το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του SBR μπορεί να είναι πολύ υψηλό στην περίπτωση που η ροή των υγρών αποβλήτων είναι μεγαλύτερη των 10MGD.

*Απόδοση*
Η μέση απόδοση βασιζόμενη σε στοιχεία από 19 εγκαταστάσεις συνοψίζεται στον επόμενο πίνακα.

| **Παράμετροι** | **Απομάκρυνση** |
|---|---|
| BOD | 89-99% |
| TSS | 85-97% |
| Νιτροποίση | 91-97% |
| Ολικό άζωτο | >75% |
| Φωσφορικά | 57-69% |

*Πίνακας 7.2 Απόδοση συστημάτων SBR* [41]

Οι κατασκευαστές των SBR συνήθως δίνουν εγγύηση για την εκροή των αποβλήτων που αφορά τις παρακάτω παραμέτρους
BOD≤10mg/L
TSS≤10mg/L
TN≤5-8mg/L
TP≤1-2mg/L
[41]

*Απαίτηση σε χημικά*
Στην περίπτωση που τα επεξεργασμένα στραγγίσματα διατίθενται στο περιβάλλον είναι αναγκαία η χλωρίωση ή και η προσθήκη χλωριούχου σιδήρου για την τήρηση των αυστηρών ορίων για τα φωσφορικά.

*Παραγόμενα υπολείμματα*

Δευτερεύουσα λάσπη παράγεται σε ποσότητες παρόμοιες της επεξεργασίας ενεργούς ιλύος και εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος [SRT (sludge retention time) και οργανικό φορτίο]

*Σχεδιαστικά κριτήρια*

- Φόρτιση στερεών:

Η φόρτιση στερεών κυμαίνεται από 0,05-0,3kgBOD/kgMLVSS. Η τυπική τιμή ισούται με 0,1kgBOD/kgMLVSS.

- Ποσοστό πτητικών στερεών σε σχέση με τα εισερχόμενα στερεά:

Το ποσοστό κυμαίνεται από 65-80%.

- Φόρτιση χώρου:

Η τιμή κυμαίνεται από 0,08-0,24kgBOD/$m^3$d

- Υδραυλικός χρόνος παραμονής:

Ο χρόνος αυτός είναι συνάρτηση της σύστασης των στραγγισμάτων, των βιολογικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα και του απαιτούμενου βαθμού επεξεργασίας των στραγγισμάτων. Ο χρόνος παραμονής των στραγγισμάτων κυμαίνεται από 12-50 ώρες. Στα αστικά λύματα ο χρόνος αυτός είναι συνήθως 24 ώρες, ωστόσο ο χρόνος παραμονής για τα στραγγίσματα μπορεί να είναι έως και μερικές ημέρες.

- Επανακυκλοφορία ενεργού λάσπης:

Εφόσον εφαρμόζεται ακολουθεί τις απαιτήσεις ενός συμβατικού συστήματος επεξεργασίας λυμάτων .

- Ηλικία λάσπης : Η παραγόμενη λάσπη μετά το τέλος του κύκλου απομάκρυνσης της λάσπης (σε τυπικά αστικά λύματα ανά 7 ημέρες) θεωρείται αδρανής, ωστόσο στα στραγγίσματα η χρονική αυτή περίοδος μπορεί να είναι πολύ μεγάλη και σε αρκετές περιπτώσεις πιθανόν να μην είναι αναγκαία η απομάκρυνση της λάσπης.

- Συγκέντρωση παραγόμενης λάσπης: Η παραγόμενη λάσπη μπορεί να κυμαίνεται από 3500-4000mg/L συνήθως για λόγους ασφαλείας αλλά και προκειμένου να εξασφαλίζονται οι απαραίτητοι χρόνοι αποικοδόμησης του οργανικού φορτίου.

- Θρεπτικά συστατικά: Η τυπική αναλογία οργανικού φορτίου / αζώτου/ φωσφόρου, ώστε να εξασφαλίζεται ή σύνθεση του κυτταρικού υποστρώματος είναι 14/2/1. Σε περίπτωση που τα υγρά απόβλητα είναι φτωχά σε θρεπτικά θα πρέπει να γίνεται προσθήκη με δοσομέτρηση ποσότητας διαλυμάτων ουρίας (σε έλλειψη αζώτου) και φωσφορικού οξέος ( σε έλλειψη φωσφόρου).

- Απομάκρυνση επεξεργασμένων αποβλήτων: Συνήθως εφαρμόζεται απομάκρυνση των επεξεργασμένων αποβλήτων σε ημερήσια βάση κατά 60% του ενεργού όγκου των δεξαμενών των διεργασιών. Ο όγκος αυτός αποτελεί τον όγκο που

εξασφαλίζει τον υδραυλικό χρόνο παραμονής των νεοεισερχόμενων αποβλήτων ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις εξόδου. Ο υπόλοιπος όγκος αποτελεί τον όγκο αδράνειας και αποθήκευσης της ανενεργού λάσπης. [3]

### 7.2.1 Λειτουργία ενός κύκλου του SBR

Ένας τυπικός κύκλος SBR όπως προαναφέρθηκε περιλαμβάνει πέντε βήματα τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. [42]

*Πλήρωση της δεξαμενής*

Τα ακατέργαστα στραγγίσματα οδηγούνται στη δεξαμενή όπου αναμιγνύονται με τα απόβλητα που έχουν κρατηθεί εκεί. Η εισερχόμενη ποσότητα των στραγγισμάτων εξαρτάται από τη δυναμικότητα της μονάδας αλλά και από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των στραγγισμάτων. Κατά το πέρας του κύκλου λειτουργίας το 10% του συνολικού όγκου τους διατίθενται σαν επεξεργασμένα υγρά απόβλητα ενώ το υπόλοιπο 90% περιλαμβάνει την ποσότητα της λάσπης που απομακρύνεται σε μεγαλύτερους κύκλους από τα υγρά απόβλητα. Γενικά η παραγωγή λάσπης στα στραγγίσματα είναι μικρότερη από ότι στα αστικά λύματα. Έτσι ενώ η απομάκρυνση της λάσπης στα αστικά λύματα γίνεται ανά εβδομάδα περίπου, η χρονική αυτή περίοδος για τα στραγγίσματα είναι αρκετά μεγαλύτερη. Ο αερισμός ξεκινάει και συγχρόνως αρχίζει να λαμβάνει χώρα και η βιολογική αποδόμηση.

*Εικόνα 7.3 Φάση πλήρωσης SBR*

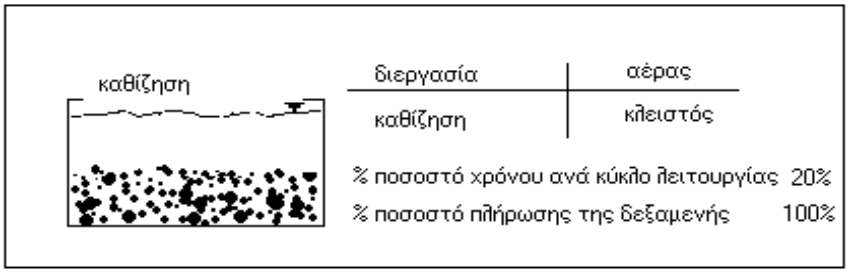
*Αντίδραση- Αερισμός*

Το αναμεμιγμένο απόβλητο αερίζεται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή του BOD. Κατά τη διάρκεια αυτού του βήματος λαμβάνουν χώρα οι αερόβιες διεργασίες βιολογικής αποδόμησης του οργανικού φορτίου και νιτροποίησης των αμμωνιακών που περιέχονται στα στραγγίσματα.

*Εικόνα 7.4 Φάση αερισμού SBR*

*Καθίζηση*

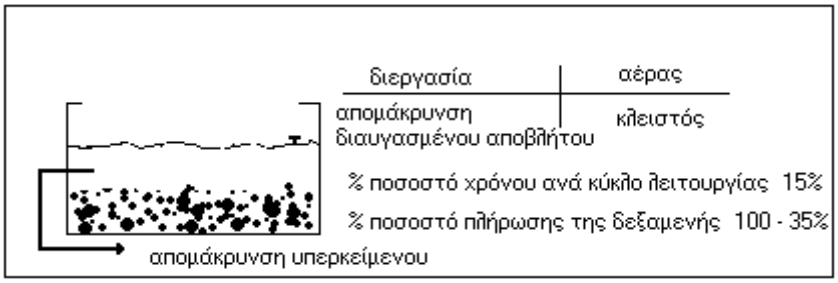
Ο αερισμός σταματάει και τα στερεά καθιζάνουν στον πυθμένα της δεξαμενής. Στα SBR η διεργασία καθίζησης είναι πολύ πιο αποδοτική από ότι σε συστήματα συνεχούς ροής καθώς τα στερεά δεν δέχονται επιδράσεις ανατάραξης και βρίσκονται σε κατάσταση πλήρους ηρεμίας.




*Εικόνα 7.5 Φάση καθίζησης SBR*

*Απομάκρυνση υπερκείμενου – αποστάλλαξη*

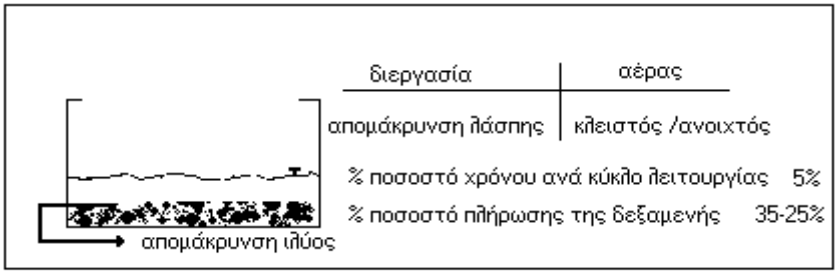
Τα υπερκείμενα υγρά απομακρύνονται από την βιολογική διαδικασία ως επεξεργασμένα απόβλητα από την κορυφή της δεξαμενής. Παράλληλα, είναι δυνατόν να πραγματοποιείται και η απομάκρυνση της περίσσειας λάσπης, ανάλογα με τον επιθυμητό χρόνο παραμονής της στο σύστημα και τη συγκέντρωσή της. Τα απόβλητα με ήπιες συνθήκες ροής μεταφέρονται εκτός του αντιδραστήρα, ώστε να αποτρέπεται η ανάμιξη με τη λάσπη του πυθμένα και τα απομακρυνόμενα υγρά να μην περιέχουν στερεά, στον βαθμό που αυτό είναι εφικτό. Συνήθεις μηχανισμούς απομάκρυνσης των διαυγασμένων υγρών αποτελούν οι ρυθμιζόμενοι υπερχειλιστές και οι διαβαθμισμένες δικλείδες καθ΄ ύψος με περιμετρική κάλυψη των δεξαμενών. Στο στάδιο αυτό δεν υπάρχει τροφοδοσία αέρα ώστε να παραμένουν τα καθιζάνοντα στερεά σε ηρεμία.




*Εικόνα 7.6 Φάση απομάκρυνσης υπερκείμενου SBR*

*Αδράνεια*

Η φάση της αδράνειας συμβαίνει μεταξύ της φάσης απομάκρυνσης του υπερκείμενου υγρού και της νέας πλήρωσης της δεξαμενής. Η χρονική διάρκεια της φάσης αυτής ποικίλει ανάλογα με το ρυθμό εκροής αλλά και την ακολουθούμενη στρατηγική λειτουργίας του συστήματος.



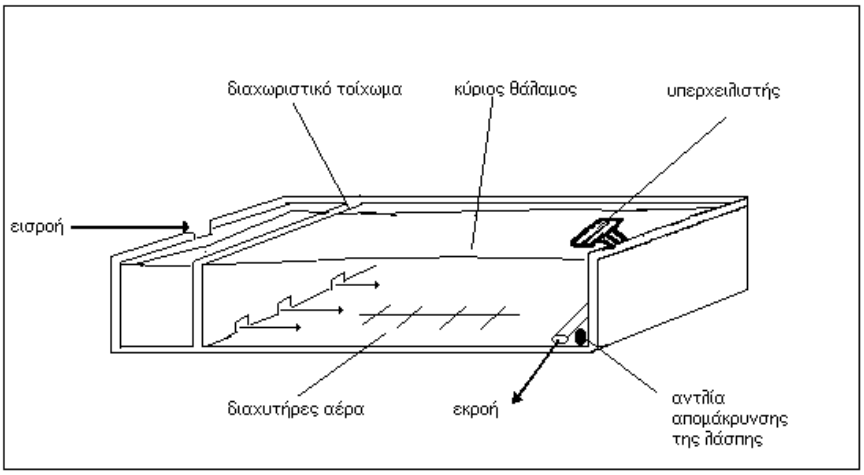

*Εικόνα 7.7 Φάση αδράνειας SBR*

*Περιγραφή εξοπλισμού*

Το σύστημα SBR περιλαμβάνει μια ή περισσότερες δεξαμενές εξοπλισμένες με αντιδραστήρα, σύστημα αερισμού, μηχανισμό απομάκρυνσης της λάσπης μηχανισμό αποστάλλαξης για την απομάκρυνση του υπερκείμενου επεξεργασμένου στραγγίσματος, και ένα σύστημα ελέγχου της χρονικής περιόδου του κύκλου. Οι δεξαμενές μπορούν να είναι κατασκευασμένες από ατσάλι ή τσιμέντο. Το σχήμα δεν είναι ιδιαίτερα κρίσιμο αλλά συνήθως είναι τετραγωνικό ή κυκλικό.

Ο αερισμός στον SBR μπορεί να παρασχεθεί από λεπτούς ή τραχείς διαχυτήρες, που δημιουργούν φυσαλίδες, ή επιπλέοντες αναδευτήρες

Ο μηχανισμός αποστάλλαξης περιλαμβάνει ένα βυθισμένο σωλήνα εξόδου με αυτόματες βαλβίδες, ρυθμιστικό φράγμα, κινούμενα διαχωριστικά. και υποβρύχιες αντλίες. Το βασικό πρόβλημα που πιθανόν να αντιμετωπίσει ο μηχανισμός είναι η ρόφηση στερεών κατά την έναρξη της τέταρτης φάσης. Η πιθανότητα να συμβεί κάτι τέτοιο μπορεί να ελαχιστοποιηθεί εάν υπάρχει ανακυκλοφορία της ροής τα πρώτα λεπτά σε ένα δεύτερο αντιδραστήρα έως ότου το επιπλέον στην επιφάνεια υγρό αρχίσει να καθαρίζει.




*Εικόνα 7.8 Σχηματική απεικόνιση SBR* [42]

### 7.2.2 Πλεονεκτήματα –Μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ο αντιδραστήρας SBR είναι τα εξής:

- Στα πρώτα στάδια ζωής της εγκατάστασης οπότε και η ροή των αποβλήτων πιθανόν να είναι αρκετά χαμηλότερη από την ροή σχεδιασμού οι αισθητήρες στάθμης που ελέγχουν το χρόνο των κύκλων μπορούν να ρυθμιστούν σε ένα χαμηλότερο επίπεδο. Η διάρκεια των κύκλων θα είναι ίδια με αυτή του σχεδιασμού αλλά η ισχύς δεν θα σπαταλάται σε επιπλέον αερισμό.
- Η δεξαμενή του SBR λειτουργεί σαν δεξαμενή εξισορρόπησης κατά την πλήρωση, έτσι ρυθμίζει τις παροχές αιχμής και τις αιφνίδιες αλλαγές στα φορτία του BOD, χωρίς να μειώνεται η ποιότητα της επεξεργασίας.
- Δεν είναι απαραίτητη η χρήση αντλητικού συστήματος επιστροφής της ενεργούς ιλύος. καθώς ο αερισμός και η καθίζηση εκτελούνται στην ίδια δεξαμενή.
- Περιοδικές εκκενώσεις μπορούν να διατηρήσουν στην εκροή στα επιθυμητά όρια.
- Η ανάπτυξη νηματοειδών μικροοργανισμών, που προκαλούν συσσωρεύσεις λάσπης μπορεί να αποφευχθεί με ρυθμίσεις στην αναλογία θρεπτικών / βιομάζα και αερισμό κατά τη διάρκεια πλήρωσης της δεξαμενής.
- Το σύστημα SBR έχει μικρότερες απαιτήσεις σε χώρο από άλλα συστήματα.
- Υπάρχει εξοικονόμηση αρχικού κεφαλαίου καθώς δεν είναι απαραίτητες άλλες βαθμίδες επεξεργασίας και επιπλέον εξοπλισμός.
- Διαπιστώνεται υψηλότερο επίπεδο τεχνογνωσίας συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα ενεργούς ιλύος.

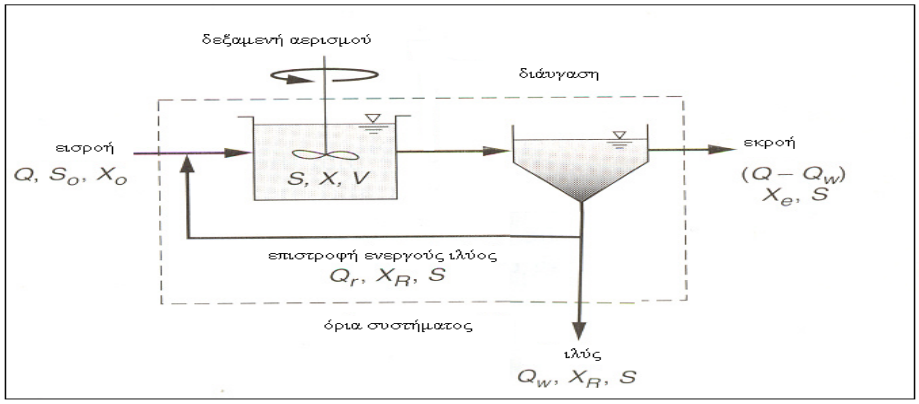
Τα παρακάτω αποτελούν πιθανά μειονεκτήματα τα οποία όμως μπορούν να αποφευχθούν

ή να ξεπεραστούν με ορθό σχεδιασμό, ρυθμίσεις κατά τη διαδικασία ή τροποποιήσεις του εξοπλισμού.

- Προβλήματα με την καθίζηση της λάσπης θα οδηγήσουν στην ύπαρξη στερεών στην εκροή και μείωση της τελικής απόδοσης
- Λόγω της σχετικά υψηλής ροής κατά την φάση της απομάκρυνσης του υπερκείμενου αποβλήτου μπορεί να απαιτηθεί υπερεκτίμηση κατά το σχεδιασμό όταν το σύστημα ακολουθείται από απολύμανση.
- Σε μεγάλους χρόνους παραμονής είναι δυνατόν να λάβει χώρα απονιτροποίηση και η λάσπη πιθανόν να αρχίσει να επιπλέει εξαιτίας της δημιουργίας αερίων του αζώτου. Η κατάσταση μπορεί να επιδεινωθεί σε περιόδους υψηλής ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας.
- Ο εξοπλισμός της διαδικασίας του αερισμού πρέπει να είναι μεγαλύτερος από ότι στα συνήθη συστήματα ενεργούς ιλύος καθώς ο αέρας εισάγεται σε συντομότερα χρονικά διαστήματα.
- Οι αγωγοί εκροής είναι αναγκαίο να υπερδιαστασιολογούνται καθώς η απομάκρυνση των 'καθαρών' στραγγισμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη από τις φυσιολογικές εισροές. [41]

### 7.2.3 Κινητικές του SBR

Κατά την περίοδο της αντίδρασης εφαρμόζονται οι κινητικές batch. Η συγκέντρωση του υποστρώματος είναι πολύ μεγαλύτερη αρχικά από ότι σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας ενεργούς ιλύος και σταδιακά μειώνεται εξαιτίας της κατανάλωσης από την βιομάζα. Η αλλαγή στην συγκέντρωση του υποστρώματος με το χρόνο μπορεί να καθοριστεί ξεκινώντας από τη σχέση από το ισοζύγιο μάζας για την κατανάλωση του υποστρώματος στη δεξαμενή αερισμού.




*Εικόνα 7.9 Απεικόνιση διαδικασίας ενεργούς ιλύος* [40]

Συσσώρευση = εισροή - εκροή + παραγωγή

$$\frac{dS}{dt}V = QS_o - QS + r_{su}V$$

όπου $r_{su} = -\dfrac{\mu_m XS}{Y(K_s + S)}$

Q: παροχή αποβλήτου, $m^3/d$

$S_o$: συγκέντρωση εισερχόμενου διαλυτού υποστρώματος, g BOD

S: συγκέντρωση εξερχόμενου διαλυτού υποστρώματος, g BOD

V: όγκος δεξαμενής αερισμού, $m^3$

X: συγκέντρωση βιομάζας, $g/m^3$

$K_s$: σταθερά που αντιστοιχεί στη συγκέντρωση του υποστρώματος στο μισό της μέγιστης ειδικής κατανάλωσης υποστρώματος, $g/m^3$

$\mu_m$ = kY: μέγιστος ειδικός βακτηριακός ρυθμός ανάπτυξης, g νέων κυττάρων/g κυττάρων·d

k: μέγιστος ειδικός ρυθμός κατανάλωσης υποστρώματος g /g ·d

Y: συντελεστής πραγματικής παραγωγής, g/g

Στην batch διαδικασία Q= 0 οπότε η συγκέντρωση του υποστρώματος είναι

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu_m XS}{Y(K_s + S)}$$

ολοκλήρωση της πιο πάνω σχέσης θα δώσει

$$K_s \ln\frac{S_o}{S_t} + (S_o - S_t) = X\left(\frac{\mu_m}{Y}\right)t$$

όπου

$S_o$: αρχική συγκέντρωση υποστρώματος σε t=0, mg/L

t=χρόνος, d

$S_t$: συγκέντρωση υποστρώματος σε χρόνο t, mg/L

Η ίδια έκφραση κινητικής εφαρμόζεται και στην περίπτωση της νιτροποίησης όπου $X=X_n$, η συγκέντρωση των αντίστοιχων βακτηρίων είναι S=N, η συγκέντρωση των $NH_4$-N, και οι συντελεστές του μοντέλου του Monod είναι

$$K_n \ln\frac{N_o}{N_t} + (N_o - N_t) = X_n\left(\frac{\mu_{mn}}{Y}\right)t$$

όπου

$N_o$: αρχική συγκέντρωση $NH_4$-N σε t=0, mg/L

$N_t$: συγκέντρωση $NH_4$-N σε χρόνο t, mg/L

$X_n$: συγκέντρωση βακτηρίων νιτροποίησης, mg/L

Ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης των βακτηρίων νιτροποίησης επηρεάζεται από τη συγκέντρωση του DO. Η επιρροή αυτή περιλαμβάνεται στην πιο πάνω εξίσωση ως εξής:

$$K_n \ln\frac{N_o}{N_t} + (N_o - N_t) = X_n\left(\frac{\mu_{mn}}{Y}\right)\left(\frac{DO}{K_o + DO}\right)t$$

όπου

DO: συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, $g/m^3$

$K_o$: ο συντελεστής μέσου κορεσμού του DO, $g/m^3$

Οι πιο πάνω κινητικές εξισώσεις batch μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν αν ο χρόνος αερισμού που επιλέγεται κατά τον σχεδιασμό ενός SBR είναι ικανός για να παρέχει το επιθυμητό επίπεδο αποικοδόμησης. Ένα συνολικό ισοζύγιο μάζας μπορεί να γίνει αρχικά υποθέτοντας πως ένα συγκεκριμένο ποσοστό υποστρώματος απομακρύνεται για να καθοριστούν οι συγκεντρώσεις της βιομάζας (X και $X_n$) για χρήση στις εξισώσεις.
[40]

### 7.2.4 Σχεδιαστικές εξισώσεις για τη διαστασιολόγηση SBR αντιδραστήρα

Οι σχεδιαστικές εξισώσεις που ισχύουν για τον SBR παρατίθενται στη συνέχεια.

α) Απομάκρυνση του $BOD_5$ ( kgr/d) = [($BOD_{εισροής}$- $BOD_{εκροής}$) (mg/L)] · παροχή (L/d) $\cdot 10^{-6}$ (kg/mg)

$$\text{Απαιτούμενη αερόβια μάζα (kgr)} \frac{BOD_5 \text{ που απομακρύνθηκε(kg/d)}}{\text{F/M αναλογία(kgr}BOD_5\text{/kgMLSS – d)}}$$

$$\text{Όγκος αντιδραστήρα}_{\text{(χαμηλή στάθμη νερού)}} (m^3) = \frac{\text{MLSS μάζα(kgr)}}{\text{MLSS συγκέντρωση(mg/L)}} \cdot \frac{10^6 \text{(mg/kg)}}{10^3}$$

Καθώς ο όγκος αυτός αποτελεί το 60% του ολικού όγκου

Ολικός όγκος αντιδραστήρα ($m^3$)= Όγκος αντιδραστήρα $_{(χαμηλή στάθμη νερού)}$/(1-0,6)

β) Decant όγκος (όγκος αποστάλλαξης)

Ολικός decant όγκος = Ολικός όγκος αντιδραστήρα ($m^3$)-Όγκος αντιδραστήρα $_{(χαμηλή στάθμη νερού)}$($m^3$)

γ) Χρόνος παραμονής

$$\text{max χρόνος παραμονής (hrs)} = \frac{\text{ολικός όγκος αντιδραστήρα (m}^3\text{)}}{\text{παροχή}\,(L/d)\cdot 10^3 (m^3/L)} \cdot 24(hr/d)$$

$$\text{min χρόνος παραμονής (hrs)} = \frac{\text{όγκος decant (m}^3\text{)}}{\text{παροχή}\,(L/d)\cdot 10^3 (m^3/L)} \cdot 24(hr/d)$$

δ) Διαστάσεις SBR

$$\text{Επιφάνεια δεξαμενής (m}^2\text{)} = \frac{\text{όγκος δεξαμενής}_{(χαμηλή στάθμη νερού)}\text{(m}^3\text{)}}{\text{ελάχιστο βάθος (m)}}$$

$$\text{Μήκος δεξαμενής (m)} = \sqrt{\text{επιφάνεια δεξαμενής}}$$

$$\text{Βάθος δεξαμενής (m)} = \frac{\text{ολικός όγκος αντιδραστήρα (m}^3\text{)}}{\text{επιφάνεια δεξαμενής (m}^2\text{)}}$$

Απαίτηση νιτρογενούς (nitrogeneous) $O_2$ ($kgrO_2/d$) = $NH_3$-$N_{οξειδωμένο}$(kgr/d)· $kgO_2/kgrBOD_5$

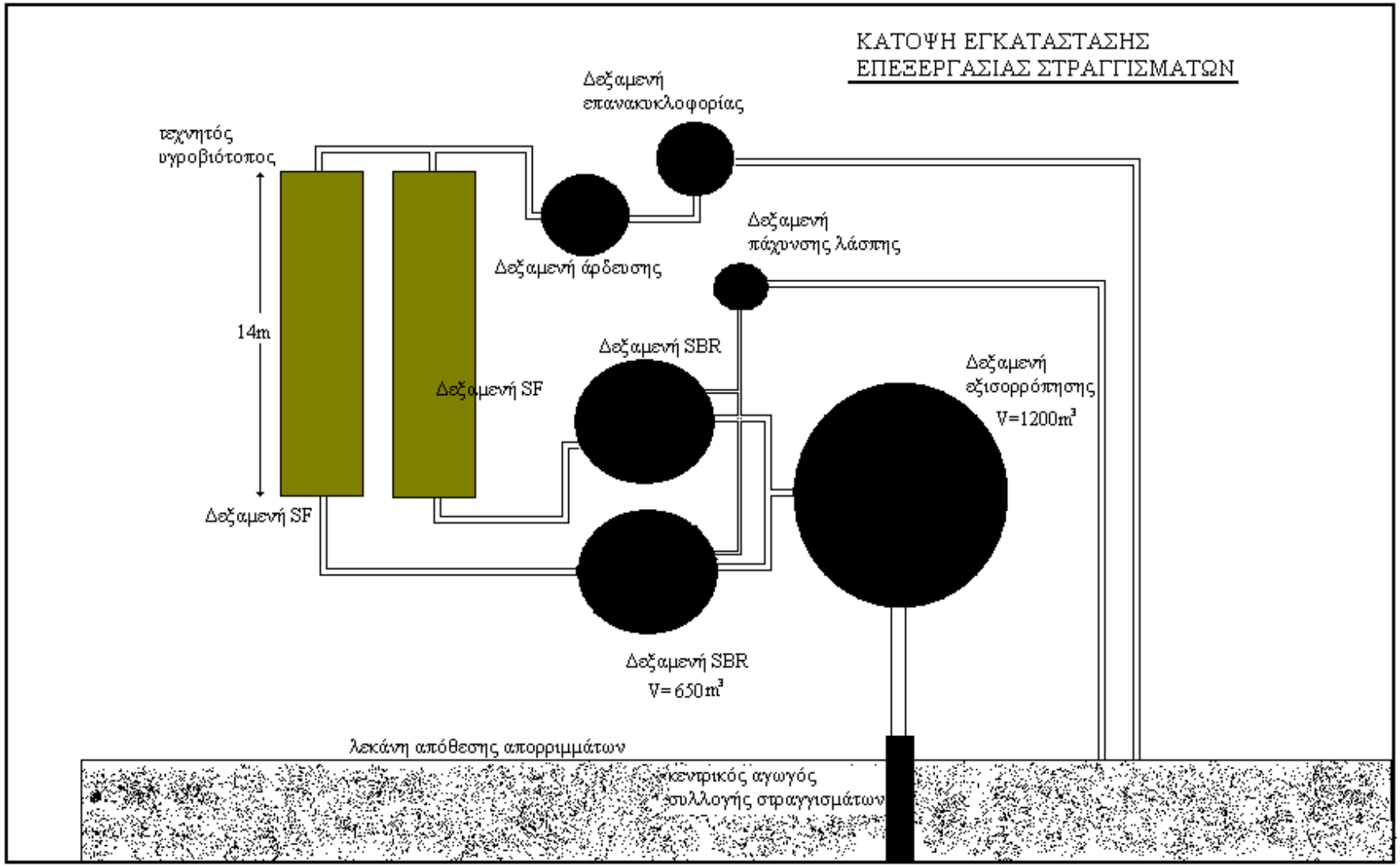
$NH_3$-$N_{οξειδωμένο}$(kgr/d) = $TKN_{που\ απομακρύνθηκε}$- σύνθεση N (kgr/d)

Σύνθεση N (kgr/d)= 5% της ενεργού ιλύος της συνολικής ημερήσιας παραγωγής ιλύος

Παραγωγή ιλύος (kgr/d) = καθαρή παραγωγή ιλύος (kgrMLSS/kgr $BOD_5$) · $BOD_5$ που απομακρύνθηκε ( kgr/d) [46]

## 7.3 Εφαρμογή SBR στο ΧΥΤΑ Χανίων

Η εγκατάσταση επεξεργασίας στραγγισμάτων διαθέτει δυο δεξαμενές SBR. Τα στραγγίσματα από το ΧΥΤΑ θα διατίθενται αρχικά στη δεξαμενή εξισορρόπησης η οποία έχει όγκο όπως, έχει ήδη ειπωθεί 1200$m^3$ και όταν πληρώνεται θα εφοδιάζει με στραγγίσματα τις δυο δεξαμενές SBR χωριστά. Μια σχηματική αναπαράστασταση του συστήματος επεξεργασίας παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα.


ΚΑΤΟΨΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΜΑΤΩΝ
Δεξαμενή επανακυκλοφορίας
τεχνητός υγροβιότοπος
Δεξαμενή πάχυνσης λάσπης
Δεξαμενή άρδευσης
14m
Δεξαμενή SBR
Δεξαμενή εξισορρόπησης
V=1200m³
Δεξαμενή SF
Δεξαμενή SF
Δεξαμενή SBR
V=650m³
λεκάνη απόθεσης απορριμμάτων
κεντρικός αγωγός συλλογής στραγγισμάτων

Η παραγωγή των στραγγισμάτων είναι $50m^3/d$ συνεπώς η δεξαμενή εξισορρόπησης θα γεμίζει σε 24 ημέρες. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην 7.2, για την περίπτωση του SBR αντιδραστήρα στο ΧΥΤΑ Χανίων, ισχύουν τα επόμενα.
Προκειμένου να εξεταστεί αν είναι επαρκής ο SBR την επεξεργασία των στραγγισμάτων θεωρείται πως το αρχικό BOD των στραγγισμάτων είναι 8000mgr/L. Γενικά χρησιμοποιούνται τα σχεδιαστικά κριτήρια της παραγράφου 7.2.

Ο μέγιστος χρόνος κατακράτησης είναι 24 ημέρες οπότε ο ολικός όγκος του αντιδραστήρα αρκεί να είναι

$$V = 24\,d \cdot 25000L/d \cdot 10^{-3}\,m^3/L = 600m^3$$

Αν ο ολικός όγκος της δεξαμενής είναι $600m^3$, τότε ο όγκος αντιδραστήρα (χαμηλή στάθμη νερού) θα είναι 600· (1-0,6) $=240m^3$, καθώς ο όγκος του διαυγασμένου αποβλήτου αποτελεί το 60% του ολικού όγκου.
Η απαιτούμενη αερόβια μάζα (kgr) θα είναι

$$\text{MLSS μάζα} = \frac{BOD_5 \text{που απομακρύνθηκε(kg/d)}}{0{,}23\,(\text{kgr}BOD_5/\text{kgMLSS} - \text{d})}$$

Παράλληλα, ο όγκος αντιδραστήρα (χαμηλή στάθμη νερού) δίνεται από την εξίσωση

$$\frac{\text{MLSS μάζα(kgr)}}{3500\text{mg/L}} \cdot \frac{10^6\,(\text{mg/kg})}{10^3}$$

Συνεπώς ο όγκος αντιδραστήρα (χαμηλή στάθμη νερού) $(m^3)$ =

$$= \frac{BOD_5 \text{που απομακρύνθηκε (kg/d)}}{0{,}23(\text{kgr}BOD_5/\text{kgMLSS} - \text{d}) \cdot 3500\text{mg/L}} \cdot \frac{10^6\,\text{mg/kg}}{10^3\,(\text{L/m}^3)} = 240m^3$$

Επιπλέον η απομάκρυνση του $BOD_5$ είναι

$BOD_5$ (kgr/d) = [(8000-X) (mg/L)] · 25000 (L/d)·$10^{-6}$(kgr/mg)
Όπου X η συγκέντρωση της εκροής του BOD σε mg/L
Από τις δυο προηγούμενες εξισώσεις προκύπτει X=160mg/L

β) Όγκος αποστράγγισης του διαυγούς αποβλήτου
Ολικός όγκος αποστράγγισης = $600m^3$-$240m^3$=$360m^3$

γ) ελάχιστος χρόνος (hrs)= $\dfrac{360m^3}{25000L/d \cdot 10^{-3}\,m^3/L} \cdot 24(hr/d) = 345{,}5hrs = 14{,}4$ ημέρες

Η απόδοση του συστήματος φαίνεται να είναι αρκετά υψηλή και ίση με 98%. Εντούτοις το σύστημα του SBR δεν πληρεί τις προϋποθέσεις έκθεσης της εκροής.

Προκειμένου λοιπόν η τιμή του BOD να μειωθεί περαιτέρω έχει κατασκευαστεί και ο τεχνητός υγροβιότοπος (σύστημα επιφανειακής ροής) που αναλύεται στη συνέχεια.

## 7.4 Φυσικά Συστήματα

Περίπου 1000 συστήματα τεχνητών υγροβιότοπων υπάρχουν στην βόρια Αμερική, ενώ αντίστοιχος είναι ο αριθμός τους στην Ευρώπη. Όπως είναι γνωστό, διάφορες φυσικές, χημικές και οικολογικές διεργασίες συμβαίνουν στο φυσικό περιβάλλον με την αλληλεπίδραση του νερού, του εδάφους, της ατμόσφαιρας, φυτικών και ζωικών οργανισμών. Τα φυσικά συστήματα επεξεργασίας σχεδιάζονται έτσι, ώστε να χρησιμοποιούν τα πλεονεκτήματα τέτοιων φυσικών διεργασιών, στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Πολλές φορές οι διεργασίες που εμπλέκονται στα φυσικά συστήματα επεξεργασίας είναι οι ίδιες με αυτές που συμβαίνουν στα μηχανικά ή συμβατικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι: η καθίζηση, το φιλτράρισμα, η μεταφορά αερίων, η προσρόφηση, η ιοντική εναλλαγή, η χημική κατακρήμνιση, η χημική οξείδωση -αναγωγή, η οικολογική μετατροπή και αποδόμηση και άλλες, που είναι μοναδικές σε φυσικά συστήματα επεξεργασίας, όπως είναι η φωτοσύνθεση, η φωτοοξείδωση και η πρόσληψη από τα φυτά. Στα φυσικά συστήματα οι διεργασίες συντελούνται με ‘φυσικές’ ταχύτητες και τείνουν να διενεργούνται περισσότερες από μία συγχρόνως, σε ένα ‘Όικοσυστηματικό αντιδραστήρα’, σε αντίθεση με τα μηχανικά συστήματα στα οποία συμβαίνουν διαδοχικά και σε διαφορετικούς, σε σειρά αντιδραστήρες ή δεξαμενές, με επιταχυνόμενες ταχύτητες, ως αποτέλεσμα της εισρέουσας σε αυτές ενέργειας.

Γενικά, φυσικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ονομάζονται αυτά που η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου διενεργείται με φυσικά μέσα και διεργασίες, όπως είναι οι φυσικές, χημικές, και οικολογικές διεργασίες [1]

Τα συστήματα αυτά χειρίζονται μια ποικιλία υγρών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων αστικών λυμάτων, αποβλήτων από ορυχεία, όμβριων από αστικές και γεωργικές περιοχές, στραγγισμάτων από ΧΥΤΑ και βιομηχανικών αποβλήτων. Οι κύριες κατηγορίες τεχνητών φυσικών συστημάτων περιλαμβάνουν εκτάσεις με πυκνή βλάστηση στις οποίες εξελίσσεται επιφανειακή ροή, ή ροή κάτω από την επιφάνεια, συστήματα λιμνών και κανάλια με επιπλέοντα υδροχαρή φυτά.

Η τεχνολογία επεξεργασίας με φυσικά συστήματα έχει την καταγωγή της στην Ευρώπη στη δεκαετία του '60, με τις εκτάσεις καλάμων για τη μείωση των οργανικών ουσιών στα βιομηχανικά υγρά απόβλητα. Η ανάκτηση εμπειρίας στην Βόρια Αμερική ξεκίνησε το 1975, με τα προγράμματα στη λίμνη Houghton, όπως και στη Florida και στο Wisconsin.

Ο τεχνητός υγροβιότοπος επιφανειακής ροής (SF) είναι μια ρηχή λίμνη (περίπου 1 ft βάθους) που περιέχει τα χρησιμοποιούμενα φυτά, όπως τα cattails, bulrushes, ή οι κοινοί κάλαμοι. Τα απόβλητα εισάγονται από τη μία πλευρά και προχωρούν πέρα από τον υγροβιότοπο. Αν η λεκάνη γεμίζεται με αμμοχάλικο ή άλλο υπόστρωμα, η ροή εξελίσσεται κάτω από την επιφάνεια (SSF), και γύρω από τις ρίζες των φυτών του υγροβιότοπου. Η ροή μέσω του αμμοχάλικου μπορεί επίσης να είναι κάθετα προς τα κάτω.

Οι διάφορες διαδικασίες που λαμβάνουν σε ένα υγροβιότοπο παρέχουν ότι και οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η ιζηματαπόθεση και η διήθηση αφαιρούν τα στερεά. Η χημική κατακρήμνιση, η ιονανταλλαγή, και η λήψη από τα φυτά αφαιρούν τα μέταλλα. Τα θρεπτικά χρησιμοποιούνται από τα φυτά και τα άλγη και ανακυκλώνονται σε νέοδιαμορφωμένα ιζήματα ενώ οι πτητικές ουσίες εξαερώνονται.

Αυτές οι διαδικασίες οδηγούν στο μετασχηματισμό και τη μεταφορά του 'αφαιρούμενου' ρύπου είτε στην ατμόσφαιρα είτε στα ιζήματα και τα εδάφη του υγροβιότοπου. Η βλάστηση είναι πάρα πολύ σημαντική επειδή παίζει ένα βασικό ρόλο στην ανακύκλωση και προσωρινή αποθήκευση πολλών ουσιών.

Οι απομακρύνσεις προχωρούν και πέρα από το χρόνο κατά τον οποίο τα απόβλητα κρατώνται στον υγροβιότοπο. Επομένως, ο χρόνος παραμονής είναι η βασική μεταβλητή σχεδιασμού. Όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα το οποίο κρατάται το απόβλητο στον υγροβιότοπο, τόσο καλύτερη είναι η επεξεργασία. Εντούτοις, οι χώροι αυτοί κατέχουν αμείωτες τις συγκεντρώσεις μερικών παραμέτρων: περίπου 5 mg/L του BOD και του TSS, π.χ.. Τυπικοί χρόνοι παραμονής είναι 1 έως 10 ημέρες για τους υπάρχοντες υγροβιότοπους.

Αυτή η τεχνολογία απαιτεί εδάφη αντί των μηχανικών συσκευών για την πραγματοποίηση της επεξεργασίας. Εάν το απαραίτητο έδαφος είναι διαθέσιμο προσφέρει χαρακτηριστικά τη μέτρια κύρια αποταμίευση πέρα από τις ανταγωνιστικές διαδικασίες. Εντούτοις, προσφέρει ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα στα λειτουργικά κόστη καθώς η λειτουργία είναι απλή και η αναγκαία συντήρηση είναι πολύ μικρή.

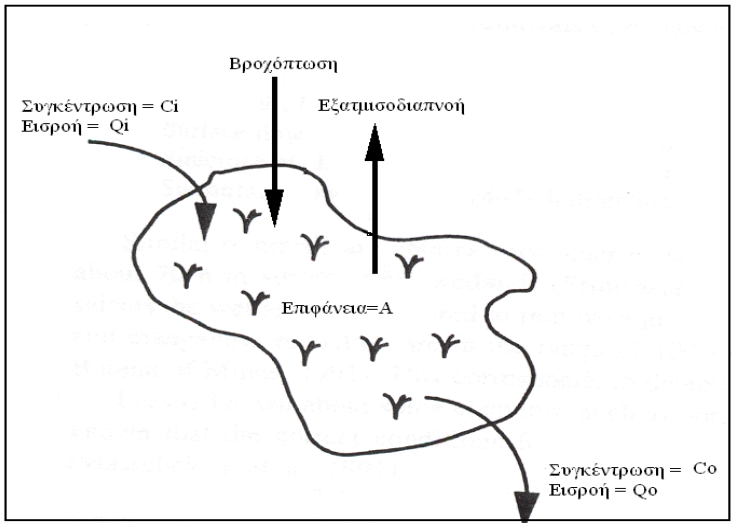
## 7.5 Υγροβιότοποι για την επεξεργασία στραγγισμάτων ΧΥΤΑ

Η επεξεργασία στραγγισμάτων από ΧΥΤΑ σε τεχνητούς υγροβιότοπους έχει εξεταστεί

επιτυχώς σε διάφορες θέσεις. Στην Νέα Υόρκη λειτουργεί υγροβιότοπος SSF. SF οι υγρότοποι έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης επιτυχώς στην Escambia από το 1990. Τα συστήματα αυτά είναι δοκιμασμένα με επιτυχία και σε ψυχρά κλίματα στη Νορβηγία και στον Καναδά ενώ οι καλλιέργειες καλάμων χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στο Ηνωμένο Βασίλειο. [31]

*Απόδοση επεξεργασίας*

Η απόδοση μπορεί να μετρηθεί από την μείωση της συγκέντρωσης, από την μείωση της μάζας, και από την μείωση του ολικού επιφανειακού φορτίου. Σε σχέση με το επόμενο σχήμα (Εικ.7.7) καθορίζονται ως εξής :




*Εικόνα 7.10 Παράσταση φυσικού συστήματος*

% Μείωση της συγκέντρωσης= $100( C_i- C_e) / C_i$ (εξ. 7.1)

% Μείωση της μάζας= $100(Q_i C_i- C_e Q_e) / Q_i C_i$ (εξ. 7.2)

Εισερχόμενο υδραυλικό φορτίο= $q_i=Q_i/A$ (εξ. 7.3)

Εισερχόμενο επιφανειακό φορτίο= $(Q_i C_i)/A$ (εξ. 7.4)

Φορτίο που απομακρύνθηκε=$(Q_i C_i- C_e Q_e) /A$ (εξ. 7.5)

όπου A: η επιφάνεια του φυσικού συστήματος, $m^2$

$C_e$: η συγκέντρωση εκροής, mg/L

$C_i$: η συγκέντρωση εισροής, mg/L

$q_i$: εισερχόμενο υδραυλικό φορτίο, m/d

$Q_e$: ροή εκροής, $m^3/d$

$Q_i$: ροή εισροής, $m^3/d$

Η μείωση της συγκέντρωσης είναι ο καλύτερος τρόπος μέτρησης της απόδοσης όσον αφορά τις τοξικές ενώσεις, ενώ η μείωση της μάζας πιθανόν να είναι πιο σημαντική για τον τελικό αποδέκτη. Το επιφανειακό φορτίο και το φορτίο που απομακρύνθηκε αποτελεί την καλύτερη μέτρηση για την τάση που μπορεί να δεχθεί ο υγροβιότοπος.

*Τοξικές οργανικές ενώσεις*

Ο αριθμός των οργανικών ουσιών που έχει μελετηθεί με την τεχνολογία των υγροβιότοπων είναι περιορισμένος. Σε εκείνες που έχουν μελετηθεί παρατηρείται μείωση των συγκεντρώσεων τους που οφείλεται στην αεριοποίησή τους και την βιολογική αποδόμησή τους που συντελείται μέσα στο περιβάλλον του υγροβιότοπου. Οι υγροβιότοποι είναι δυνατόν να παρέχουν τόσο αερόβια όσο και αναερόβια ζώνη, κοντά η μία στην άλλη, οι οποίες ευνοούν τις διαφορετικές μικροβιακές και οξειδοαναγωγικές διαδικασίες.

Ένας ρηχός υγροβιότοπος δίνει την ευκαιρία αεριοποίησης των πτητικών ουσιών. Η αποδοτικότητα δεν είναι τόσο μεγάλη όσο με την μηχανική επεξεργασία, αλλά η διαφορά αντισταθμίζεται από τους μεγάλους χρόνους παραμονής στον υγροβιότοπο. Ο χρόνος ημιζωής για τις αδιάλυτες ενώσεις όπως το βενζόλιο, το τολουόλιο, κυμαίνεται από 2 έως 4 ημέρες και είναι μικρότερος για περισσότερο πτητικές ενώσεις όπως το βινυλοχλωρίδιο και το χλωρομεθάνιο.

Παράλληλα, οι λιγότερο πτητικές οργανικές ενώσεις έχουν μικρότερες πιθανότητες να αεριοποιηθούν, ωστόσο στις περιπτώσεις αυτές λαμβάνει χώρα η βιοαποικοδόμησης. Έτσι λοιπόν, ο χρόνος ημιζωής για ενώσεις όπως οι φαινόλες, τετραϋδροφουράνες και βενζόλιο είναι σχετικά μικρός και μπορεί να κυμαίνεται από 10 έως 40 ώρες.

*Μέταλλα*

Τα μέταλλα απομακρύνονται μέσω της ανταλλαγής κατιόντων, με τα ιζήματα του υγροβιότοπου, εξαιτίας της κατακρήμνισής τους σαν σουλφίδια και άλλα αδιάλυτα άλατα, και την λήψη τους από τις ρίζες των φυτών.

Π.χ., για την αφαίρεση ψευδάργυρου σε υγροβιότοπο έχουν αναφερθεί τα παρακάτω:

Eger et αl, 1993 90-96% απομάκρυνση

Surface flow 22-34 ώρες

Sinicrope et αl, 1992

Subsurface flow 24-31 ώρες

Παρόμοιες απομακρύνσεις έχουν αναφερθεί για άλλα μέταλλα όπως για παράδειγμα, το χρώμιο το οποίο απομακρύνεται κατά 70% σε 70 ώρες (surface flow). Οι συνιστώμενες εκτάσεις για την απομάκρυνση σιδήρου και μαγγάνιου κυμαίνονται από 100 έως 500 $m^2$/kg του μετάλλου που απομακρύνεται ανά ημέρα. Αυτό ανταποκρίνεται σε χρόνους παραμονής από 1 έως 10 ημέρες.

*Οργανικές ουσίες: BOD, COD*

Η εμπειρία στην απομάκρυνση του BOD και του COD προέρχεται κυρίως από την επεξεργασία των αστικών λυμάτων και λυμάτων προερχόμενων από κτηνοτροφικές μονάδες. Περίπου 90% του εισερχόμενου φορτίου BOD μπορεί να απομακρυνθεί κατά την παραμονή ενός αποβλήτου για 7 ημέρες σε έναν υγροβιότοπο SF. Οι

μηχανισμοί απομάκρυνσης περιλαμβάνουν την οξείδωση και την αναερόβια χώνευση.

*Θρεπτικά*

Η μείωση των θρεπτικών φωσφορικών και νιτρικών απαιτεί την πλέον μακρόχρονη παραμονή από οποιοδήποτε άλλο ρύπο. Περίπου 90% του εισερχόμενου θρεπτικού φορτίου μπορεί να απομακρυνθεί κατά την παραμονή ενός αποβλήτου σε ένα υγροβιότοπο SF για 14 ημέρες. Τα θρεπτικά είναι χρήσιμα σε χαμηλές συγκεντρώσεις για τη συντήρηση του υγροβιότοπου.[31]

*Είδη βλάστησης στους υγροβιότοπους*

Αρκετά συνήθης είναι η χρήση κάποιων ειδών καλαμιών *Typhta ssp.,* bulrushes *Scirpus* ssp., *australis Phragmit.* Τα είδη αυτά έχουν ένα ευρύ φάσμα στην ποιότητα του νερού που μπορούν να γίνουν αποδέκτες όμως υπάρχουν και κάποια όρια πέρα από τα οποία δεν μπορούν να επιζήσουν. Επομένως, η προεπεξεργασία των στραγγισμάτων είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλιστεί η επιβίωση της βλάστησης.

Οι διεργασίες που εξελίσσονται σε ένα υγροβιότοπο μπορούν να συνοψιστούν στις εξής

Φυτοεκχύλιση: μεταφορά των ρύπων από το υπέδαφος και συσσώρευσή τους στο υπέργειο τμήμα του φυτού

Φυτοεξάτμιση: μεταφορά των ρύπων από το υπέδαφος στην ατμόσφαιρα

Φυτοαποδόμηση: ενζυματική διάσπαση των ρύπων στο υπέργειο τμήμα του φυτού

Ριζοδιήθηση: μεταφορά των ρύπων από τον υδροφόρο φορέα ή υδροκαλλιέργεια και συσσώρευσή τους στις ρίζες.

Ριζοαποδόμηση: ενζυματική διάσπαση των ρύπων στις ρίζες

Ενισχυμένη βιοαποδόμηση: ενίσχυση του μικροβιακού πληθυσμού από το ριζικό σύστημα με αύξηση του ρυθμού βιοαποδόμησης ρύπων στην ατμόσφαιρα.

διεργασίες φυτοσταθεροποίησης

Λιγνιτοποίηση: μεταφορά των ρύπων και σταθεροποίηση /εγκλωβισμό τους (με μη αντιστρεπτές χημικές αντιδράσεις) στα τοιχώματα φυτικών κυττάρων.

Χουμικοποιήση: μικροβιακά και φυτικά ένζυμα ενώνουν τους ρύπους στις χουμικές ενώσεις του εδάφους.[4]

### 7.5.1 Σχεδιασμός υγροβιότοπου

Κατά το σχεδιασμό ενός υγροβιότοπου θεωρείται συνήθως μια σταθερή περίοδος λειτουργίας. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται έχουν την μορφή [35]

ρυθμός απομάκρυνσης, (επιφάνεια): $J= k( C_e-C^*)$ (εξ. 7.6)

ρυθμός απομάκρυνσης, (όγκος): $R=k_v (C_e- C^*)$ (εξ. 7.7)

σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης, (επιφάνεια) σε θερμοκρασία T $^oC$: $k=k_{20}\Theta^{(T-20)}$ (εξ.

7.9)
σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης, (όγκος) σε θερμοκρασία T $^{o}$C: $k_v=k_{v20}\,\Theta^{(T-20)}$ (εξ. 7.1)

$C_e$= συγκέντρωση εκροής του ρυπαντή, mg/L
$C^*$= background concentration, συγκέντρωση υποβάθρου ρυπαντή , mg/L
$k_{v20}$ =σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης, (όγκος) σε θερμοκρασία 20 $^{o}$C, m/yr
$k_{20}$ = σταθερά ρυθμού απομάκρυνσης, (επιφάνεια) σε θερμοκρασία 20 $^{o}$C, m/yr
θ = συντελεστής θερμοκρασίας
ε= πορώδες
Παράλληλα, ισχύει και η σχέση k=(εh) $k_v$
Αν η ροή είναι plug flow με σταθερή ( P-ET) επιλέγονται εκθετικά προφίλ

$$\frac{C_x - C^*}{C_i - C^*} = \exp[-ky/q] = \exp[-k_v \tau y] \qquad \text{(εξ.7.10), ( εξ. 7.11)}$$

όπου
$C_x$ : η συγκέντρωση του ρυπαντή σε απόσταση x από το σημείο εισροής
q: υδραυλικό φορτίο m/yr
τ: ονομαστικός χρόνος παραμονής
και y: = x/L
Αν όμως η ροή μεταβάλλεται εξαιτίας του α=P-ET≠0 τότε χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{C_x - C'}{C_i - C'} = \left(1 + \frac{ay}{q}\right)^{-(1+\frac{k}{a})} \qquad \text{(εξ.7.12), (εξ.7.13)}$$

$$C' = C^*\left[\frac{k}{k+a}\right]$$

Σε σταθερή γενικά ροή η επιφάνεια επεξεργασίας του υγροβιότοπου $A_s$ ($m^2$) δίνεται από τη σχέση:

$$A_s = -\frac{Q_o}{k}\ln\left(\frac{C_e - C^*}{C_o - C^*}\right) \qquad \text{(εξ.7.14)}$$

όπου $Q_o$ ο ετήσιος ρυθμός εισροής υγρών αποβλήτων, $m^3$/yr

Η εξατμισοδιαπνοή έχει σαν απόρροια την επιμήκυνση του χρόνου παραμονής και την αύξηση της συγκέντρωσης των διαλυμένων συστατικών του στραγγίσματος. Αντίθετα αποτελέσματα έχει η βροχόπτωση. Το σφάλμα κατά τη χρήση των (εξ.7.10) και (εξ.7.11) θα είναι ίσο με το λόγο α/q για α/>-0,5. Επομένως εάν 25% της εισροής εξατμίζεται η χρήση των (εξ.7.10) και (εξ.7.11) με μέση ροή υπολογίζει συγκεντρώσεις 25% χαμηλότερες από ότι δίνει το ισοζύγιο μάζας, ενώ αντίθετα αν η

βροχόπτωση προσθέτει 25% στην εισροή οι εξισώσεις υπολογίζουν 25% μεγαλύτερες συγκεντρώσεις.

Το μοντέλο που ακολουθεί διαφοροποιείται από το προηγούμενο και οι εξισώσεις στις οποίες βασίζεται είναι οι εξής [11]:
Υδραυλικός χρόνος παραμονής: θεωρείται ο χρόνος ροής που εξαρτάται από την παροχή και τη διατομή ροής και υπολογίζεται από την εξίσωση

$$t = \frac{A' \cdot d}{Q} \qquad (εξ.7.15)$$

όπου
t: υδραυλικός χρόνος παραμονής
A': πραγματικό εμβαδόν διαθέσιμο για τη ροή του υγρού, $m^2$
Q: μέση παροχή στην λεκάνη, $m^3/d$
d: βάθος νερού λεκάνης, m

Αν θεωρηθεί πως το A' είναι ένα ποσοστό του εμβαδού A της διατομής, της ροής που ορίζεται από τη διατομή διέλευσης των υγρών τότε το ποσοστό αυτό μπορεί να εκφραστεί από το πορώδες του μέσου ροής οπότε η εξίσωση γράφεται

$$t = \frac{L \cdot W \cdot d \cdot n}{Q} \qquad (εξ.7.16)$$

όπου
L: το μήκος της λεκάνης παράλληλα στην ροή, m
W: πλάτος λεκάνης, m
n: πορώδες
Q: μέση παροχή στη λεκάνη, $m^3/d$

Για την απομάκρυνση του BOD σε τεχνητούς υγροβιότοπους χρησιμοποιούνται οι επόμενες εξισώσεις

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{(-K_T t)} \qquad (εξ.7.17)$$

όπου
$C_o$: συγκέντρωση BOD στην εισροή, mg/L
$C_e$: συγκέντρωση BOD στην εκροή, mg/L
$K_T$: πρώτης τάξεως σταθερά ταχύτητας εξαρτώμενη από την θερμοκρασία

$$K_T = K_{20}\theta^{(T-20)} \qquad (εξ.7.18)$$

όπου
$K_{20}$ σταθερά σε θερμοκρασία 20 $^oC, d^{-1}$ και
T: θερμοκρασία σε $^oC$.

Παράλληλα, ο υπολογισμός της συνολικής επιφάνειας των κλινών γίνεται από την εξίσωση (7.20)

$$A_s = \frac{Q\ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T dn} \qquad (\text{εξ.7.19})$$

## 7.6 Εφαρμογή υγροβιότοπου στο ΧΥΤΑ Χανίων

Ο τεχνητός υγροβιότοπος που κατασκευάζεται στο ΧΥΤΑ Χανίων ως τμήμα της εγκατάστασης επεξεργασίας των στραγγισμάτων αποτελείται από δυο λεκάνες μήκους 14m, πλάτους 6m και βάθους 0,6m έκαστη. Θεωρείται πως η κάθε μια από τις δύο λεκάνες δέχεται τα επεξεργασμένα στραγγίσματα από την κάθε δεξαμενή SBR οπότε η παροχή στην κάθε λεκάνη είναι ίση με $25m^3$. Ο έλεγχος απόδοσης θα γίνει με τη χρήση του τελευταίου μοντέλου της παραγράφου 7.5.1.

Η τιμή του πορώδους σε υγροβιότοπους επιφανειακής ροής μπορεί να κυμαίνεται από 0,65-0,75. Θεωρώντας λοιπόν, πορώδες ίσο με 0,7 και βάσει των παραπάνω στοιχείων ο χρόνος παραμονής θα είναι βάσει της εξίσωσης 7.16.

$$t = \frac{14m \cdot 6m \cdot 0.6m \cdot 0.7}{25m^3/d} = 1{,}4 \text{ ημέρες}$$

Επιπλέον, η σταθερά κινητικής θεωρώντας θ=1,06 , $K_{20}$ = $0{,}678d^{-1}$ και για θερμοκρασία $18^oC$ θα είναι $K_T=0{,}678\cdot^{(18-20)}=0{,}603\ d^{-1}$.

Έτσι λοιπόν, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή εκροής του BOD, γνωρίζοντας πως η τιμή εισροής θα είναι 102mg/L (το BOD εκροής από τον SBR) βάσει της 7.17.

$$C_e = 160 \cdot e^{(-0{,}603 \cdot 1{,}4)} = 68{,}3 mg/L.$$

Παρατηρείται πως η τιμή εκροής δεν είναι η επιθυμητή (25mg/L). Προφανώς ο υγροβιότοπος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος έτσι ώστε να ικανοποιείται το όριο αυτό.

Θεωρώντας λοιπόν ως δεδομένη την τιμή εκροής 25mg/L είναι δυνατόν να βρεθούν οι απαιτούμενες διαστάσεις της λεκάνης.

Το εμβαδόν δίνεται από τη σχέση $A_s = \frac{Q\ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_T dn}$ οπότε

$$A_s = \frac{25m^3/d\ln\left(\frac{160mg/L}{25mg/L}\right)}{0{,}603d^{-1} \cdot 0{,}6m \cdot 0{,}7} = 183{,}11m^2.$$

Ο λόγος μήκους πλάτους 3:1 έχει επικρατήσει ως ο οικονομικά βέλτιστος οπότε προκύπτει W=7,81m και L=23,43m. Για διευκόλυνση στην κατασκευή θεωρείται πλάτος λεκάνης 7m και μήκος ίσο με 21m. Για τις διαστάσεις αυτές προκύπτει χρόνος παραμονής

$t = \dfrac{23{,}5m \cdot 7{,}8m \cdot 0{,}6m \cdot 0{,}7}{25m^3 / d}$ =3 ημέρες ενώ το BOD της εκροής θα είναι

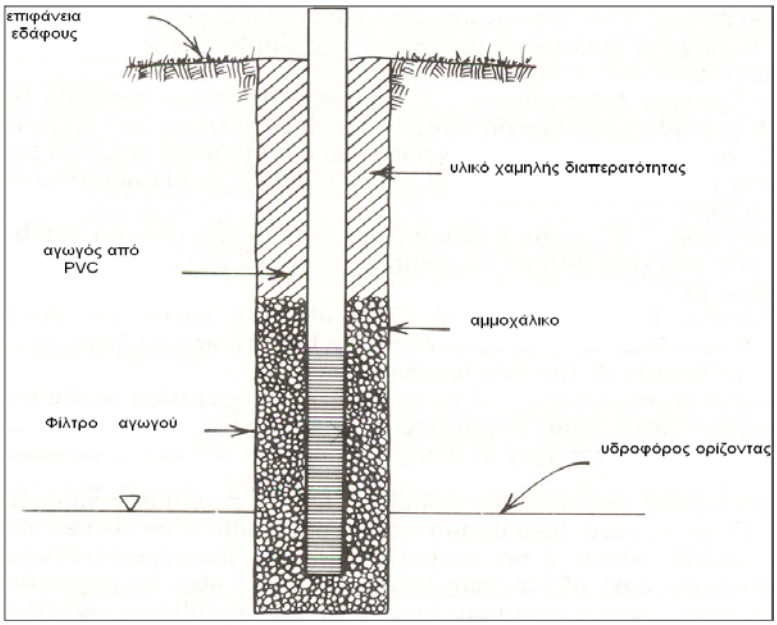
$C_e = 102 \cdot e^{(-0{,}603 \cdot 3)}$ =24,7mg/L που ικανοποιεί τα όρια διάθεσης.

Πάντως και στην περίπτωση του SBR αλλά και στην περίπτωση του υγροβιότοπου έχουν χρησιμοποιηθεί εξισώσεις και σταθερές που χρησιμοποιούνται για οικιακά λύματα οπότε είναι πολύ πιθανόν τα πραγματικά αποτελέσματα να αποκλίνουν.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

## 8.1 Τοποθέτηση φρεατίων

Σκοπός της παρακολούθησης των υπογείων υδάτων, είναι η γνώση της ορθής ή όχι λειτουργίας του ΧΥΤΑ και της ικανότητας της μόνωσης να συγκρατεί τα απόβλητα.
Τα στραγγίσματα είναι πιθανόν να φεύγουν από την βάση της κυψέλης εξαιτίας διαρροής της μόνωσης, να κινούνται προς τον υδροφόρο ορίζοντα και να ρέουν στο υπόγειο υδροφόρο στρώμα. Η δειγματοληψία πρέπει να διενεργείται σε τρεις τουλάχιστον θέσεις πριν από την έναρξη των εργασιών υγειονομικής ταφής ώστε να λαμβάνονται τιμές αναφοράς για μελλοντικές δειγματοληψίες. Κατά την επιλογή των προς ανάλυση παραμέτρων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η κινητικότητα στη ζώνη των υπογείων υδάτων. Συνιστώμενες παράμετροι είναι 1) pH, 2) TOC, 3) φαινόλες 4) βαρέα μέταλλα, 5) φθόριο 6) αρσενικό, 7) υδρογονάνθρακες [21].
Η εγκατάσταση φρεατίων ή άλλων συστημάτων ελέγχου παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου των ρύπων που φεύγουν από την κυψέλη, μετρούν την απόδοση του ΧΥΤΑ, δίνουν μια έγκυρη ενημέρωση πριν οι ρύποι κινηθούν προς αξιόλογες πηγές και πηγές πόσιμου νερού.
Ένα τυπικό φρεάτιο φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:

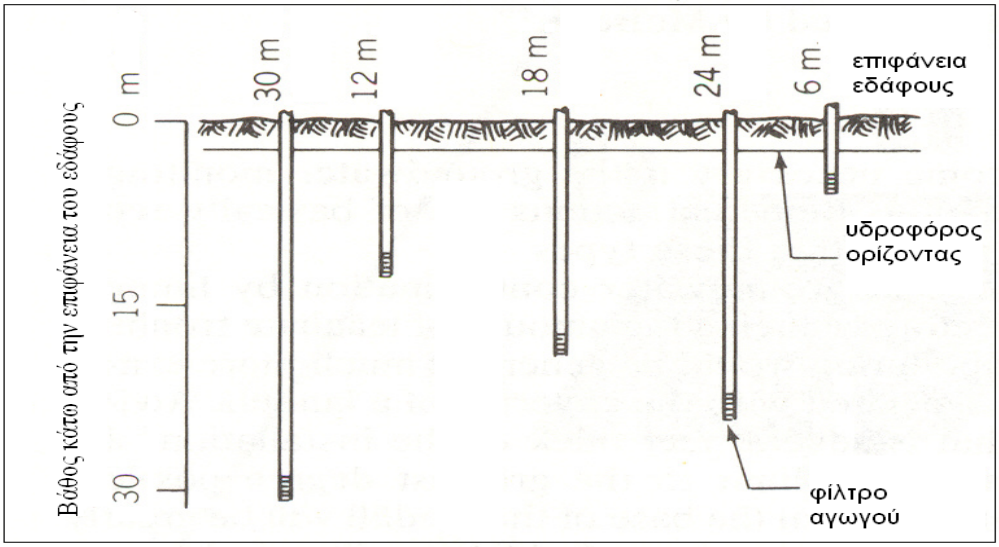



*Εικόνα 8.1 Φρεάτιο παρακολούθησης υπογείων υδάτων*

Ο αγωγός του φρεατίου είναι συνήθως πλαστικός διαμέτρου 5cm τον οποίο τοποθετείται ένα φίλτρο-εσχάρα στο κάτω άκρο. Ο αγωγός τοποθετείται σε ένα άνοιγμα διαμέτρου τουλάχιστον 10cm με υλικό κοκκώδες γύρω από τον αγωγό ώστε

να επιτρέπεται η εύκολη πρόσβαση του νερού στο φρεάτιο. Το φρεάτιο εκτείνεται χαμηλότερα της ανώτατης στάθμης του υπόγειου υδροφορέα σε βάθος που οι ρύποι μπορούν να ανιχνευθούν. Κατά κύριο λόγο το μήκος του αγωγού εξαρτάται από τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής.

Στην περίπτωση ανομοιογενούς υπόγειου στρώματος με ποικίλους σχηματισμούς και ασυμμετρίες η κατασκευή ενός πιο πολύπλοκου συστήματος καθίσταται αναγκαία. Θα πρέπει λοιπόν, να χρησιμοποιηθούν περισσότερα φρεάτια που να καταλήγουν σε διαφορετικά βάθη. Η ορθή τοποθέτηση των φρεατίων απαιτεί την κατανόηση της κίνησης των υπογείων νερών καθώς η μετακίνηση των σωματιδίων δεν θα γίνεται μόνο στην οριζόντια αλλά και στην κάθετη διεύθυνση. Η πιο εύκολη προσέγγιση για την παρακολούθηση των υπογείων νερών είναι η εγκατάσταση μερικών γειτονικών φρεατίων τα οποία καταλήγουν σε διαφορετικά βάθη. Συνήθως τοποθετούνται σε χωριστά ανοίγματα και έχουν φίλτρα σε διαφορετικές στάθμες στο έδαφος.




*Εικόνα 8.2 Σύστημα φρεατίων* [33]

Μια τροποποίηση αυτής της μεθόδου είναι η εγκατάσταση δυο ή περισσοτέρων φρεατίων σε ένα μεγαλύτερο άνοιγμα η οποία μειώνει το κόστος αλλά αυξάνει την πολυπλοκότητα της κατασκευής. Το δείγμα λαμβάνεται στη συνέχεια με την βοήθεια μιας συσκευής από το επιθυμητό βάθος. Καλό είναι πριν τη συλλογή των δειγμάτων να λαμβάνεται ένας όγκος δυο ή τρεις φορές τη χωρητικότητα του φρεατίου πριν ληφθεί το δείγμα, το πρόβλημα που πιθανόν να προκύψει σε αυτή την περίπτωση είναι πως συνήθως οι ΧΥΤΑ κατασκευάζονται σε εδάφη που δεν γίνεται εύκολα η κυκλοφορία του νερού και πιθανόν να χρειάζονται αρκετές ώρες για να ξαναγεμίσει το φρεάτιο.

## 8.2 Εξυγίανση εδάφους

Οι ενέργειες εξυγίανσης είναι πιθανόν να είναι αναγκαίες στην περίπτωση που ανιχνευθούν τιμές μεγαλύτερες των ορίων.

Η πρώτη τύπου λύση είναι η αποκοπή της πηγής ρύπανσης περιορίζοντας τη διήθηση μέσω της κάλυψης του ΧΥΤΑ. Οι τεχνικές μείωσης της ρύπανσης είναι πιο εκτεταμένες και σίγουρα πιο πολυδάπανες από ότι η απλή κάλυψη – αποκατάσταση του ΧΥΤΑ. Η διήθηση μπορεί να αποτραπεί με την τοποθέτηση αργίλου πάχους 1-2m ή συνθετικής μεμβράνης πάνω από την κυψέλη. Οι ενέργειες αυτές είναι δυνατόν να μειώσουν στο μέγιστο δυνατό τη διήθηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο ΧΥΤΑ και φυσικά τη διαρροή από την βάση αυτού.

Μια δεύτερη προσέγγιση είναι η απομόνωση της κυψέλης με την κατασκευή ενός αδιαπέραστου στοίχους περιφερειακά αυτής. Επιπλέον, μπορεί να γίνει και προσπάθεια περιορισμού της κάθετης διαρροής με την έκχυση κατάλληλου υλικού κάτω από την κυψέλη. Η κατασκευή ενός τοίχου slurry αποτελεί παράδειγμα της προσέγγισης αυτής. Η τάφρος ανοίγεται σε βάθος κάτω από τη ζώνη που έχει ρυπανθεί, ή έως την κορυφή του αδιαπέραστου στρώματος, έχει πλάτος από 0,6-0,9m και γεμίζεται με υλικό αδιαπέραστο από τα στραγγίσματα. Το ρυπασμένο νερό συλλέγεται από φρεάτια και οδηγείται για κατάλληλα επεξεργασία και διάθεση.

Μια τρίτη λύση είναι η υδραυλική απομόνωση και αποκατάσταση του ρυπασμένου υπόγειου νερού. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας φρεάτια αποκατάστασης και φρεάτια εισαγωγής αέρα τα οποία ωθούν την κίνηση των υδάτων προς τα πρώτα. Οι τεχνολογίες εξυγίανσης είναι συνήθως πολύ δαπανηρές και σε αρκετές περιπτώσεις το αποτέλεσμα δεν είναι πάντα το επιθυμητό. Σε κάποιες περιπτώσεις το πρόβλημα ρύπανσης του υπόγειου υδροφορέα ήταν τόσο οξύ και οι λύσεις περιορισμένες που χρειάστηκε εκσκαφή και μετακίνηση ολόκληρης της κυψέλης ενέργεια η οποία φυσικά αποδείχθηκε ιδιαίτερα δαπανηρή.[33]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9ο
# ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΧΥΤΑ

## 9.1 Οικονομικά στοιχεία στεγάνωσης, μόνωσης και διαχείριση στραγγισμάτων

Η εύρεση οικονομικών στοιχείων για το ΧΥΤΑ Χανίων δεν ήταν εφικτή καθώς τα στοιχεία αυτά δεν έχουν ακόμα κατατεθεί στην νομαρχία Χανίων από την κατασκευάστρια εταιρία.

Τα παρακάτω στοιχεία [15] χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να κοστολογηθεί η στεγάνωση-μόνωση και διαχείριση στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Λάρισας και αναφέρονται στο έτος 1998. Τα γενικά χαρακτηριστικά πάντως του ΧΥΤΑ Λάρισας είναι τα εξής:

Συνολική έκταση ιδιοκτησίας Δ. Λάρισας : 1500 στρ.

Συνολική έκταση χώρου κατάλληλου για ταφή: 200 στρ.

Συνολικός ωφέλιμος όγκος ταφής: 3.240.000$m^3$

Ποσότητα εισερχομένων απορριμμάτων: 65.000tn/ έτος

| ΔΑΠΑΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ | Μονάδα μέτρησης | Τιμή μονάδας (Euro) |
|---|---|---|
| **1. Εξομάλυνση διαμόρφωση επιφάνειας ΧΥΤΑ – εξασφάλιση αργίλου** | | |
| 1.1 Εκσκαφή σε έδαφος γαιώδες (αφαίρεση επιφανειακής φυτικής γης σε βάθος 0,40m) | $m^3$ | 2,93 |
| 1.2 Εκσκαφές υγιούς χώματος για προμήθεια αργίλου γεωλογικού φραγμού | $m^3$ | 2,93 |
| 1.3 Μεταφορά φυτικής γης και αργίλου εντός ΧΥΤΑ έως 700m | $m^3$ | 2,05 |

| | | |
|---|---|---|
| **2. Στεγάνωση πυθμένα ΧΥΤΑ** | | |
| 2.1 Διαμόρφωση υπόβασης 20cm ( αναμόχλευση – συμπύκνωση ) | $m^2$ | 0,88 |
| 2.2 Μεταφορά της αργίλου της παρ.1.2 στον τόπο συμπύκνωσης μετά από κοσκίνισμά της | $m^3$ | 4,40 |
| 2.3 Προμήθεια – Διάστρωση – ανάμιξη μπετονίτη (2%κβ) | kgr | 0,24 |
| 2.4 Κατασκευή γεωλογικού φραγμού (συμπυκνωμένο τελικό πάχος 50cm) | $m^3$ | 5,87 |
| 2.5 Κατασκευή διαχωριστικών των κυψελών αναχωμάτων | $m^3$ | 4,40 |

| | | |
|---|---|---|
| 2.6 Προμήθεια-τοποθέτηση στεγανωτικής μεμβράνης 2mm | $m^2$ | 9,10 |
| 2.7 Προμήθεια-τοποθέτηση γεωϋφάσματος προστασίας ( 500 $gr/m^2$) | $m^2$ | 2,93 |
| 2.8 Προμήθεια τοποθέτηση άμμου προστασίας 10cm | $m^3$ | 13,21 |

| | | |
|---|---|---|
| **3. Κατασκευή στραγγιστήριας ζώνης** | | |
| 3.1 Προμήθεια τοποθέτηση στραγγιστήριας κροκάλας 16-32,3cm | $m^3$ | 14,67 |
| 3.2 Προμήθεια τοποθέτησης γεωϋφάσματος διαχωρισμού υποκείμενης άμμου προστασίας από στραγγιστήρια κροκάλα ώστε να μην βουλώσουν οι σωλήνες και η στραγγιστήρια ζώνη από την άμμο | $m^2$ | 0,88 |

| | | |
|---|---|---|
| **4. Σύστημα συλλογής – απομάκρυνσης στραγγισμάτων** | | |
| 4.1 Κεντρικός αδιάτρητος αγωγός HDPE Φ315, 6A Προμήθεια | m | 105,65 |
| 4.2 Κεντρικός αδιάτρητος αγωγός HDPE Φ315, 6A Τοποθέτηση | m | 14,67 |
| 4.3 Κεντρικός διάτρητος αγωγός HDPE Φ315, 6A Διάτρηση, προμήθεια, τοποθέτηση | m | 132,06 |
| 4.4 Κεντρικός διάτρητος αγωγός HDPE Φ200, 6A Διάτρηση, προμήθεια, τοποθέτηση | m | 73,37 |
| 4.5 Χυτοσίδηρες δικλείδες Φ315 | τεμ. | 586,94 |
| 4.6 Χυτοσίδηρες δικλείδες Φ200 | τεμ. | 234,77 |
| 4.7 Φρεάτια κατάντη κυψέλης | τεμ. | 1760,82 |

| | | |
|---|---|---|
| **5. Διαχείριση - διευθέτηση όμβριων** | | |
| 5.1 Εκσκαφή αντιπλημμυρικής τάφρου | $m^3$ | 4,40 |
| 5.2 Οπλισμένο σκυρόδεμα τάφρου υποδοχής – διοχέτευσης όμβριων γύρω από την λεκάνη ταφής | $m^3$ | 146,74 |
| 5.3 Τεχνικό + αγωγός παράκαμψης μονάδας επεξεργασίας στραγγισμάτων | τεμ. | 23477,62 |
| 5.4 Διευθέτηση όμβριων σε υπόλοιπες εγκαταστάσεις ΧΥΤΑ | τεμ. | 2054,292 |

| | | |
|---|---|---|
| **6. Σύστημα επιτήρησης - παρακολούθησης** | | |
| 6.1 Αντλία – γεώτρηση (υδρευτική και monitoring) | τεμ. | 30814,38 |
| 6.2 Αντλία – γεώτρηση (monitoring) | τεμ. | 26412,33 |

*Πίνακας 9.1 Κόστος στεγάνωσης, μόνωσης ΧΥΤΑ* [12]

Το σύστημα επεξεργασίας των στραγγισμάτων στην Λάρισα βασίζεται σε τρεις εν σειρά αεριζόμενες λιμνοδεξαμενές (lagoons) των 500m$^3$ η κάθε μια, οι οποίες αφαιρούν τον οργανικό ανθρακούχο ρύπο, κάνουν νιτροποίηση και μερική απονιτροποιήση, μια δεξαμενή σταθεροποίησης 800m$^3$. Οι δαπάνες κατασκευής που αφορούν τη συγκεκριμένη μονάδα συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα:

| | | |
|---|---|---|
| **7 Εγκατάσταση επεξεργασίας στραγγισμάτων** | | |
| 7.1 Εκσκαφές σε έδαφος γαιώδες για lagoons | m$^3$ | 2,95 |
| 7.2 Εκσκαφές σε βραχώδες –ημιβραχώδες | m$^3$ | 7,34 |
| 7.3 Διάστρωση αργίλου πάχους 0,50 ( μεταφορά, κοσκίνισμα, εφαρμογή) μετά υπόβασης | m$^3$ | 11,15 |
| 7.4 Γεωμεμβράνη HDPE, 2,0mm προμήθεια – τοποθέτηση | m$^2$ | 9,10 |
| 7.5 Γεωύφασμα προστασίας προμήθεια – τοποθέτηση | m$^2$ | 2,05 |
| 7.6 Άοπλο σκυρόδεμα πυθμένα | m$^3$ | 58,70 |
| 7.7 Αγωγοί σύνδεσης, φρεάτια δικλείδων, εκτροπής, χυτοσιδηρές δικλείδες | m$^3$ | 10858,4 |
| 7.8 Αγωγός HDPE Φ90, 6atm, ανακυκλοφορίας 7.1 στραγγισμάτων | m | 46,955 |
| 7.9 Αντλιοστάσιο κτίσμα | m$^3$ | 5869,41 |
| 7.10Αντλίες επανακυκλοφορίας | m$^3$ | 2054,30 |
| 7.11 Επιφανειακός αεριστήρας 18kW | m$^3$ | 23477,62 |
| 7.12 Κοχλιωτός υπερχειλιστής | m$^3$ | 1760,82 |
| 7.13 DOμετρο-pHμετρο | m$^3$ | 3815,15 |
| 7.14 Αυτοματισμοί –PLC μετά οικίσκου στέγασης | m$^3$ | 13206,16 |

*Πίνακας 9.2 Δαπάνες κατασκευής εγκατάστασης επεξεργασίας στραγγισμάτων στο ΧΥΤΑ Λάρισας* [15]

## 9.2 Οικονομικά στοιχεία επεξεργασίας στραγγισμάτων

Γενικά, η επεξεργασία των στραγγισμάτων είναι μια διαδικασία που μπορεί να αυξήσει κατά πολύ τον αρχικό προϋπολογισμό ενός ΧΥΤΑ. Έχει εκτιμηθεί πως το σύστημα επεξεργασίας και συλλογής των στραγγισμάτων είναι δυνατόν να αυξήσει το κόστος ενός ΧΥΤΑ κατά 30-40%. Οι Chian και Dewalle (1977) ανέπτυξαν κόστη

για διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διαδικασίες. Το κόστος επεξεργασίας βέβαια ποικίλει ανάλογα με τις διακυμάνσεις της ποσότητας και ποιότητας των στραγγισμάτων οπότε η φόρμουλα χρειάζεται βελτιώσεις κάθε φορά. Η ανακύκλωση των στραγγισμάτων φαίνεται πως μειώνει το κόστος επεξεργασίας των στραγγισμάτων καθώς μειώνονται οι συγκεντρώσεις των οργανικών και ο ΧΥΤΑ μπορεί να συμπεριφέρεται σαν δεξαμενή εξισορρόπησης και να δίνει μια σχετικά σταθερή παροχή στραγγισμάτων. Σύμφωνα με τον Straub (1980) η ανακύκλωση των στραγγισμάτων είναι δυνατόν να επιφέρει μείωση του κόστους επεξεργασίας 20% σε μεγάλους ΧΥΤΑ και 40% σε μικρότερους. Στο κόστος αυτό περιλαμβάνεται το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του συστήματος ανακύκλωσης.

Οι Chiang και Patel έχουν κάνει κάποιες εκτιμήσεις κόστους για το αρχικό κόστος και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης για μια σειρά μεθόδων επεξεργασίας στραγγισμάτων. Τα κόστη αυτά αναφέρονται για μέση ροή 20, 75 και 380 L/min. Κάποιες απλοποιητικές υποθέσεις έχουν γίνει προκειμένου να εκτιμηθούν τα κόστη. Οι υποθέσεις αυτές είναι οι εξής :

- Το κόστος των συστημάτων συλλογής και ανακύκλωσης των στραγγισμάτων δεν περιλαμβάνεται.
- Το κόστος γης δεν περιλαμβάνεται. Θεωρείται πως υπάρχει ικανή γη διαθέσιμη στο ΧΥΤΑ για την κατασκευή οποιασδήποτε εγκατάστασης.
- Ο χρόνος ζωής του έργου είναι 20 έτη.
- Με το πέρασμα των ετών τροποποιείται η σύσταση των στραγγισμάτων και θα είναι αναγκαίες κάποιες τροποποιήσεις στο σύστημα επεξεργασίας οι οποίες δεν περιλαμβάνονται στο κόστος αυτό.
- Τα στραγγίσματα που εισέρχονται στην εκάστοτε εγκατάσταση έχουν τα εξής χαρακτηριστικά.: $BOD_5$= 4000mg/L, COD=8000 mg/L, TSS=100 mg/L, αλκαλικότητα = 6000 mg/L, TDS= 10000mg/L και pH=5,8
- Θεωρείται πως η εξάτμιση από τις δεξαμενές είναι 30cm ετησίως ενώ για τρεις συνεχείς μήνες δεν υπάρχει εξάτμιση.

Ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει μια σειρά μεθόδων επεξεργασίας

| | **Αρχικό Κόστος ( χιλ. Euro)** | | | **Κόστος λειτουργίας και συντήρησης ( χιλ. Euro)** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Διαδικασία επεξεργασίας** | **20L/min** | **75L/min** | **380L/min** | **20L/min** | **75L/min** | **380L/min** |
| Δεξαμενή εξάτμισης | 82,85 | 248,55 | 497,10 | 8,29 | 12,43 | 16,57 |
| Δεξαμενή σταθεροποιήσης | 49,71 | 165,70 | 289,97 | 8,29 | 12,43 | 16,57 |
| Λίμνη αερισμού | 62,14 | 207,13 | 372,83 | 12,43 | 16,57 | 33,14 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Δεξαμενή εκτεταμένου αερισμού και καθίζηση | 99,42 | 331,40 | 579,95 | 12,43 | 24,86 | 49,71 |
| Βιολογικός πύργος και καθίζηση | 70,43 | 227,84 | 414,25 | 12,43 | 20,72 | 33,14 |
| RBC και καθίζηση | 82,85 | 248,55 | 497,10 | 12,43 | 24,86 | 49,71 |
| SBR | 70,42 | 227,84 | 414,25 | 12,43 | 24,86 | 49,71 |
| Βιολογική απονιτροποίηση* | 24,85 | 82,85 | 165,70 | 12,43 | 16,57 | 33,14 |
| Αναερόβιος χωνευτής** | 33,14 | 103,56 | 207,13 | 12,43 | 16,57 | 33,14 |
| Αναερόβιο φίλτρο** | 33,14 | 103,56 | 207,13 | 12,43 | 16,57 | 33,14 |
| Κροκίδωση/ κατακρήμνιση*** και καθίζηση | 33,14 | 103,56 | 207,13 | 12,43 | 24,86 | 49,71 |
| Αφαίρεση αμμωνίας | 20,72 | 66,28 | 124,28 | 8,28 | 12,43 | 24,86 |
| Φίλτρο βαρύτητας | 24,86 | 82,85 | 165,70 | 12,43 | 16,57 | 33,14 |
| GAC**** | 49,71 | 248,55 | 289,98 | 16,57 | 33,14 | 66,28 |
| RO**** | 58,00 | 186,42 | 331,40 | 16,57 | 33,14 | 66,28 |
| Μικροδιήθηση με RO**** | 62,14 | 207,13 | 372,82 | 20,71 | 41,43 | 74,57 |

*Πίνακας 9.3 Κόστος μεθόδων επεξεργασίας στραγγισμάτων* [37]

*μετά από βιολογική επεξεργασία

**50-70% απομάκρυνση οργανικών

***30-50% απομάκρυνση οργανικών

****μετά από βιολογική ή φυσικοχημική (καθίζηση, κατακρήμνιση)

## 9.3 Οικονομικά στοιχεία κατασκευής του ΧΥΤΑ ανεξάρτητα από τη διαχείριση των στραγγισμάτων

Οι επόμενοι πίνακες αποτελούν επίσης στοιχεία από το ΧΥΤΑ Λάρισας και αφορούν τμήμα των δαπανών κατασκευής του ΧΥΤΑ ανεξάρτητα από τη διαχείριση των

στραγγισμάτων. [15]

| | **Μονάδα μέτρησης** | **Τιμή μονάδας (Euro)** |
|---|---|---|
| **1. Οδοποιία** | | |
| 1.1 Οδοποιία ασφάλτινη σύνδεσης ΧΥΤΑ με επαρχιακή οδό σύνδεσης (μήκους περίπου 2km) | m | 111,5 |
| 1.2 Οδοποιία ασφάλτινη μέχρι είσοδο σε κυψέλες (πλάτους περίπου 2km) | m | 88,05 |
| 1.3 Οδοποιία εσωτερική χωμάτινη εντός κυψελών έως εκάστοτε μέτωπο | m | 58,70 |
| 1.4 Τεχνικά, οδοσήμανση κλπ | τεμ. | 146,75 |

| | | |
|---|---|---|
| **2. Κτιριακές εγκαταστάσεις** | | |
| 2.1 Οικίσκος ελέγχου μετά χώρου διοικητηρίου WC, λουτρών και χημικού εργαστηρίου και εξοπλισμού ζυγιστηρίου μετά εκσκαφών κλπ | $m^2$ | 675,00 |
| 2.2 Χώρος δειγματοληψίας απορριμμάτων ( ασφάλτινο) | $m^2$ | 20,54 |
| 2.3 Χώρος έκπλυσης τροχών | $m^2$ | 176,08 |
| 2.4 Ενημερωτική πινακίδα | τεμ. | 88,04 |
| 2.5 Πύλη εισόδου | τεμ. | 88,04 |
| 2.6 Περίφραξη | m | 52,82 |
| 2.7 Γεφυροπλάστιγγα ( μηχανισμός ζύγισης δυναμοκυψέλες, ράμπα από οπλισμένο σκυρόδεμα κλπ) | τεμ. | 35216,43 |

| | | |
|---|---|---|
| **3. Η/Μ Εγκαταστάσεις – εγκαταστάσεις ασφαλείας** | | |
| 3.1 Ηλεκτρικοί πίνακες, αυτοματισμοί , χειριστήρια , γειώσεις | τεμ. | 10271,46 |
| 3.2 Η/Ζ γεννήτρια 100 | τεμ. | 23477,62 |
| 3.3 Εξωτερικός φωτισμός ασφαλείας | τεμ. | 586,94 |
| 3.4 Εγκαταστάσεις πυρασφάλειας (πυρανίχνευση – πυροσβεστήρες κλπ) | τεμ. | 1760,82 |
| 3.5 Αλεξικέραυνα ( σε κτίρια και σε μέτωπο ταφής) | τεμ. | 4402,05 |
| 3.6 Εγκαταστάσεις υδραυλικές- αποχέτευσης | τεμ. | 1467,35 |

| | | |
|---|---|---|
| **4. Διαχείριση βιοαερίου** | | |
| 4.1 Κατακόρυφο δίκτυο φρεατίων | τεμ. | 14673,51 |

| | | |
|---|---|---|
| 4.2 Αγωγοί μεταφοράς | m | 6,16 |
| 4.3 Φρεάτια ελέγχου | τεμ. | 880,41 |
| 4.4 Παγίδες συμπυκνωμάτων | τεμ. | 880,41 |
| 4.5 Βάννες χυτοσίδηρου | τεμ. | 293,47 |
| 4.6 Πυρσός βιοαερίου | τεμ. | 38151,15 |
| 4.7 Εκσκαφές επιχώσεις, βάση πυρσού, περίφραξη πυρσού | τεμ. | 2054,30 |
| 4.8 Γεωτρήσεις ελέγχου διαφυγής βιοαερίου | τεμ. | 176,10 |
| 4.9 Φορητή συσκευή ανίχνευσης βιοαερίου | τεμ. | 2934,70 |
| 4.10 Συσκευή ανίχνευσης βιοαερίου εντός κτιρίου (μόνιμη) | τεμ. | 2054,30 |

| | | |
|---|---|---|
| **5. Περιμετρική δεντροφύτευση** | τεμ. | 880,42 |
| **6. Τελική κάλυψη- αποκατάσταση του χώρου** | $m^2$ | 23,48 |

*Πίνακας 9.4 Επιπλέον κόστη κατά την κατασκευή ενός ΧΥΤΑ* [15]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10ο
ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ -ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## 10.1 Μετρούμενες παράμετροι

Οι δειγματοληψίες έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος 2004) σε τακτά χρονικά διαστήματα (ανά 10 ημέρες περίπου) και τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν είναι τα εξής :

*Οργανοληπτικά χαρακτηριστικά* [17]

- *Ολικά Στερεά* (TS): Πρόκειται για τα στερεά που παραμένουν μετά από εξάτμιση ορισμένου όγκου του δείγματος στους 102-103$^{o}$C
- *Διαλυμένα Στερεά (TDS):* Τα TDS διέρχονται από φίλτρο και περιλαμβάνουν τα πραγματικά διαλυμένα στερεά και τα κολλοειδή.
- *Αιωρούμενα Στερεά (SS):* Τα SS παραμένουν στο φίλτρο και εμπεριέχουν τα καθιζάνοντα στερεά.
- *Θολερότητα:* Οφείλεται κυρίως στη συσσώρευση των κολλοειδών.

Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά [17]

- *Θερμοκρασία:* Η θερμοκρασία είναι δυνατόν να επηρεάσει τη διαλυτότητα του οξυγόνου την ταχύτητα των χημικών και βιολογικών αντιδράσεων, τη συμπεριφορά και την ανάπτυξη των μικροοργανισμών .
- *pH:* Πρόκειται για την αρνητική λογαριθμική συγκέντρωση των υδρογονοκατιόντων, μετράται προκειμένου να είναι γνωστό αν υπάρχει περίπτωση διάβρωσης των αγωγών και της εγκατάστασης επεξεργασίας. Η μέτρηση του pH γίνεται με την ηλεκτρομετρική μέθοδο ( pHμετρο)
- *Αγωγιμότητα:* Προέρχεται από την κινητικότητα των ιόντων και δίνει πληροφορίες για τι διαλυμένες ιοντικές ουσίες κυρίως άλατα, οξέα και βάσεις. Όσο μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα τόσο περισσότερες είναι οι ουσίες που περιέχει το νερό. Η αγωγιμότητα μετράται σε milliSiemens per meter. Στο εργαστήριο μετρήθηκε με την βοήθεια αγωγιμόμετρου της WTW.
- *Σκληρότητα:* Σχετίζεται με τη δημιουργία αποθέσεων και οφείλεται στην παρουσία διαλυμένων αλάτων ασβεστίου και μαγνησίου με ανθρακικά και δισανθρακικά ιόντα ως $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$, $CaCO_3$, κτλ. Ο προσδιορισμός έγινε με φασματοφωτόμετρο και χρήση δεικτών.
- *Αλατότητα:* Είναι η συγκέντρωση των ολικών στερεών όταν όλα τα ανθρακικά άλατα έχουν μετατραπεί σε οξείδια, όλα τα βρωμιούχα και ιωδιούχα έχουν

αντικατασταθεί από χλωριούχα και όλες οι οργανικές ουσίες έχουν πλήρως οξειδωθεί. Καθορίζεται μετρώντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

- Θολότητα: Πρόκειται για την μείωση της διαύγειας που προκαλείται από αιωρούμενα σωματίδια όπως λάσπη, οργανικό και ανόργανο υλικό, διαλυτές έγχρωμες οργανικές ενώσεις, πλαγκτόν και άλλους μικροοργανισμούς. Στο εργαστήριο μετρήθηκε με φορητό θολόμετρο της Orbeco-Hellige model 966.
- *Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD):* Πρόκειται για το οξυγόνο που καταναλώνεται για τη βιοχημική οξείδωση του μίγματος των οργανικών ενώσεων στο δείγμα με προϊόντα $CO_2$, $NH_3$ και $H_2O$. Για τον προσδιορισμό του BOD χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Oxitop της WTW. Κατά τη διάρκεια της μέτρησης γινόταν ομοιόμορφη ανάδευση του δείγματος σε θάλαμο επώασης 20$^o$C.
- *Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD):* Εκφράζεται ως το ισοδύναμο οξυγόνο που απαιτείται για την οξείδωση της οργανικής ύλης στο δείγμα.. Η οξείδωση του δείγματος γίνεται με ισχυρό οξειδωτικό ( $K_2Cr_2O_7$), σε όξινο περιβάλλον ($H_2SO_4$) παρουσία καταλύτη ($Ag_2SO_4$) και σε υψηλή θερμοκρασία (150$^o$ C). Στη συνέχεια γίνεται προσδιορισμός της περίσσειας των διχρωμικών ιόντων με φωτομέτρηση.
- *Ολικός Οργανικός Άνθρακας ( TOC):* Εκφράζει τη ολική συγκέντρωση των οργανικών ενώσεων σε mg C ανά λίτρο δείγματος. Κατά την μέτρηση του TOC προσδιορίζονται αρχικά οι ακόλουθοι παράμετροι

TC: ολικός άνθρακας

IC: ανόργανος άνθρακας. Ο ανόργανος άνθρακας προέρχεται από το διαλυμένο $CO_2$ και από τα ιόντα $HCO^-_3$ και $CO^{2-}_3$.

Ο ολικός οργανικός άνθρακας ουσιαστικά προκύπτει από τη διαφορά TC- IC

Η μέτρηση των TC και IC έγινε με τη χρήση του οργάνου TOC 5000A Total Organic Carbon Analyzer, SHIMADZU

Η μέτρηση των επόμενων παραμέτρων έγινε με τη χρήση σταθερού φασματοφωτόμετρου τύπου UV1601 SHIMADZU

- *$Cl^-$:* Τα ιόντα χλωρίου είναι από τα κυριότερα ανόργανα ιόντα του νερού και των αποβλήτων
- *$PO^{-3}_4$:* Ο φώσφορος συνήθως συναντάται με την μορφή ριζών με πλέον συνηθέστερη την *$PO^{-3}_4$.*
- *$NH_4$- N:* Το αμμωνιακό άζωτο υπάρχει στα υδατικά διαλύματα είτε σαν αμμωνιακό ιόν είτε σαν αέρια αμμωνία αναλόγως το pH του διαλύματος σύμφωνα με την εξίσωση $NH^+_4 \leftrightarrow NH_3 + H^+$

- *$NO_2$- N:* Η οξείδωση των αζωτούχων ενώσεων οδηγεί καταρχήν σε νιτρώδη ιόντα και στη συνέχεια σε νιτρικά.
- *$NO_3$- N:* Τα νιτρικά ιόντα είναι η πιο οξειδωμένη μορφή των αζωτούχων ενώσεων. Ο καθορισμός των νιτρικών βοηθά στην εκτίμηση του χαρακτήρα και του βαθμού οξείδωσης στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.
- Βαρέα Μέταλλα. Πρόκειται για τα μεταλλικά στοιχεία που έχουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο από αυτό του σιδήρου. Απόβλητα που περιέχουν βαρέα μέταλλα συγκαταλέγονται στα τοξικά και επικίνδυνα, ωστόσο εξαιτίας της μειωμένης περιβαλλοντικής ευαισθησίας αλλά κυρίως λόγω της έλλειψης χώρων που δέχονται τέτοιου είδους απόβλητα, αυτά καταλήγουν τελικά σε κοινούς χώρους υγειονομικής ταφής μη επικίνδυνων στερεών αποβλήτων. Στο εργαστήριο. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η συσκευή ατομικής απορρόφησης AA-6800 Atomic Absorption spectrophotometer SHIMADZU για τον προσδιορισμό των εξής μετάλλων: Νικέλιο (Νι), Μόλυβδος (Pb), Χαλκός (Cu), Χρώμιο (Cr), Ψευδάργυρος (Zn), Κασσίτερος (Sn)

## 10.2 Δειγματοληψία

Την πρώτη φορά το δείγμα λήφθηκε από τη δεξαμενή εξισορρόπησης.

*Εικόνα 10.1 1ο Σημείο Δειγματοληψίας , δεξαμενή εξισορρόπησης*

Οι επόμενες δειγματοληψίες έγιναν από την έξοδο του κεντρικού αγωγού από όπου μελλοντικά θα αντλείται το στράγγισμα και θα οδηγείται στην εγκατάσταση επεξεργασίας.

*Εικόνα 10.2 2ο Σημείο Δειγματοληψίας , έξοδος κεντρικού αγωγού*

## 10.3 Συνοπτική παρουσίαση οργάνων [17]

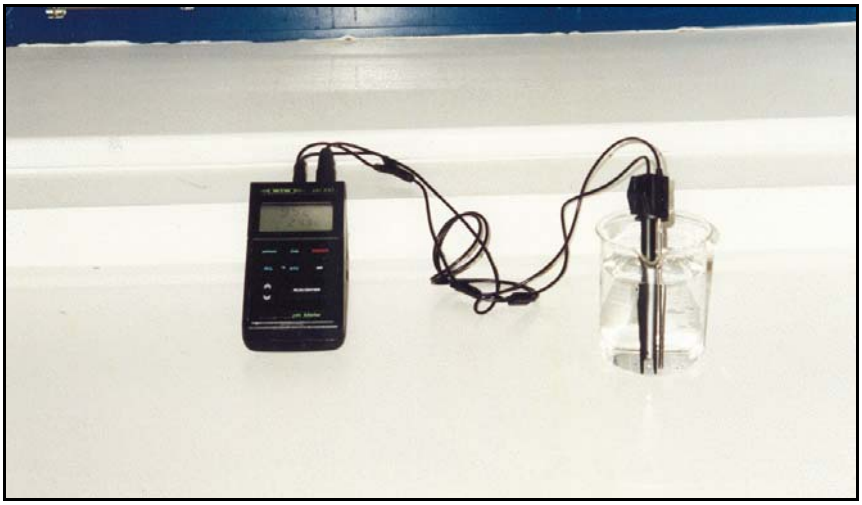
*Ηλεκτρονικό θολόμετρο:* Το δείγμα φωτίζεται από φωτεινή πηγή και με χρήση φωτοκύτταρου μετράται η ένταση του φωτός που σκεδάζεται από τα αιωρούμενα σωματίδια προς κατεύθυνση κάθετη από αυτή του προσπίπτοντος φωτός. Μονάδα θολερότητας (NTU) λαμβάνεται η θολερότητα που προκύπτει από διάλυμα $SiO_2$ σε αποσταγμένο νερό συγκέντρωσης 1mg/L

*Εικόνα 10.3 Ηλεκτρονικό θολόμετρο*

*Συσκευή διήθησης:* Η διήθηση γίνεται με την βοήθεια αντλίας ενώ η συσκευή μπορεί να δεχθεί έως και τρία χωνιά για την ταυτόχρονη διήθηση τριών διαφορετικών δειγμάτων.

*Εικόνα 10.4 Συσκευή διήθησης*

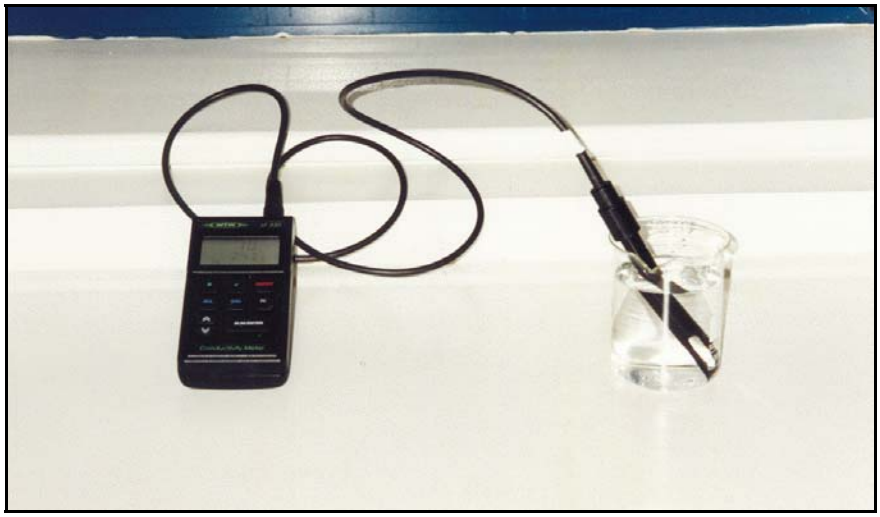
*Φορητό pH-μετρο:* Το όργανο αυτό έχει ένα ηλεκτροχημικό αισθητήρα που περιλαμβάνει ένα ηλεκτρόδιο μέτρησης με μεμβράνη υάλου και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται έτσι ώστε η ηλεκτρική τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων να είναι 0mV όταν το pH είναι 7. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά του pH από 7 τόσο μεγαλύτερη γίνεται και η διαφορά τάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το pH-μετρο χρησιμοποιεί αυτό το σήμα για να υπολογίσει το pH.



*Εικόνα 10.5 Φορητό pH-μετρο*

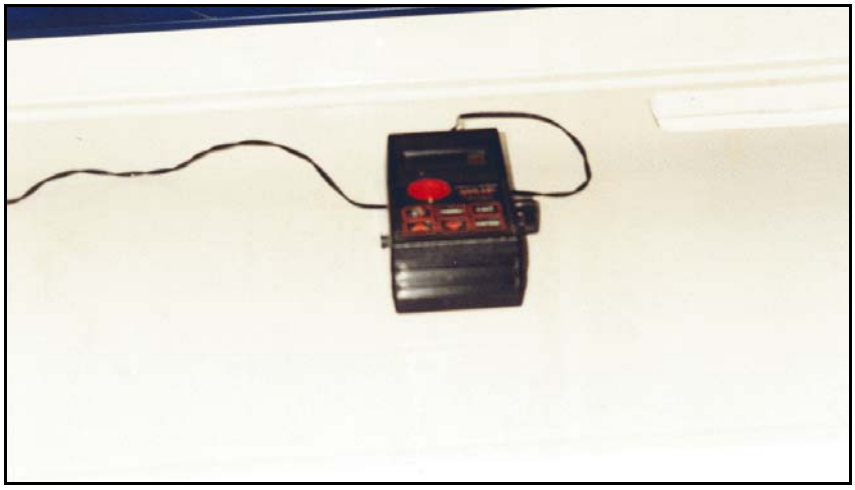
*Φορητό Αγωγιμόμετρο:* Το όργανο μετρά το ρεύμα που διέρχεται από τα ηλεκτρόδια και εφαρμόζει το νόμο του Ohm για να υπολογίσει την αγωγιμότητα του διαλύματος. Στη συνέχεια κάνοντας χρήση της εξίσωσης $C = G\frac{L}{A}$ όπου C η ειδική αγωγιμότητα σε S/cm, G η αγωγιμότητα (S) , L η απόσταση των ηλεκτροδίων και A η επιφάνεια

των ηλεκτροδίων. Παράλληλα, μετράται και η θερμοκρασία η οποία επηρεάζει την αγωγιμότητα και οι ειδικές αγωγιμότητες των διαλυμάτων ανάγονται σε κανονική θερμοκρασία 25 $^{o}$C.



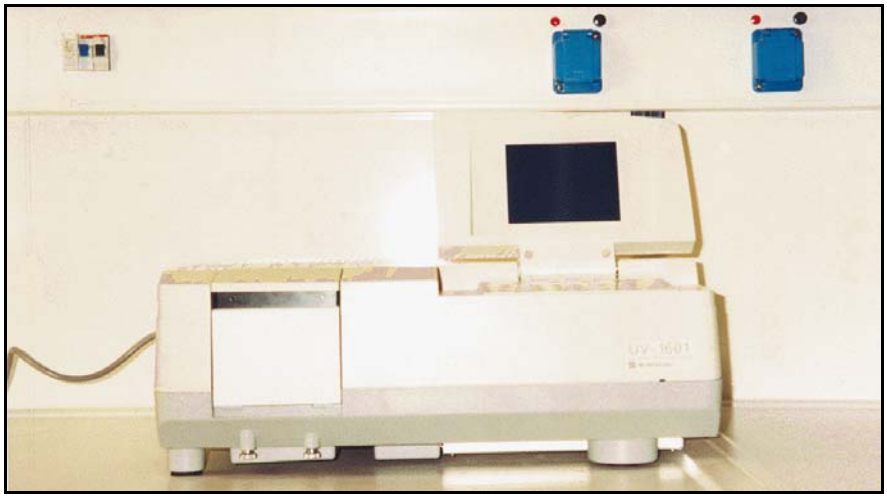
*Εικόνα 10.6 Φορητό Αγωγιμόμετρο*

*Φορητό Φασματοφωτόμετρο:* Η ουσία που προσδιορίζεται μετατρέπεται με κατάλληλες χημικές αντιδράσεις σε κάποιο έγχρωμο σύμπλοκό της το οποίο απορροφά ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος. Η μέτρηση γίνεται στο φασματοφωτόμετρο στέλνοντας στο δείγμα ακτινοβολία αυτού του μήκους κύματος. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας συσχετίζεται με τη συγκέντρωση του συμπλόκου και συνεπώς με τη συγκέντρωση της ουσίας που προσδιορίζεται. Προκειμένου να υπάρχει για την απορρόφηση το σημείο μηδέν χρησιμοποιείται το τυφλό, το οποίο στις περισσότερες αναλύσεις είναι το αρχικό δείγμα. χωρίς προσθήκη αντιδραστηρίων.



*Εικόνα 10.7 Φορητό Φασματοφωτόμετρο*

*Σταθερό Φασματοφωτόμετρο: Η αρχή στην οποία στηρίζεται είναι παρόμοια με αυτή του φορητού φασματοφωτομέτρου*

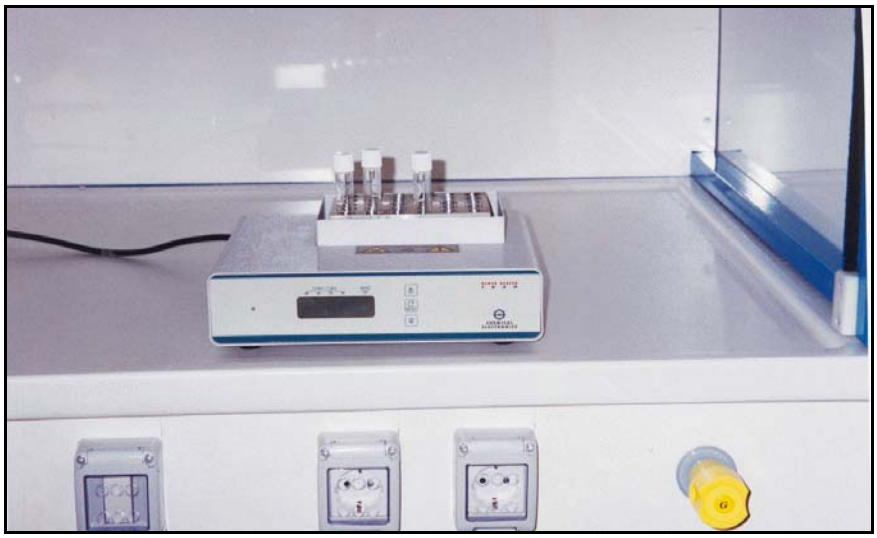


*Εικόνα 10.8 Σταθερό Φασματοφωτόμετρο*

*Φιάλες BOD – Oxitop:* Πρόκειται για φιάλες με ειδικά πώματα που είναι εφοδιασμένα με ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης της υποπίεσης στην φιάλη και απ' ευθείας ηλεκτρονικής ένδειξης του καταναλωθέντος οξυγόνου που αντιστοιχεί στην μετρούμενη υποπίεση. Οι φιάλες τοποθετούνται σε σύστημα μαγνητικού αναδευτήρα μέσα σε θάλαμο επώασης 20$^{o}$C.

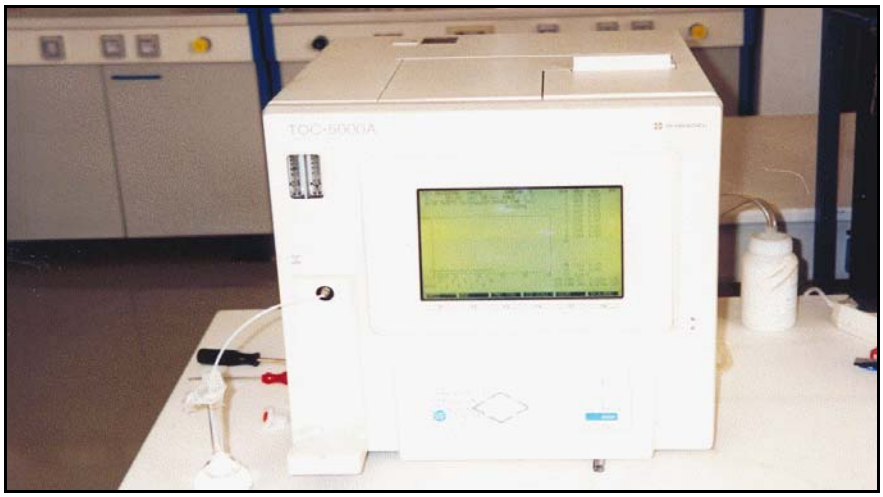
*Εικόνα 10.9 Φιάλες BOD – Oxitop*

*COD meter:* Για τον προσδιορισμό του COD πριν το δείγμα φωτομετρηθεί τοποθετείται σε ειδική συσκευή που αποτελείται από θερμαντικό σώμα με ενσωματωμένες υποδοχές για την τοποθέτηση των σωλήνων και ακριβή ρύθμιση της θερμοκρασίας στους 150 $^{o}$C και του χρόνου χώνευσης σε 2 ώρες.



*Εικόνα 10.10 Θερμαντικό σώμα*

*Αναλυτής TOC:* Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι μεγάλης ευαισθησίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση δειγμάτων με συγκεντρώσεις οργανικών της τάξης των μερικών ppb. Το δείγμα ομογενοποιείται και μια μικροποσότητα του δείγματος εκχύνεται με σύριγγα σε προθερμασμένη κυψελίδα και καίγεται σε ρεύμα οξυγόνου ή αέρα σε υψηλή θερμοκρασία (680 έως 1000 °C).

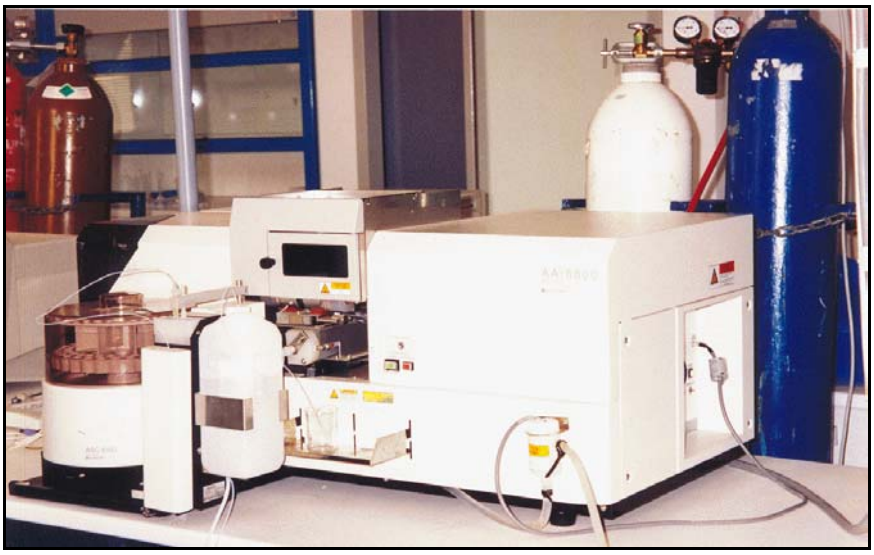



*Εικόνα 10.11* Αναλυτής TOC

Το νερό εξατμίζεται και η οργανική ύλη οξειδώνεται σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Το διοξείδιο του άνθρακα από την οξείδωση και από τον ανόργανο άνθρακα μεταφέρεται στη συνέχεια σε ειδικό θάλαμο και μετράται ποσοτικά σε αναλυτή

υπερύθρων. Ο ανόργανος άνθρακας μπορεί να προσδιοριστεί πριν από την καύση με οξίνιση του δείγματος και ανάδευση με αδρανές αέριο για μετατροπή των ανθρακικών και δισσανθρακικών σε διοξείδιο του άνθρακα.. Το TOC του δείγματος προκύπτει από τη διαφορά TC και IC.

*Ατομική απορρόφηση:* Η φασματοφωτομετρία ατομικής απορρόφησης βασίζεται στην απορρόφηση από τα άτομα του δείγματος ενέργειας η οποία προέρχεται από μια πηγή μονοχρωματικής ακτινοβολίας κατάλληλου μήκους κύματος. Η ακτινοβολία που απορροφάται από κάθε άτομο αντιστοιχεί στην ενέργεια που απαιτείται για μια ηλεκτρονιακή μετάπτωση από την θεμελιώδη κατάσταση σε μια διεγερμένη κατάσταση (γραμμή συντονισμού). Για την ποσοτική ανάλυση με τις μεθόδους φασματοφωτομετρίας ατομικής απορρόφησης μετρείται πρώτα η απορρόφηση μιας σειράς προτύπων διαλυμάτων των οποίων η συγκέντρωση είναι γνωστή κατασκευάζεται καμπύλη αναφοράς και κατόπιν μετρώνται οι απορροφήσεις των άγνωστων δειγμάτων και συγκρίνονται με εκείνες των προτύπων. [6]



*Εικόνα 10.12 Συσκευή ατομικής απορρόφησης*

## 10.4 Παρουσίαση εργαστηριακών μετρήσεων

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή των μετρήσεων καθώς επίσης και η μέση τιμή της κάθε παραμέτρου.

| **Εργαστηριακά αποτελέσματα** | | | |
|---|---|---|---|
| | **Μονάδες** | **Ελάχιστη τιμή** | **Μέγιστη τιμή** |
| **Αγωγιμότητα** | mS/cm | 6,78 | 8,5 |
| **Αλατότητα** | | 3,7 | 4,8 |
| **Θολότητα** | NTU | 68 | 86,2 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **pH** | | 8,18 | 8,55 |
| **Ολικά στερεά (TS)** | gr/L | 3,19 | 3,67 |
| **Αιωρούμενα στερεά (TSS)** | gr/L | 0,08 | 0,24 |
| **Διαλυμένα στερεά (TDS)** | gr/L | 3,2 | 3,67 |
| **Σκληρότητα** | mgr/L | 687 | 829 |
| **BOD** | mgr/L | 80 | 110 |
| **COD** | mgr/L | 506 | 704 |
| **TC** | ppm | 644,2 | 663,9 |
| **IC** | ppm | 442,5 | 464,8 |
| **TOC** | ppm | 191,8 | 204 |
| **$Cl^-$** | ppm | 679,4 | 1137 |
| **$PO^{-3}_4$** | ppm | 5,22 | 7,54 |
| **$NO_3$-N** | ppm | 6,43 | 8,96 |
| **$NH_3$-N** | ppm | 195,73 | 356,55 |
| **$NO_2$-N** | ppm | 0,08 | 0,1 |
| **Νικέλιο (Ni)** | ppm | έως 3,65 | |
| **Μόλυβδος (Pb)** | ppm | δεν ανιχνεύθηκε | |
| **Χαλκός (Cu)** | ppm | έως 1,8 | |
| **Χρώμιο (Cr)** | ppm | δεν ανιχνεύθηκε | |
| **Ψευδάργυρος (Zn)** | ppm | έως 2,84 | |
| **Κασσίτερος: (Sn)** | ppm | δεν ανιχνεύθηκε | |

*Πίνακας 10.1 Εργαστηριακά αποτελέσματα*

## 10.5 Συμπεράσματα

Τα εργαστηριακά αποτελέσματα δεν έδωσαν τις αναμενόμενες τιμές και κατά πλειοψηφία κινήθηκαν στα κατώτερα όρια που συνήθως δίνονται στην βιβλιογραφία αλλά και σε δημοσιευμένα κείμενα από ποιοτικές αναλύσεις στραγγισμάτων που έχουν γίνει κατά καιρούς στον Ελλαδικό χώρο. Οι χαμηλές αυτές τιμές είναι πολύ πιθανόν να οφείλονται στις παρακάτω αιτίες:

- Μεγάλο τμήμα των απορριμμάτων που βρίσκονται σήμερα στην κυψέλη προέρχονται από το εργοστάσιο δεματοποίησης. Τυχόν στραγγίσματα που διαφεύγουν από τα δεματοποιημένα απορρίμματα είτε λόγω της μεταφοράς από το εργοστάσιο είτε λόγω της τοποθέτησής τους στο χώρο και την μετέπειτα εξέλιξη των χωματουργικών εργασιών θεωρούνται γηρασμένα και μικρής φυσικά ισχύος.
- Η δειγματοληψία δεν έγινε κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο καθώς εξαιτίας της μικρής παραγωγής στραγγισμάτων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού δεν υπήρχε ροή. Αναγκαστικά λοιπόν το δείγμα λήφθηκε από στάσιμη πηγή στην οποία τα στραγγίσματα έχουν παραμείνει για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, η δειγματοληψία έγινε από επιφανειακά στραγγίσματα, συνεπώς τμήμα των στερεών, των κολλοειδών αλλά και των ουσιών που είναι προσκολλημένα σε αυτά (π.χ.) βαρέα μέταλλα και έχουν κατακάτσει είτε στον πυθμένα της δεξαμενής (1ο σημείο δειγματοληψίας), είτε στην τάφρο συλλογής κατάντη της κυψέλης δεν έχει ληφθεί υπόψη στις αναλύσεις. Η εγκατάσταση επεξεργασίας των στραγγισμάτων πρόκειται να λειτουργήσει κανονικά μέσα στο φθινόπωρο οπότε θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον η παρακολούθηση των στραγγισμάτων όχι μόνο πριν την επεξεργασία αλλά και έπειτα από κάθε στάδιο επεξεργασίας (εκροή SBR και εκροή τεχνητού υγροβιότοπου) προκειμένου να εκτιμηθεί η απόδοση αυτού.
- Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η παρακολούθηση ενός ΧΥΤΑ θα πρέπει να γίνεται τουλάχιστον για τρία έτη με μηνιαία δειγματοληψία έτσι ώστε να φαίνεται καθαρά η ισχύς των στραγγισμάτων και η διακύμανση αυτών τόσο σε εποχιακό όσο και σε ετήσιο επίπεδο.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11ο
ΣΥΝΟΨΗ – ΕΠΙΛΟΓΟΣ

## 11.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ υδατικού ισοζυγίου και βιολογικής αποσύνθεσης στα αστικά στερεά απόβλητα έχουν σαν συνέπεια την εμφάνιση μεγάλων διακυμάνσεων στην ποιοτική και ποσοτική σύσταση των στραγγισμάτων. Για το λόγο αυτό τα στραγγίσματα που προκύπτουν από ένα ΧΥΤΑ μπορούν να χαρακτηριστούν ως ένα 'ιδιόμορφο' υγρό απόβλητο και δυσκολότερο στη διαχείριση από ότι τα αστικά λύματα και τα βιομηχανικά απόβλητα καθώς είναι πιο ισχυρό από τα μεν πρώτα και παρουσιάζει πολύ υψηλότερες διακυμάνσεις στην ποσότητα από τα δεύτερα. Η παραγωγή των στραγγισμάτων αποτελεί ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα και η διαφυγή τους από το χώρο είναι δυνατόν να προκαλέσει σημαντική ρύπανση τόσο στο έδαφος όσο και στον υπόγειο υδροφορέα. Η τακτική παρακολούθηση της ποιότητας των στραγγισμάτων και της απόδοσης της εγκατάστασης επεξεργασίας των στραγγισμάτων είναι ιδιαιτέρως σημαντική λοιπόν καθώς οποιαδήποτε δυσλειτουργία του συστήματος είναι δυνατόν να προκαλέσει σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα στον αποδέκτη.

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων από τα στραγγίσματα στο ΧΥΤΑ Χανίων έδωσαν χαμηλές τιμές γεγονός που κύρια οφείλεται στην ιδιαιτερότητα του ΧΥΤΑ, λόγω της τοποθέτησης μεγάλου όγκου δεματοποιημένων απορριμμάτων, αλλά και εξαιτίας της δειγματοληψίας από στάσιμη πηγή όπου τα στραγγίσματα είχαν μείνει για μεγάλο χρονικό διάστημα (καθώς κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού η παραγωγή διασταλλαγμάτων είναι πολύ χαμηλή).

Κατά τη σύγκριση των δυο μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν (Tchobanoglous και HELP) για τον υπολογισμό του όγκου των παραγόμενων στραγγισμάτων διαπιστώθηκαν μεγάλες αποκλίσεις, που οφείλονται στη διαφορετική σύσταση απορριμμάτων που θεωρεί το κάθε μοντέλο. Στην περίπτωση του υπολογιστικού μοντέλου του Tchobanoglous το ποσοστό της υγρασίας στα απορρίμματα θεωρήθηκε 30% κ.ο. ενώ το αντίστοιχο ποσοστό υγρασίας στη δεδομένη τιμή που διέθετε το HELP ήταν πολύ χαμηλότερη. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η τιμή της υγρασίας που θεωρεί το μοντέλο είναι περίπου 0,12vol/vol, για τον τύπο απορριμμάτων 19 που έχει επιλεγεί, ενώ επιπλέον θεωρώντας πως το 75% του όγκου των απορριμμάτων είναι ανενεργός, η περιεχόμενη αρχική υγρασία θα είναι μόνο του ενεργού τμήματος των απορριμμάτων δηλαδή το 25% της τιμής αυτής.

Η ορθή μόνωση μιας λεκάνη απόθεσης απορριμμάτων είναι βασική προϋπόθεση για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την κατασκευή ενός ΧΥΤΑ. Όπως διαπιστώθηκε και με τη χρήση του μοντέλου HELP όταν η μόνωση δεν

γίνεται σωστά (μη ορθή συμπύκνωση της φυσικής αργίλου ή ατέλειες στην τοποθέτηση της γεωμεμβράνης π.χ.) η διαρροή και επομένως η ρύπανση μπορεί να είναι μεγάλη. Επιπλέον, διαπιστώθηκε πως είναι πολύ δύσκολο να περιοριστεί η διήθηση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στην περίπτωση που η αποκατάσταση του ΧΥΤΑ γίνει μόνο με φυσικά μέσα όπως η συμπυκνωμένη άργιλος με αποτέλεσμα η πάνω από τον απορριμματικό όγκο αποστραγγιστική ζώνη να συλλέγει μόνο μια μικρή ποσότητα αυτών. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί και μπετονίτης, σε χαμηλό ποσοστό, η διήθηση μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό. Ωστόσο όπως τονίζεται και στην βιβλιογραφία η μόνωση αυτή είναι δυνατόν να αντιμετωπίσει προβλήματα που είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν. Για το λόγο αυτό η μόνωση και επιφανειακά του χώρου με φύλλα HDPE φαίνεται να είναι η πλέον αξιόπιστη.

Όσον αφορά τη διαχείριση των παραγόμενων στραγγισμάτων μέσω ανακυκλοφορίας στη λεκάνη απόθεσης αυτή δεν φαίνεται να αποδίδει όσον αφορά την μείωση του όγκου τους. Η χρήση του προγράμματος έδειξε πως κατά την ανακυκλοφορία μόνο ένα χαμηλό, σχετικά, επιπλέον ποσοστό χάνεται λόγω εξατμισοδιαπνοής ενώ το υπόλοιπο αποθηκεύεται στα απορρίμματα και στο εδαφικό υλικό. Είναι επομένως προφανές, πως κάποια στιγμή η συνεχής συσσώρευση στραγγισμάτων μέσα στο χώρο θα καταστήσει αδύνατη την περαιτέρω διήθηση υγρών και την εμφάνιση φαινομένων όπως η λίμναση υδάτων επιφανειακά της λεκάνης.

Το μοντέλο Landgem που χρησιμοποιήθηκε γα να προβλεφθεί η εξέλιξη του βιοαερίου μέσα στο ΧΥΤΑ Χανίων δείχνει πως η παραγωγή του ξεκινά λίγο χρόνο μετά την έναρξη λειτουργίας του χώρου και κορυφώνεται μετά το πέρας αυτής. Από το έτος αυτό και έπειτα η παραγωγή του βιοαερίου μειώνεται σταδιακά. Το πρόγραμμα πάντως φαίνεται να υπερεκτιμά τα έτη που στη συνέχεια παράγεται βιοαέριο. Αυτό πιθανόν να συμβαίνει καθώς το μοντέλο είναι προσαρμοσμένο στα στερεά απόβλητα των Η.Π.Α. τα οποία αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από υλικά συσκευασίας και πλαστικά αντίθετα με τα απορρίμματα στην Ελλάδα.

Όσον αφορά τις μεθόδους διαχείρισης των στραγγισμάτων φαίνεται πως μια στρατηγική επεξεργασίας στραγγισμάτων κατάλληλη για κάποιον ΧΥΤΑ δεν καθίσταται αυτόματα κατάλληλη για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων όλων των ΧΥΤΑ. Επιπλέον, μια μέθοδος επεξεργασίας δεν δείχνει να είναι ικανή να απομακρύνει όλους τους ρύπους από τα στραγγίσματα και για το λόγο αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιείται συνδυασμός μεθόδων, φυσικοχημικών και βιολογικών, προκειμένου να επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του φορτίου. Κάποιες από τις διεργασίας είναι πιθανόν να πρέπει να τροποποιηθούν κατά τη διάρκεια της ζωής του ΧΥΤΑ λόγω της διαφοροποίησης της ποιότητας των διασταλλαγμάτων σε συνάρτηση με το χρόνο.

Η εγκατάσταση επεξεργασίας που θα λειτουργήσει στα Χανιά αποτελείται κατά κύριο λόγο από τις δεξαμενές SBR και τον τεχνητό υγροβιότοπο. Η εγκατάσταση φαίνεται να αποδίδει κυρίως εξαιτίας του μεγάλου χρονικού διαστήματος κατά το οποίο τα διασταλλάγματα παραμένουν μέσα στις δεξαμενές SBR. Ωστόσο η συμβολή του υγροβιότοπου δεν είναι σημαντική καθώς οι διαστάσεις του είναι πολύ μικρές με αποτέλεσμα ο χρόνος παραμονής των στραγγισμάτων μέσα σε αυτές να είναι εξαιρετικά μικρός. Πάντως η απόδοση του συστήματος έγινε βάσει σταθερών που αφορούν αστικά λύματα, λόγω απουσίας στοιχείων για τα στραγγίσματα από ΧΥΤΑ, συνεπώς τα πραγματικά αποτελέσματα είναι πιθανόν να διαφοροποιούνται σε μεγάλο βαθμό.

Θα ήταν ενδιαφέρον αφότου ξεκινήσει η λειτουργία της εγκατάστασης να γίνεται δειγματοληψία από διάφορα σημεία αυτής προκειμένου να ελέγχεται η ποιότητα της εκροής αλλά και η απόδοση της εγκατάστασης. Πιθανόν πάντως η εγκατάσταση να απομακρύνει σε μεγάλο βαθμό το οργανικό φορτίο αλλά το επίμονο οργανικό κλάσμα να παραμένει, για αυτό και η εγκατάσταση μια μονάδας ενεργού άνθρακα σαν τριτοβάθμια επεξεργασία να είναι απαραίτητη. Τέλος, μια δεξαμενή καθίζησης πριν από τις δεξαμενές SBR να είχα επιπλέον θετικά αποτελέσματα στη διαδικασία.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ


1. Αγγελάκης Α.Ν., Tchobanoglous G., 'Υγρά απόβλητα, φυσικά συστήματα επεξεργασίας και ανάκτηση, επαναχρησιμοποίηση και διάθεση εκροών', 1995 Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης
2. Βαμβακερίδου Λύδια, Σχεδιασμός και Μαθηματική Προσομοίωση δικτύων ύδρευσης, 2001 ΕΜΠ
3. Καϊάφας Ιωάννης, 'Επεξεργασία στραγγισμάτων ΧΥΤΑ μη επικίνδυνων στερεών αποβλήτων', μεταπτυχιακή εργασία, τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Χανιά 2002
4. Καλογεράκης Νικόλαος, 'Βιολογική Εξυγίανση Περιβάλλοντος' BIOREMEDATION, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις
5. Κουτσογιάννης Δημήτρης, 'Σχεδιασμός αστικών δικτύων αποχέτευσης', ΕΜΠ
6. Οικονομόπουλος Αλέξανδρος, 'Ρύπανση και έλεγχος ρύπανσης υδάτων', 2003, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις.
7. Παναγιωτακόπουλος Δημήτριος, 'Βιώσιμη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων' 2002, ΖΥΓΟΣ.
8. Παπαδόπουλος Αχιλλέας, 'Ανάπτυξη μεθόδων για την επεξεργασία στραγγισμάτων από χώρους ταφής απορριμμάτων', Διδακτορική διατριβή ΕΜΠ 1994
9. Σκορδίλης Αδαμάντιος 'Ελεγχόμενη Εναπόθεση Στερεών μη Επικίνδυνων Αποβλήτων', 2001, ΙΩΝ
10. Τραγανίτης Σ., Βαλακώστας Μ., Κωστοβασίλης Ι. 'Σχεδιασμός και λειτουργία της εγκατάστασης προεπεξεργασίας στραγγισμάτων του ΧΥΤΑ Λάρισας'. Τ.Ε.Ε. Heleco '03, Πρακτικά Συνεδρίου, τόμος Β
11. Τσαγκαράκης Κ.Π., Αγγελάκης Α.Ν. 'Φυσικά Συστήματα Επεξεργασίας Αστικών Υγρών αποβλήτων', 2003
12. Τσακίρης Ι., 'Υδατικοί Πόροι Ι: Τεχνική Υδρολογία', 1995, Συμμετρία
13. Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Μονάδας Μηχανικής Διαλογής και κομποστοποιήσης και χώρου Υγειονομικής ταφής απορριμμάτων στη θέση Κορακιά νοτίως της χαράδρας του Κουρουπητού Ακρωτηρίου Χανίων
14. Τεχνική Μελέτη Κατασκευής ΧΥΤΑ Χανίων

15. ΥΠΕΧΩΔΕ, Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης Επιχειρησιακού Προγράμματος για το περιβάλλον, Στοϊλόπουλος Β.,
16. Πρακτικά ημερίδας Νέες τεχνολογίες στον τομέα Διαχείρισης των στερεών αποβλήτων, Διοργανωτής Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Ανατολικής Κρήτης, Ηράκλειο 8/2/ 2002
17. Έλεγχος ρύπανσης νερών, Σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων, Εργαστήριο Διαχείρισης Αερίων, Υγρών και στερεών αποβλήτων, Τμήμα Μηχανικών περιβάλλοντος, 2003 Πολυτεχνείο Κρήτης.
18. ΦΕΚ 358/ 1996, 'Μέτρα και όροι διαχείρισης των στερεών αποβλήτων'
19. ΦΕΚ 1016/1997, 'Κατάρτιση πλαισίου προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Εθνικός σχεδιασμός διαχείρισης στερεών αποβλήτων, (γενικές κατευθύνσεις της πολιτικής διαχείρισης των στερεών αποβλήτων)'
20. ΦΕΚ723/2000, 'Συμπλήρωση και εξειδίκευση της υπ'αριθ. 113944/1944/1997 κοινής Υπουργικής Απόφασης με θέμα: Εθνικός Σχεδιασμός διαχείρισης στερεών αποβλήτων (Γενικές κατευθύνσεις της πολιτικής διαχείρισης στερεών αποβλήτων)'
21. ΦΕΚ 1572/2002, 'Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων'
22. Andreotolla Gianni, Pierro Cannas 'Chemical and Biological Characteristics of landfill leachate', Landfilling of waste: leachate, Christensen, Cossu, Stegman, E&FN Spon
23. Barber C. Maris Peter , 'Leachate Recirculation: Full Scale experience Water Research Centre, 1992 Landfilling of waste: Leachate', E&FN Cossu
24. Blakey Nick, 'Model Prediction of landfill Leachate Production', Landfilling of waste: leachate, Christensen, Cossu, Stegman, E&FN Spon
25. Cambell D, 'Understanding water balance in landfill sites', Waste Management 594-598p
26. Cossu Rafaello, Serra Roberto, Muntoni Aldo, 'Physico – chemical Treatment of leachate, 1992 Landfilling of waste: Leachate', E&FN Cossu
27. Datta Manoj 'Waste Disposal in Engineered Landfills', Narosa, 1997
28. Diamadopoulos E. et al. 'Combined treatment of landfill leachate and domestic sewage in a sequencing batch reactor' Water science technology vol.36 No2 pp 61-68, 1997

29. Kouzeli – Katsiri, Bosdogianni A., Christoulas D., 'Prediction of leachate quality from sanitary landfills', 958 Journal of environmental engineering/ October 1999
30. Kristensen Preben, Ecotoxicological Characteristics of landfill leachate, Landfilling of waste: Leachate, E&FN Cossu
31. Mulamooti G., McBean A., 'Constructed Wetlands for the treatment of landfill leachate'
32. Peters A. Thomas, Purification of landfill Leachate with membrane filtration, Filtration and Separation, Jan/Feb 1998, page 33
33. Robinson William D. 'The solid waste handbook, a practical guide', 1986, Wiley Interscience
34. Rowe Kerry, Quigley Robert, Booker John. 'Clayey Barrier systems for waste disposal facilities', E&FN Spon
35. Senior Eric, 'Microbiology of landfill sites', Second Edition
36. Streeter Victor/Wylie Benjamin, 'Μηχανική των ρευστών', Fountas
37. Syed R. Quasim, Walter Chiang 'Sanitary Landfill Leachate, Generation, control, treatment'
38. Tatsi A.A., A.I. Zouboulis, 'A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki Greece)', 270-219pp, Advances in Environmental Research
39. Tchobanoglous G., Theisen H. Vigil S. 'Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management issues'
40. Tchobanoglous G. Burton F. Stensel D., ΄Wastewater Engineering Treatment and reuse', 4th Edition 2003, Metcalf & Eddy
41. U.S. Environmental Protection Agency, 'Wastewater Technology fact sheet, Sequencing batch reactors'
42. U.S. Environmental Protection Agency, 'Sequencing batch reactors', Office of water Enforcement and Compliance
43. U.S. Environmental Protection Agency, The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance Model, user's guide for version 3,
44. U.S. Environmental Protection Agency, User's manual Landfill gas Emissions Model Version 2, Richard Pelt, Robert Bass et al.

45. Yalmaz G. and Ozturk I., Biological ammonia removal from anaerobically pre-treated landfill leachate in Sequencing batch reactors (SBR), Water Science and technology Vol 43 No3 pp307/314, IWA Publishing 2001.
46. www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-501/a-e.pdf - SBR
47. www.uswcl.ars.ag.gov/exper/relhumeq.htm