



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος
Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών
και Επικίνδυνων Αποβλήτων

ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΓΙΔΑΡΑΚΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ



ΧΑΝΙΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^Ο

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ, ΠΟΙΟΤΙΚΗ & ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΑ 1

1.1 Κατηγορίες στερεών αποβλήτων	1
1.2 Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ)	2
1.3 Ποιοτική και ποσοτική ανάλυση ΑΣΑ	4
1.3.1 Παραγωγή απορριμμάτων	6
1.3.2 Ποσοτική ανάλυση	7
1.3.3 Ποιοτική ανάλυση	9
1.3.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά	12
1.3.3.2 Χημικά χαρακτηριστικά	17
1.3.3.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά	23
1.3.3.4 Ειδικά απόβλητα	25
1.4 Μελέτες σύστασης ΑΣΑ	26
1.4.1 Ελλαδικός χώρος	26
1.4.2 Εξωτερικό	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^Ο

ΑΠΟΚΟΜΙΔΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ 37

2.1 Προσωρινή αποθήκευση απορριμμάτων	38
2.1.1 Είδη μέσων προσωρινής αποθήκευσης	38
2.1.1.1 Σάκοι	38
2.1.1.2 Κάδοι	40
2.1.1.3 Καινοτόμα συστήματα	44
2.1.2 Αριθμός και χωρητικότητα μέσων προσωρινής αποθήκευσης	50
2.1.3 Χωροθέτηση μέσων προσωρινής αποθήκευσης	51
2.2 Συλλογή απορριμμάτων	58
2.2.1 Κατηγορίες συλλογής	61
2.2.2 Οχήματα	63
2.2.3 Ωράριο	64
2.2.4 Συχνότητα	66
2.2.5 Δρομολόγια	67
2.3 Μεταφορά και μεταφόρτωση απορριμμάτων	71
2.4 Συστήματα αποκομιδής απορριμμάτων	72
2.4.1 Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση	72
2.4.2 Αξιολόγηση (Benchmarking)	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	
ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ	86
3.1 Βασικές αρχές	86
3.2 Εκτίμηση απόδοσης	87
3.3 Υλικά ανακύκλωσης	92
3.4 Απόβλητα συσκευασίας	105
3.4.1. Νομικό πλαίσιο	105
3.4.2. Στατιστικά στοιχεία	108
3.4.3. Κατηγορίες	110
3.4.4. Συλλογή και διαχωρισμός στην Ελλάδα	113
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	
ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	114
4.1. Βασικές αρχές	114
4.2 Μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας	116
4.3 Αερόβια Διεργασία	120
4.3.1 Είδη	121
4.3.1.1. Μέθοδος αναδεδόμενων σωρών	122
4.3.1.2. Μέθοδος δυναμικά αεριζόμενων σωρών	124
4.3.1.3. Μέθοδος βιοαντιδραστήρων (κλειστά συστήματα)	125
4.3.2. Προϊόντα	126
4.3.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	128
4.3.4. Στάδια	129
4.3.5. Χημικοί παράγοντες επιρροής	132
4.3.6. Φυσικοί παράγοντες επιρροής	135
4.3.7. Απαιτήσεις ποιότητας	137
4.4. Αναερόβια χώνευση	141
4.4.1 Βασικές αρχές και λειτουργία	141
4.4.2 Συστήματα και τεχνολογίες	145
4.4.3 Αναερόβια ζύμωση οργανικών στερεών αποβλήτων	150
4.4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα	157
4.5. Ισοζύγια	157
4.5.1 Μάζας	157
4.5.2 Ρύπων	159
4.5.3 Ενέργειας	159

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	161
ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	
5.1 Εισαγωγή	161
5.2 Αποτέφρωση – Καύση	162
5.3 Πυρόλυση	169
5.4 Αεριοποίηση	173
5.5 Τεχνική Πλάσματος	176
5.6 Μηχανισμοί σχηματισμού και συμπεριφορά επικίνδυνων ουσιών	179
5.6.1 Μονοξείδιο του άνθρακα και προϊόντα ατελούς καύσης	182
5.6.2 Διοξίνες και φουράνια	184
5.6.3 Οξείδια αζώτου NOx	187
5.6.4 Βαρέα μέταλλα	189
5.7 Ισοζύγια	193
5.7.1 Μάζας	193
5.7.2 Ρύπων	195
5.7.3 Ενέργειας	199
5.7.4 Σύγκριση με μηχανική – βιολογική επεξεργασία	202
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	204
ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΤΑΦΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	204
6.1 Διάθεση απορριμμάτων	204
6.2 Υγειονομική Ταφή (YT)	206
6.3 Διασταλλάγματα	214
6.3.1 Παραγωγή	214
6.3.2 Φάσεις αποδόμησης απορριμμάτων	218
6.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την σύνθεση	222
6.3.4 Χημικά χαρακτηριστικά	223
6.3.5 Συστήματα μόνωσης και συλλογής	227
6.3.5.1 Κλίση βάσης και τοποθέτηση συστημάτων	234
6.3.5.2 Υδραυλική αγωγιμότητα στραγγιστικής ζώνης	238
6.3.5.3 Επιλογή και χαρακτηριστικά των αγωγών	239
6.3.5.4 Φράξιμο και διήθηση	241
6.3.5.5 Διαρροές μόνωσης	242
6.4 Βιοαέριο	247
6.4.1 Παραγωγή	247
6.4.3 Κίνηση	251
6.4.3.1 Παράγοντες κίνησης	252
6.4.3.2 Συνθήκες που επηρεάζουν την κίνηση	253
6.4.3.3 Εξισώσεις κίνησης	255
6.4.3.4 Κίνηση των βασικών αερίων που συνθέτουν το βιοαέριο	257
6.4.4 Παρακολούθηση	261

6.4.4.1 Παρακολούθηση εδαφικών αερίων (<i>Soil gas monitoring</i>)	261
6.4.4.2 Παρακολούθηση κοντά στην επιφάνεια (<i>Near surface monitoring</i>)	266
6.4.4.3 Παρακολούθηση εκπομπών (<i>Emissions monitoring</i>)	267
6.4.4.4 Παρακολούθηση αέρα περιβάλλοντος (<i>Ambient air monitoring</i>)	269
6.4.4.5 Παρακολούθηση αέρα εσωτερικών χώρων (<i>Indoor monitoring</i>)	271
6.4.4 Συστήματα συλλογής και ελέγχου	273
6.4.4.1 Παθητικός έλεγχος βιοαερίου	276
6.4.4.2 Ενεργητικός έλεγχος βιοαερίου	278
6.4.4.3 Συμπυκνώματα	283
6.4.4.4 Διαχείριση βιοαερίου	284
6.5 Περίοδος μεταφροντίδας ενός ΧΥΤΑ	289
6.6 Αποκατάσταση ενός ΧΥΤΑ	290

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο	292
ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΧΩΡΩΝ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (ΧΥΤΑ)	292

7.1 Χωροθέτηση	292
7.1.2 Βασικά βήματα / στάδια	293
7.1.2.1 Αρχική προμελέτη	294
7.1.2.2 Έρευνες στο πεδίο	294
7.1.2.3 Οικονομική αξιολόγηση	296
7.1.2.4 Κοινοτική διαβούλευση	297
7.1.3 Κριτήρια	298
7.1.3.1 Γεωλογία	299
7.1.3.2 Σταθερότητα	300
7.1.3.3 Υδρογεωλογία	300
7.1.3.4 Υδρολογία	302
7.1.3.5 Τοπογραφία	303
7.1.3.6 Περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές	303
7.2 Διαστασιολόγηση	304
7.3 Χωματοκάλυψη	307
7.3.1 Τεχνική Noble	307
7.3.2 Τεχνική διαστασιολόγησης	308
7.3.3 Μέθοδος ισοϋψών	309
7.3.4 Μέθοδος τομών	310
7.4. Τελική Κάλυψη	312
7.5 Αποκατάσταση	318
7.5.1 Ελεγχόμενη παροχή νερού	319
7.5.2 In situ αερισμός	320
7.6. Μεταφροντίδα	321

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο	324
ΒΙΩΣΙΜΗ ΤΑΦΗ	324
8.1 Εξέλιξη εδαφικής διάθεσης απορριμμάτων	324
8.2 Από ΧΥΤΑ σε ΧΥΤΥ	325
8.3 Ισοζύγια μάζας	329
8.4 Μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ΧΥΤΑ	333
8.5 Στρατηγικές επίτευξης βιώσιμης ταφής απορριμμάτων	334
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	 338

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Χαρακτηρισμός, Ποιοτική & Ποσοτική Ανάλυση ΑΣΑ

1.1 Κατηγορίες στερεών αποβλήτων

Ως Στερεά Απόβλητα (ΣΑ) θεωρούνται στερεά υλικά ή υλικά με ελάχιστο υγρό περιεχόμενο, τα οποία δεν έχουν κάποια χρησιμότητα και ως εκ τούτου ο κάτοχός τους τα απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να τα απορρίψει. Ενδεχομένως ορισμένα εξ αυτών να παρουσιάζουν και κάποιου είδους επικινδυνότητα. Συνήθως αποτελούν απόβλητα νοικοκυριών, βιομηχανικών και εμπορικών εγκαταστάσεων, γεωργικών και εξορυκτικών δραστηριοτήτων, κα.. Επίσης, είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν απόβλητα από τη διαχείριση υγρών αποβλήτων, την επεξεργασία πόσιμου νερού και εγκαταστάσεις επεξεργασίας αέριων εκπομπών.

Γενικά, ο χαρακτηρισμός ενός υλικού ως απόβλητο εξαρτάται αφενός από τις ιδιότητες αυτού και αφετέρου από:

- Τις ισχύουσες οικονομικές συνθήκες (η αξία των υλικών μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά).
- Το κόστος της απόρριψης (μπορεί να αυξηθεί ανάλογα με την επιλεγείσα μέθοδο απόρριψης ή και με την επιβολή τελών).
- Την ισχύουσα νομοθεσία, η οποία και θέτει τους εκάστοτε ισχύοντες όρους και απαιτήσεις προς όφελος του περιβάλλοντος.

Ουσιαστικά, το τι είναι και τι δεν είναι ΣΑ είναι θέμα ορισμού. Γενικά, θεωρείται ότι στην κατηγορία των ΣΑ περιλαμβάνονται όλα τα απόβλητα με εξαίρεση:

- Απόβλητα σε υγρή φάση χωρίς αξιόλογο ποσοστό αιωρούμενων ρύπων (υγρά απόβλητα).
- Αέριοι ρύποι.

Τα ΣΑ ομαδοποιούνται γενικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Αστικά Στερεά Απόβλητα (απορρίμματα)
2. Ειδικά Στερεά Απόβλητα: (α) Επικίνδυνα απόβλητα.
(β) Μη επικίνδυνα ειδικά απόβλητα.
(γ) Ιατρικά απόβλητα.

Πιο αναλυτικά, τα ΣΑ περιλαμβάνουν:

- Αστικά απορρίμματα (οικιακά, βιοτεχνικά, εμπορικά, οδοκαθαρισμού κλπ.).
- Στερεά ή υδαρή (με αξιόλογο ποσοστό αιωρούμενων ουσιών) απόβλητα, που δεν μπορούν να διατεθούν μαζί με τα οικιακά (ορισμένα βιομηχανικά, τοξικά ή αδρανή και απόβλητα της βιομηχανίας παραγωγής ενέργειας).
- Πετρελαιοειδή απόβλητα (προέρχονται από την επεξεργασία του πετρελαίου, διυλιστήρια, χημικά εργοστάσια, ναυπηγεία, κλπ.).
- Απόβλητα γεωργικών και κτηνοτροφικών εκμεταλλεύσεων.
- Απόβλητα ορυχείων και μεταλλείων.
- Απόβλητα εκσκαφών (από ξηρά και θάλασσα).
- Απόβλητα οικοδομικών κατεδαφίσεων.
- Ιλεις από την επεξεργασία αστικών λυμάτων και τη βιομηχανία.
- Απόβλητα εμπορικών δραστηριοτήτων.
- Ιατρικά απόβλητα.
- Ελαστικά.
- Σκράπ (π.χ. αποσυρθέντων αυτοκινήτων, παλαιών Η/Υ, κ.λπ.).

1.2 Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ)

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα ΣΑ, που παράγονται από τις δραστηριότητες των νοικοκυριών (οικιακά ΣΑ), των εμπορικών δραστηριοτήτων (εμπορικά ΣΑ), του οδοκαθαρισμού, καθώς και άλλα ΣΑ (ιδρύματα, επιχειρήσεις), τα οποία μπορούν λόγω της φύσης τους ή της σύνθεσής τους να εξομαλυνθούν με τα οικιακά ΣΑ. Σύμφωνα με την ΚΥΑ 29407/3508/2002 «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή αποβλήτων» ως αστικά απόβλητα νοούνται «...τα οικιακά απόβλητα καθώς και άλλα απόβλητα που λόγω φύσης ή σύνθεσης είναι παρόμοια με τα οικιακά, τα οποία διέπονται από τις διατάξεις της ΚΥΑ 69728/824/1996».

Τα ΑΣΑ αποτελούν ένα ιδιαιτέρως ανομοιογενές μίγμα υλικών. Ο χαρακτηρισμός των ΑΣΑ αποσκοπεί στο να προσδιορίσει βασικές κατηγορίες υλικών που περιέχουν, προκειμένου να προσδιορισθεί πληροφορία απαραίτητη για την κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης, επεξεργασίας και αξιοποίησής τους (ανακύκλωση, ανάκτηση ενέργειας, κ.λπ.). Ο πιο δόκιμος διαχωρισμός των ΑΣΑ, όπως προκύπτει από σειρά δειγματοληψιών και αναλύσεων, ως προς συγκεκριμένες κατηγορίες (κλάσματα) υλικών, συμπεριλαμβάνει τα εξής:

- **Ζυμώσιμα**

Περιλαμβάνονται τα τροφικά υπολείμματα και τα απόβλητα κήπου.

- **Χαρτί:**

Περιλαμβάνονται τα πάσης φύσεως χαρτιά και χαρτόνια, που προέρχονται κυρίως από έντυπο υλικό και συσκευασίες προϊόντων.

- **Μέταλλα:**

Περιλαμβάνεται το σύνολο των μεταλλικών υλικών, που απαντώνται στα απορρίμματα. Συνηθίζεται ένας διαχωρισμός σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα (κυρίως λόγω της μαγνητικής ιδιότητας των πρώτων), με τα τελευταία να έχουν ως κυριότερο αντιπρόσωπο το αλουμίνιο.

- **Γυαλί:**

Συνηθίζεται ο διαχωρισμός σε λευκό, καφέ και πράσινο γυαλί, όσον αφορά στην ανακύκλωση, καθώς η παραγωγή καφέ και λευκού γυαλιού απαιτεί υαλότριμμα μόνο του ίδιου χρώματος.

- **Πλαστικό:**

Περιλαμβάνεται το σύνολο των πολυμερών απορριμμάτων. Η κατηγορία αυτή γίνεται διαρκώς μεγαλύτερη κατά τα τελευταία χρόνια και στη χώρα μας, ως συνέπεια της αλλαγής των καταναλωτικών συνηθειών (στροφή σε συσκευασμένα προϊόντα, κ.λ.π.). Χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι η έντονη ανομοιογένειά της, λόγω των πολλών χρησιμοποιούμενων πολυμερών (π.χ. PVC, PE, PP, PS, PET, ABS, κ.λπ.).

- **Δέρμα – Ξύλο – Ύφασμα – Λάστιχο (ΔΞΥΛ):**

Χαρακτηρίζονται ως λοιπά καύσιμα.

- **Αδρανή:**

Εδώ περιλαμβάνονται χημικώς ανενεργά υλικά, που καταλήγουν στα οικιακά απορρίμματα (π.χ. χρώματα, πέτρες, κ.λ.π.).

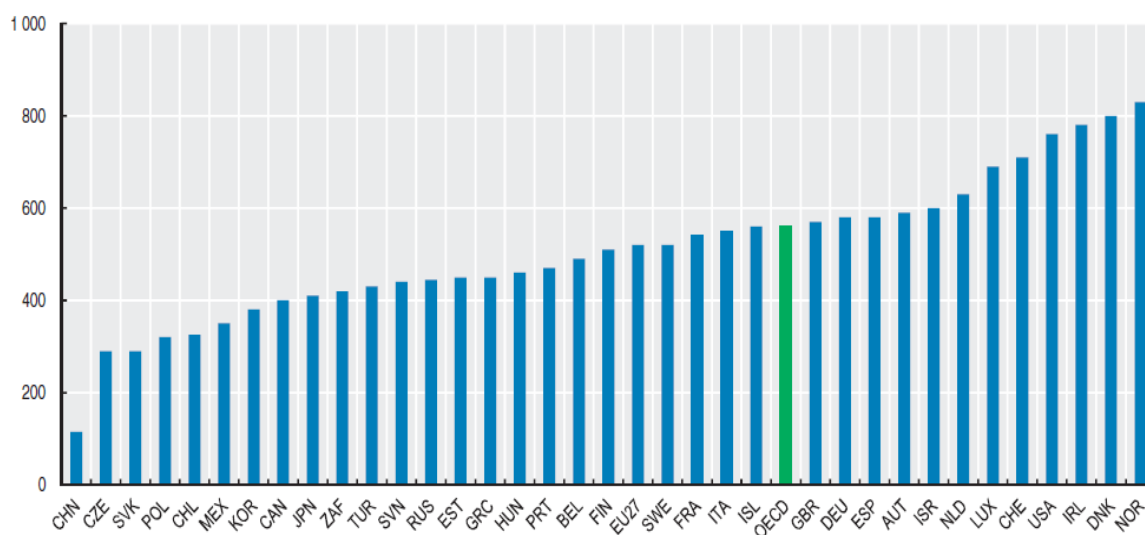
• **Λοιπά:**

Στο κλάσμα αυτό καταλήγουν τα υλικά εκείνα που δε μπορούν να ταξινομηθούν σε καμιά από τις άλλες κατηγορίες.

1.3 Ποιοτική και ποσοτική ανάλυση ΑΣΑ

Καθοριστικό ρόλο στην επιλογή ή στο σχεδιασμό ενός Συστήματος Διαχείρισης Απορριμμάτων (ΣΔΑ) παίζουν η ποσότητα και η σύνθεση αυτών. Η ποσότητα μπορεί να αναφέρεται είτε στο βάρος των απορριμμάτων, που παράγει ένα άτομο την ημέρα (kg/άτομο/ημέρα), είτε στο βάρος των απορριμμάτων, που παράγει μία οικογένεια την ημέρα (kg/οικογένεια/ημέρα), είτε στο βάρος των απορριμμάτων, που παράγει σε καθημερινή βάση ένας Δήμος. Βέβαια, θα μπορούσε κανείς να εκφράσει την ποσότητα των απορριμμάτων σε συνάρτηση με τον όγκο τους και όχι με το βάρος τους. Κάτι τέτοιο όμως δεν συνιστάται, πρώτον διότι ο παράγοντας "όγκος" είναι πολύ σχετικός και αστάθμητος και δεύτερον διότι το βάρος χρησιμοποιείται διεθνώς για την περιγραφή των ποσοτήτων των απορριμμάτων.

Στο Διάγραμμα 1.1 παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές τιμές των παραγόμενων ποσοτήτων απορριμμάτων σε διάφορες χώρες του κόσμου.



Διάγραμμα 1.1: Παραγόμενες ποσότητες απορριμμάτων σε διάφορες χώρες του κόσμου, kg/κάτοικο/έτος [OECD, 2010]

Η δε σύνθεση των απορριμμάτων αποτελεί τη βάση κάθε σχεδιασμού διαχείρισής τους και παίζει πρωταρχικό ρόλο τόσο για την επιλογή μεθόδων / συστημάτων διάθεσης, όσο και για τον έλεγχο της λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Ο όρος

σύνθεση αναφέρεται στην φυσική σύνθεση των απορριμμάτων (όχι στην χημική), δηλαδή στο ποσοστό κατά βάρος των διάφορων υλικών, που συνθέτουν τα απορρίμματα (π.χ. πλαστικά, μέταλλα, ζυμώσιμα, χαρτί, ξύλα, κ.λ.π.). Ενδεικτική εικόνα της σύνθεσής τους σε διάφορες περιοχές του κόσμου παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Πίνακας 1.1: Σύνθεση των απορριμμάτων σε διάφορες περιοχές του κόσμου.

	Ποσοστό (%) κατά βάρος				
	Νέα Υόρκη (ΗΠΑ, 2008)	Χόνγκ Κόνγκ (Χόνγκ Κόνγκ, 2010)	Βουδαπέστη (Ουγγαρία, 2005)	Πεκίνο (Κίνα, 2009)	Ντάκα (Μπαγκλαντές, 2007)
Χαρτί	32,7	20,5	14,6	10,3	10,7
Πλαστικά	14,1	20,6	16,7	9,8	4,3
Μέταλλα	6,9	1,7	1,8	0,8	2
Υαλί	4,4	5,1	2,2	0,6	0,7
Ζυμώσιμα	22,7	44,8	29,4	69,3	68,3
Λοιπά	19,2	7,3	35,3	9,2	14

Όπως γίνεται κατανοητό από το Διάγραμμα 1.1 και τον Πίνακα 1.1, οι ποσότητες και η σύνθεση των απορριμμάτων διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή, καθώς εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως: τις υπάρχουσες οικονομικές δραστηριότητες, τον τύπο των κατοικιών, την εποχή, την χρήση οικιακών σκουπιδοφάγων, τις καταναλωτικές συνήθειες, το βιοτικό και μορφωτικό επίπεδο, την ύπαρξη ανακύκλωσης, την νομοθεσία, τις κλιματολογικές συνθήκες, κ.λ.π.. Παράδειγμα της επίδρασης π.χ. του τύπου κατοικίας στις ποσότητες και στη σύνθεση των απορριμμάτων είναι το εξής: κάποιος που μένει σε μονοκατοικία και διαθέτει αυλή με κατοικίδια ζώα, αναμένεται να έχει στα σκουπίδια του λιγότερα ζυμώσιμα από ότι ένας που μένει σε πολυκατοικία, επειδή μέρος των ζυμώσιμων χρησιμοποιείται για τη διατροφή των ζώων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι στο νομό Αττικής η παραγωγή απορριμμάτων ανά κάτοικο ανά ημέρα σε μια υποβαθμισμένη περιοχή, όπως είναι ο Δήμος Ζεφυρίου, είναι 0,64 Kg, ενώ στο Δήμο της Εκάλης, όπου τα κοινωνικοοικονομικά και καταναλωτικά χαρακτηριστικά των πολιτών είναι υψηλά, ανέρχεται σε 1,6 Kg. Γίνεται επομένως αντιληπτή η ανάγκη να ληφθούν σοβαρά υπ' όψη οι προαναφερθέντες παράγοντες στην εκτίμηση των ποσοτήτων και της σύνθεσης των οικιακών στερεών απορριμμάτων.

1.3.1 Παραγωγή απορριμμάτων

Οι ποσότητες των ΑΣΑ και των βασικών συστατικών τους εκφράζονται σε βάρος, λόγω του ότι:

- μετριέται πιο εύκολα από τον όγκο,
- είναι ανεξάρτητο από το βαθμό συμπίεσης, ο οποίος δεν είναι ούτε ελεγχόμενος, ούτε προβλέψιμος με ακρίβεια στις διάφορες φάσεις της διαχείρισης.

Τα χαρακτηριστικότερα μεγέθη, που περιγράφουν την παραγωγή απορριμμάτων, είναι η Μοναδιαία Παραγωγή Απορριμμάτων (ΜΠΑ) και ο αντίστοιχος Ρυθμός Παραγωγής Απορριμμάτων (ΡΠΑ). Η ΜΠΑ εκφράζεται από το βάρος των απορριμμάτων που παράγει ένα άτομο σε μια ημέρα (kg/κατ./ημέρα), διότι με βάση την τιμή αυτή μπορούν να εκτιμηθούν περιοδικές ποσότητες για διάφορα μεγέθη πληθυσμών και για διάφορες χρονικές περιόδους. Η ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται ανά κάτοικο ποικίλλει πολύ, ανάλογα με την χώρα και την περιοχή. Η ποσότητα, όπως είναι ευνόητο είναι μεγαλύτερη στις πλούσιες χώρες και στις πλούσιες περιοχές της ίδιας χώρας. Στις δε αγροτικές περιοχές η ποσότητα των απορριμμάτων είναι μικρότερη από την ανάλογη στις αστικές περιοχές. Στον Πίνακα 1.2 δίνονται μερικές τυπικές τιμές παραγωγής απορριμμάτων ανά κάτοικο. Η τιμή της ΜΠΑ για την Ελλάδα (2002) κυμαίνεται από 0,6 kg/κατ./ημέρα για τις αγροτικές περιοχές ως 1,4 kg/κατ./ημέρα για τις οικονομικά ακμαίες αστικές περιοχές. Το 2012 η μέση τιμή ανά κάτοικο στην Ελλάδα υπολογίζεται σε 1,3 kg/κατ./ημέρα

Πίνακας 1.2: Παραγωγή ΑΣΑ στην Ελλάδα (kg/ άτομο/ ημέρα) – Τυπικές Τιμές [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004]

Πληθυσμός Οικισμού ή Πόλης	Οικιακά Απόβλητα	Εμπορικά, Ιδρυμάτων, Κατασκευών	Σύνολο
<2.000	0,5	0,2	0,7
2.000 -10.000	0,7	0,2	0,9
10.000 -100.000	0,7	0,3	1,0
> 100.000	0,8	0,5	1,3

Ο ΡΠΑ εκτιμάται για μια περιοχή πολλαπλασιάζοντας την ΜΠΑ με τον εξυπηρετούμενο πληθυσμό της:

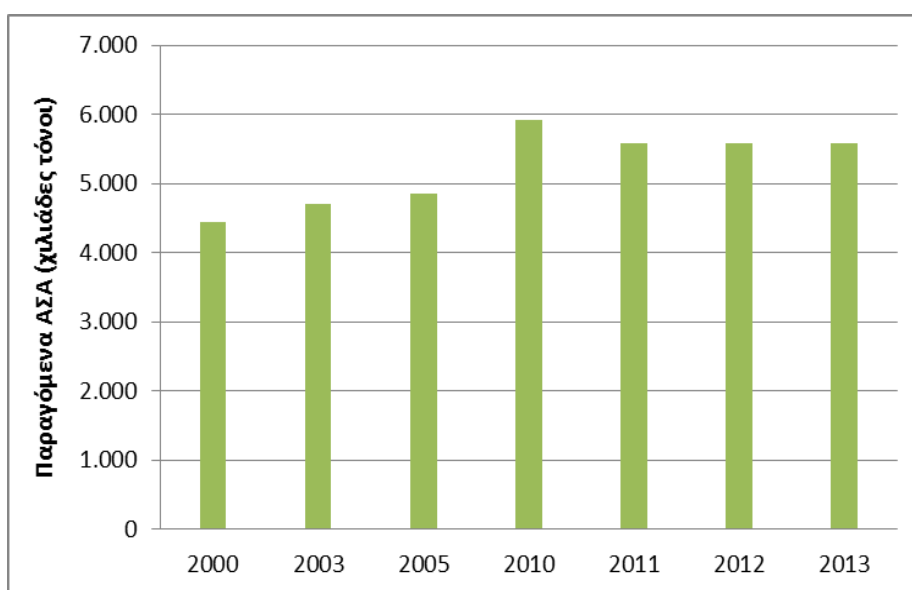
$$ΡΠΑ = ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ \times ΜΠΑ \text{ (Kg/ημέρα)}$$

Ο ΡΠΑ επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- Πληθυσμιακή πυκνότητα (αύξηση της πληθυσμιακής πυκνότητας αντιστοιχεί σε αύξηση της παραγωγής απορριμμάτων).
- Πληθυσμιακές διακυμάνσεις (ιδιαίτερα για τουριστικές περιοχές).
- Εποχιακές διακυμάνσεις.
- Συχνότητα συλλογής (αύξηση συχνότητας συλλογής αντιστοιχεί σε αύξηση της παραγωγής απορριμμάτων).
- Οικονομο-κοινωνικό, πολιτισμικό και μορφωτικό επίπεδο.
- Γεωγραφική περιοχή αναφοράς.
- Ηλικία καταναλωτών.
- Τύπος εμπορικής δραστηριότητας.
- Είδος βιομηχανικής δραστηριότητας.
- Ύπαρξη προγραμμάτων ανακύκλωσης και βιολογικής επεξεργασίας.
- Όγκος και είδη κάδων.
- Εφαρμογή άλλων δυνατοτήτων διάθεσης.
- Ενημέρωση καταναλωτών.

1.3.2 Ποσοτική ανάλυση

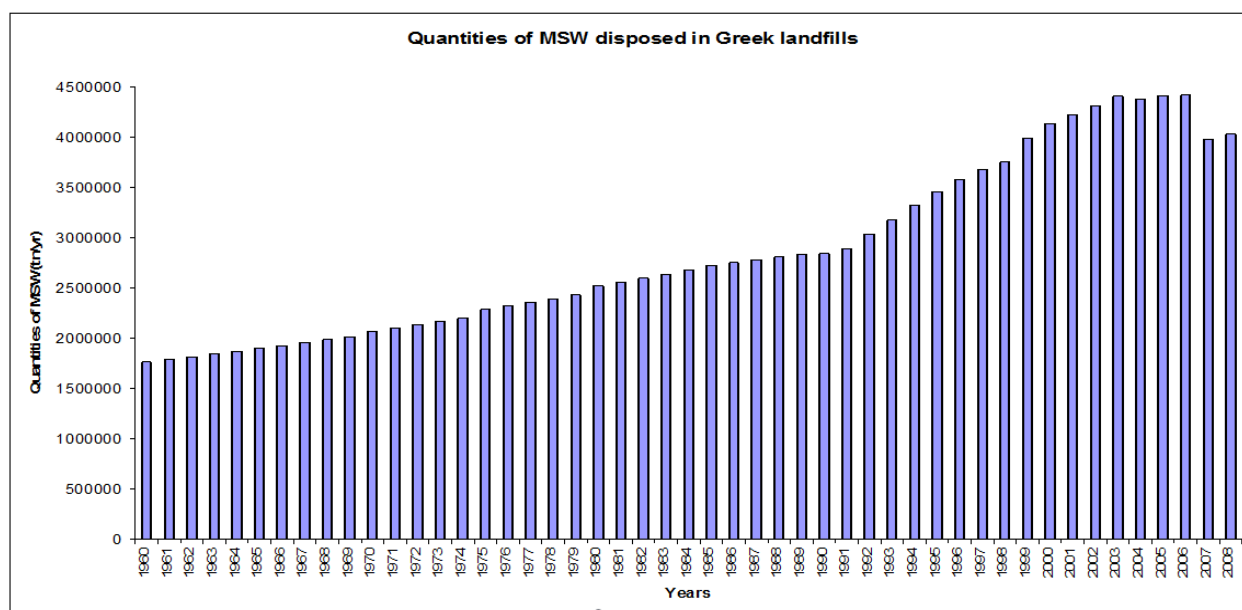
Το 2000 η ποσότητα των παραγόμενων οικιακών αποβλήτων σε επίπεδο χώρας ανήλθε σε σχεδόν 4,4 εκατομμύρια τόνους και αυξήθηκε σταθερά έως και το 2010. Η κατάσταση για τα έτη 2000-2013 αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 1.2.



Διάγραμμα 1.2: Παραγόμενες ποσότητες ΑΣΑ στον ελληνικό χώρο [Eurostat, 2015]

Τα οικιακά απόβλητα περιλαμβάνουν τα απόβλητα που προέρχονται από κατοικίες, καθώς και ένα μέρος των αποβλήτων που παράγονται από τα εμπορικά καταστήματα (~10%). 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 (συμπεριλαμβανομένων των μεταναστών και των τουριστών). Όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.3, το μεγαλύτερο ποσοστό (>80%) των αστικών απορριμμάτων στην Ελλάδα καταλήγουν σε εδαφική διάθεση. Η μείωση που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια οφείλεται στην αύξηση της ανακύκλωσης στην χώρα μας.

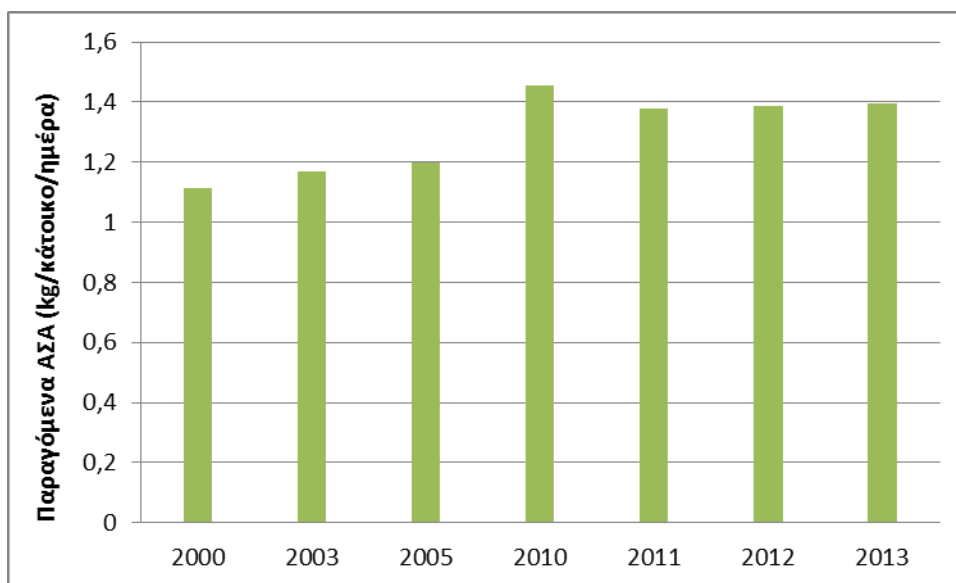
Η μέση ημερήσια παραγωγή οικιακών αποβλήτων το 2000 ανέρχονταν σε 1,11 Kg/κάτοικο, το 2010 η μέση παραγωγή ανά κάτοικο ανέρχονταν σε 1,45 Kg, ενώ το 2013 μειώθηκε στα 1,40 Kg/κάτοικο. Στο Διάγραμμα 1.4 δίνεται η μέση ημερήσια παραγωγή αποβλήτων ανά κάτοικο για την περίοδο 2000-2013.



Διάγραμμα 1.3: Χρονική εξέλιξη της ταφής των αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα

[Chalvatzaki et al., 2010].

Παρατηρείται ότι μέσα σε μια δεκαετία η παραγωγή οικιακών στερεών αποβλήτων στην χώρα μας έχει αυξηθεί κατά 33%, ενώ η ανά κάτοικο παραγωγή αυξήθηκε κατά 30%. Η αύξηση αυτή μπορεί να αποδοθεί στην ανάπτυξη των μεγάλων αστικών κέντρων, την αύξηση του τουριστικού ρεύματος και κυρίως την αντίστοιχη αύξηση του ΑΕΠ, που συνοδεύτηκε από άνοδο του βιοτικού επιπέδου κατανάλωσης.



Διάγραμμα 1.4: Ποσότητες παραγόμενων οικ. αποβλήτων σε kg/κάτοικο/ημέρα [Eurostat, 2015]

1.3.3 Ποιοτική ανάλυση

Τα ΑΣΑ, που απορρίπτονται, χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλη ποικιλία όσον αφορά στη σύνθεση των υλικών από τα οποία αποτελούνται. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που η δειγματοληψία στερεών απορριμμάτων χαρακτηρίζεται ως η πιο «δύσκολη» σε σχέση με τη δειγματοληψία εδαφών, αέρα ή νερού. Εν τούτοις, παρά την ποικιλία, διαφαίνεται μια σχετική "ομοιότητα", από πόλη σε πόλη ή και από χώρα σε χώρα, ως προς τα είδη των συστατικών υλικών, συχνά δε και ως προς τα ποσοστά τους. Η «ομοιότητα» αυτή στη σύνθεση (ή σύσταση) εκφράζεται στατιστικώς και μπορεί να προβλεφθεί σε στατιστική βάση.

Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζεται η σύνθεση των οικιακών στερεών αποβλήτων στην χώρα μας το έτος 2002, ενώ η υφιστάμενη κατάσταση σήμερα δίνεται στο Διάγραμμα 1.5. Συνήθως, οι μελέτες εκτίμησης της σύνθεσης αφορούν στα οικιακά απόβλητα και τούτο διότι βασίζονται σε δειγματοληψίες, οι οποίες γίνονται στις γειτονιές (στους κάδους) πριν από τη συλλογή. Για το λόγο αυτό, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην ανάγνωση και χρήση των στοιχείων αυτών και στην αποφυγή σύγχυσης μεταξύ «οικιακών» και «αστικών» αποβλήτων.

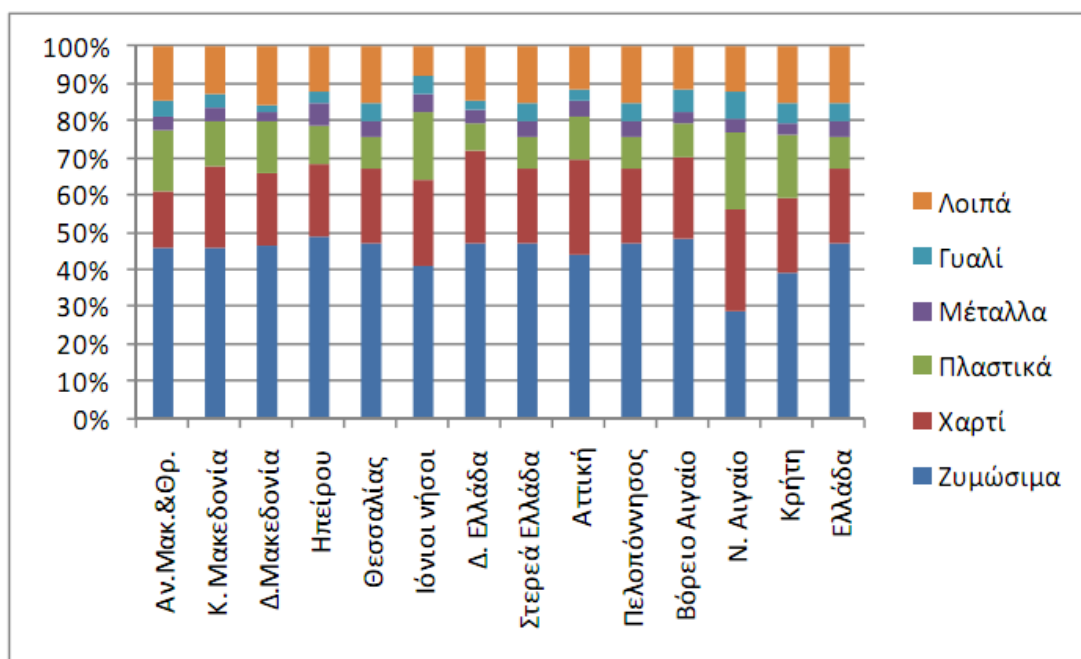
Επισημαίνεται, επίσης, ότι με την εισαγωγή προγραμμάτων ανακύκλωσης, οι ποσότητες και η σύνθεση (αλλά και η θερμογόνο δύναμη) των παραγόμενων ΑΣΑ μπορεί να είναι διαφορετικές από εκείνες των συλλεγόμενων με το «παραδοσιακό» σύστημα συλλογής.

Πίνακας 1.3: Σύνθεση των οικιακών στερεών αποβλήτων (μέσες τιμές) στην Ελλάδα
[Παναγιωτακόπουλος, 2007]

Συστατικά	Διακύμανση Μέσων Τιμών		Τυπική Τιμή	
	Ο.Τ.Α. > 10000	Ο.Τ.Α. < 10000	Ο.Τ.Α. > 10000	Ο.Τ.Α. < 10000
<u>Οργανικά Υλικά</u>				
Τροφικά Υπολείμματα	35-60	50-75	46	62
Χαρτί Χαρτόνι	15-25	12-20	20	16
Πλαστικά	7-15	3-10	8,5	7
Υφάσματα Λάστιχα Δέρματα Ξύλα	4-8	2-6	5	3
Απορρίμματα Κήπων	-	-	1,8	1
<u>Ανόργανα Υλικά</u>				
Γυαλί	2,5 -16,0	2 - 12	4,5	2,5
Κουτιά Αλουμινίου, Μέταλλα	2,8-10,0	2 -5	5	3,5
Άλλα Αδρανή (Χώμα, Τέφρα, κ.ά.)	2-12	2-20	3	1
Υπόλοιπα		6,5	4	

Οι τιμές του Πίνακα 1.3 είναι μέσες τιμές που έχουν εκτιμηθεί σε διάρκεια μηνών ή ετών. Αντίστοιχα στοιχεία για άλλες χώρες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.4. Στο Διάγραμμα 1.5 και στον Πίνακα 1.4 παρατηρείται η ύπαρξη υψηλότερων ποσοστών τροφικών υπολειμμάτων στους μικρούς οικισμούς, στα χωριά και στις φτωχές χώρες, έναντι των αντίστοιχων ποσοστών στις μεγαλύτερες πόλεις και στις πλουσιότερες χώρες. Μεταξύ των αιτιών που μπορούν να αναφερθούν για το φαινόμενο αυτό είναι και τα εξής: Στις φτωχότερες περιοχές είναι μικρότερη η κατανάλωση προκαθορισμένων και συσκευασμένων φρούτων και λαχανικών (σε σχέση με προπαρασκευασμένες τροφές), υπάρχει μικρότερη χρήση περιοδικών και εφημερίδων, ενώ εν γένει υπάρχει δυσχέρεια αγοράς καταναλωτικών αγαθών. Επίσης, στις πλουσιότερες χώρες επεκτείνεται σταδιακά η χρήση συσκευών αλέσεως των τροφικών υπολειμμάτων, τα οποία καταλήγουν, ως υγρά απόβλητα, στο σύστημα αποχέτευσης και όχι στον κάδο των οικιακών αποβλήτων.

Υπενθυμίζεται ότι υψηλό ποσοστό ενός συστατικού στα ΑΣΑ δεν σημαίνει και υψηλή ποσότητα. Η εκτίμηση των ποσοτήτων των συστατικών των ΑΣΑ γίνεται με δειγματοληψίες και στατιστικές αναλύσεις. Σε συνήθειες απλές περιπτώσεις, οι δειγματοληψίες και ο διαχωρισμός των υλικών γίνεται χειρωνακτικά: το δείγμα των ΑΣΑ αδειάζεται σε ένα πάγκο και τα συστατικά υλικά τοποθετούνται σε χωριστούς κάδους και ζυγίζονται. Πρόσφατα, έχουν αναφερθεί στατιστικές αναλύσεις που στηρίζονται σε φωτογραφίες των δειγμάτων από τις οποίες εκτιμάται η σύνθεση. Η επιλογή των δειγμάτων και ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της όλης διαδικασίας απαιτεί «γνώση των αποβλήτων» και γνώση των μεθόδων της Στατιστικής.



Διάγραμμα 1.5: Μέση ποιοτική σύσταση παραγόμενων αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα ανά περιφέρεια [Μπουρτσάλας, 2011]

Πίνακας 1.4: Σύνθεση (% κατά βάρος) οικιακών στερεών αποβλήτων σε διάφορες χώρες (μη συμπεριλαμβανομένων των ανακυκλωθέντων υλικών) [Παναγιωτακόπουλος, 2007]

Συστατικά Υλικά στα Οικιακά Σ.Α.	Χώρες Χαμηλού Εισοδήματος	Χώρες Μεσαίου Εισοδήματος	Χώρες Υψηλού Εισοδήματος
Οργανικά Συστατικά			
Τροφικά Υπολείμματα	40-85	20-65	6-30
Χαρτί - Χαρτόνι	1-10	8-30	20-45
Πλαστικά	1-5	2-6	2-8
Υφάσματα	1-5	2-10	2-6
Λάστιχα - Δέρματα	1-5	1-4	0-2
Απορρίμματα Κήπων	1-5	1-10	10-20
Ξύλα	1-5	1-10	1-4
Ανόργανα Συστατικά			
Γυαλί	1-10	1-10	4-12
Κουτιά Κασσιτέρου Αλουμίνιο	1-5	1-5	2-8
Άλλα Μέταλλα			0-1
			1-4
Αδρανή (χώμα, τέφρα, κλπ)	1-40	1-30	0-10

Όπως ήδη αναφέρθηκε, αναπτύσσονται πιέσεις για μείωση των ΑΣΑ, γεγονός το οποίο σημαίνει μελλοντικές τροποποιήσεις στην σύνθεση. Οι προβλέψεις δεν είναι εύκολες. Γενικά, μπορεί να ισχυριστεί κανείς ότι, αντιγράφοντας τα καταναλωτικά ήθη των «αναπτυγμένων» χωρών, οι αναπτυσσόμενες χώρες θα παρουσιάζουν, στα

επόμενα χρόνια, αύξηση του ποσοστού χαρτιού και ανάλογη μείωση του ποσοστού ζυμώσιμων.

1.3.3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Προκειμένου να διερευνηθούν και να αξιολογηθούν οι δυνατότητες εναλλακτικών μορφών επεξεργασίας και διάθεσης των ΑΣΑ, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν ορισμένα φυσικά χαρακτηριστικά τους, όπως: πυκνότητα, ειδικό βάρος, υγρασία, μέγεθος τεμαχίων, υδροαπορροφητικότητα και υδραυλική αγωγιμότητα.

Πυκνότητα και Ειδικό Βάρος

Ως πυκνότητα ενός υλικού ορίζεται η μάζα του υλικού ανά μονάδα όγκου, ενώ ως ειδικό βάρος, ρ , ενός υλικού ορίζεται το βάρος του υλικού ανά μονάδα όγκου. Συχνά γίνεται αναφορά στην πυκνότητα με μονάδες ειδικού βάρους (π.χ. τόνοι ανά κυβικό μέτρο). Οι τιμές του ειδικού βάρους είναι απαραίτητες για τις αντιστοιχίες βάρους και όγκου, καθώς οι μετρήσεις βάρους είναι πιο εύκολες από τις μετρήσεις όγκου.

Το ειδικό βάρος (ΕΒ) ρ των ΑΣΑ διαφοροποιείται ανάλογα με την φάση της διαδικασίας διαχείρισης. Όταν είναι ασύμφορη η άμεση εκτίμηση των πραγματικών τιμών στο πεδίο, ο μελετητής στηρίζεται στη βιβλιογραφία. Στον Πίνακα 1.5 δίνονται διακυμάνσεις τιμών του ρ . Ο μελετητής θα πρέπει, λαμβάνοντας υπόψη του και άλλους παράγοντες, να επιλέξει, για κάθε περίπτωση, μια συγκεκριμένη τιμή. Υπογραμμίζεται και πάλι ότι στη βιβλιογραφία παρατηρούνται έντονες διαφοροποιήσεις. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα στοιχεία προκύπτουν από διαφορετικές έρευνες πεδίου, σε διαφορετικού είδους ΑΣΑ, από διαφορετικούς αναλυτές, και με διαφορετικές διαδικασίες δειγματοληψίας και ανάλυσης. Είναι και αυτό μία ένδειξη του πόσο νέα είναι η επιστημονική αυτή περιοχή της διαχείρισης ΑΣΑ. Όπως ήδη αναφέρθηκε, καθώς τα ΑΣΑ διατρέχουν τις διαδοχικές φάσεις της διαχείρισής τους, μεταβάλλεται και η πυκνότητά τους.

Αν οριστεί ως:

- ρ_χ το ΕΒ όταν τα ΑΣΑ βρίσκονται σε χαλαρή κατάσταση,
- ρ_μ το ΕΒ κατά τη μεταφορά,
- ρ_τ το τελικό ΕΒ των ΑΣΑ στο ΧΥΤΑ, μετά τη συμπίεση και
- r ο βαθμός συμπίεσης των ΑΣΑ,

τότε με πλαίσιο αναφοράς την πυκνότητα στους κάδους, είναι εφικτή η αναφορά είτε στο συνολικό βαθμό συμπίεσης $\gamma = \rho_{\tau} / \rho_{\chi}$, ή στο βαθμό συμπίεσης στα απορριμματοφόρα (Α/Φ) που είναι $\gamma (Α/Φ) = \rho_{\mu} / \rho_{\chi}$. Οι τιμές του γ κυμαίνονται περίπου από 2 έως 8.

Πίνακας 1.5: Ειδικό βάρος αστικών στερεών αποβλήτων [Παναγιωτακόπουλος, 2002].

Κατάσταση ΑΣΑ	Ειδικό βάρος, ρ (kg/m ³)	
	Διακύμανση Τιμών	Τυπική Τιμή
Οικιακά		
▪ Σε χαλαρή κατάσταση, χωρίς επεξεργασία	60 - 200	130
▪ Μέσα στο Απορριμματοφόρο (Α/Φ), συμπίεσμένα	180-450	300
▪ Μετά την Εκκένωση τους από το Α/Φ, όπου είχαν συμπεσθεί	120-250	180
Εμπορικά / Βιομηχανικά	175-350	250
Αστικά Στερεά Απόβλητα (οικιακά, εμπορικά, κτλ)		
▪ Στο Α/Φ, με συμπίεση	180-450	300
▪ Στο ΧΥΤΑ, με απλή συμπίεση	300 - 500	450
▪ Στο ΧΥΤΑ, με καλή συμπίεση	400-750	600
▪ Στο ΧΥΤΑ, με πολύ καλή συμπίεση	600-1200	800
Κατασκευών / Κατεδαφίσεων (αδρανή)	1000-1800	1500

Όταν τα εξεταζόμενα ΑΣΑ έχουν διαφορετική σύνθεση από αυτήν που αντιστοιχεί στα βιβλιογραφικά δεδομένα ή όταν ο μελετητής επιθυμεί να εκτιμήσει την πυκνότητα με μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτήν που του επιτρέπει ο Πίνακας 1.5, τότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές ΕΒ του κάθε συστατικού υλικού των ΑΣΑ, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια στον Πίνακα 1.6.

Πίνακας 1.6: Ειδικό βάρος συστατικών υλικών των ΑΣΑ (όπως αυτά απορρίπτονται).

Συστατικό Υλικό	Ειδικό Βάρος "στον κάδο" (Kg/m ³)		"Μέγιστος" Βαθμός Συμπίεσης
	Διακύμανση Τιμών	Τυπική Τιμή	
<u>Οργανικά</u>			
Τροφικά	130-490	250	3
Χαρτί	35-140	90	6.5
Χαρτόνι	40- 80	50	6.5
Πλαστικά	40-130	60	10
Υφάσματα	35-100	60	7
Λάστιχα	80-200	130	3.5
Δέρματα	100 -260	150	3.5
Άλλα Οργανικά	100-350	150	3
<u>Ανόργανα</u>			
Γυαλί	150-500	200	2.5
Μη σιδηρούχα	50-240	160	6.7
Σιδηρούχα	150-1200	350	3.3
Άλλα Αδρανή (τέφρα, χώμα κτλ.)	320-960	480	1.3

Υγρασία

Η υγρασία είναι ένα χαρακτηριστικό κατ' εξοχή καθοριστικό για την καταλληλότητα των ΑΣΑ για καύση και παραγωγή ατμού ή/και ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το νερό πρέπει να εξατμιστεί πριν προχωρήσει η θερμική επεξεργασία. Είναι επίσης σημαντικό χαρακτηριστικό για την κομποστοποίηση και για τη συμπεριφορά των ΑΣΑ υπό τις αναερόβιες συνθήκες ενός ΧΥΤΑ.

Για την μέτρηση της υγρασίας των ΑΣΑ, μετράται αρχικά στο δείγμα το «υγρό βάρος» του (S_w) και στη συνέχεια τοποθετείται το δείγμα σε κλίβανο με θερμοκρασία 105°C μέχρι σταθερού βάρους, κατόπιν υπολογίζεται το ξηρό βάρος του (S_d). Το επί τοις εκατό ποσοστό υγρασίας, Y , ορίζεται ως:

$$Y_w = [(S_w - S_d) / S_w] \cdot 100 \quad (1-1)$$

ή

$$Y_d = [(S_w - S_d) / S_d] \cdot 100 \quad (1-2)$$

Δηλαδή, είτε ως % επί του «υγρού» βάρους (το συνηθέστερο, δεδομένου ότι η κατάσταση εκκίνησης είναι η κατάσταση των ΑΣΑ στον κάδο, με την υγρασία τους), ή ως % επί του "ξηρού" βάρους. Στον Πίνακα 1.7 δίνονται ενδεικτικές τιμές υγρασίας των διαφόρων συστατικών υλικών των ΑΣΑ. Γνωρίζοντας την υγρασία του κάθε συστατικού υλικού και τη ποσοστιαία σύνθεση των ΑΣΑ, μπορούμε να εκτιμήσουμε τη συνολική υγρασία των ΑΣΑ. Η υγρασία επηρεάζεται από (και ποικίλει ανάλογα με) την εποχή του έτους, τη σύνθεση των ΑΣΑ, τις καιρικές συνθήκες (π.χ. υγρασία ατμόσφαιρας), κ.τ.λ.

Σημειώνεται ότι οι τιμές του Πίνακα 1.7 προέρχονται κατά βάση από στοιχεία των ΗΠΑ. Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενδεικτικά και για τα ΑΣΑ της χώρας μας, αλλά μόνον για το κάθε συστατικό χωριστά. Στη χώρα μας, αν και τα στοιχεία συνεχίζουν να είναι σποραδικά, έχουν παρατηρηθεί μεγαλύτερες τιμές υγρασίας, μέχρι και 50 % "υγρού" βάρους.

Πίνακας 1.7: Ποσοστά υγρασίας στα ΑΣΑ [Παναγιωτακόπουλος, 2007].

Συστατικό Υλικό	Ποσοστό Υγρασίας (% «υγρού» βάρους)	
	Διακύμανση Τιμών	Τυπική Τιμή
<u>Οργανικά</u>		
Τροφικά Υπολείμματα	50 -80	70
Χαρτί	4 -10	6
Χαρτόνι	4 -8	5
Πλαστικά	1 -4	2
Υφάσματα	6 -12	10
Λάστιχα	1 -4	2
Δέρματα	8 -12	10
<u>Ανόργανα</u>		
Γυαλί	1 -4	2
Μη σιδηρούχα Μέταλλα	2 -4	2.5
Σιδηρούχα Μέταλλα	2 -6	3
Αδρανή (τέφρα, χώμα κτλ.)	6 -12	7
Απορρίμματα Κήπων	30 -80	60
<u>Αστικά Στερεά Απόβλητα</u>		
σε Α/Φ	15 - 40 (τιμές ΗΠΑ)	20 (τιμές ΗΠΑ)
σε ΧΥΤΑ	15 - 40 (τιμές ΗΠΑ)	25 (τιμές ΗΠΑ)
<u>Εμπορικά Απορρίμματα</u>		
	10-80	20

Υδροαπορροφητικότητα

Η υδροαπορροφητικότητα (field capacity) των ΑΣΑ (που αναφέρεται επίσης ως υδατοϊκανότητα και υδροχωρητικότητα) ορίζεται ως η μέγιστη υγρασία (% επί του ξηρού βάρους) που μπορεί να συγκρατηθεί απ' αυτά σε κανονικές συνθήκες πεδίου βαρύτητας (δηλαδή, υπό την επήρεια μόνο της βαρύτητας). Από το φυσικό αυτό χαρακτηριστικό εξαρτάται η δημιουργία στραγγισμάτων (ή διασταλλαγμάτων) στον χώρο υγειονομικής ταφής αποβλήτων (ΧΥΤΑ), καθώς διασταλλάγματα δημιουργούνται μόνον εφόσον η υγρασία υπερβεί την υδροαπορροφητικότητα.

Η έννοια μιας συγκεκριμένης τιμής Α % για την υδροαπορροφητικότητα είναι ότι, εφόσον το % περιεχόμενο υγρασίας των ΑΣΑ (επί του ξηρού βάρους) δεν υπερβεί το Α %, δεν θα υπάρξει στράγγισμα (δηλαδή, ροή υγρού), λόγω βαρύτητας. Η υδροαπορροφητικότητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, κύριοι εκ των οποίων είναι:

- Η σύνθεση των ΑΣΑ.
- Ο βαθμός συμπίεσης.
- Η έκταση ή ο βαθμός στον οποίο έχει προχωρήσει η βιοαποικοδόμηση των οργανικών συστατικών.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες τιμές για την υδροαπορροφητικότητα των ΑΣΑ στις διάφορες φάσεις της διαχείρισής τους. Για τα μη συμπιεσμένα ΑΣΑ αναφέρονται τιμές από 50 έως 60 %, όταν για τα συνήθη εδάφη οι τιμές κυμαίνονται από 5 έως 35 %.

Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός υλικού (π.χ. του εδάφους ή των αποβλήτων) αποτελεί ένα μέτρο της ταχύτητας με την οποία το νερό διαπερνάει το υλικό. Για κάθε συγκεκριμένο υλικό, η υδραυλική αγωγιμότητα μετριέται στο εργαστήριο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πιεζομετρικού ύψους. Οι μονάδες μέτρησης είναι μήκος ανά μονάδα χρόνου (δηλαδή, μονάδες ταχύτητας). Η υδραυλική αγωγιμότητα K των ΑΣΑ σχετίζεται με τη διαπερατότητα των ΑΣΑ ως εξής:

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (1.3)$$

όπου:

K = η υδραυλική αγωγιμότητα (m/sec)

k = η ειδική διαπερατότητα ή απλώς διαπερατότητα του υλικού (m^2)

ρ = η πυκνότητα του νερού (kg/m^3)

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/sec^2)

μ = το δυναμικό ιξώδες του νερού ($kg / [m \cdot sec]$).

Η ειδική διαπερατότητα k εξαρτάται από χαρακτηριστικά του υλικού, όπως το πορώδες, την κοκκομετρία, την πολυπλοκότητα των πόρων του, την ειδική επιφάνεια, κ.τ.λ. Για ΑΣΑ συμπιεσμένα στο ΧΥΤΑ, οι τιμές του k κυμαίνονται από 10^{-12} έως $10^{-11} m^2$ στην κάθετη κατεύθυνση και περίπου $10^{-10} m^2$ στην οριζόντια κατεύθυνση.

Μέγεθος και Κατανομή Μεγέθους Τεμαχίων

Η αποτελεσματικότητα των επεξεργασιών εκείνων που σχετίζονται με την καύση, τη συμπίεση, την κομποστοποίηση, κυρίως όμως με τη μηχανική διαλογή και την ανάκτηση υλικών, επηρεάζεται, εκτός άλλων παραγόντων και από την κοκκομετρία των ΑΣΑ (μέγεθος των τεμαχίων των ΑΣΑ). Για το μέγεθος ενός τεμαχίου χρησιμοποιούνται διάφορα μέτρα, όπως: Το μήκος L (μεγαλύτερη διάσταση) του τεμαχίου, η μέση τιμή μήκους L και πλάτους W του τεμαχίου ($[L+W]/2$), η τιμή $(L \cdot W) / 2$, κ.τ.λ. Το μέγεθος των τεμαχίων και η κατανομή τους

μπορούν επίσης να προσδιοριστούν από τη δυνατότητα των τεμαχίων να περάσουν από κόσκινα με συγκεκριμένων διαστάσεων ανοίγματα. Από σποραδικά στοιχεία που έχουν συλλεχθεί, υποδεικνύεται με επιφύλαξη η παρακάτω κατανομή και ταξινόμηση ανά μέγεθος υλικών για τα ΑΣΑ στη χώρα μας (Πίνακας 1.8).

Πίνακας 1.8: Κατανομή και ταξινόμηση υλικών των ΑΣΑ [Παναγιωτακόπουλος, 2007].

Κατηγορία	Διακύμανση Μεγέθους	Διακύμανση Ποσοστού (%)
I	0- 40 mm	12-35
II	40-120 mm	35-43
III	> 120 mm	30-40

1.3.3.2 Χημικά χαρακτηριστικά

Όπως οι φυσικές, έτσι και οι χημικές ιδιότητες των ΑΣΑ και τα χημικά χαρακτηριστικά τους έχουν σημασία για την ανάλυση και αξιολόγηση εναλλακτικών μορφών επεξεργασίας. Για παράδειγμα, η καύση και η κομποστοποίηση εξαρτώνται από τις χημικές ιδιότητες και την χημική σύνθεση των ΑΣΑ. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να διατυπωθούν τα χημικά χαρακτηριστικά των ΑΣΑ, όπως π.χ. η αναγνώριση διαφόρων γενικών ομάδων χημικών ενώσεων και η εκτίμηση των ποσοστών τους στην σύνθεση των ΑΣΑ, η στοιχειακή ανάλυση, η ανάλυση που αφορά στα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την καταλληλότητα των ΑΣΑ ως καύσιμο και η εκτίμηση της θερμογόνου δύναμης ή του ενεργειακού περιεχομένου των ΑΣΑ.

Ομαδοποίηση Χημικών Ενώσεων

Οι κύριες ομάδες, που συνήθως αναφέρονται, είναι οι εξής:

- Λιπίδια (λίπη, έλαια, κλπ), με χαμηλή διαλυτότητα στο νερό και υψηλή θερμογόνο δύναμη (γύρω στα 40.000 kJ/kg).
- Υδατάνθρακες (σάκχαρα, άμυλο, κλπ), με μεγάλη διαλυτότητα στο νερό και υψηλό ρυθμό βιοαποδόμησης.
- Φυσικές και τεχνητές ίνες (crude fibers), όπως τα υφάσματα και τα δέρματα.
- Πρωτεΐνες.
- Συνθετικά οργανικά υλικά, που είναι κατά βάση τα πλαστικά, που βιοαποδομούνται δύσκολα και έχουν υψηλή θερμογόνο δύναμη (~53.000 kJ/kg).
- Ανόργανα υλικά, όπως γυαλιά, μέταλλα, κεραμικά, χώμα, και τέφρα.

Ανάλυση Καταλληλότητας για Καύση (Proximate Analysis)

Αναφέρεται στον προσδιορισμό τεσσάρων χαρακτηριστικών που είναι καθοριστικά για την καταλληλότητα των ΑΣΑ ως καύσιμο:

- **Υγρασία**

Προσθέτει βάρος στα ΑΣΑ, αλλά μειώνει τη θερμογόνο δύναμη.

- **Τέφρα:**

Είναι το υπόλειμμα της καύσης (στους 575°C) ή τα υλικά στα ΑΣΑ που δεν καίγονται. Όπως και η υγρασία, προσθέτει βάρος στα ΑΣΑ, αλλά μειώνει τη θερμογόνο δύναμη.

- **Πτητική Καύσιμη Ύλη (volatile matter):**

Είναι το % κατά βάρος των ΑΣΑ που μετατρέπεται σε αέρια όταν η θερμοκρασία αυξηθεί μέχρι τους 950°C.

- **Μη Πτητικός Άνθρακας (fixed carbon):**

Είναι η μη πτητική οργανική ύλη (άνθρακας), που απομένει μέσα στον κλίβανο μετά την καύση (στους 950°C). Είναι και αυτή καύσιμη ύλη, αλλά σε πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες (π.χ. σε 1200°C).

Ενδεικτικές τιμές των παραπάνω χαρακτηριστικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.9:

Πίνακας 1.9: Ανάλυση καταλληλότητας ΑΣΑ για Καύση (όπως απορρίπτονται)
[Παναγιωτακόπουλος, 2007].

Χαρακτηριστικό	Διακύμανση Τιμών % "ξηρού" βάρους	Τυπική Τιμή % "ξηρού"
Υγρασία	10-65	37,5
Πτητικά	30-60	50,0
Μη Πτητικός Άνθρακας	5-15	8,0
Τέφρα	10-30	20,0

Στοιχειακή Ανάλυση

Με τον όρο αυτό εννοείται ο προσδιορισμός του ποσοστού καθενός από τα χημικά στοιχεία που υπάρχουν σε μια ουσία – εν προκειμένω, στα συστατικά των ΑΣΑ. Τα πέντε κύρια στοιχεία που αφορούν στα ΑΣΑ είναι ο άνθρακας (C), το οξυγόνο (O), το υδρογόνο (H), το άζωτο (N), το θείο (S) και η τέφρα. Με βάση τα ποσοστά αυτά, χαρακτηρίζεται η χημική σύνθεση της οργανικής ύλης στα ΑΣΑ και εκτιμάται η τιμή του λόγου C/N, που επηρεάζει τις βιολογικές διεργασίες στα ΑΣΑ.

Στον Πίνακα 1.10 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές των ποσοστών των χημικών στοιχείων στα συστατικά υλικά των ΑΣΑ.

Πίνακας 1.10: Στοιχειακή ανάλυση των συστατικών των ΑΣΑ [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

	Ποσοστό Χημικού Στοιχείου (κατά "ξηρό" βάρος)					
	C	H	O	N	S	Τέφρα
<u>Οργανικά Υλικά</u>						
Τροφικά	50	6	38	3	0.4	2.6
Χαρτί	44	6	44	0.3	0.2	5.5
Χαρτόνι	44	6	44	0.3	0.2	5.5
Πλαστικά	60	7	23	-	-	10
Υφάσματα	56	7	30	5	0.2	1.8
Λάστιχα	76	10	-	2	-	12
Δέρματα	60	9	12	10	0.4	8.6
Απορρίμματα Κήπων	48	6	38	3	0.3	4.7
Ξύλα	50	6	43	0.2	0.1	0.7
<u>Ανόργανα Υλικά</u>						
Γυαλί	0.5	0.1	0.4	<0.1	-	98.9
Μέταλλα	4.5	0.6	4.3	<0.1	-	90.5
Άλλα Αδρανή (τέφρα, χώμα, κτλ.)	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0

Ο άνθρακας, το οξυγόνο και το υδρογόνο περιέχονται με το μεγαλύτερο ποσοστό σε όλα τα συστατικά. Η τέφρα (τελευταία στήλη) περιέχει τα υπολείμματα της καύσης. Το ποσοστό της τέφρας είναι ελάχιστο για τα οργανικά υλικά, σχεδόν μηδενικό και πολύ μεγάλο για τα ανόργανα υλικά. Αν τα ανόργανα υλικά αποσυρθούν από τα ΑΣΑ πριν από την καύση, τότε το ποσοστό της τέφρας περιορίζεται περίπου στο 10 % της ποσότητας που θα προέκυπτε χωρίς την απόσυρση.

Για τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης (σε ξηρή βάση) ενός τύπου ΑΣΑ, π.χ. της τυπικής σύνθεσης του Πίνακα 1.5 για μεγάλους ΟΤΑ, ακολουθείται η κάτωθι διαδικασία:

1. Θεωρείται δείγμα 100 kg
2. Για κάθε συστατικό των ΑΣΑ, υπολογίζεται το αντίστοιχο βάρος, με βάση τα ποσοστά του Πίνακα 1.5
3. Για κάθε συστατικό των ΑΣΑ, υπολογίζεται το ξηρό βάρος (αφαιρείται δηλαδή το % υγρασίας, χρησιμοποιώντας τις τιμές του Πίνακα 1.9).
4. Με βάση τα ποσοστά (Πίνακας 1.10), και για κάθε συστατικό των ΑΣΑ, υπολογίζεται το επί μέρους βάρος κάθε χημικού στοιχείου στο συνολικό βάρος.

5. Η συνολική ποσότητα ενός χημικού στοιχείου στο δείγμα των ΑΣΑ, είναι το άθροισμα των ποσοτήτων του στοιχείου αυτού σε όλα τα συστατικά των ΑΣΑ.

Θερμογόνος Δύναμη

Η θερμογόνος δύναμη του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ είναι η θερμότητα (θερμική ενέργεια) που εκλύεται όταν αυτό καίγεται πλήρως. Ένα ποσοστό της μάζας του υλικού παραμένει ως αδρανές υπόλειμμα (τέφρα).

Η ανώτερη θερμογόνος δύναμη (Α.Θ.Δ.) ορίζεται ως το ποσό της θερμότητας που παράγεται μέσω πλήρους καύσης σε θερμιδόμετρο μιας ποσότητας δείγματος σε ατμόσφαιρα οξυγόνου, υποθέτοντας ότι τόσο το νερό που περιέχονταν στο δείγμα, όσο και αυτό που παράχθηκε από το υδρογόνο, παραμένει σε υγρή μορφή.

Αν θεωρηθεί ότι το νερό των προϊόντων παραμένει σε μορφή ατμών υπολογίζεται η κατώτερη θερμογόνος δύναμη (Κ.Θ.Δ.).

Με βάση την ανώτερη θερμογόνο δύναμη επί ξηρού, το ποσοστό υγρασίας επί του φυσικού δείγματος W_{Φ} και το ποσοστό τέφρας επί του φυσικού δείγματος A_{Φ} , δύναται να υπολογιστούν οι εξής παράμετροι:

- Ανώτερη θερμογόνος δύναμη επί του φυσικού δείγματος (Α.Θ.Δ.) $_{\Phi}$

$$(A.Θ.Δ.)_{\Phi} = (A.Θ.Δ.)_{\xi} \cdot (1 - W_{\Phi})$$
- Κατώτερη θερμογόνος δύναμη επί του φυσικού δείγματος (Κ.Θ.Δ.) $_{\Phi}$

$$(K.Θ.Δ.)_{\Phi} = (A.Θ.Δ.)_{\Phi} - A'$$

όπου: $A' = [9Y + W_{\Phi}] \times 2.509$ με μονάδες [kJ/kg]

Y: % κ.β. περιεκτικότητα του δείγματος σε H_2 (στοιχειακή ανάλυση)

2.509: θερμότητα εξαέρωσης του νερού σε ατμοσφαιρική πίεση [kJ/kg].

Ενδεικτικές τιμές της θερμογόνου δύναμης συστατικών των ΑΣΑ δίνονται στον Πίνακα 1.11. Οι τιμές αναφέρονται σε ΑΣΑ «στον κάδο», όπως απορρίπτονται, σε «υγρή» κατάσταση.

Πίνακας 1.11: Χαρακτηριστικά θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ: Αδρανή υπολείμματα και θερμογόνος δύναμη («Υγρό» ΑΣΑ, «στον κάδο») ¹ [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Συστατικό ΑΣΑ	Αδρανή Υπολείμματα (%)		Θερμογόνος Δύναμη (kJ/ kg)	
	Διακύμανση	Τυπική Τιμή	Διακύμανση	Τυπική Τιμή
<u>Οργανικά Υλικά</u>				
Τροφικά	1-7	6 ^β	3000-6000	5000
Χαρτί	3-8	6	12000-19000	17000
Χαρτόνι	3-8	6	12000-19000	17000
Πλαστικά	5-20	10	30000-37000	33000
Υφάσματα	2-4	2.5	15000-19000	17000
Λάστιχα	5-20	10	20000-28000	23000
Δέρματα	8-20	10	15000-20000	17000
Απορρίμματα	2-6	4.5	2000-19000	7000
Ξύλα	0.5-2	1.5	17000-20000	19000
<u>Ανόργανα Υλικά</u>				
Γυαλιά	96-99	98	100-250	150
Μη Σιδηρούχα	90-99	96	-	-
Άλλα Μέταλλα	95-99	98	250-1200	700
Άλλα Αδρανή	60-80	70	2000-11600	7000

Οι μετρήσεις για τη θερμογόνο δύναμη των ΑΣΑ στη χώρα μας είναι περιορισμένες και οι τιμές που αναφέρονται δεν είναι πάντα αξιόπιστες. Έχουν αναφερθεί τιμές που κυμαίνονται από 1.000 έως 2.500 kcal/ kg, ή περίπου από 4.200 μέχρι 10.000 kJ/kg. (Η θερμογόνος δύναμη του πετρελαίου ντήζελ είναι 10.000-11.000 kcal/ kg).

Σημειώνεται ότι τα ανάλογα στοιχεία (Πίνακας 1.9, Πίνακας 1.10 και Πίνακας 1.11) έχουν προκύψει κυρίως από αναλύσεις στη Β. Αμερική. Τα σχετικά στοιχεία για τη χώρα μας είναι μέχρι σήμερα άκρως περιορισμένα και δεν μπορεί να διαμορφωθεί στατιστικά αξιόπιστη «τυπική» εικόνα.

Προσδιορισμός βαρέων μετάλλων

Ο προσδιορισμός των βαρέων μετάλλων γίνεται με τις παρακάτω μεθόδους φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης.

• **ICP – AES** (*Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry*).

Ικανή για τον προσδιορισμό υψηλών επιπέδων ή ιχνών των παρακάτω στοιχείων: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sn, Ti, Tl, V και Zn.

¹ Οι τιμές του υπολείμματος διαφοροποιούνται από αυτές του Πίνακα 1.13 διότι αναφέρονται σε «υγρό» βάρος.

- **FAAS** (*Flame Atomic Absorption Spectroscopy*).

Για τον προσδιορισμό υψηλών επιπέδων ή ιχνών των παρακάτω στοιχείων: Ag, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, V και Zn.

- **ET – AAS** (*Electrothermal Flame Atomic Absorption Spectroscopy*).

Για τον προσδιορισμό ιχνοσυγκεντρώσεων των παρακάτω στοιχείων: Ag, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Tl. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους η ET-AAS δείχνει ανοχή στις υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων.

- **HG – AAS** (*Hydride Generation Flame Atomic Absorption Spectroscopy*).

Για τον προσδιορισμό ιχνοσυγκεντρώσεων των παρακάτω στοιχείων: As, Ge, Sb, Se, Sn.

- **CV – AAS** (*Cold Vapour Generation Flame Atomic Absorption Spectroscopy*).

Για τον προσδιορισμό του Hg.

- **ICP – MS** (*Inductively coupled plasma mass spectrometry*).

Χρησιμοποιείται για την πλειοψηφία των μετάλλων εφόσον το διάλυμα περιέχει λιγότερο από 0,5% διαλυμένα άλατα. Βέβαια, η μεγάλη ευαισθησία της μεθόδου επιτρέπει την αραίωση του δείγματος ώστε να ξεπεραστεί ο περιορισμός αυτός.

Ο προσδιορισμός όμως των βαρέων μετάλλων μέσω των παραπάνω μεθόδων απαιτεί τη μεταφορά των μετάλλων από τη στερεή φάση (στερεά απορρίμματα) στην υγρή (υγρό διάλυμα). Μέθοδοι διαλυτοποίησης ή χώνευσης (digestion) των στερεών δειγμάτων των απορριμμάτων περιλαμβάνουν μεθόδους υγρής χώνευσης με την χρήση διάφορων συνδυασμών οξέων όπως: $\text{HNO}_3^+ \text{HClO}_4$, $\text{HNO}_3^+ \text{HCl}$, $\text{HNO}_3^+ \text{HClO}_4^+ \text{HF}$, $\text{HNO}_3^+ \text{HCl}^+ \text{HF}$ [20, 21], $\text{HNO}_3^+ \text{HF}$.

Επίσης, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται η μέθοδος με συστήματα μικροκυμάτων. Οι παραπάνω μέθοδοι διαφέρουν μόνο ως προς την επιλογή του αντιδραστηρίου. Οι εφαρμογές της φασματοσκοπίας ατομικής απορρόφησης (AAS) περιλαμβάνουν:

- Βιολογικά, ιατρικά και κλινικά δείγματα (αίμα και άλλα σωματικά υγρά, ιστός, μαλλιά, δόντια, νύχια).
- Περιβαλλοντικά δείγματα (νερά, στερεά, ιζήματα).
- Μεταλλοβιομηχανίες.
- Φαρμακοβιομηχανία.

- Βιομηχανία τροφών.
- Βιομηχανική υγιεινή.
- Μελέτες ρύπανσης.

Οι συνηθέστερες πηγές των κυριότερων βαρέων μετάλλων (Pb, Cd, Hg) στα ΑΣΑ είναι:

- **Pb:** Πλαστικά, είδη αλιείας, οθόνες CRT, κεραμικά, κολλήσεις κ.α.
- **Cd:** Λόγω περιορισμού της χρήσης Cd συναντάται κυρίως σε απορριπτόμενες ποσότητες μπαταριών Ni/Cd, σε πιγμένα και σταθεροποιητές σε πλαστικά που κατασκευάζονταν μέχρι 1-2 δεκαετίες πριν και άλλα αγαθά όπως τα πλαίσια PVC των παραθύρων.
- **Hg:** οδοντιατρικά αμαλγάματα, συσκευές όπως θερμόμετρα, μπαταρίες, λυχνίες τηλεόρασης και λάμπες.

Οι τιμές βαρέων μετάλλων στα ΑΣΑ που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία δείχνουν ένα σχετικά μεγάλο εύρος που μπορεί να δικαιολογηθεί από διαφοροποιήσεις σε τοπικές συνήθειες και χαρακτηριστικά παραγωγής και κατανάλωσης. Για παράδειγμα στον Πίνακα 1.12 φαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές βαρέων μετάλλων (Pb, Cd, Hg) σε ΑΣΑ στην Ελλάδα και το εξωτερικό.

Πίνακας 1.12: Τιμές βαρέων μετάλλων σε ΑΣΑ σε Ελλάδα και εξωτερικό [Παναγιωτακόπουλος, 2007].

	Χανιά 1991		Καλαμάτα 1992		Ηνωμένο Βασίλειο 1994
	Z (Ξ)	K (Ξ)	Z (Ξ)	K (Ξ)	Ολικές τιμές
Pb, ppm	21,4	16,8	19,2	14,6	33 - 247
Cd, ppm	0,6	1,5	0,6	1,2	0,4 - 1,9
Hg, ppm	-	-	-	-	0,02 - 0,12

Ξ: ξηρό κλάσμα, Z: ανάλυση με προσανατολισμό τη βιοσταθερότητα, K: ανάλυση με προσανατολισμό την καύση

1.3.3.3 Βιολογικά χαρακτηριστικά

Υπάρχουν ορισμένα χαρακτηριστικά ή ιδιότητες των ΑΣΑ, αναφερόμενα ως βιολογικά, τα οποία επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα εκείνων των μορφών επεξεργασίας, οι οποίες συνεπάγονται βιοαποικοδόμηση (ή βιοδιάσπαση ή βιοσταθεροποίηση) της οργανικής ύλης των ΑΣΑ. Τα χαρακτηριστικά

αυτά αναφέρονται στη βιοαποδομησιμότητα, στις παραγόμενες οσμές και στην ανάπτυξη μικροοργανισμών και εντόμων.

Βιοαποδομησιμότητα

Στους Πίνακες 1.2 και 1.4 τα ΑΣΑ διαχωρίζονται σε **οργανικά** και **ανόργανα** συστατικά (σε οργανικό και ανόργανο κλάσμα). Το βασικότερο βιολογικό χαρακτηριστικό των ΑΣΑ είναι ότι το οργανικό κλάσμα τους είναι βιοαποδομήσιμο. Αυτό σημαίνει ότι το κλάσμα αυτό μπορεί να μετατραπεί με βιολογικές διεργασίες (κυρίως δια μέσου μικροβιακών διεργασιών) σε αέρια και σε σχετικώς αδρανή οργανικά και ανόργανα στερεά. Η βιολογική αυτή διαδικασία μπορεί να λάβει χώρα:

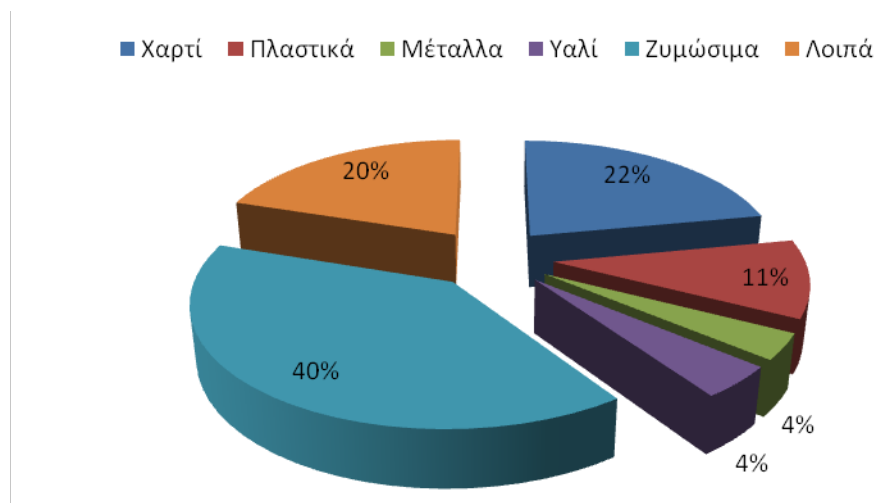
- Είτε σε αναερόβιες (απουσία οξυγόνου) συνθήκες, οπότε παράγονται CO_2 CH_4 , οσμές και αναπτύσσονται μικροοργανισμοί και έντομα.
- Ή σε αερόβιες (παρουσία οξυγόνου) συνθήκες, οπότε παράγεται ένα άοσμο, σταθεροποιημένο στερεό υλικό («compost») πλούσιο σε οργανική ύλη, υδατάνθρακες και πρωτεΐνες.

Τα διάφορα οργανικά υλικά βιοαποδομούνται με διαφορετικό ρυθμό (έχουν διαφορετικό δείκτη βιοαποδομησιμότητας), ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί εμπειρικά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των τροφικών υπολειμμάτων είναι διπλάσιο του βιοαποδομήσιμου κλάσματος του χαρτονιού και τετραπλάσιο του χαρτιού εφημερίδας. Γενικά, τα οργανικά συστατικά των ΑΣΑ διαχωρίζονται σε βραδέως και ταχέως βιοαποδομήσιμα. Ορισμένα οργανικά, όπως πλαστικά, ελαστικά και δέρματα, βιοαποδομούνται με τόσο βραδύ ρυθμό ώστε σε πρακτικό επίπεδο να χαρακτηρίζονται ως μη βιοαποδομήσιμα.

Παραγωγή Οσμών: Η παραγωγή οσμών είναι αποτέλεσμα αναερόβιων διεργασιών στους χώρους συσσώρευσης των ΑΣΑ (κάδους, σταθμούς μεταφόρτωσης, χώρους εδαφικής διάθεσης, κ.τ.λ.) και βεβαίως ευνοείται σε ψηλές θερμοκρασίες. Σε τέτοιο περιβάλλον ευνοείται ο σχηματισμός υδρόθειου και μερκαπτανών από οργανικές ουσίες που περιέχουν θείο.

Ανάπτυξη Εντόμων: Η κοινή μύγα αναπτύσσεται σε 9 με 11 μέρες από τη στιγμή παραγωγής των αυγών, γεγονός που υποδεικνύει όρια στο χρόνο μεταξύ αποκομιδής των ΑΣΑ. Η υφιστάμενη μέση ποιοτική σύσταση των παραγόμενων αστικών

αποβλήτων δίνεται στη συνέχεια (Διάγραμμα 1.6), 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. Στα συνολικά παραγόμενα οικιακά απόβλητα τα απορριπτόμενα υλικά συσκευασίας αποτελούν περίπου το 20% κατά βάρος.



Διάγραμμα 1.6: Μέση ποιοτική σύσταση των αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα (2007) [ΕΚΠΑΑ, 2010].

1.3.3.4 Ειδικά απόβλητα

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 κ.λ.π.). Το ποσοστό των αποβλήτων αυτών περιλαμβάνεται στο ποσοστό των «λοιπών» στο παραπάνω διάγραμμα (Διάγραμμα 1.6). Στον Πίνακα 1.14, που ακολουθεί, παρέχονται οι ποσότητες των παραγόμενων ειδικών επικίνδυνων αποβλήτων ανά κατηγορία πληθυσμού.

Πίνακας 1.14: Παραγωγή ειδικών επικίνδυνων αποβλήτων ανά κατηγορία πληθυσμού [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Είδος πληθυσμού	Ποσότητα tn/έτος	%
Αστικός	2.417	53,4
Ημιαστικός	661	14,6
Αγροτικός	1.447	32,0
ΣΥΝΟΛΟ	4.525	100

1.4 Μελέτες σύστασης ΑΣΑ

1.4.1 Ελλαδικός χώρος

Η αποτύπωση της υφιστάμενης διαχείρισης στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα, εστιάζεται σε θέματα διαχείρισης ΑΣΑ. Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται δεδομένα, για το σύνολο της χώρας, που αφορούν:

- Στις παραγόμενες ποσότητες και τη σύσταση των ΑΣΑ.
- Στις εφαρμοζόμενες πρακτικές, μεθόδους και τα έργα διαχείρισης.
- Στις εμπειρίες από τα έργα διαχείρισης ΑΣΑ, με έμφαση στις προσπάθειες ανακύκλωσης και επεξεργασίας.

Στον Ελλαδικό χώρο έχουν εκπονηθεί κατά καιρούς μελέτες για τη σύνθεση των ΑΣΑ, αλλά η πλειοψηφία τους είναι αποτέλεσμα περισσότερο μιας αποσπασματικής αντιμετώπισης του προβλήματος της διαχείρισης των απορριμμάτων παρά μιας συνολικής και πιο προσεκτικής αντιμετώπισης από την πολιτεία και την τοπική αυτοδιοίκηση. Παρατηρώντας τον Πίνακα 1.15 διαπιστώνεται ότι ο Εθνικός Σχεδιασμός (τελευταία στήλη) διαφέρει αρκετά από πρόσφατες μελέτες που έχουν γίνει, π.χ. Θεσσαλονίκη 1998, αλλά και από άλλες μελέτες όπως θα διαπιστωθεί στη συνέχεια. Αυτό είναι απόρροια εν μέρει της μεγάλης ετερογένειας που παρουσιάζει ο ελλαδικός χώρος, όσον αφορά στα χαρακτηριστικά παραγωγής και σύνθεσης απορριμμάτων, αλλά και εξαιτίας της αλλαγής των καταναλωτικών προτύπων.

Η γνώση της σύστασης των παραγόμενων ΑΣΑ είναι ιδιαίτερης σημασίας για την εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης απορριμμάτων, στο σύνολό τους. Οι ενδεχόμενες μεταβολές στην ποιοτική σύσταση των παραγόμενων αποβλήτων στην πορεία του χρόνου περιγράφουν στην πράξη τη μεταστροφή των καταναλωτικών συνηθειών και διαμορφώνουν τις μελλοντικές τάσεις παραγωγής ΑΣΑ. Τα στοιχεία αυτά τυγχάνουν ιδιαίτερης αξιολόγησης για την χάραξη στρατηγικής διαχείρισης αποβλήτων σε τοπικό, περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο. Ο Πίνακας 1.16 παρουσιάζει τα πιο πρόσφατα δεδομένα για την ποιοτική σύνθεση των αστικών απορριμμάτων στις Βόρειες (North Countries - N.C.) και Νότιες χώρες (South Countries – S.C.) της Ευρώπης. Παρατηρείται μια συσχέτιση των τιμών του Πίνακα 1.16 με τον εθνικό σχεδιασμό, όπως αυτός παρουσιάζεται από τον Πίνακα 1.15.

Με βάση πιο πρόσφατες αναλύσεις, οι οποίες θεωρούνται ως οι πιο αντιπροσωπευτικές διότι διεξήχθησαν με ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα δειγματοληψίας και ανάλυσης των ΑΣΑ, συμπεριλαμβανομένων και στοιχειομετρικών αναλύσεων και μετρήσεων θερμογόνου δύναμης, η σύσταση των αστικών απορριμμάτων σε επίπεδο Περιφέρειας Κρήτης για το διάστημα 2003-2005 συνοψίζεται στον Πίνακα 1.17 και το Διάγραμμα 1.7).

Σε σύγκριση με τα δεδομένα του Διαγράμματος 1.7, φαίνεται πως τα ζυμώσιμα δεν καταλαμβάνουν πλέον το 50% των απορριμμάτων, αλλά περίπου το 39%, επιβεβαιώνοντας τη συνεχή μείωση του μεριδίου τους στο σύνολο των απορριμμάτων, ενώ από την άλλη, τα πλαστικά στα απορρίμματα σχεδόν διπλασιάζονται.

Τα αποτελέσματα αυτά οδηγούν στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Στην σύνθεση των ΑΣΑ παρουσιάζονται 3 κυρίαρχες κατηγορίες, τα ζυμώσιμα υλικά (τροφικά υπολείμματα), το χαρτί και τα πλαστικά με συνολικό ποσοστό ~76%.
- Την πρώτη θέση καταλαμβάνουν τα τροφικά υπολείμματα (>39%) και ακολουθούν το χαρτί (20%) και τα πλαστικά (17%), που μοιράζονται την δεύτερη θέση.
- Το ποσοστό του γυαλιού (>5%) πλέον αποτελείται περισσότερο από φιάλες μιας χρήσεως.
- Τα ποσοστά των αδρανών υλικών είναι ιδιαίτερα χαμηλά (<3%), ποσοστό που δικαιολογείται από το ότι δεν συλλέγονται από τα απορριμματοφόρα οχήματα αλλά μεταφέρονται σε ξεχωριστούς ΧΔΑ με άλλα οχήματα. Το ποσοστό που καταγράφηκε αντιστοιχεί σε ποσότητες αδρανών από εμπορικές/οικιακές δραστηριότητες, συνήθως μπάζα-σοβάδες και άμμος μέσα σε σακούλες.

Μία συνολική σύγκριση της ποιότητας των οικιακών απορριμμάτων σε διάφορες περιοχές και χρονικές περιόδους παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.8.

Πίνακας 1.15: Ποιοτική ανάλυση ΑΣΑ σε διάφορες πόλεις της Ελλάδας (ποσοστά %) [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Περιοχή Δήμος	Αθήνα (6/83- 6/84)	Θεσσαλονίκη (4/86-3/87)	Θεσσαλονίκη 1998	Πυλαία 1998	Ηράκλειο 1987	Ρόδος 9/87- 8/88	Κως 1989	Χανιά 1990	Κομοτηνή 1992-1993	Ξάνθη 1992- 1993	Καλαμάτα 1992	Εθνικός Σχεδιασμός
Ζυμώσιμα	59	52	26,6	41	52,5	42	37	55	67	62	47	47
Χαρτί	19,5	18	29	23	17,2	14	25	19	9	15	25	20
Αδρανή + Υπόλ.	4,5	6	9	10	11,8		5	6	13	11	8	15,5
ΔΕΥΑ	3,5	8	9	6		4	5	4			6	
Αλουμίνιο	4	5	1	4	0,3	10	2	1	3	3	0,5	4,5
Μέταλλα			3,4		2,5		3	3			3	
Πλαστικά	7	7	18	13	14,3	12	11	8	6	7	7,5	8,5
Γυαλί	2,5	4	4	3	1,4	2	12	4	2	2	3	4,5
Ειδικό Βάρος (kg/m ³)	167,2	-	-		-	119,8	113	137,9	-	-	140	-

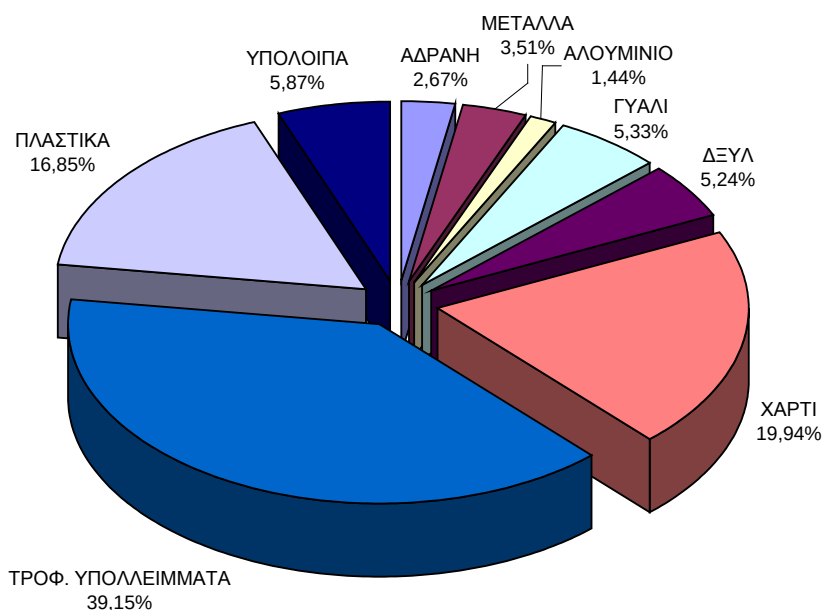
Πίνακας 1.16: Ποιοτική ανάλυση ΑΣΑ σε διάφορες χώρες της Ευρώπης (ποσοστά %) [Tsagas et al., 2010].

Composition (%)	Organic garbage	Paper/ Cardboard	Plastic	Glass	Metal	Others
North countries						
Austria	35	22	11	8	5	19
Belgium	39	17	5	7	3	29
Denmark	29	27	0,8	5	6	32
Finland*	33	40	10	5	5	7
France	32	20	9	10	3	26
Germany	14	34	22	12	5	12
Hungary	29	15	17	2	2	35
Ireland	31	25	11	5	4	23
Sweden*	-	68	2	11	2	17
UK*	40	18	8	7	8	19
Average N.C.	31	29	10	7	4	22
South countries						
Greece*	47	20	9	5	5	16
Italy	29	28	5	13	2	22
Portugal	34	21	11	7	4	23
Spain	49	21	12	8	4	7
Average S.C.	40	23	9	8	4	17

Πίνακας 1.17: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα σύνθεσης ΑΣΑ περιφέρειας Κρήτης (2003-2005)

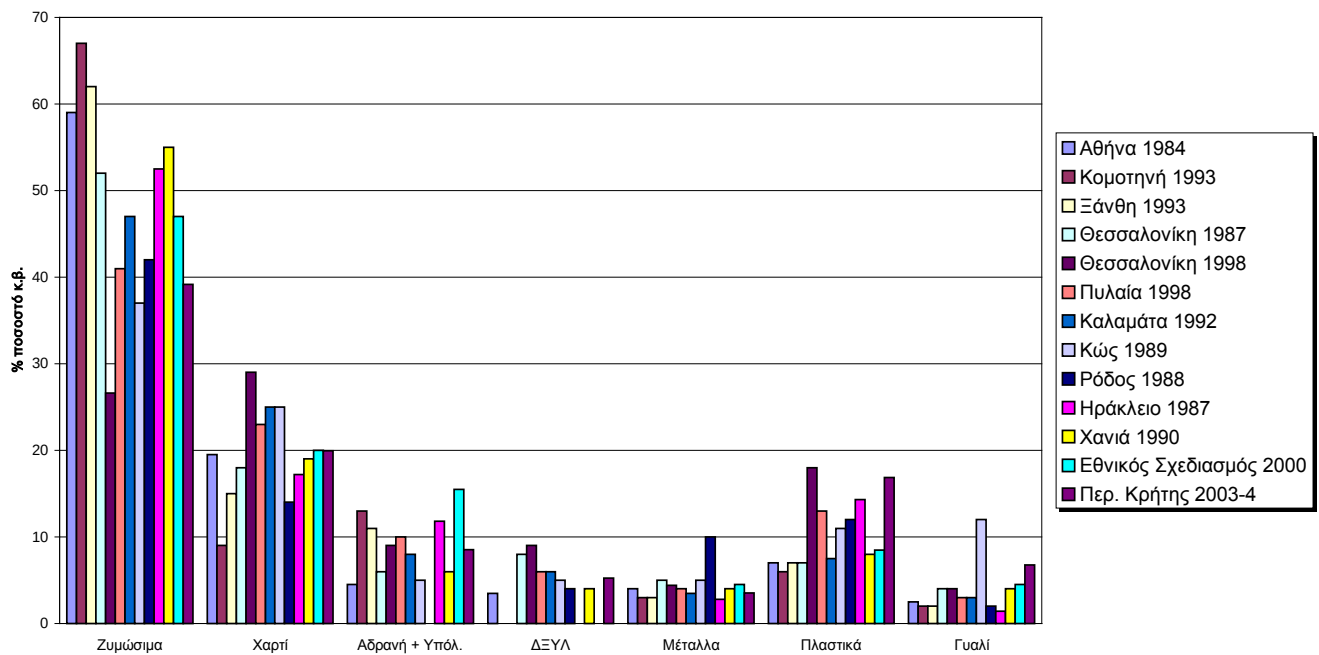
[Gidarakos, Tzamilis, Havas, 2005].

Συγκεντρωτικά	
	έτους
ΑΔΡΑΝΗ	2,67
ΜΕΤΑΛΛΑ	3,51
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	1,44
ΓΥΑΛΙ	5,33
ΔΞΥΛ	5,24
ΧΑΡΤΙ	19,94
ΤΡΟΦ. ΥΠΟΛ.	39,15
ΠΛΑΣΤΙΚΑ	16,85
ΥΠΟΛΟΙΠΑ	5,87



Διάγραμμα 1.7: Μέση ποιοτική σύσταση των οικιακών αποβλήτων στην Κρήτη (2004)

[Gidarakos et al., 2004].



Διάγραμμα 1.8: Σύγκριση σύστασης απορριμμάτων σε διάφορες περιοχές και διάφορες χρονικές περιόδους [Gidarakos et al., 2004].

Μεταξύ των δύο δεκαετιών παρατηρείται μια μείωση της τάξης του 40%, όσον αφορά στα ζυμώσιμα. Η μείωση αυτή εξηγείται από τη μεταβολή στα ποσοστά των πλαστικών και του χαρτιού. Η προηγούμενη δεκαετία (1985-1995) εμφανίζει το χαρτί σε ποσοστά όχι μεγαλύτερα του 20% και το πλαστικό σε ποσοστά της τάξης του 10%. Αντίθετα, μετά το 1995 το χαρτί παρουσιάζει ποσοστό της τάξης του 20-25% και το πλαστικό ~18%, αντίστοιχα. Δηλαδή σε χαρτί και πλαστικό παρατηρείται μια αύξηση τα τελευταία χρόνια από 25% (χαρτί) έως 80% (πλαστικό) ή περίπου 50% συνολικά. Συνεπώς, οι πιο πρόσφατες μελέτες (Θεσσαλονίκη 1998, Πυλαία 1998 και Περιφέρεια Κρήτης 2003-2005) αποτυπώνουν ξεκάθαρα μια αύξηση των υλικών συσκευασίας, όπως είναι αυτά των πλαστικών και του χαρτιού. Η μεταβολή αυτή είναι αποτέλεσμα της αλλαγής στις καταναλωτικές συνήθειες των πολιτών, αλλά και της τάσης των βιομηχανιών για παραγωγή και διάθεση στην αγορά τυποποιημένων προϊόντων.

Αναφορικά με την παραγωγή στερεών αποβλήτων διαφόρων κατηγοριών στην Ελλάδα, πρέπει να τονιστεί ότι τα στοιχεία είναι ιδιαίτερα περιορισμένα και δεν θεωρούνται ιδιαίτερα αξιόπιστα διότι δεν βασίζονται σε ολοκληρωμένα και συστηματικά προγράμματα μετρήσεων και αναλύσεων. Τα πλέον επικαιροποιημένα

επίσημα στοιχεία, σε ότι αφορά την παραγωγή στερεών αποβλήτων διαφόρων κατηγοριών, παρατίθενται στον Πίνακα 1.18.

Σύμφωνα με στοιχεία του 2001 στην Ελλάδα παράγονται περί τα 4,6 εκατομμύρια τόνοι αστικών στερεών αποβλήτων, που περιλαμβάνουν κυρίως τα απόβλητα που προέρχονται από κατοικίες, καθώς και ένα μέρος αποβλήτων που παράγονται από εμπορικές δραστηριότητες και συλλέγονται από τους ΟΤΑ [ΚΥΑ Η.Π. 50910/2727/2003]. Η ποσότητα αυτή διαμορφώνεται περίπου στους 5 εκατομμύρια τόνους το 2013 (Eurostat, 2015).

Πίνακας 1.18: Ποσότητες στερεών αποβλήτων ανά κατηγορία [Ι.Τ.Α., 2007].

Έτος Αναφοράς	Κατηγορία αποβλήτου	Παραγόμενη Ποσότητα, (t)
2001	Αστικά Στερεά Απόβλητα ¹	4.559.000
2004	Επικίνδυνα Απόβλητα	184.500 (94.000 τον ιστορικά)
2002	Χρησιμοποιημένα Ελαστικά ²	50.000
2002	Οχήματα Τέλους Κύκλου Ζωής –ΟΤΚΖ ²	70.000 ^a
2005	Απόβλητα Λιπαντικών Ελαίων – ΑΛΕ ²	85.000
2005	Απόβλητα από Εκσκαφές, Κατασκευές & Κατεδαφίσεις – ΑΕΚΚ ³	5.500.000
2003	Μη Επικίνδυνα Βιομηχανικά ²	20.000.000
2003	Απόβλητα Ηλεκτρικού – Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού – ΑΗΕΕ ^{2,3}	175.000
2005	Φορητές Ηλεκτρικές Στήλες (μπαταρίες) – Συσσωρευτές ³	39.000
	Νοσοκομειακά απόβλητα	Μη Διαθέσιμο ³
2005	Ιλύες ΕΕΛ ²	415.000

^a Τεμάχια

¹ ΚΥΑ Η.Π. 50910/2727 – 22.12.2003

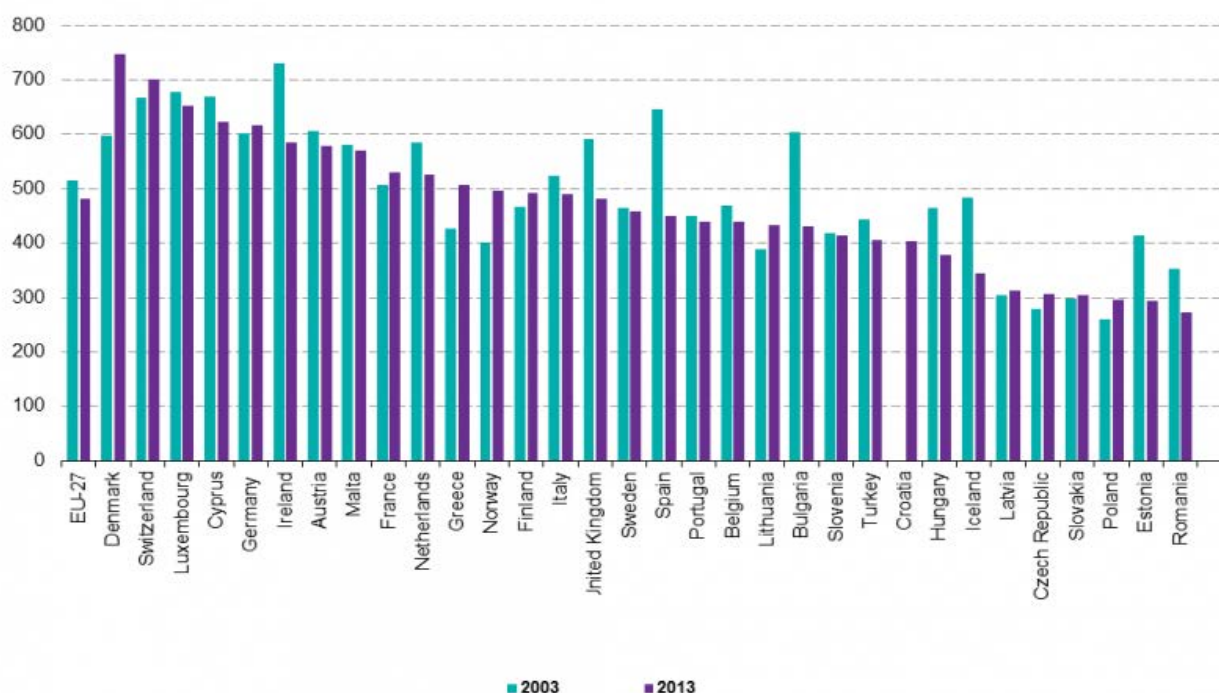
² ΥΠΕΧΩΔΕ, επίσημη ιστοσελίδα: www.minenv.gr/anakyklosi

³ Σύμφωνα με την ΚΥΑ 14312/1302 – 09.06.2000 η ποσότητα των μολυσματικών νοσοκομειακών αποβλήτων ανέρχεται σε 14.000 τον. – με την κατάργηση της εν λόγω ΚΥΑ από την ΚΥΑ Η.Π. 50910/2727/2003 δεν υπάρχει άλλη επίσημη αναφορά σχετικά με τα νοσοκομειακά απόβλητα.

1.4.2 Εξωτερικό

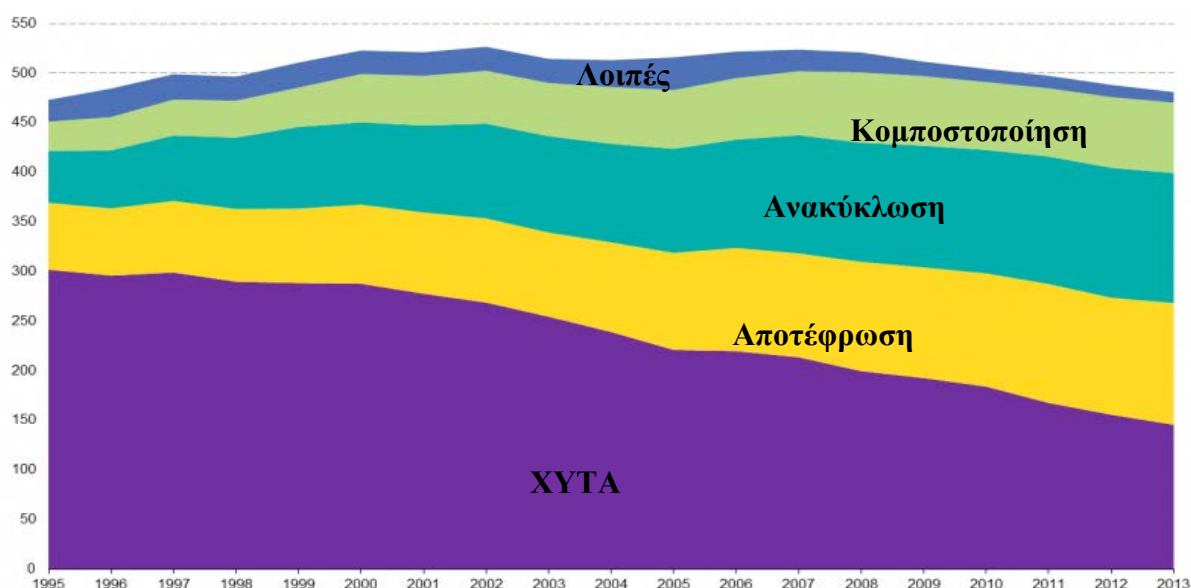
Πρέπει να σημειωθεί ότι μελέτες σύνθεσης απορριμμάτων στο εξωτερικό και κυρίως στις ΗΠΑ γίνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, κάτι που έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την ελληνική πραγματικότητα, την έλλειψη δηλαδή αρχείων δεδομένων. Είναι χαρακτηριστικό ότι στις ΗΠΑ παρόμοιες μελέτες διεξάγονται σε επίπεδο πολιτείας και για κάθε περιοχή υπάρχουν στατιστικά στοιχεία ανά έτος.

Στο Διάγραμμα 1.9 παρουσιάζεται η ετήσια κατά κεφαλή παραγωγή των αστικών στερεών αποβλήτων στις χώρες της ΕΕ-27 τα έτη 2003 και 2013. Η ανά κάτοικο παραγωγή των κρατών μελών της Ευρώπης των 27 παρουσιάζει μείωση κατά τη συγκεκριμένη δεκαετία. Εντούτοις, η πλειονηφία των χωρών παρουσιάζει αύξηση, με τραινές εξαιρέσεις την Ιρλανδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ισπανία και τη Βουλγαρία.



Διάγραμμα 1.9: Παραγωγή στερεών αποβλήτων (kg/κάτοικο/έτος) κατά τα έτη 2003 και 2013 [Eurostat, 2015].

Σημαντική είναι η διαφοροποίηση και ως προς τις μεθόδους διαχείρισης των ΑΣΑ στην ΕΕ-27, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.10. Παρότι η διάθεση των στερεών αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) είναι ακόμα η κύρια επιλογή, το ποσοστό της έχει μειωθεί περίπου 49%, την περίοδο 1995 - 2013. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του ποσοστού των άλλων μεθόδων επεξεργασίας (ανακύκλωση, κομποστοποίηση και αποτέφρωση). Κατά την ίδια περίοδο η αποτέφρωση αυξήθηκε κατά 92%, ενώ η ανακύκλωση και η κομποστοποίηση αυξήθηκαν κατά 163% και 153%, αντίστοιχα. Το 2013, το 40% των στερεών αποβλήτων οδηγήθηκε σε χώρους ταφής, το 26% σε μονάδες αποτέφρωσης, το 27% ανακυκλώθηκε και το 15% οδηγήθηκε στις εγκαταστάσεις κομποστοποίησης.

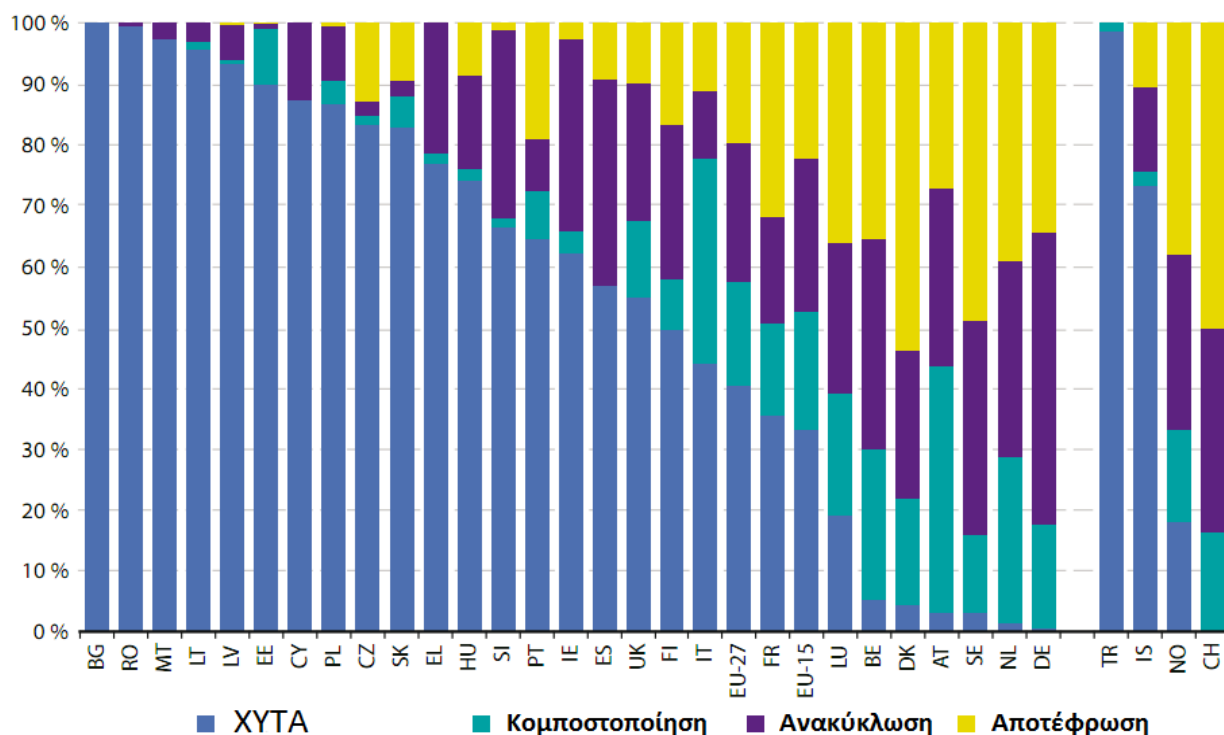


Διάγραμμα 1.10: Διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων στην ΕΕ-27 κατά τα έτη 1995-2013
(σε kg/κάτοικο)

[Eurostat http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Municipal_waste_treatment,_EU-27,_kg_per_capita.png, 2015].

Αναλυτικότερα, το ποσοστό εφαρμογής των διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας των αστικών στερεών αποβλήτων σε επιλεγμένες χώρες της ΕΕ το 2008 παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.11. Τα χαμηλότερα ποσοστά διάθεσης των αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤ) επιτυγχάνονται από το Βέλγιο, τη Δανία, την Αυστρία, την Σουηδία, την Ολλανδία και τη Γερμανία, όπου το ποσοστό δεν υπερβαίνει το 5% της παραγόμενης ποσότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διαχείριση των απορριμμάτων τους στηρίζεται σε ένα συνδυασμό μεθόδων επεξεργασίας (αποτέφρωσης, ανακύκλωσης και κομποστοποίησης). Η Σουηδία, η Δανία, η και η Ολλανδία χρησιμοποιούν την καύση σε σημαντικό ποσοστό των αποβλήτων τους (σε ποσοστό 49, 48 και 39%, αντίστοιχα) ενώ η Γερμανία, η Σουηδία, το Βέλγιο και η Δανία χρησιμοποιούν εκτεταμένα την ανακύκλωση (σε ποσοστό 48, 36, 36 και 34%, αντίστοιχα). Σε σύγκριση με τις υπόλοιπες χώρες, η Αυστρία, η Ιταλία και η Ολλανδία χρησιμοποιούν περισσότερο την κομποστοποίηση (σε ποσοστό 40, 32 και 28%, αντίστοιχα).

Αντίστοιχα, χώρες όπως η Βουλγαρία, η Ρουμανία, η Μάλτα, η Λιθουανία και η Λετονία εξακολουθούν να βασίζονται σε μεγάλο ποσοστό (άνω του 90%) στην υγειονομική ταφή, με την Βουλγαρία να παρουσιάζει το υψηλότερο (100%).

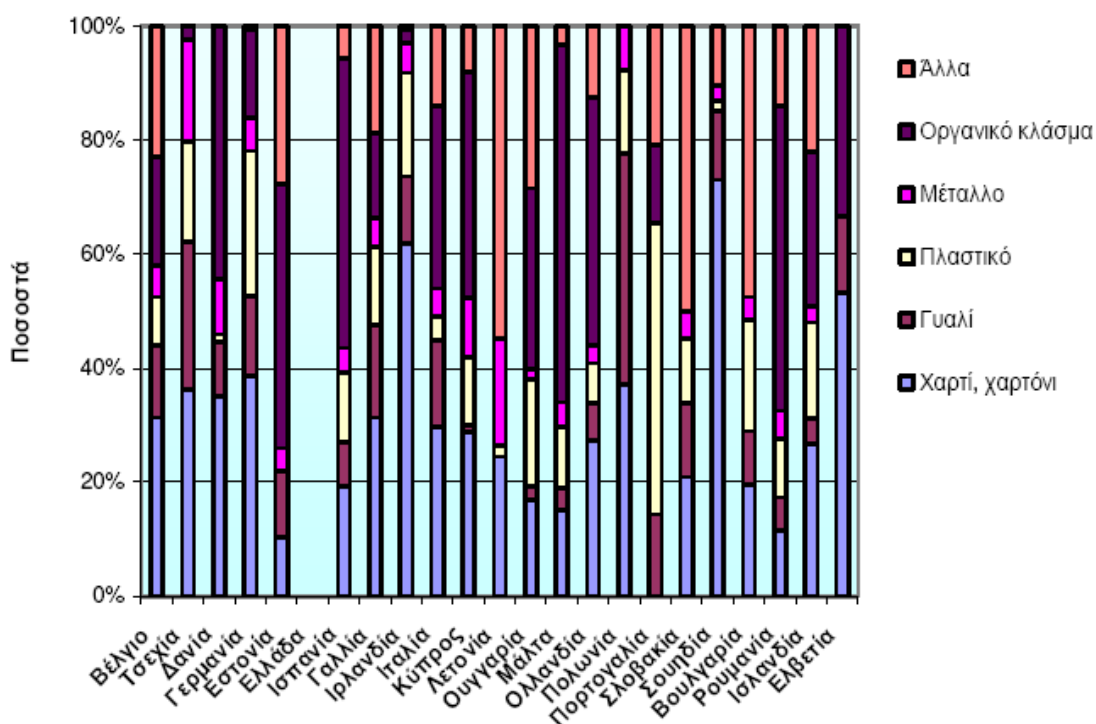


Διάγραμμα 1.11: Διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων σε επιλεγμένες χώρες της ΕΕ το έτος 2008

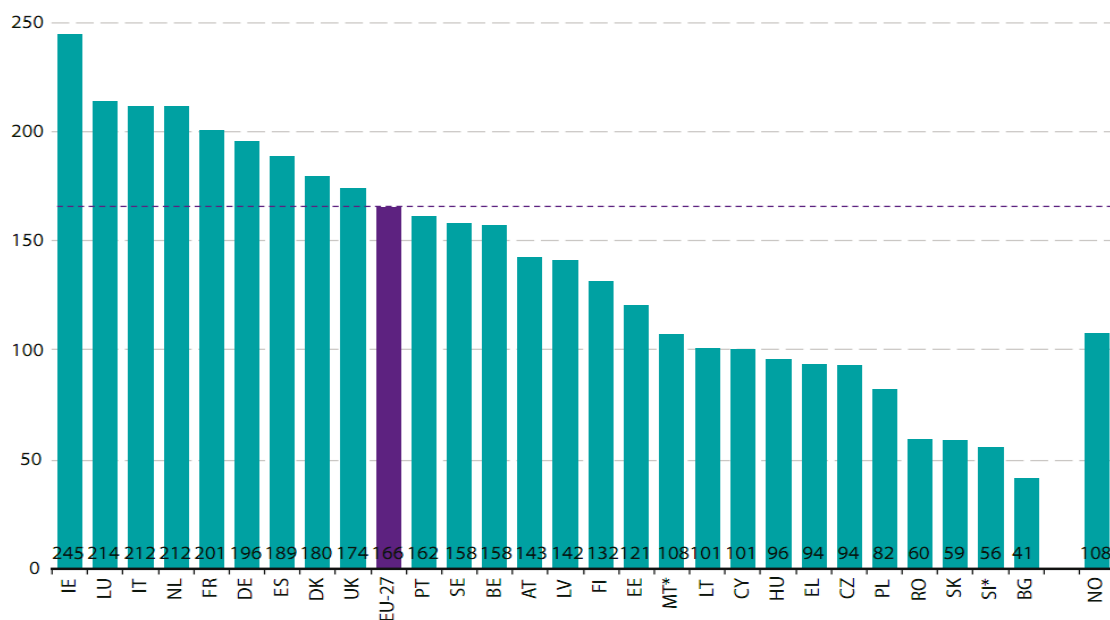
[Eurostat http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-32-10-283/EN/KS-32-10-283-EN.PDF, 2010].

Το Διάγραμμα 1.12, αν και ελλιπές (δεν διατίθενται στοιχεία για όλες τις χώρες-μέλη), δίνει μια αντιπροσωπευτική εικόνα αναφορικά με τη σύνθεση των παραγόμενων απορριμμάτων στην Ευρώπη. Όπως παρατηρείται, τα οργανικά απόβλητα και το χαρτί αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των παραγόμενων ΑΣΑ (η Ελλάδα δεν συμπεριλαμβάνεται λόγω έλλειψης στοιχείων).

Από τη σύνθεση που προαναφέρθηκε, τα πλαστικά, το γυαλί, τα μέταλλα και το χαρτί είναι τα τέσσερα κύρια υλικά των απορριμμάτων συσκευασίας (συσκευασία – οποιοδήποτε υλικό που χρησιμοποιείται για προστασία, χειρισμό και μεταφορά των αγαθών). Οι συσκευασίες μπορεί να προέρχονται από μια πληθώρα πηγών, όπως σούπερ μάρκετ, λιανική πώληση, βιομηχανίες, οικίες, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, εστιατόρια κλπ. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 1.13 το 2007 στην Ευρώπη των 27 παράχθηκαν 166 kg/κάτοικο. Οι ποσότητες απορριμμάτων συσκευασίας (Διάγραμμα 1.13) διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των χωρών, από 50 έως και 250 kg/κάτοικο. Η διαφορά αυτή δεν οφείλεται μόνο στην διαφορά βιοτικού επιπέδου, αλλά και σε διαφορετικές μεθοδολογίες υπολογισμού που εφαρμόζονται.



Διάγραμμα 1.12: Ποσοστιαία σύνθεση στερεών αποβλήτων που παράγονται σε επιλεγμένες χώρες της ΕΕ το έτος 2002 (σε εκατομύρρια τόνους)
[Eurostat <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/extraction/evalight>, 6/5/06].

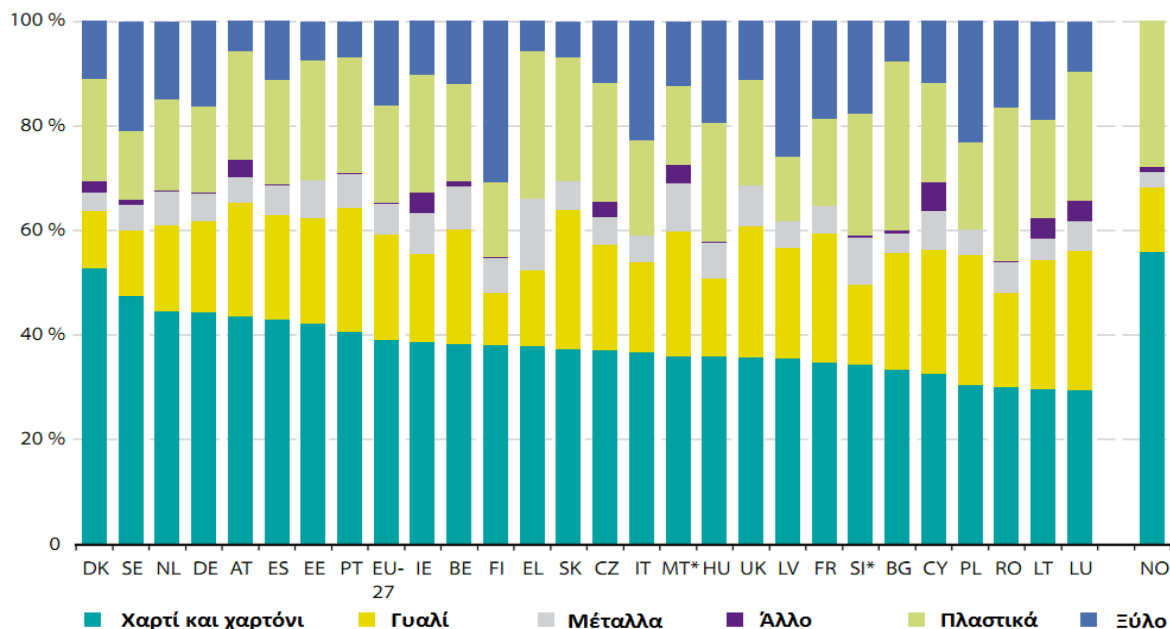


* 2004

Διάγραμμα 1.13: Παραγωγή απορριμμάτων συσκευασίας σε κιλά ανά κάτοικο στις χώρες-μέλη της ΕΕ-27, 2007

[Eurostat http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-32-10-283/EN/KS-32-10-283-EN.PDF, 2010].

Όπως προκύπτει και από το Διάγραμμα 1.14 τα υλικά συσκευασίας διαφέρουν από χώρα σε χώρα και, πέρα των αναφερθέντων, περιλαμβάνουν και το ξύλο.



* 2006

Διάγραμμα 1.14: Σύσταση των απορριμμάτων συσκευασίας στις χώρες-μέλη της ΕΕ-27, 2007
[Eurostat http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-32-10-283/EN/KS-32-10-283-EN.PDF, 2010].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Αποκομιδή Απορριμμάτων

Ο ορθή διαχείριση των παραγόμενων σε μια πόλη απορριμμάτων αποτελεί μια από τις πλέον βασικές παραμέτρους καθορισμού της ποιότητας της ζωής των κατοίκων της, η οποία ουσιαστικά ξεκινά από την αποκομιδή αυτών. Η αποκομιδή των απορριμμάτων αποτελείται από 4 βασικά στάδια, τα οποία επηρεάζονται άμεσα από την εκάστοτε παραγωγή απορριμμάτων, τόσο σε επίπεδο ποιότητας, όσο και ποσότητας [ΤΕΕ, 2006]:

1. Παραγωγή απορριμμάτων.
2. Προσωρινή αποθήκευση απορριμμάτων.
3. Συλλογή.
4. Μεταφορά και μεταφόρτωση προς επεξεργασία/διάθεση.

Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων και σχεδιασμού ενός συστήματος αποκομιδής απορριμμάτων (συνήθως οι ΟΤΑ) οφείλουν να επιδιώκουν τη βέλτιστη δυνατή λύση, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων, μεταξύ των οποίων κοινωνικές, πολιτιστικές, πολιτισμικές, τεχνολογικές, οικονομικές, νομοθετικές, κλπ.. Εντούτοις, ακόμη και σήμερα η εν λόγω επιδίωξη πολλές φορές δεν επιτυγχάνεται, λόγω έλλειψης εκπαίδευσης ή γνώσης, λανθασμένων πολιτικών αποφάσεων, περιορισμένων οικονομικών δυνατοτήτων ή ακόμη και αδιαφορίας.

Προβλήματα, τα οποία συχνότατα απαντώνται όσον αφορά στην αποκομιδή απορριμμάτων, συμπεριλαμβάνουν:

- Ανεπαρκή συλλογή απορριμμάτων, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η διατήρηση της αισθητικής και της υγιεινής.
- Όχληση των δημοτών (π.χ. θόρυβος από λειτουργία οχημάτων, οσμές, παρακώλυση της κυκλοφορίας, κα.).
- Αυξημένο κόστος αποκομιδής, λόγω κακού σχεδιασμού.

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί το γεγονός ότι για τα παραπάνω προβλήματα μέρος της ευθύνης πολλές φορές έχουν και οι ίδιοι οι δημότες, οι οποίοι ενδεχομένως αρνούνται να συμμορφωθούν με τις υποδείξεις των υπευθύνων και να υιοθετήσουν ορθές πρακτικές διαχείρισης των απορριμμάτων τους, όσον αφορά π.χ.:

- Στην χρήση λίγων μεγάλων και όχι πολλών μικρών σακουλών απορριμμάτων.
- Στον σωστό χρόνο εναπόθεσης των απορριμμάτων τους στους κάδους, ανάλογα με το εκάστοτε ωράριο συλλογής.
- Στην τήρηση του δημοτικού κανονισμού καθαριότητας (π.χ. αποφυγή παράνομων διαθέσεων απορριμμάτων).
- Στην ελαχιστοποίηση των παραγόμενων απορριμμάτων τους, μέσω π.χ. της ανακύκλωσης, κα..

2.1 Προσωρινή αποθήκευση απορριμμάτων

Τα απορρίμματα συλλέγονται και αποθηκεύονται προσωρινά σε υποδοχείς απορριμμάτων, των οποίων ο τύπος και η χωρητικότητα συνήθως επιλέγονται από τις δημοτικές υπηρεσίες. Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα οι εν λόγω υποδοχείς συνήθως επιλέγονται, τοποθετούνται και συντηρούνται από τη δημοτική υπηρεσία καθαριότητας του εκάστοτε δήμου [Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002]

2.1.1 Είδη μέσων προσωρινής αποθήκευσης

Τα πλέον συνήθη μέσα προσωρινής αποθήκευσης απορριμμάτων είναι τα εξής:

2.1.1.1 Σάκοι

Οι χρησιμοποιούμενοι σάκοι είναι ως επί τω πλείστον πλαστικοί και πολύ λιγότερο χάρτινοι, τουλάχιστον στην Ελλάδα, δεδομένου ότι οι χάρτινοι σάκοι δεν ενδείκνυται για την αποθήκευση των σύμμεικτων απορριμμάτων (όπως και των οργανικών) στην χώρα μας, λόγω του υψηλού ποσοστού οργανικού κλάσματος και υγρασίας. Οι χρησιμοποιούμενοι πλαστικοί σάκοι συνήθως είναι κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο υψηλής (HDPE) ή χαμηλής πυκνότητας (LDPE). Στην αγορά κυκλοφορούν διάφορα είδη και μεγέθη, για μικρά δοχεία παντός χρήσης, κουζίνας, για κάδους απορριμμάτων και για απορρίμματα κήπων.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει η τάση να χρησιμοποιούνται ανακυκλώσιμοι σάκοι. Το ποσοστό του ανακυκλώσιμου υλικού, που περιέχουν, καθορίζει ουσιαστικά και την ανθεκτικότητά τους στην χρήση: όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε ανακυκλώσιμο υλικό, τόσο μειώνεται η ανθεκτικότητα των σάκων και ως εκ τούτου συνήθως δεν υπερβαίνεται το ποσοστό του 80% σε ανακυκλώσιμο πλαστικό.

Παλιότερα, οι σακούλες αποτελούσαν το μόνο μέσο προσωρινής αποθήκευσης απορριμμάτων, καθώς τοποθετούνταν ως είχαν στο πεζοδρόμιο προς συλλογή. Ως αποτέλεσμα, απαντώνταν συχνότατα φαινόμενα «διάλυσης» αυτών και διασκόρπισης των απορριμμάτων, υπό την επίδραση των καιρικών συνθηκών ή λόγω επιθέσεων ζώων, προκαλώντας σημαντικότερα προβλήματα αισθητικής και υγιεινής.

Η χρήση των σακουλών εντούτοις θεωρείται ότι μείωνε το κόστος συλλογής των απορριμμάτων, διότι δεν χρειάζονταν ιδιαίτερες επενδύσεις για αγορά υποδοχέων και ειδικά εξοπλισμένων απορριμματοφόρων. Οι σακούλες μεταφέρονταν από τους εργάτες καθαριότητας και απορρίπτονταν μέσα στο απορριμματοφόρο.

Σήμερα, οι σάκοι τοποθετούνται εντός ειδικών κοινόχρηστων κάδων, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη απομόνωση των απορριμμάτων από το περιβάλλον. Ωστόσο η ύπαρξη σάκων εκτός των κάδων ή ακόμη και σε σημεία που δεν υπάρχει καν κάδος αποτελεί συνήθη εικόνα στην χώρα μας, που δημιουργείται από την αμέλεια των πολιτών. Μάλιστα, στις συγκεκριμένες περιπτώσεις είναι συχνή η χρήση πλαστικών τσαντών των super markets και όχι μεγάλων ειδικών σάκων (π.χ. 50 λίτρων, που χωρούν κατά μέσο όρο τα απορρίμματα 2 ημερών μιας τετραμελούς οικογένειας) (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Όχι σπάνια όψη κάδων απορριμμάτων στην Ελλάδα.

2.1.1.2 Κάδοι

Οι κάδοι απορριμμάτων κατασκευάζονται συνήθως από ανθεκτικό πλαστικό ή μέταλλο και μπορεί να είναι τροχήλατοι (κυλιόμενοι) ή όχι (σταθεροί) (Εικόνες 2.2 & 2.3). Στην Ελλάδα, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο μεταλλικοί και πλαστικοί τροχήλατοι κάδοι, χωρητικότητας που κυμαίνεται από 120 έως 1.100 λίτρα.



Εικόνα 2.2: Παραδείγματα κυλιόμενων κάδων προσωρινής αποθήκευσης απορριμμάτων.



Εικόνα 2.3: Παραδείγματα σταθερών κάδων προσωρινής αποθήκευσης απορριμμάτων.

Το σύστημα των κάδων προσφέρει καλύτερη αισθητική και προστασία της δημόσιας υγείας σε σχέση με τους σάκους, αλλά αυξάνει το κόστος λειτουργίας των υπηρεσιών καθαριότητας, εξαιτίας των απαιτούμενων δαπανών για προμήθεια και συντήρηση αυτών.

Οι κάδοι εκκενώνονται είτε με μηχανοποιημένο (περίπτωση μεγάλων κάδων) είτε με χειρωνακτικό τρόπο (περίπτωση των μικρών δοχείων). Απαραίτητο είναι οι κάδοι να είναι με καλύμματα, ώστε να κλείνουν και να αποφεύγεται ο παρασιτισμός από

έντομα και τρωκτικά. Ως ελάχιστες απαιτήσεις, τις οποίες ο κάδος πρέπει να πληροί, θεωρούνται οι εξής:

- Ικανοποίηση κανόνων ασφαλείας και υγιεινής.
- Στεγανοποίηση ενάντια διαρροών στραγγισμάτων.
- Αποτροπή διασπορών απορριμμάτων.
- Αποτροπή εκπομπών οσμών.
- Ανθεκτικότητα σε βανδαλισμούς και επιθέσεις ζώων.

Ειδικά όσον αφορά στους τροχήλατους κάδους, που είναι και οι πλέον συνηθισμένοι, κριτήρια για την επιλογή τους θα πρέπει να είναι [ΤΕΕ, 2006]:

- Η προσαρμογή τους στο σύστημα ανύψωσης του απορριμματοφόρου οχήματος.
- Ο χρόνος προσαρμογής τους στο σύστημα ανύψωσης του απορριμματοφόρου οχήματος.
- Ο χρόνος απο-προσαρμογής τους από το σύστημα ανύψωσης του απορριμματοφόρου οχήματος και επιστροφής τους στην θέση τους.
- Η καταπόνηση του μηχανισμού ανύψωσης του απορριμματοφόρου οχήματος.
- Η καταπόνηση του πλαστικού μηχανήματος.
- Η κατανάλωση ενέργειας κατά την εκκένωση τους.
- Η καλαισθησία του περιβάλλοντος χώρου.
- Η ανθεκτικότητα τους σε βανδαλισμούς.
- Η ευκολία χρήσης τους από το προσωπικό αποκομιδής.
- Η έκταση της συντήρησης τους.
- Το κόστος συντήρησης και προμήθειάς τους.
- Η αντοχή των εξαρτημάτων και λοιπών στοιχείων τους.
- Η ευχρηστία από το δημότι.
- Η στεγανότητα.
- Η ευκολία καθαρισμού και απολύμανσης τους.
- Η διάρκεια ζωής τους.
- Η δυνατότητα χρήσης τους και για τη συλλογή ανακυκλώσιμων υλικών, έστω με μικρή προσαρμογή.
- Η στιβαρότητα και ο κίνδυνος για ανατροπή τους.

- Η ανθεκτικότητά τους στην χρήση.
- Η δυνατότητα εκκένωσης των διασταλλαζόντων και υπολειμμάτων πλύσης.
- Η αντικραδασμική κατασκευή τους.
- Το ερμητικό κλείσιμο του καλύμματος τους προς αποφυγή διαρροής οσμών.
- Το βάρος του καλύμματος τους.

Εκτός των προηγούμενων τύπων κάδων, στις μεγάλες πόλεις, κυρίως έξω από εμπορικά καταστήματα, οικοδομές, κλπ., απαντώνται μεγάλοι κάδοι που ονομάζονται απορριμματοκιβώτια (containers). Χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που η παραγωγή απορριμμάτων είναι πολύ μεγάλη. Υπάρχουν απορριμματοκιβώτια ορθογώνια (χωρητικότητας έως και 40.000 λίτρων), σχήματος σκάφης (10.000 λίτρων) και άλλα ορθογώνια, που έχουν ειδική πρέσα (15.000 έως 26.000 λίτρων) (Εικόνα 2.4). Η μεταφορά των απορριμματοκιβωτίων γίνεται με ειδικά οχήματα (Εικόνα 2.5).

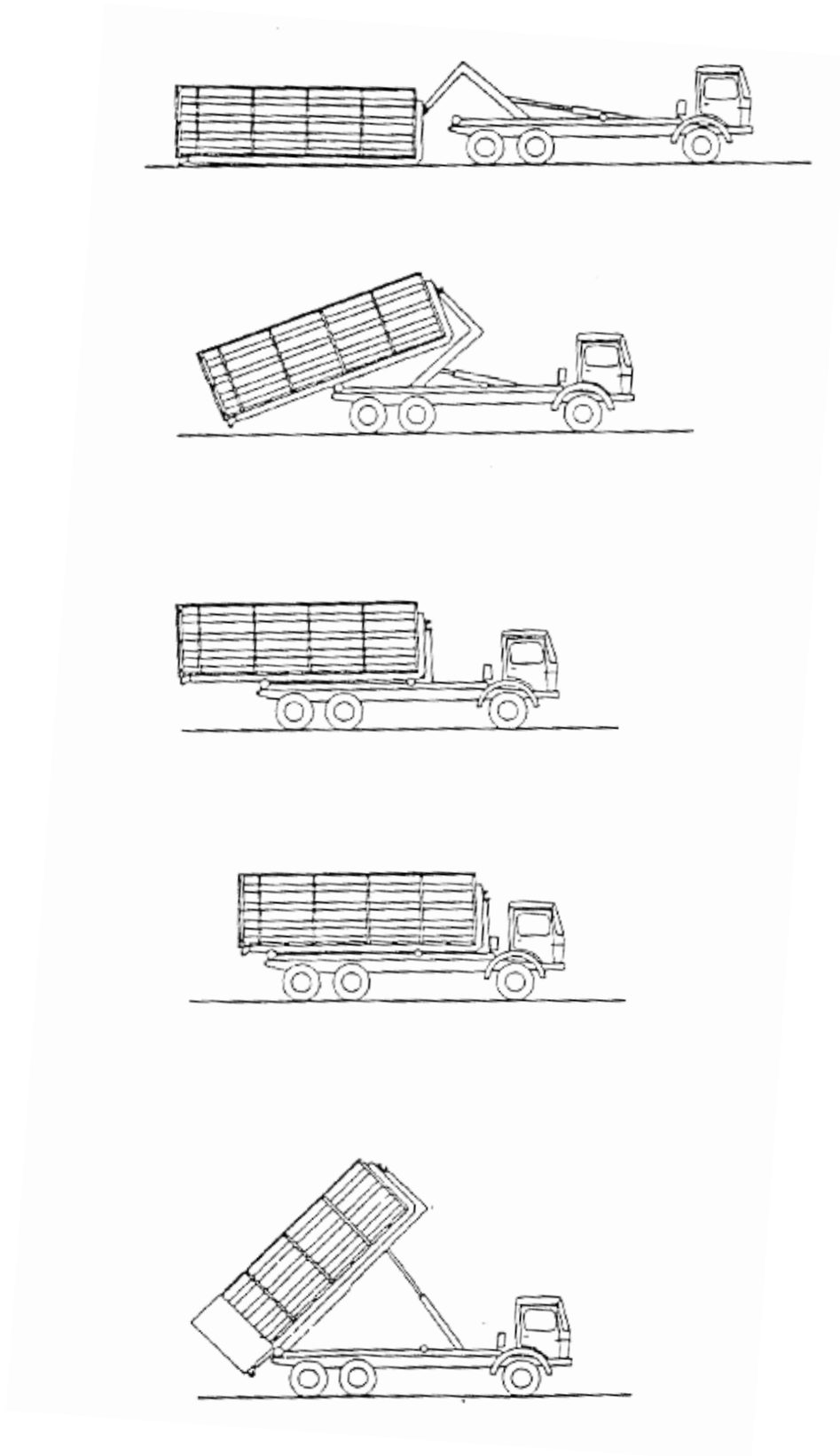


(α)



(β)

Εικόνα 2.4: Παραδείγματα απορριμματοκιβωτίων (α) ορθογώνια και (β) σχήματος σκάφης.



Σχήμα 2.1: Ενδεικτικός τρόπος μεταφοράς και εκκένωσης απορριμματοκιβωτίου
[Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002].

Οι ελάχιστες απαιτήσεις, τις οποίες ένα απορριμματοκιβώτιο πρέπει να πληροί, είναι:

- Συμβατότητα με τα οχήματα μεταφόρτωσης.
- Διασφάλιση ομοιόμορφης πλήρωσης του εσωτερικού του, με στόχο την ισοκατανομή των φορτίων κατά το διαμήκη άξονά του.
- Ελαχιστοποίηση των χειρωνακτικών παρεμβάσεων.
- Ικανοποίηση κανόνων ασφαλείας και υγιεινής.
- Στεγανοποίηση ενάντια διαρροών στραγγισμάτων.
- Αποτροπή διασπορών απορριμμάτων.
- Αποτροπή εκπομπών οσμών.
- Συμβατότητα για ενδεχόμενη σιδηροδρομική μεταφορά, κατ'επιλογήν.

Τα απορριμματοκιβώτια είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν ως:

- Κινητοί σταθμοί μεταφόρτωσης.
- Κέντρα συλλογής απορριμμάτων σε περιοχές αυξημένης παραγωγής.
- Κέντρα συλλογής απορριμμάτων σε περιοχές με γεωγραφικές ιδιαιτερότητες ή/και στενότητα δρόμων.

2.1.1.3 Καινοτόμα συστήματα

Πέραν των προαναφερόμενων συμβατικών μέσων προσωρινής αποθήκευσης απορριμμάτων, τα τελευταία τουλάχιστον έτη, έχουν αναπτυχθεί κάποια προηγμένα συστήματα, τα οποία προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα και εκπροσωπούνται από:

Ημιυπόγειοι και υπόγειοι κάδοι

Μεγάλοι κάδοι, χωρητικότητας άνω των 1.100 λίτρων, τοποθετούνται εντός του εδάφους, μερικώς ή εξ' ολοκλήρου, αποτελώντας έτσι τους λεγόμενους ημιυπόγειους (Εικόνα 2.5) και υπόγειους κάδους, αντίστοιχα. Οι εν λόγω κάδοι μπορεί να είναι είτε μόνιμα τοποθετημένοι εντός κοιλότητας του εδάφους, είτε να βρίσκονται πάνω σε υπόγεια βάση, η οποία, με κατάλληλο σύστημα ανέλκυσης, ανεβαίνει πάνω από την επιφάνεια του εδάφους για την εκκένωσή τους (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.5: Παραδείγματα ημιυπόγειων κάδων.



Εικόνα 2.6: Παραδείγματα υπόγειων ανερχόμενων κάδων απορριμμάτων.

Βασικό πλεονέκτημα των συγκεκριμένων κάδων είναι ότι η χωρητικότητά τους είναι επαρκής για να αντικαταστήσει ένα μεγάλο αριθμό συμβατικών κάδων, μειώνοντας έτσι το κόστος, τις οχλήσεις και τον χώρο που αυτοί θα καταλάμβαναν. Ο κάδος εκκενώνεται μόνο όταν γεμίσει, ελαχιστοποιώντας τα δρομολόγια και το κόστος αποκομιδής, τις εκπομπές οσμών και του θορύβου, που προκαλούνται κατά την εκκένωση του, καθώς επίσης και την παρεμπόδιση της κίνησης των οχημάτων. Οι συγκεκριμένοι κάδοι φέρουν εσωτερικά ειδικό σάκο, ο οποίος συνήθως φορτώνεται και αδειάζει με γερανοφόρο όχημα (Εικόνα 2.7). Ο εν λόγω σάκος είναι από διπλά ενισχυμένο ύφασμα για να αντέχει το βάρος των απορριμμάτων.



Εικόνα 2.7: Παραδείγματα υπόγειων ανερχόμενων κάδων απορριμμάτων.

Κάδοι με ογκομέτρηση/ζύγιση και αναγνώριση

Ορισμένοι τύποι κάδων διαθέτουν στο κάλυμμά τους θάλαμο ογκομέτρησης και ζύγισης (Εικόνα 2.8), ο οποίος επιτρέπει καλύτερο έλεγχο των εισερχόμενων στον κάδο απορριμμάτων. Συνήθως οι συγκεκριμένοι κάδοι διαθέτουν και σύστημα αναγνώρισης του χρήστη, μέσω ειδικών καρτών (Εικόνα 2.9), ώστε να είναι εφικτή η ανά χρήστη καταγραφή των απορριπτόμενων απορριμμάτων. Επίσης και οι ίδιοι κάδοι διαθέτουν δικό τους κωδικό αναγνώρισης, ο οποίος καταγράφεται από το απορριμματοφόρο, που τους εκκενώνει και μεταφέρει τα δεδομένα σε κεντρικό σύστημα διαχείρισης του όλου δικτύου προσωρινής αποθήκευσης και συλλογής των απορριμμάτων. Μέσω ενός τέτοιου συστήματος είναι δυνατή η προσαρμογή και η απόδοση του κόστους διαχείρισης των απορριμμάτων ανά κάτοικο, ανάλογα με την παραγωγή, που έχει (Εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.8: Παραδείγματα κάδων με δυνατότητα ογκομέτρησης και/ή ζύγισης των απορριμμάτων [TEE, 2006].



Εικόνα 2.9: Παραδείγματα κάδων με δυνατότητα αναγνώρισης του χρήστη [TEE, 2006].



Εικόνα 2.10: Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας αυτόματου συστήματος αναγνώρισης κάδων [TEE, 2006].

Κάδοι με δυνατότητα συμπίεσης

Οι συγκεκριμένοι τύπου κάδοι χρησιμοποιούνται για την απόρριψη, τόσο των σύμμεικτων, όσο και των ανακυκλώσιμων υλικών (Εικόνα 2.11). Αποτελούνται από θάλαμο συμπίεσης, όπου απορρίπτονται τα απορρίμματα συσκευασμένα μέσω μιας θύρας εισαγωγής. Ο βαθμός συμπίεσης μπορεί να προσαρμοσθεί ανάλογα το είδος, τη

σύσταση και την ποσότητα των απορριμμάτων. Ενδεικτικά ο βαθμός συμπίεσης συνήθως ανέρχεται σε 5:1 για τα σύμμεικτα απορρίμματα, 8:1 για τα πλαστικά και 2:1 για το χαρτί.

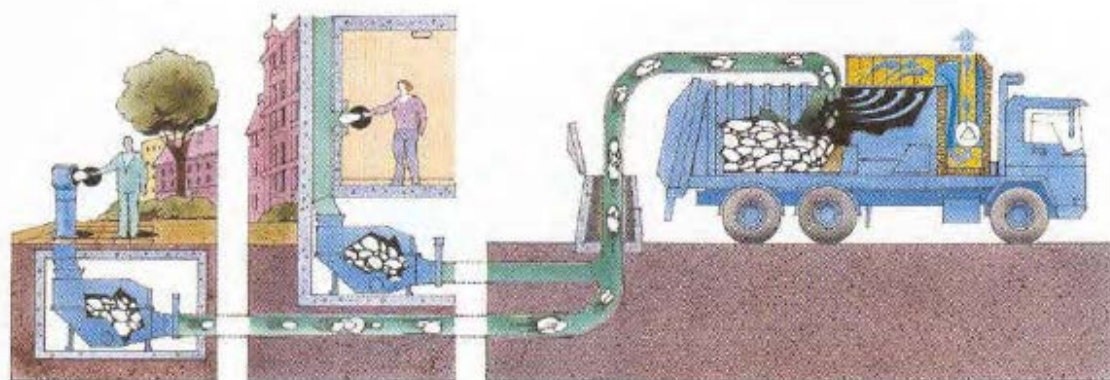
Οι συγκεκριμένοι κάδοι αποτελούν λύση για περιοχές με γεωγραφικές ιδιαιτερότητες και στενούς δρόμους ή πεζοδρομία.



Εικόνα 2.11: Σύστημα προσωρινής αποθήκευσης με ενσωματωμένο θάλαμο συμπίεσης [ΤΕΕ, 2006].

Δίκτυα συλλογής

Πρόκειται για δίκτυα, που αποτελούνται από αγωγούς μεγάλου διαμετρήματος, οι οποίοι έχουν θύρες εισαγωγής απορριμμάτων σε διάφορα σημεία και καταλήγουν σε μεγάλους υποδοχείς απορριμμάτων. Στα απλούστερα συστήματα η συλλογή των απορριμμάτων πραγματοποιείται μέσω βαρύτητας (Σχήμα 2.2), ενώ στα πλέον σύνθετα η εγκατάσταση είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, η διακίνηση των απορριμμάτων εντός των αγωγών γίνεται μέσω πνευματικής μεταφοράς, που διασφαλίζεται από ένα σταθμό αναρρόφησης (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.2: Δίκτυο συλλογής απορριμμάτων βαρύτητας [Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002].



Σχήμα 2.3: Πνευματικό δίκτυο συλλογής απορριμμάτων [www.excel-uae.com].

Οι αγωγοί πρέπει να έχουν κυκλική εσωτερική διάμετρο με ελαχίστη διάσταση 0,30 cm και να είναι κατασκευασμένοι από ανθεκτικό υλικό, προκειμένου να αντέχουν στις πτώσεις σκληρών και βαρέων αντικειμένων. Οι δε συνδέσεις θα πρέπει είναι τελείως στεγανές στο νερό. Οι αγωγοί θα πρέπει ακόμη να μπορούν να καθαρίζονται και να αδειάζουν εύκολα από τις επικαθίσεις ζυμώσιμων υλικών. Ο καθαρισμός και η απολύμανση πρέπει να γίνεται περιοδικά τουλάχιστον μια φορά τον χρόνο.

Η εφαρμογή τέτοιου είδους δικτύων διασφαλίζει [ΤΕΕ, 2006]:

- Σημαντική μείωση στο κόστος προσωπικού (το αναγκαίο προσωπικό για τη συλλογή των απορριμμάτων μειώνεται σημαντικά, μέσω του αυτοματισμού).
- Μείωση λειτουργικών δαπανών συλλογής.

- Εξάλειψη οσμών.
- Εξάλειψη θορύβου από τα απορριμματοφόρα.
- Αισθητική αναβάθμιση.
- Διασφάλιση της δημόσιας υγείας.
- Προστασία περιβάλλοντος.
- Αυξημένη αξιοπιστία και ασφάλεια.
- Διευκόλυνση των δημοτών.
- Μείωση των οχλήσεων από την τοποθέτηση συμβατικών κάδων.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα τους είναι [TEE, 2006]:

- Υψηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης.
- Αδυναμία εφαρμογής του σε ήδη ανεπτυγμένες οικοδομικά περιοχές.
- Τεχνικά προβλήματα (όπως στην περίπτωση φραξίματος των αγωγών από ογκώδη απορρίμματα).
- Θραύση των αγωγών από κακή λειτουργία ή φθορά.
- Υγιεινή εντός κτιρίου.

2.1.2 Αριθμός και χωρητικότητα μέσων προσωρινής αποθήκευσης

Ο αριθμός και η χωρητικότητα των χρησιμοποιούμενων μέσων προσωρινής αποθήκευσης απορριμμάτων ουσιαστικά καθορίζεται από τον ρυθμό παραγωγής των απορριμμάτων και σχετίζεται άμεσα με τη συχνότητα συλλογής αυτών.

Ο αριθμός των κάδων εξαρτάται από την απαιτούμενη χωρητικότητα, αλλά και η χωρητικότητα του κάθε κάδου χωριστά από τον αριθμό των κάδων που θα τοποθετηθούν. Πρόκειται για μια αλληλεξάρτηση, στην οποία θα πρέπει να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή ισορροπία. Στόχος είναι οι κάδοι που τελικά θα χρησιμοποιηθούν να μην είναι περιττοί, αλλά ούτε και ανεπαρκείς.

Συγκεκριμένα, οι παράμετροι προς συνεκτίμηση στην επιλογή των κάδων είναι [TEE, 2006]:

- Κλιματικές συνθήκες. Σε περιοχές με ιδιαίτερα αυξημένη θερμοκρασία τα απορρίμματα πρέπει να συλλέγονται συχνότερα προς μείωση των οχλήσεων, που ενισχύονται από την υψηλή θερμοκρασία.

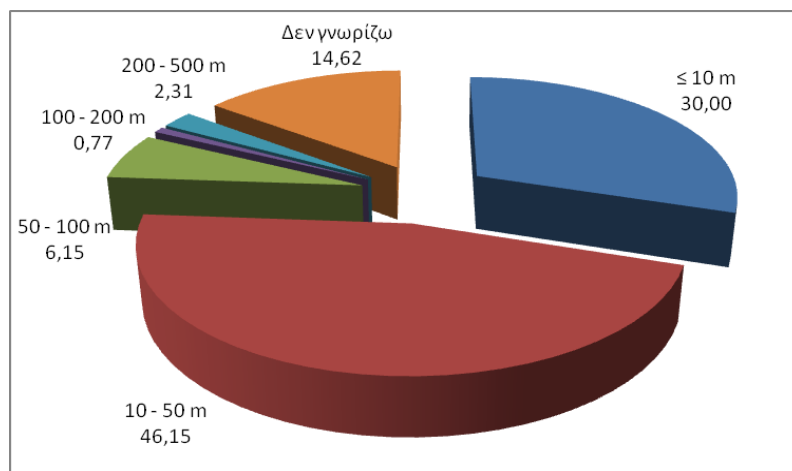
- Πληθυσμιακή πυκνότητα. Υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα απαιτεί μεγαλύτερη συνολική χωρητικότητα κάδων, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται κυρίως από την πολιτική της εκάστοτε δημοτικής αρχής.
- Εποχικές διακυμάνσεις – τουριστική κίνηση. Πρέπει να προβλέπεται η αύξηση της παραγωγής, λόγω τουριστικής κίνησης και να μη λαμβάνεται υπόψη μόνο ο μόνιμος πληθυσμός, ώστε να αποφευχθεί υπερχειλίση των κάδων στις περιόδους αυξημένης τουριστικής κίνησης.
- Απαιτήσεις κατοίκων. Η μείωση της όχλησης και η αύξηση της διευκόλυνσης τους, με κύριο στόχο τη συμμόρφωση τους στον κανονισμό καθαριότητας, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.
- Πολιτική δημοτικής αρχής - Συχνότητα συλλογής – Αισθητική. Αν και ο αριθμός και η χωρητικότητα των κάδων καθορίζει τη συχνότητα συλλογής, πολλές φορές μπορεί να συμβεί το αντίθετο. Ανάλογα με την συχνότητα συλλογής επιλέγονται και οι κάδοι. Η αισθητική του χώρου, η οποία απαγορεύει την τοποθέτηση μεγάλου αριθμού κάδων, ιδιαιτέρως σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, λαμβάνεται επίσης υπόψη κατά την επιλογή των κάδων.
- Αυξομείωση της παραγωγής απορριμμάτων τα σαββατοκύριακα. Ανάλογα την περιοχή και τις δραστηριότητες, που διενεργούνται σε αυτήν, η παραγωγή των απορριμμάτων δύναται να μεταβάλλεται. Στόχος είναι η αποφυγή της υπερχειλίσης των κάδων στην περίπτωση αυξημένης παραγωγής απορριμμάτων.
- Γεωγραφικές ιδιαιτερότητες. Σε περιοχές δύσβατες ή με στενούς δρόμους, τα κέντρα συλλογής μειώνουν τον αριθμό των κάδων, αλλά όχι και την απαιτούμενη χωρητικότητα αυτών.

2.1.3 Χωροθέτηση μέσων προσωρινής αποθήκευσης

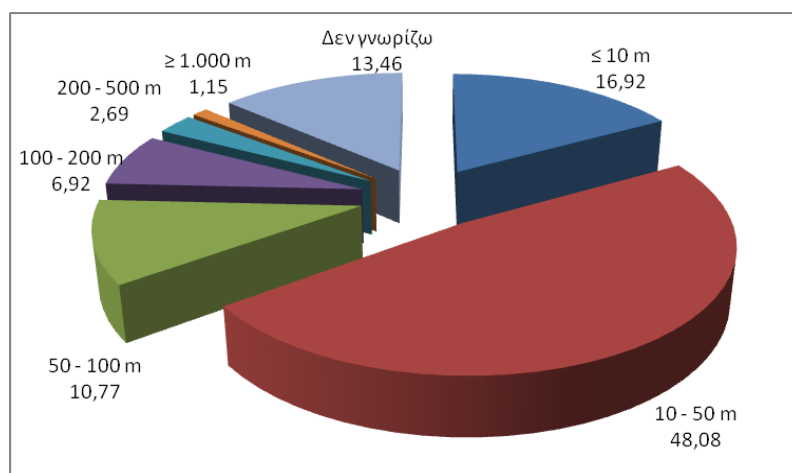
Η χωροθέτηση των εκάστοτε μέσων προσωρινής αποθήκευσης, ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, αποτελεί σημαντικότερο θέμα, επί του οποίου συχνά αναπτύσσονται πολλές τριβές και προβλήματα. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι ενώ κάθε πολίτης θέλει και πρέπει να εξυπηρετείται από κάποιον κάδο, αυτός θα πρέπει να είναι στην εξώπορτα του γείτονα και όχι στη δική του. Ως αποτέλεσμα, σε

ορισμένες γειτονιές κάδοι σχεδόν καθημερινά «ταξιδεύουν» έως και μερικές δεκάδες μέτρα.

Από έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2004 στο Δήμο Πανοράματος από το Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΠΘ, προέκυψε ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση ενός κάδου από ένα νοικοκυριό, που εξακολουθεί να διευκολύνει τα μέλη του, είναι αυτή των 50 m, ενώ η ελάχιστη αποδεκτή εκείνη των 10 m (Διάγραμμα 2.1 & 2.2).



Διάγραμμα 2.1: Γραφική απεικόνιση απαντήσεων στην ερώτηση: «Ποια είναι η ελάχιστη απόσταση ενός κάδου απορριμμάτων από την οικία σας, που δεν θα σας δημιουργούσε πρόβλημα οχλήσεων (οσμών, θορύβου, κλπ.);»



Διάγραμμα 2.2: Γραφική απεικόνιση απαντήσεων στην ερώτηση: «Ποια είναι η μέγιστη απόσταση ενός κάδου απορριμμάτων από την οικία σας, που θεωρείτε ικανοποιητική;»

Αντικειμενικά, με σκοπό την προστασία και διευκόλυνση του πολίτη, καθώς επίσης και την αποτελεσματική συλλογή των απορριμμάτων, η τοποθέτηση των μέσων προσωρινής αποθήκευσης των απορριμμάτων θα πρέπει να αποφεύγεται (Πίνακας 2.1) σε σημεία όπου [ΤΕΕ, 2006]:

- Παρεμπόδιζεται η κυκλοφορία των οχημάτων και ιδιαιτέρως των μέσων μαζικής μεταφοράς.
- Τίθεται θέμα ασφάλειας της κίνησης πεζών και οχημάτων (Εικόνα 13.12).
- Είναι δυνατόν να προσβληθεί η υγεία και η ασφάλεια του συνόλου.
- Δεν είναι αποδεκτά από αισθητική άποψη.
- Δυσχεραίνεται το έργο του προσωπικού αποκομιδής απορριμμάτων.
- Είναι δυνατόν να δημιουργηθούν εστίες ανεξέλεγκτης απόρριψης.

Πίνακας 2.1: Σημεία τοποθέτησης κάδων προς αποφυγή [ΤΕΕ, 2006].

Σκοπός περιορισμών & απαγορεύσεων Σημείο τοποθέτησης κάδων προς αποφυγή	Μη παρεμπόδιση κυκλοφορίας	Ασφάλεια στους δρόμους: Κίνηση πεζών	Ασφάλεια στους δρόμους: Κίνηση οχημάτων	Διασφάλιση της υγείας και της ασφάλειας του συνόλου	Αισθητική	Διευκόλυνση προσωπικού συλλογής	Ασφάλεια του συνόλου	Αποφυγή δημιουργίας εστιών απόρριψης
Γωνίες δρόμων	✓	✓	✓				✓	
Σηματοδότες	✓	✓	✓				✓	
Διαβάσεις πεζών		✓					✓	
Ράμπες ατόμων με ειδικές ανάγκες		✓						
Ράμπες ασθενοφόρων							✓	
Σχολεία		✓		✓	✓			✓
Εκκλησίες		✓			✓		✓	
Πάρκα		✓		✓	✓		✓	✓
Αθλητικοί χώροι		✓		✓	✓		✓	✓
Παιδικές χαρές		✓		✓	✓		✓	✓
Ακάλυπτα οικόπεδα		✓		✓	✓	✓	✓	✓
Εγκαταλεμμένα σπίτια		✓		✓	✓	✓	✓	✓
Καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος				✓	✓		✓	



Εικόνα 2.12: Δείγματα εσφαλμένης τοποθέτησης κάδων, που προκαλεί παρακώλυση της κίνησης και επικινδυνότητα για τους πεζούς.[ΤΕΕ, 2006].

Πέρα από τα προαναφερόμενα σημεία προς αποφυγή, κατά την χωροθέτηση των μέσων προσωρινής αποθήκευσης των απορριμμάτων, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα παρακάτω κριτήρια [ΤΕΕ, 2006]:

- Χώροι στάθμευσης.
- Δρόμοι που επιτρέπεται ή όχι η στάθμευση.
- Πλάτος πεζοδρομίου και δρόμου.
- Κυκλοφοριακή κίνηση.
- Γενικός πολεοδομικός κανονισμός.
- Ανωμαλία εδάφους.
- Κλίση εδάφους.

- Καταστήματα.
- Αριθμός κτιρίων και διαμερισμάτων / καταστημάτων σε κάθε κτίριο.
- Ρυθμός παραγωγής απορριμμάτων.
- Πρόγραμμα ανακύκλωσης και κομποστοποίησης.
- Ιδρύματα-Δημόσια κτίρια-Οργανισμοί.
- Βιοτεχνική (ή/και βιομηχανική δραστηριότητα).
- Εποχικές διακυμάνσεις – Τουριστική κίνηση.
- Ύπαρξη ιδιωτικών κάδων.
- Ημέρες προγράμματος αποκομιδής.
- Δικαιότερη κατανομή απέναντι στους πολίτες.
- Μείωση της όχλησης.
- Αύξηση της διευκόλυνσης.
- Προσβασιμότητα.
- Διευκόλυνση του προσωπικού αποκομιδής.
- Διασφάλιση της ασφάλειας και της υγιεινής.

Σημαντικό εργαλείο για την ορθή χωροθέτηση των εκάστοτε μέσων προσωρινής αποθήκευσης των απορριμμάτων αποτελούν σήμερα τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, με τη βοήθεια των οποίων μπορεί να γίνει πλήρης καταγραφή και χωρική απεικόνιση όλων των απαραίτητων για την εν λόγω χωροθέτηση δεδομένων και παραμέτρων, όπως η πληθυσμιακή πυκνότητα μιας περιοχής, οι χρήσεις των κτιρίων, η παραγωγή των απορριμμάτων, οι διαστάσεις πεζοδρομίων, κα.. Με τον τρόπο αυτό αναπτύσσεται μια βάση δεδομένων, η επεξεργασία της οποίας μπορεί σχετικά εύκολα και με ασφάλεια να οδηγήσει στη βελτιστοποίηση της χωροθέτησης των απαιτούμενων μέσων προσωρινής αποθήκευσης των απορριμμάτων.

Για την αξιολόγηση της εκάστοτε προκύπτουσας λύσης έχουν μάλιστα οριστεί δείκτες όχλησης και διευκόλυνσης των κατοίκων, οι οποίοι προκύπτουν ως εξής [ΤΕΕ, 2006]:

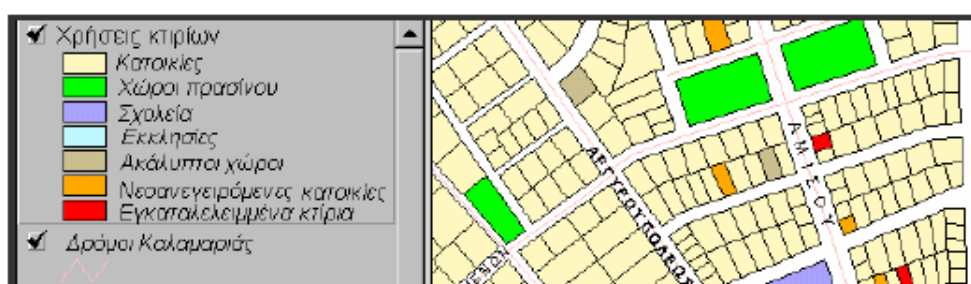
$$\text{Δείκτης όχλησης: } A = \Pi_i \cdot \sum (1/d_{ij})$$

όπου: Π_i = ο πληθυσμός μιας οικιστικής μονάδας i

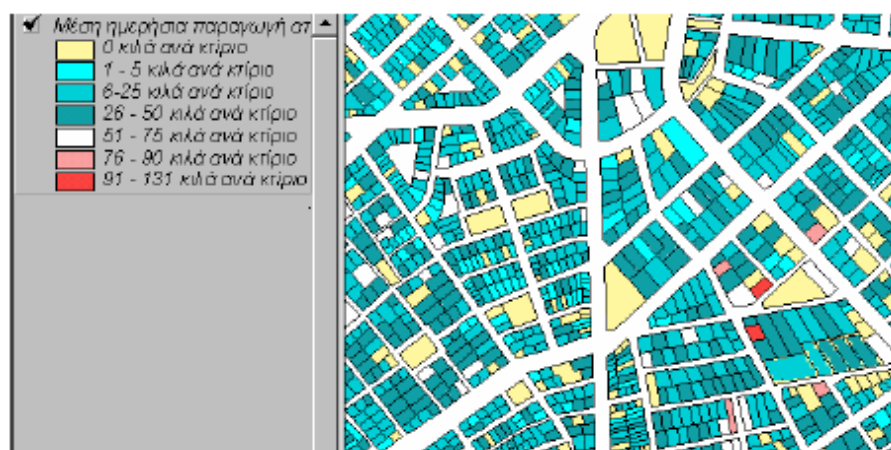
d_{ij} = η απόσταση κάθε κάθου από την οικιστική μονάδα i

Δείκτης διευκόλυνσης: $C = C(\max\{d_{ij}\}) = \{0,1\} = \{OXI, NAI\}$

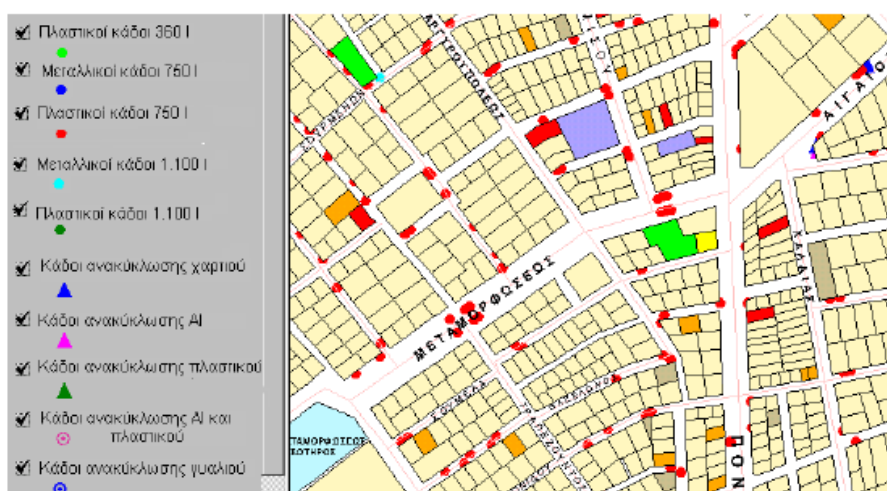
Για κάθε οικιστική μονάδα ο δείκτης όχλησης λαμβάνει συγκεκριμένη τιμή και εκτιμά την όχληση, που προκαλείται από την υφιστάμενη τοποθέτηση των κάδων στη συγκεκριμένη οικιστική μονάδα. Ο δε δείκτης διευκόλυνσης λαμβάνει τιμή ίση με 1 ($C = 1 = NAI$) όταν η απόσταση του πιο απομακρυσμένου κάδου από την οικιστική μονάδα i είναι χαμηλότερη του σημείου διευκόλυνσης (10 – 50 m). Στην αντίθετη περίπτωση λαμβάνει τη μηδενική τιμή.



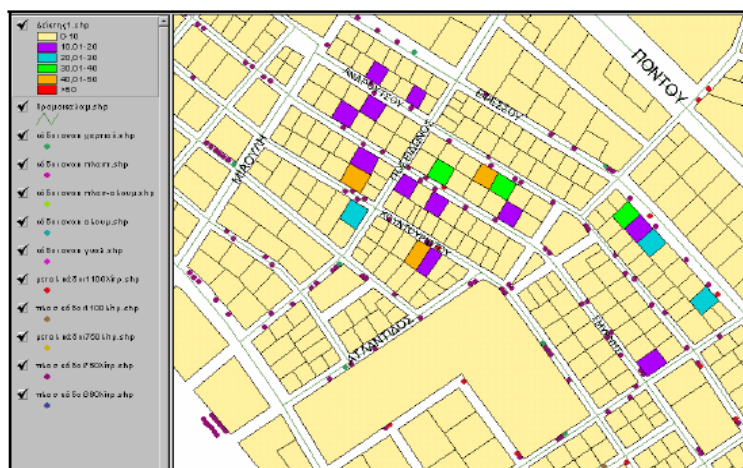
Σχήμα 2.4: Παράδειγμα χαρτογραφικής απεικόνισης των χρήσεων γης στον αστικό ιστό [ΤΕΕ, 2006].



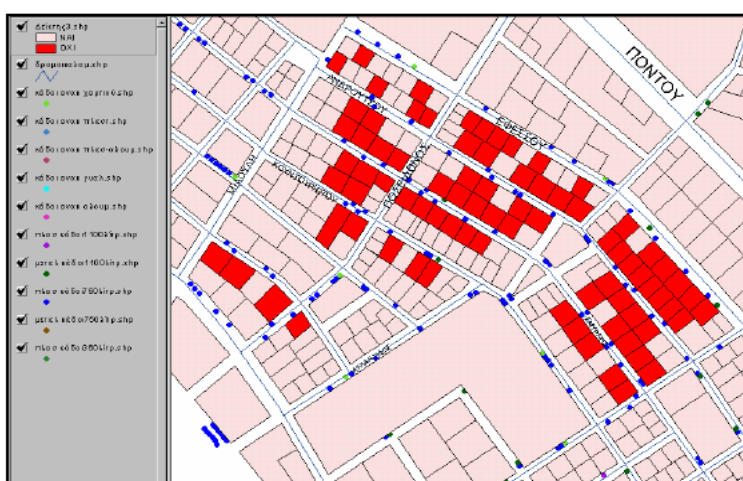
Σχήμα 2.5: Παράδειγμα χαρτογραφικής απεικόνισης της μέσης ημερήσιας παραγωγής απορριμμάτων ανά κτίριο [ΤΕΕ, 2006].



Σχήμα 2.6: Παράδειγμα χαρτογραφικής απεικόνισης των θέσεων κάδων με ταυτόχρονη ταξινόμηση τους κατά είδος και χωρητικότητα [ΤΕΕ, 2006].



Σχήμα 2.7: Χαρτογραφική απεικόνιση του δείκτη όχλησης Α για μια περιοχή μελέτης [ΤΕΕ, 2006].



Σχήμα 2.8: Χαρτογραφική απεικόνιση του δείκτη διευκόλυνσης C για μια περιοχή μελέτης [ΤΕΕ, 2006].

2.2 Συλλογή απορριμμάτων

Η συλλογή των απορριμμάτων είναι το στάδιο κατά το οποίο τα απορρίμματα, που έχουν συγκεντρωθεί προσωρινά στους κάδους, συλλέγονται από κάποιο κατάλληλο όχημα.

Τα προβλήματα, που συνήθως απαντώνται στη διαδικασία της συλλογής απορριμμάτων, διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες [ΤΕΕ, 2006]:

- Προβλήματα προκύπτοντα από ελλιπή ή άστοχο σχεδιασμό και σχετίζονται με τη δημοτική αρχή.

Ο ελλιπής ή άστοχος σχεδιασμός δύναται να οξύνει ή να δημιουργήσει σωρεία προβλημάτων, που αφορούν είτε στο αστικό περιβάλλον, είτε στη δημοτική αρχή, είτε τέλος τους πολίτες. Τα στοιχεία, τα οποία αποτελούν τις κυριότερες γενεσιουργούς αιτίες τέτοιων προβλημάτων, συνοψίζονται ως εξής:

- ο Ωράριο αποκομιδής.
- ο Πρόγραμμα / συχνότητα συλλογής.
- ο Τοποθέτηση και εξασφάλιση θέσης κάδων (χωροθέτηση κάδων, εύκολη πρόσβαση, όχληση από την τοποθέτηση, απόσταση από τη μονάδα κατοικιών, μη μείωση χώρων στάθμευσης).
- ο Αριθμός κάδων (περιττός ή μη επαρκής αριθμός κάδων, περιττή ή με επαρκή χωρητικότητα κάδων, αντιστοιχία κάδων με μονάδες κατοικιών, αισθητική).
- ο Δρομολόγια οχημάτων καθαριότητας (βελτίωση των δρομολογίων, ελαχιστοποίηση των νεκρών χρόνων, επαναπροσδιορισμός των δρομολογίων για μείωση κόστους, οχλήσεων και αντιδράσεων).
- ο Ηλικία οχημάτων συλλογής απορριμμάτων (κόστος συντήρησης, αυξημένο κόστος αποκομιδής, ατυχήματα, ρύπανση της ατμόσφαιρας).
- Προβλήματα προκύπτοντα από πολιτιστικούς παράγοντες, οι οποίοι διαμορφώνουν στάσεις και συμπεριφορές απέναντι στην παραγωγή και ατομική διαχείριση των παραγόμενων απορριμμάτων.

Τα κυριότερα είναι:

- ο Συμπεριφορά πολιτών σε σχέση με τη συλλογή (τήρηση ωραρίου συλλογής, σεβασμός στο προσωπικό και το πρόγραμμα καθαριότητας, τήρηση κανονισμού καθαριότητας (εάν υφίσταται)).
- ο Παράνομη διάθεση.
- ο Ατομική διαχείριση απορριμμάτων (αποφυγή παραγωγής απορριμμάτων, συμμετοχή στην ανακύκλωση, διαλογή στην πηγή).
- ο Σχεδιασμός, συνεχής έλεγχος και αναπροσαρμογή του προγράμματος σε ό,τι αφορά:
 - Δρομολόγια - Οργάνωση δρομολογίων και ωραρίων έτσι ώστε να καλύπτεται πλήρως και καθημερινώς η πόλη και όλοι οι οικισμοί.
 - Προσωπικό.
 - Στόλο οχημάτων.
 - Αριθμό, χωρητικότητα και χωροθέτηση κάδων και απορριμματοκιβωτίων – αντικατάσταση λόγω φθορών, ανεπάρκειας ή παλιάς τεχνολογίας.
 - Εποπτεία συλλογής και οδοκαθαρισμού.
 - Εξοπλισμό (κάδους, καλαθάκια, απορριμματοκιβώτια).
 - Κανονισμό καθαριότητας.
 - Γραμμή επικοινωνίας του δημότη για θέματα καθαριότητας.

Λόγω ακριβώς της σπουδαιότητας της διαδικασίας της συλλογής των απορριμμάτων, αλλά και του πλήθους και μεγέθους των προβλημάτων, που αυτή μπορεί να προκαλέσει, κρίνεται αναγκαία η σύσταση ενός ενιαίου φορέα διαχείρισης των απορριμμάτων, σε επίπεδο αποκομιδής, ο οποίος θα έχει ολοκληρωμένη εποπτεία του συστήματος προς αποφυγή αλληλοεπικάλυψης αρμοδιοτήτων με άλλους φορείς και επίτευξη ευέλικτης λειτουργίας και δυνατότητας λήψης αποφάσεων.

Αρμοδιότητες ενός τέτοιου φορέα διαχείρισης αποτελούν:

- Έλεγχος της εφαρμογής προγραμμάτων αποκομιδής.
- Συντονισμός της κίνησης, διάθεσης και φύλαξης οχημάτων καθαριότητας.
- Ενημέρωση και εκπαίδευση του προσωπικού στην τήρηση των κανόνων κυκλοφορίας και ασφαλείας.

- Σύνταξη στατιστικών στοιχείων για τον ημερήσιο όγκο των απορριμμάτων και την σύνθεση τους από:
 - ο Βιομηχανίες.
 - ο Νοσοκομεία.
 - ο Ιδρύματα.
 - ο Επιχειρήσεις.
 - ο Εκκλησίες.
 - ο Καταστήματα
 - ο Λαχαναγορές.
 - ο Λαϊκές.
 - ο Δημόσιες υπηρεσίες και οργανισμούς.
 - ο Οικίες.
 - ο Αγροτικές δραστηριότητες.

Επίσης και συμπληρωματικά, στοιχεία για:

- ο Όγκο συλλογής απορριμμάτων ανά οδό, όπως αυτά διαμορφώνονται στη διάρκεια της εβδομάδας, καθώς και στη διάρκεια του έτους.
 - ο Εποχιακές διακυμάνσεις.
- Ενημέρωση και πληροφόρηση πολιτών σχετικά με τη διαχείριση των απορριμμάτων.
 - Τήρηση δελτίων εξαγωγής και δελτίων παραγγελιών για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ή θα χρησιμοποιηθούν.
 - Τήρηση ενημερωμένων χαρτών χωροθέτησης κάδων, συμπεριλαμβανομένης χωρητικότητας και αριθμού.
 - Τήρηση χαρτών δρομολογίων και ώρας αποκομιδής, συμπεριλαμβανομένων πιθανών αποκλίσεων.
 - Εφαρμογή προγραμμάτων ανακύκλωσης.
 - Προώθηση προγράμματος για μείωση των απορριμμάτων που τίθενται προς συλλογή.
 - Μεταφορά και διάθεση (συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας και ανακύκλωσης) των απορριμμάτων.
 - Έλεγχος μέσω του εποπτικού προσωπικού τον πλήρη και απόλυτο καθαρισμό των χώρων.

- Συγκέντρωση ημερήσιων δελτίων εργασίας και έλεγχος παρουσίας προσωπικού.
- Μελέτη, σύνταξη και τροποποίηση προγράμματος αποκομιδής απορριμμάτων.
- Μελέτη βελτίωσης παρεχομένων υπηρεσιών προς τους δημότες.
- Μηχανογράφηση όλου το προγράμματος.
- Συντήρηση οχημάτων και εξοπλισμού.
- Πλύση (ή/και απολύμανση) κάδων, απορριμματοκιβωτίων, καλαθιών, οχημάτων, πεζόδρομων, πεζοδρομίων, οδών και πλατειών.
- Οδοκαθαρισμός – χειρωνακτικός ή με μηχανική σάρωση.
- Οργάνωση και έλεγχος ειδικού συνεργείου καθαρισμού αφισών και αεροπανώ.
- Οργάνωση και έλεγχος ειδικού συνεργείου απορρύπανσης από τυχαία περιστατικά ή ατυχήματα (π.χ. τροχαία ατυχήματα, πυρκαγιές κ.λ.π.).
- Απομάκρυνση εγκαταλειμμένων οχημάτων παντός τύπου από τους δρόμους.
- Οργάνωση ειδικών συνεργείων απολυμάνσεων (εντομοκτονίας, μικροβιοκτονίας, μυοκτονίας) για την απολύμανση κοινόχρηστων χώρων και κτιρίων, και δημοτικών κτιρίων.
- Αποξήλωση εξέδρων για τελετές και σηματοστολισμού της πόλης.
- Τήρηση αρχείων μηχανικών μέσων καθώς και των επισκευών και συντήρησης τους.
- Οργανωμένη αντιμετώπιση έκτακτων περιστατικών και καταστροφών που δημιουργούν μεγάλο όγκο αποβλήτων.

2.2.1 Κατηγορίες συλλογής

Ανάλογα με τον τρόπο εκκένωσης των υφιστάμενων μέσων προσωρινής αποθήκευσης των απορριμμάτων, η συλλογή αυτών μπορεί να διακριθεί σε [Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002]:

- Χειρωνακτική, που πραγματοποιείται από τους εργάτες αποκομιδής, χωρίς τη συμμετοχή του οδηγού του απορριμματοφόρου. Το χρησιμοποιούμενο απορριμματοφόρο είναι με ή χωρίς μηχανισμό και η φόρτωση γίνεται στο πίσω μέρος (rear loader) (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13: Φόρτωση και εκκένωση κάδου με απορριματοφόρο όχημα χειρωνακτικής συλλογής (οπίσθιας φόρτωσης).

- Ημιαυτόματη, που πραγματοποιείται από απορριματοφόρο με μηχανισμό πλευρικής φόρτωσης (side loader). Η εργασία διεκπεραιώνεται μόνο από τον οδηγό του απορριματοφόρου, που συλλέγει τους κάδους από συγκεκριμένες θέσεις δίπλα στο κράσπεδο του πεζοδρομίου, όπου μεταφέρονται κάθε φορά από το χρήστη, πριν την ώρα της συλλογής (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14: Φόρτωση κάδου με απορριματοφόρο όχημα ημιαυτόματης συλλογής (πλευρικής φόρτωσης).

- Αυτόματη, που πραγματοποιείται με απορριματοφόρα εμπρόσθιας φόρτωσης (front loader), δια χρήσης μηχανισμού ανύψωσης μεγάλων δοχείων, τοποθετημένων σε καθορισμένες θέσεις (Εικόνα 2.15). Οι χρήστες μεταφέρουν με κυλιόμενους κάδους τα απορρίμματά τους στις θέσεις, όπου είναι τοποθετημένα τα δοχεία. Εκεί τα εκκενώνουν στα μεγάλα κοντέϊνερς μέσω μηχανισμού και τα παραλαμβάνουν για τη νέα χρήση. Εάν η διαδρομή

είναι κατάλληλη (λίγη κυκλοφορία, κοντινή απόσταση κάτω των 300 m) δεν υπάρχει δυσφορία του κοινού. Η όλη εργασία φορτοεκφόρτωσης πραγματοποιείται μόνο από τον οδηγό του απορριμματοφόρου. Όταν το κοινό συμμορφώνεται και δεν αφήνει γύρω από τα δοχεία ογκώδη αντικείμενα, το σύστημα είναι πολύ οικονομικό. Στην αντίθετη περίπτωση απαιτούνται στο απορριμματοφόρο εργάτες αποκομιδής και χάνονται τα πλεονεκτήματα της αυτόματης συλλογής.



Εικόνα 2.15: Απορριμματοφόρο όχημα αυτόματης συλλογής (εμπρόσθιας φόρτωσης).

2.2.2 Οχήματα

Τα απορριμματοφόρα οχήματα φορτώνουν τους κάδους μηχανικά ή χειρωνακτικά και δύναται να είναι εφοδιασμένα με [ΤΕΕ, 2006]:

- μηχανισμό συμπίεσης (πρέσα ή μύλο)
- μηχανισμό ανύψωσης κάδων
- με μηχανισμό πλύσης κάδων (Εικόνα 2.17)
- με σύστημα απολύμανσης και περιορισμού σκόνης.

Γενικά, διακρίνονται σε ανοικτά, κλειστά, οπίσθιας, πλάγιας και εμπρόσθιας φόρτωσης.

Στα απορριμματοφόρα οχήματα τύπου πρέσας (Εικόνα 2.16α), τα απορρίμματα ωθούνται στο εσωτερικό του οχήματος με τη βοήθεια σιαγόνας, που εκτελεί μία ημικυκλική κίνηση από πάνω προς τα κάτω και μέσα. Τα απορρίμματα πιέζονται πάνω στην πλάκα του εμβόλου και συμπιέζονται. Όταν η πίεση πάνω στην πλάκα ξεπεράσει κάποιο όριο, η πλάκα υποχωρεί προς το εσωτερικό και έτσι γεμίζει το

εσωτερικό του οχήματος. Το όχημα αδειάζει με αντίστροφη κίνηση του εμβόλου, η πλάκα του οποίου ωθεί τα απορρίμματα αυτή τη φορά προς τα έξω.

Στο σύστημα συμπίεσης με μύλο (Εικόνα 2.16α), τα απορρίμματα ωθούνται προς το εσωτερικό του οχήματος και συμπιέζονται με τη βοήθεια περιστρεφόμενου τύμπανου. Η εκκένωση γίνεται με την αντίστροφη κίνηση του τύμπανου.



Εικόνα 2.16: Απορριματοφόρο όχημα με μηχανισμό συμπίεσης τύπου: α. πρέσας και β. μύλου.



Εικόνα 2.17: Όχημα πλύσης κάδων.

2.2.3 Ωράριο

Τα ωράρια συλλογής των απορριμμάτων συνδέονται με [ΤΕΕ, 2006]:

- Τους τομείς αποκομιδής και εποπτείας. Η αναπροσαρμογή του ωραρίου μπορεί να απαιτεί αναπροσδιορισμό των τομέων αποκομιδής.
- Το πρόγραμμα αποκομιδής, δηλαδή πόσες ημέρες την εβδομάδα γίνεται αποκομιδή των απορριμμάτων ανά περιοχή.

- Τα σχεδιασμένα δρομολόγια, τη διάρκεια αυτών και τις ακολουθούμενες πορείες.

Γενικά, στον καθορισμό του ωραρίου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο διαχωρισμός του 24ώρου σε ημέρα, βράδυ και νύχτα, όπως ορίζεται από την ΕΕ για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού θορύβου, η οποία ορίζει ως ημέρα την περίοδο από 07.00 έως 19.00 (διάρκεια 12 ωρών), ως βράδυ την περίοδο από 19.00 έως 23.00 (διάρκεια 4 ωρών) και ως νύχτα την περίοδο από 23.00 έως 07.00 (διάρκεια 8 ωρών) τοπική ώρα.

Σύμφωνα με τον παραπάνω διαχωρισμό, η ημερήσια συλλογή απορριμμάτων εκκινεί στις 05.00-07.00 και λήγει 17.00-19.00, η βραδινή από 17.00-19.00 έως 21.00-23.00 και η νυχτερινή από 21.00-23.00 έως 05.00-07.00 τοπική ώρα, ανάλογα με τη θέσπιση κάθε κράτους.

Η ημερήσια συλλογή συνιστάται να εκκινεί πριν την έναρξη της αυξημένης κυκλοφορίας, δηλαδή πριν την έναρξη των μεταφορών του μεγαλύτερου όγκου των δημοτών προς τις εργασίες τους. Προτεραιότητα θα πρέπει να δίνεται σε περιοχές συνωστισμού και μεγάλης προσέλευσης δημοτών, όπως το κέντρο της πόλης, τα εμπορικά κέντρα, οι κεντρικοί οδικοί άξονες, τα ιδρύματα, τα σχολεία και τα νοσοκομεία. Η συλλογή από τα παραπάνω σημεία μπορεί να γίνει και μετά το πέρας της αυξημένης κίνησης ή λειτουργίας τους, με την προϋπόθεση να μην ενοχλούνται οι δημότες που διαμένουν στον περίγυρο αυτών.

Δεύτερη προτεραιότητα αποτελεί η συλλογή των απορριμμάτων από τις οικιστικές περιοχές και των καταστημάτων εκτός εμπορικών κέντρων. Το πρωί ή απόγευμα γίνεται η συλλογή στις περιοχές κατοικίας και την περιφέρεια. Πλεονέκτημα της ημερήσιας συλλογής είναι το ότι διενεργείται εντός του εργασιακού ωραρίου, και έτσι δεν απαιτεί υπερωρίες και επομένως πρόσθετο κόστος για αυτές, και δεν προκαλεί αντιδράσεις και εργασιακή φόρτιση του προσωπικού. Αντίθετα, η βραδινή και ιδιαιτέρως η νυχτερινή συλλογή ενισχύει τα παραπάνω προβλήματα, αν και επιφέρει και οφέλη, όπως μείωση της επιφόρτισης της ημερήσιας ηχορύπανσης και καθαρούς δρόμους πριν την έναρξη της κίνησης.

Λανθασμένη επιλογή του ωραρίου μπορεί να προκαλέσει, μεταξύ άλλων [ΤΕΕ, 2006]:

- Αντιδράσεις κατοίκων, καταστηματαρχών, οδηγών.

- Παρακώλυση κυκλοφορίας.
- Ηχητικές οχλήσεις.
- Αύξηση της ηχορύπανσης.
- Οσμές.
- Αύξηση της τοπικής ρύπανσης του αέρα.
- Παραβίαση της αισθητικής και/ή της υγιεινής.
- Αύξηση της διάρκειας αποκομιδής.
- Καταπόνηση των οχημάτων αποκομιδής.
- Αύξηση του κόστους συντήρησης των οχημάτων αποκομιδής, της κατανάλωσης καυσίμου, του απαιτούμενου προσωπικού και εν τέλει του συνολικού κόστους διαχείρισης.

2.2.4 Συχνότητα

Η συχνότητα συλλογής των απορριμμάτων ανά τομέα αποκομιδής πρέπει να αποφασίζεται σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια:

- Ρυθμό παραγωγής απορριμμάτων.
- Εμπορική – βιοτεχνική- βιομηχανική δραστηριότητα.
- Κλιματικές συνθήκες.
- Ωράριο συλλογής.
- Εποχικές διακυμάνσεις – τουριστική κίνηση.
- Ύπαρξη χώρων ιστορικού ενδιαφέροντος.
- Πολυσύχναστες περιοχές.
- Σχολεία, πάρκα, παιδικές χαρές.
- Καταστήματα υγειονομικού ενδιαφέροντος.
- Κέντρα περίθαλψης.
- Απαιτήσεις κατοίκων.
- Πολιτική δημοτικής αρχής.

Λανθασμένη συχνότητα συλλογής των απορριμμάτων επιφέρει τις ίδιες δυσμενείς επιπτώσεις όπως η λανθασμένη επιλογή του ωραρίου συλλογής. Υψηλή συχνότητα αποκομιδής δε συνεπάγεται κατ' ανάγκη και υψηλή στάθμη προσφερόμενης υπηρεσίας. Κάθε ΟΤΑ καθορίζει, ανάλογα με τις προκύπτουσες

ανάγκες και τις δυνατότητές του, τη συχνότητα συλλογής των απορριμμάτων, που παράγονται εντός των ορίων του, η οποία σε αστικές τουλάχιστον περιοχές συνήθως κυμαίνεται από 3 έως 7 φορές την εβδομάδα.

2.2.5 Δρομολόγια

Η οργάνωση των δρομολογίων συλλογής των απορριμμάτων εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, μεταξύ των οποίων, οι πλέον σημαντικές είναι οι εξής [ΤΕΕ, 2006]:

- Τεχνικά χαρακτηριστικά οχήματος:
 - ο Τύπος (πρέσα, μύλος, δορυφορικό, γερανοφόρο, κ.λπ.)
 - ο Απαιτούμενο μέγεθος πληρώματος.
 - ο Χωρητικότητα.
 - ο Ηλικία.
- Γεωγραφικά χαρακτηριστικά του δήμου:
 - ο Τοπογραφικά όρια.
 - ο Φυσικά εμπόδια.
 - ο Γεωγραφικές ιδιαιτερότητες (στους λόφους τα οχήματα πρέπει να εκκινούν τη συλλογή από το υψηλότερο σημείο και να κατεβαίνουν όσο αυξάνει το φορτίο τους).
- Χαρακτηριστικά οδικής κυκλοφορίας:
 - ο Οδοσήμανση εντός των ορίων του δήμου.
 - ο Κυκλοφοριακή κίνηση.
 - ο Κεντρικές οδικές αρτηρίες.
 - ο ΚΟΚ.
 - ο Δύσβατοι οδοί.
 - ο Στενοί οδοί, όπου η προσέλευση των οχημάτων είναι αδύνατη ή απαιτεί οχήματα μικρών διαστάσεων.
- Χωροθέτηση κάδων:
 - ο Σημεία χωροθέτησης των κάδων.
 - ο Θέσεις παραγωγών απορριμμάτων.
 - ο Περιοχές εμπορικής/βιοτεχνικής/βιομηχανικής δραστηριότητας.

- ο Είδος παραγωγών απορριμμάτων (οικίες, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα, ιδρύματα, πάρκα, κ.λπ.)
- Λοιπά στοιχεία:
 - ο Συχνότητα συλλογής.
 - ο Ωράρια εργασίας και συλλογής.
 - ο Διάρκεια αποκομιδής, απαίτηση ισοκατανομής, όσο αυτό είναι δυνατόν.
 - ο Θέση του τελευταίου κάδου που εκκενώνεται πρέπει να είναι η δυνατόν κοντινότερη προς το χώρο διάθεσης.
 - ο Σημείο εκκίνησης οχημάτων.
 - ο Χώρος διάθεσης απορριμμάτων (σταθμός μεταφόρτωσης, κέντρο διαλογής ή/και ανάκτησης, μονάδα επεξεργασίας, χώρος τελικής διάθεσης).
 - ο Φορτίο που θα οδηγηθεί προς διάθεση.
 - ο Ταχύτητα συλλογής που εξαρτάται από την πυκνότητα χωροθέτησης των κάδων απορριμμάτων (ή της κατανομής των παραγωγών απορριμμάτων).

Τα βασικότερα βήματα για τον καθορισμό των δρομολογίων είναι [TEE, 2006]:

- Χαρτογραφική απεικόνιση των παραγωγών απορριμμάτων, των θέσεων των κάδων και της αναμενόμενης ποσότητας απορριμμάτων για συλλογή.
- Ανάλυση των δεδομένων και πληροφοριών, αναπαραγωγή πινάκων πληροφοριών.
- Χαρτογραφική απεικόνιση των τοπογραφικών ορίων, φυσικών εμποδίων και σήμανσης των δρόμων εντός των ορίων του δήμου.
- Προκαταρκτικός σχεδιασμός των δρομολογίων.
- Αξιολόγηση των προκαταρκτικών δρομολογίων και ανάπτυξη αναθεωρημένων.

Στόχος του σχεδιασμού των δρομολογίων θα πρέπει να είναι [TEE, 2006]:

- Συλλογή όλων των απορριμμάτων.
- Ελαχιστοποίηση της καλυπτόμενης απόστασης από τα οχήματα αποκομιδής.

- Ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου αποκομιδής (με ταυτόχρονη μείωση των νεκρών χρόνων).
- Ελαχιστοποίηση του κόστους αποκομιδής.
- Περιορισμός της αντίδρασης των πολιτών.
- Περιορισμός της ηχορύπανσης.
- Ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων προς δρομολόγηση.
- Ελαχιστοποίηση των διαδρομών κάθε οχήματος.
- Ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου προσωπικού αποκομιδής.

Ένας σωστός σχεδιασμός των δρομολογίων, όπως προαναφέρθηκε, ελαχιστοποιεί τις διαδρομές ανά δρομολόγιο, γεγονός σημαντικό διότι έτσι περιορίζονται οι εκπομπές καυσαερίων στην ατμόσφαιρα, μειώνεται η όχληση στην οδική κυκλοφορία, μειώνονται οι ηχητικές οχλήσεις και εξοικονομούνται καύσιμα και ημερομίσθια.

Κάποιοι γενικοί κανόνες, που ακολουθούνται, προς αυτήν την κατεύθυνση είναι οι εξής [Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002]:

- Το απορριμματοφόρο, κατά τη συλλογή, κατευθύνεται ταυτόχρονα προς τον χώροδιάθεσης
- Όπου υπάρχουν κλίσεις, το απορριμματοφόρο να συλλέγει κατηφορίζοντας.
- Τα απορρίμματα των απομακρυσμένων περιοχών εξυπηρετούνται με την ίδια διαδρομή (αν είναι δυνατόν) και την ίδια ημέρα.

Δυστυχώς, η τακτική που ακολουθείται σήμερα στις περισσότερες περιοχές της Ελλάδας, σχετικά με το σχεδιασμό των διαδρομών που ακολουθούν τα οχήματα, είναι τυχαία ή εμπειρική και έχει να κάνει με τον καταμερισμό συνοικιών και με το τί εξυπηρετεί τον οδηγό.

Γενικά, η βελτιστοποίηση της δρομολόγησης των απορριμματοφόρων οχημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική, αν όχι άκρως αναγκαία. Για την επίτευξή της συνήθως πραγματοποιείται πολυκριτηριακή ανάλυση, με βασικότερα σημεία [ΤΕΕ, 2006]:

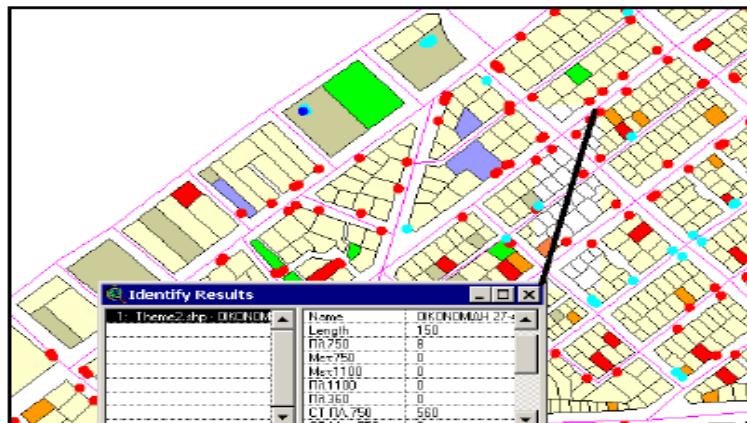
- Οι θέσεις, όπου χωροθετούνται οι κάδοι που θα εξυπηρετηθούν κατά την αποκομιδή.

- Το είδος των κάδων (υλικό, χωρητικότητα, ανακύκλωσης, ανάμεικτων απορριμμάτων).
- Τα χαρακτηριστικά του τμήματος του αστικού οδικού δικτύου (οδός, αριθμός, μονόδρομοι, δρόμοι διπλής κατεύθυνσης).

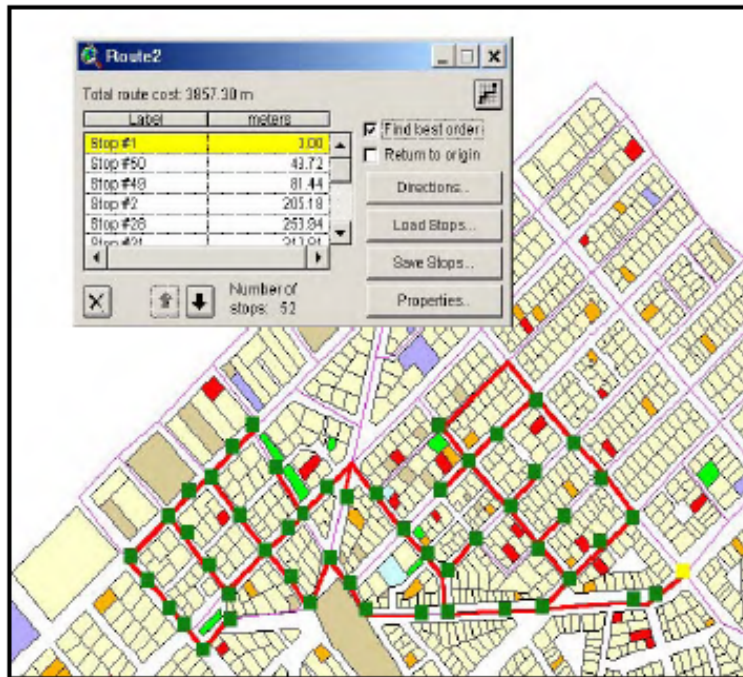
Η όλη διαδικασία βελτιστοποίησης απαιτεί τον χωρικό και γεωγραφικό προσδιορισμό τουλάχιστον ορισμένων βασικών δεδομένων, όπως [TEE, 2006]:

- Των θέσεων όπου θα σταματήσει το απορριμματοφόρο όχημα για να εκκενώσει τους κάδους (Σχήμα 2.9).
- Των προς βελτιστοποίηση μεταβλητών (διαδρομή, χρόνος δρομολόγησης, κα.).
- Της βέλτιστης διαδρομής του απορριμματοφόρου οχήματος (Σχήμα 2.10).

Σε μεγάλες περιοχές, η βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει μόνο με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και ειδικών προγραμμάτων (π.χ. Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών). Σε μικρές όμως περιοχές μπορεί να γίνει με τη βοήθεια της μεθόδου των περιττών (ή μονών) κόμβων:



Σχήμα 2.9: Παράδειγμα χαρτογραφικής απεικόνισης διαφόρων πληροφοριών, που λαμβάνονται υπόψη για τη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης ενός απορριμματοφόρου οχήματος [TEE, 2006].



Σχήμα 2.10: Παράδειγμα χαρτογραφικής απεικόνισης βελτιστοποιημένου δρομολογίου απορριματοφόρου οχήματος [TEE, 2006].

2.3 Μεταφορά και μεταφόρτωση απορριμμάτων

Η μεταφορά είναι το στάδιο κατά το οποίο το απορριματοφόρο έχει ολοκληρώσει τη συλλογή των απορριμμάτων από το σύνολο των κάδων και ξεκινάει να πάει στον χώρο επεξεργασίας ή στο χώρο διάθεσης. Το στάδιο αυτό κλείνει στο σημείο όπου το όχημα φτάνει σε έναν από αυτούς τους χώρους.

Η συνηθισμένη για τη χώρα μας τακτική είναι η κατευθείαν μεταφορά των απορριμμάτων σε χώρους διάθεσης των απορριμμάτων. Η διαδρομή που διανύει το όχημα μπορεί να είναι από 1 χιλιόμετρο μέχρι μερικές δεκάδες χιλιόμετρα. Αυτό εξαρτάται αποκλειστικά από τη γεωγραφική θέση του χώρου διάθεσης [Γαβριλάκης Κ., 2002].

Η μεταφόρτωση απορριμμάτων πολλές φορές είναι επιβεβλημένη για την ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των απορριμμάτων από τους χώρους παραγωγής στους χώρους τελικής τους διάθεσης. Χωρίς μεταφόρτωση, το έργο της μεταφοράς επιτελείται από τα ίδια τα απορριματοφόρα, των οποίων ο ρόλος θα έπρεπε να περιορίζεται στην αποκομιδή και συλλογή.

Κεντρική ιδέα της μεταφόρτωσης είναι η ύπαρξη ενός Σταθμού Μεταφόρτωσης Απορριμμάτων (ΣΜΑ), στον οποίο καταλήγουν τα απορριμματοφόρα και, αφού εκκενωθούν, επιστρέφουν στο χώρο παραγωγής των απορριμμάτων για τη συνέχιση του έργου της αποκομιδής. Στο ΣΜΑ τα απορρίμματα συμπιέζονται με κατάλληλες πρέσες και φορτώνονται σε απορριμματοκιβώτια (κοντέινερς), που στη συνέχεια μεταφέρονται, είτε σιδηροδρομικά ή με ειδικούς οχηματοσυρμούς («νταλίκες») στο χώρο τελικής διάθεσής τους (π.χ. έναν ΧΥΤΑ) [ΤΕΕ, 2006].

Προϋποθέσεις για να αποτελέσει η μεταφόρτωση παράγοντα ελαχιστοποίησης του κόστους είναι οι παρακάτω [ΤΕΕ, 2006]:

- Η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων απορριμμάτων σε μεγάλες αποστάσεις.
- Η χρήση μικρών οχημάτων (ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές με στενούς δρόμους).
- Η εκμετάλλευση του ΣΜΑ από πολλά απορριμματοφόρα.

Βέβαια, τόσο η χωροθέτηση, όσο και η λειτουργία, ενός ΣΜΑ δεν αποτελούν εύκολο έργο, καθώς συνήθως τυγχάνουν της ίδιας αντιμετώπισης με έναν ΧΥΤΑ από τους πολίτες. Για το λόγο αυτό, η υλοποίηση και η αξιοποίηση ενός ΣΜΑ πρέπει να αποφασίζεται με σύνεση, λαμβάνοντας υπόψη πολλές παραμέτρους και κυρίως έχοντας αποδείξει πέραν καμίας αμφιβολίας της αναγκαιότητάς του, λόγω σημαντικού οικονομικού και περιβαλλοντικού οφέλους.

2.4 Συστήματα αποκομιδής απορριμμάτων

2.4.1 Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση

Τα βήματα, που θα πρέπει να ακολουθηθούν, προκειμένου οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων να διευκολυνθούν κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος αποκομιδής, συνοψίζονται ως εξής [ΤΕΕ, 2006]:

- Ορισμός και εξειδίκευση του προβλήματος: διατύπωση του προβλήματος των προδιαγραφών, αναγκών και απαιτήσεων.
- Συλλογή και απογραφή δεδομένων: απογραφή όλων των αρμόδιων και σχετικών φορέων της κοινότητας και συλλογή δεδομένων και βασικών πληροφοριών (δημογραφικά, μορφωτικά, κοινωνικά, οικονομικά, τεχνολογικά, κ.ά. στοιχεία).

- Αξιολόγηση και σύνθεση εναλλακτικών λύσεων: Αξιολόγηση και ανάλυση των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν κατά το βήμα 2 και διαμόρφωση σχεδίου.
- Εξέταση βιωσιμότητας και κόστους υλοποίησης εναλλακτικών λύσεων.
- Επιλογή προγραμμάτων και σχεδίων: επιλογή εναλλακτικών λύσεων και επανεξέταση αυτών και πιθανή τροποποίηση.
- Ανάπτυξη χρονοδιαγράμματος υλοποίησης: ένα επαρκώς ορισμένο διάγραμμα δύναται να μειώσει τις αστοχίες κατά το σχεδιασμό.
- Οργάνωση της πορείας υλοποίησης: καθορισμός απαραίτητων ενεργειών και δράσεων για επίτευξη του στόχου και διαμόρφωση λεπτομερούς διαγράμματος δραστηριοτήτων.
- Υλοποίηση σχεδίου.
- Τήρηση χρονοδιαγράμματος και εφαρμογή του σχεδίου.
- Αξιολόγηση σχεδίου.
- Χρήση δεικτών αξιολόγησης και μεταβολή του συστήματος σε περίπτωση εύρεσης αδυναμιών ή αστοχιών.

Για ένα επιτυχή σχεδιασμό και εφαρμογή, τα παρακάτω έχουν ιδιαίτερη σημασία:

- Υπάρχουσα κατάσταση.
- Υφιστάμενος εξοπλισμός και ανθρώπινο δυναμικό.
- Ανάγκες εξοπλισμού.
- Επιστημονική στήριξη.
- Υπεύθυνη ομάδα για το σχεδιασμό.
- Υπεύθυνη ομάδα για την παρακολούθηση.
- Σχεδιασμός ενημέρωσης δημοτών.
- Μελλοντικές βλέψεις.
- Εμπλεκόμενοι φορείς.
- Χρήστες.
- Κανονισμοί.

Από το Υπουργείο Εσωτερικών προτείνεται η εξής αναλυτική μεθοδολογία διαχείρισης των απορριμμάτων στα πλαίσια ενός ΟΤΑ, με στόχο την αποτελεσματική / βέλτιστη αποκομιδή των παραγόμενων απορριμμάτων και όχι μόνο.

1. Καταγραφή των ποσοτήτων των αστικών αποβλήτων που διαχειρίζεται ο Δήμος από στοιχεία που τηρεί στην υπηρεσία, από ζυγίσεις στον ΧΥΤΑ (εφόσον υπάρχει και λειτουργεί) ή άλλες σχετικές μετρήσεις ή εκτιμήσεις, σε σχέση με τα αδρανή, κλαδιά δένδρων, απορρίμματα κήπου, μεταχειρισμένα ελαστικά και άλλα ειδικά απόβλητα, που πιθανόν συλλέγει. Καταγραφή και της υφιστάμενης ποιοτικής σύστασης των αποβλήτων, εφόσον είναι εφικτό, άλλως θα γίνουν προσομοιώσεις με άλλες παρεμφερείς περιοχές.
2. Καταγραφή όλου του βασικού εξοπλισμού της υπηρεσίας καθαριότητας (πχ. απορριμματοφόρα, μηχανικά σάρωθρα, φορτηγά, JCB, υδροφόρες, πλυντήριο κάδων, κλπ.), καθώς επίσης και του σχετικού εξοπλισμού του αμαξοστασίου (αντλίες καυσίμων, εξοπλισμός συνεργείων, κλπ.). Η καταγραφή θα αφορά βασικά σε ποσότητες, ηλικία, δυναμικότητα, χωρητικότητα.
3. Προσεγγιστική αποτύπωση σε χάρτη της θέσης των κάδων και υπολογισμό σε EXCEL του αριθμού, του τύπου, της χωρητικότητας, καθώς και της ποιοτικής τους κατάστασης.
4. Καταγραφή των ημερήσιων διαδρομών: απορριμματοφόρων, μηχανικών σαρωθρων, φορτηγών συλλογής ογκωδών αποβλήτων, κλαδεμάτων, αδρανών.
5. Καταγραφή αριθμού, ηλικίας, ειδικότητας, σχέσης εργασίας (μόνιμοι, εποχιακοί) του προσωπικού της υπηρεσίας καθαριότητας, της δ/σης, τμήματος, γραφείου, που ανήκει βάσει του οργανογράμματος του Δήμου και του εγκεκριμένου οργανισμού του.
6. Αναλυτική περιγραφή του συστήματος οδοκαθαρισμού (μηχανικού, χειρωνακτικού) και του συστήματος συλλογής, μεταφοράς, μεταφόρτωσης. Εντοπισμός ευπαθών σημείων.
7. Πραγματοποίηση συνεντεύξεων με το προσωπικό της καθαριότητας για τον τρόπο λειτουργίας τους και τον εντοπισμό τυχόν παραπόνων, προβλημάτων. Έλεγχος του ωραρίου λειτουργίας, των αμοιβών, της κατάρτισης των εργαζομένων, καταγραφή τυχόν δυσλειτουργιών μεταξύ των διοικητικών υπηρεσιών του δήμου (τμήμα προμηθειών, οικονομικά, τεχνική υπηρεσία), του

- βαθμού τήρησης προληπτικής και προγραμματισμένης συντήρησης, της παλαιότητας του εξοπλισμού, κλπ..
8. Συγκριτική αξιολόγηση των διαφόρων συστημάτων συλλογής, προσωρινής αποθήκευσης, μεταφοράς, μεταφόρτωσης και τελικής διάθεσης απορριμμάτων που σχηματικά περιλαμβάνει τα εξής: σύγκριση των μέσων προσωρινής αποθήκευσης (πχ. χάρτινες σακούλες έναντι των πλαστικών, μεταλλικοί κάδοι έναντι των πλαστικών), των απορριμματοφόρων οπισθίας, πλαγίας και εμπροσθίας φόρτωσης, των σταθμών μεταφόρτωσης μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, καθώς επίσης και των αντίστοιχων δεδομένων για τη διάθεση.
 9. Αναλυτική καταγραφή των προϋπολογισμών για εργασίες καθαριότητας και διαχείρισης στερεών αποβλήτων σε συνδυασμό με τα ύψη των ανταποδοτικών τελών της τελευταίας πενταετίας.
 10. Συλλογή όλων των απαραίτητων στοιχείων για την κατάρτιση γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (GIS). Συλλογή υπαρχόντων χαρτών (πολεοδομικών) και σε συνεργασία με την υπηρεσία καθορισμό των στοιχείων που πρέπει να αποτυπωθούν και διαμόρφωση σχετικής πρότασης κόστους κατάρτισης GIS.
 11. Διερεύνηση και αποτύπωση όλων των υποχρεώσεων του Δήμου, που προκύπτουν από την κοινοτική και εθνική νομοθεσία, όπως π.χ. θέματα αδειοδότησης για τη συλλογή των αστικών αποβλήτων, διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων, κ.α..
 12. Προσδιορισμός της θέσης του Δήμου αναφορικά με τη διαχείριση των ειδικών αποβλήτων (μπαταρίες, συσσωρευτές, αδρανή απόβλητα, απόβλητα από ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, μεταχειρισμένα ελαστικά, συσκευασίες), που προκύπτουν από την εφαρμογή του νόμου και των αντιστοίχων Προεδρικών Διαταγμάτων περί εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισης, κλπ..
 13. Αναθεώρηση του υφιστάμενου κανονισμού καθαριότητας με τα νέα δεδομένα, που προκύπτουν, τόσο από την κοινοτική, όσο και από την εθνική νομοθεσία, ώστε να καταστεί λειτουργικός και να καλύπτει τις υποχρεώσεις των πολιτών και του Δήμου. Κατάρτιση πίνακα κριτηρίων χωροθέτησης των κάδων, που αποτελεί ίσως το πιο κρίσιμο σημείο τριβών πολιτών και Δήμου και καθορισμός της συμβολής της Δημοτικής Αστυνομίας στην εύρυθμη λειτουργία της καθαριότητας της πόλης.

14. Καθορισμός, σε πρώτη φάση, ζωνών προτεραιότητας και, σε συνεργασία με την υπηρεσία καθαριότητας, τεχνικών προδιαγραφών καθαριότητας ανά ζώνη, με στόχο την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας, χρόνου αποκατάστασης της καθαριότητας, κλπ. και βαθμολόγηση των σχετικών παραμέτρων έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή να μπορεί ο Δήμος, με δειγματοληπτική φωτογραφική μεθοδολογία, να λέει ότι το σύνολο της έκτασής του, τμήμα αυτής ή ακόμη και κάποια μικρή οδός «είναι τόσο τοις εκατό καθαρή». Στη συνέχεια θα μπορούσε η μέθοδος να προταθεί στο αρμόδιο Υπουργείο για νομοθέτηση «τεχνικών προδιαγραφών καθαριότητας», κάτι που δεν υφίστανται μέχρι σήμερα.
15. Σύνταξη πίνακα δεικτών επίδοσης καθαριότητας, ο οποίος μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο μέτρησης δεικτών επίδοσης στο πλαίσιο της μέτρησης της απόδοσης των υπηρεσιών ΟΤΑ, σύμφωνα και με τα προβλεπόμενα από τη νέα νομοθεσία.
16. Σύνταξη μελέτης σκοπιμότητας για τη δυνατότητα εγκατάστασης ηλεκτρονικού κέντρου ελέγχου στόλου απορριμματοφόρων (fleet management) στο Δήμο, όπου μέσω τηλεματικής θα παρακολουθείται η θέση των απορριμματοφόρων ανά πάσα στιγμή και θα μετρώνται οι χρόνοι συλλογής - μεταφοράς με στόχο τη βελτιστοποίηση των διαδρομών των απορριμματοφόρων.

Το σύστημα επικοινωνίας και διαχείρισης στόλου οχημάτων, στοχεύει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της υπηρεσιακής δράσης των οχημάτων και στην αναβάθμιση των προσφερομένων υπηρεσιών, με την ταυτόχρονη μείωση των λειτουργικών δαπανών.

Στη Διεύθυνση Καθαριότητας εξετάζεται κατά πόσο συμφέρει να λειτουργεί σύστημα φωνητικής επικοινωνίας και διαχείρισης στόλου οχημάτων, το οποίο αρχικά θα τοποθετηθεί σε ένα μικρό αριθμό από οχήματα διαφόρων τύπων, με δυνατότητα καταγραφής στοιχείων όπως π.χ. δρομολόγια, όρια ταχύτητας, καταγραφή κάδων, κλπ.. Ο Δήμος αξιολογώντας τη χρησιμότητα του συστήματος, με το πέρας της ετήσιας χρήσης του, θα προχωρήσει ή όχι στην εφαρμογή του στο σύνολο των υπηρεσιακών λειτουργιών της Διεύθυνσης Καθαριότητας.

Το «νέο σύστημα επικοινωνίας και διαχείρισης στόλου οχημάτων» είναι ένα αυτόματο πληροφοριακό σύστημα ελέγχου της κίνησης των οχημάτων σε πραγματικό χρόνο (online), στηριζόμενο στις τεχνολογίες του δορυφορικού

συστήματος εντοπισμού GPS (Global Positioning System), τηλεπικοινωνιακών διασυνδέσεων TETRA (Trans-European Trunked RAdio) με τυποποίηση από το ETSI (Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακής Τυποποίησης), που δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες του να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα των Ιδιωτικών Ραδιοεπικοινωνιών, με τα πλεονεκτήματα της Κινητής Τηλεφωνίας και των Υπηρεσιών Μετάδοσης δεδομένων (on-line) με χαμηλό κόστος επικοινωνίας (χωρίς χρέωση οι κλήσεις εντός των ομάδων, οι κλήσεις ανάγκης και η αποστολή των προκαθορισμένων μηνυμάτων), σε συνδυασμό με το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.

Το σύστημα TETRA σήμερα εφαρμόζεται ήδη στον στο Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών (ΔΑΑ) "Ελευθέριος Βενιζέλος", στον Οργανισμό Λιμένος Πειραιώς και στην Αττική Οδό. Το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού GPS (Global Positioning System) αποτελεί παγκοσμίως ένα δοκιμασμένο σύστημα εντοπισμού αντικειμένων και σημείων στη γεωγραφική διάσταση. Η μεταφορά των δεδομένων από τα οχήματα προς το κέντρο μέσω δικτύου TETRA, εξασφαλίζει την ταχύτατη και ασφαλή μετάδοσή τους, με το χαμηλότερο κόστος. Η ψηφιακή φωνητική επικοινωνία του στόλου οχημάτων με το κέντρο επιχειρήσεων, το γραφείο κίνησης, τα εποπτικά όργανα και τα υπόλοιπα μέρη της Διεύθυνσης Καθαριότητας μέσω δικτύου TETRA, εξασφαλίζει ταχύτατο και ασφαλή τρόπο επικοινωνίας, με το χαμηλότερο κόστος και τη μεγαλύτερη ασφάλεια παρέχοντας κρυπτοφωνημένη επικοινωνία. Η χρήση του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών επιτρέπει τη σύνδεση του συστήματος με τη γεωγραφική διάσταση (εντοπισμός οχημάτων επί χάρτου), αξιοποιώντας την υπάρχουσα υποδομή του Δήμου στο χώρο.

17. Σύνταξη των κάτωθι οδηγών

- α) Πρότυπου οδηγού διαχείρισης κάδων, που θα περιέχει παραμέτρους που επηρεάζουν τη χωροθέτηση των κάδων, θέματα οργάνωσης της διαχείρισης τους, δημιουργίας μητρώου κάδων, κριτήρια χωροθέτησής τους, ζητήματα συμπεριφοράς των πολιτών σχετικά με τους κάδους, Ευρωπαϊκά Πρότυπα.
- β) Πρότυπου οδηγού για οργάνωση εκστρατείας καθαριότητας από ανεξέλεγκτες απορρίψεις, που θα περιλαμβάνει μία κωδικοποίηση των ενεργειών στις οποίες πρέπει να προβεί ο Δήμος για να υλοποιήσει «ημέρες

καθαριότητας», με στόχο την ευαισθητοποίηση των πολιτών σε συνδυασμό και με τις τουριστικές περιόδους.

γ) Με δεδομένες και τις υποχρεώσεις της χώρας μας για μείωση των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων σε συνδυασμό με την καθαριότητα του Δήμου, πρότυπου οδηγού για τη διαχείριση των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων που παράγονται από πιτσαρίες, φούρνους, σουβλατζίδικα, ταχείας εξυπηρέτησης εστιατόρια, supermarkets κλπ..

δ) Πρότυπου οδηγού για μείωση του απορριπτόμενου χαρτιού από τα γραφεία, τόσο του δημόσιου, όσο και του ιδιωτικού τομέα, ο οποίος θα συμπεριλαμβάνει και οδηγίες για μείωση του χαρτιού που παράγεται κατά τη χρήση φωτοτυπικών μηχανημάτων, τη διαδικασία αναγγελίας – κοινοποίησης εγγράφων, τη λειτουργία Η/Υ.

ε) Πρότυπου πρακτικού οδηγού για την ασφάλεια των εργαζομένων στην υπηρεσία καθαριότητας, με στόχο τη μείωση των ατυχημάτων στον τομέα της καθαριότητας, κυρίως κατά τη συλλογή, μεταφορά και τελική διάθεση των απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ, ο οποίος θα περιλαμβάνει οδηγίες που αναδεικνύονται μέσα από εμπειρίες τόσο στον ελληνικό όσο και στον Διεθνή χώρο.

στ) Καταλόγων που θα περιλαμβάνουν

- Την υφιστάμενη μέχρι σήμερα εθνική (Νόμοι, Π.Δ/τα, Αποφάσεις) και κοινοτική νομοθεσία (οδηγίες, αποφάσεις, κανονισμούς) που σχετίζεται με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων.
- Την υφιστάμενη νομοθεσία που σχετίζεται με την καθαριότητα.
- Την υφιστάμενη νομοθεσία για την υγιεινή και ασφάλεια στην ΔΣΑ.
- Τα υφιστάμενα ευρωπαϊκά πρότυπα EN στη ΔΣΑ και τις αναμενόμενες εξελίξεις στον τομέα.

18. Διερεύνηση των εναλλακτικών συστημάτων χρηματοδότησης – δανεισμού για την προμήθεια εξοπλισμού της υπηρεσίας καθαριότητας (κύρια από το Ταμείο Παρακαταθηκών και Δανείων και με Leasing).

19. Καταγραφή των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων, τόσο του ιδιωτικού, όσο και του δημόσιου τομέα, από διεθνείς και από ελληνικές εμπειρίες, εστιαζόμενες κυρίως στα χαρακτηριστικά του Δήμου, ώστε να μπορεί ο Δήμος να πάρει μελλοντικές αποφάσεις.

20. Κατάρτιση προγράμματος επιμόρφωσης του προσωπικού υπό τη μορφή θεματικών ενοτήτων για τις διάφορες κατηγορίες προσωπικού.
21. Χορήγηση, για ένα έτος, τεχνικής υποστήριξης σχετικά με την παραγόμενη κοινοτική και εθνική νομοθεσία (ενημέρωση επί της παραγόμενης νομοθεσίας) καθώς και on-line συμβουλευτική υποστήριξη επί θεμάτων που απασχολούν την υπηρεσία μέσω του διαδικτύου.
22. Τέλος, σύνταξη επιχειρησιακού προγράμματος – σχεδίου δράσης που θα εξειδικεύει τις παραπάνω δράσεις σε χρονικό ορίζοντα 5ετίας. Το επιχειρησιακό πρόγραμμα θα περιλαμβάνει επιμέρους δράσεις, κόστος και ενδεικτικό χρονοδιάγραμμα εφαρμογής τους με σκοπό τη σταδιακή και με σταθερό ρυθμό βελτίωση των συνθηκών καθαριότητας στον Δήμο, ώστε να γίνει σε μία πενταετία *«ένας από τους καθαρότερους δήμους της χώρας»*.

2.4.2 Αξιολόγηση (Benchmarking)

Η αξιολόγηση των συστημάτων αποκομιδής απορριμμάτων, καθώς επίσης και η αποδοτικότητα και παραγωγικότητα των υπηρεσιών καθαριότητας των ΟΤΑ, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη σύγκριση συμφωνημένων δεικτών αξιολόγησης, οι οποίοι περιγράφουν συγκεκριμένους τομείς του ολικού συστήματος, από διοικητικό έως λειτουργικό επίπεδο. Η μέθοδος καλείται «Benchmarking» (οροθέτηση επιδόσεων ή συγκριτική ανάλυση (αξιολόγηση) επιδόσεων) και η εφαρμογή της είναι ήδη γνωστή διεθνώς κυρίως στις ιδιωτικές εταιρίες [TEE, 2006].

Οι στόχοι της μεθόδου είναι η ανεύρεση καλύτερων τρόπων και μεθόδων να εκτελεστεί το έργο των υπηρεσιών. Συγκεκριμένα το Benchmarking είναι μια διαδικασία εξεύρεσης, κατανόησης και προσαρμογής των καλύτερων πρακτικών, τόσο μέσα από την ίδια υπηρεσία καθαριότητας, όσο και από άλλες αντίστοιχες ώστε να επιτευχθεί βελτίωση και αύξηση της αποδοτικότητας-παραγωγικότητας. Αυτό περιλαμβάνει αξιολόγηση και σύγκριση διαδικασιών, βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο μία υπηρεσία να καθορίσει νέους στόχους και πρότυπα, τα οποία βελτιώνουν και προσθέτουν αξία στις διαδικασίες της, παρέχοντας καλύτερη απόδοση και βελτιωμένη ποιότητα [Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002].

Οι υποχρεώσεις των ΟΤΑ για προστασία του περιβάλλοντος αυξάνονται. Οι ΟΤΑ θέλουν να βελτιώσουν την ποιότητα των υπηρεσιών τους, αλλά ταυτόχρονα να

περιορίσουν το κόστος. Η ανάγκη οικονομικής και διαχειριστικής διαφάνειας απέναντι στο κράτος, όσο και στους πολίτες, αποτελεί απαίτηση. Συχνά οι ΟΤΑ χρησιμοποιούν τα νομικά επιτρεπτά επίπεδα, ως σταθερές για αξιολόγηση που αφορά στην περιβαλλοντική ποιότητα. Βάση αυτών των επιπέδων θέτονται και οι στόχοι (π.χ. όρια εκπομπών). Παρόλα αυτά ειδικά όταν γίνεται αναφορά στο κόστος για την προστασία του περιβάλλοντος ή στην ικανοποίηση των απαιτήσεων και αναγκών των πολιτών, οι ΟΤΑ αδυνατούν να περιγράψουν ή να ποσοτικοποιήσουν την αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών τους. Η σύγκριση με άλλους ΟΤΑ έρχεται να τους βοηθήσει να αξιολογήσουν τις προσπάθειες τους και να αναγνωρίσουν τα κενά στις εφαρμοζόμενες πρακτικές [TEE, 2006].

Η διαδικασία του Benchmarking ακολουθεί μια σειρά ενεργειών-σταδίων. Κάθε στάδιο πρέπει να ολοκληρώνεται πριν ακολουθήσει το επόμενο. Τα στάδια αυτά είναι γενικά τα εξής [TEE, 2006 - Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002]:

- Προσδιορισμός και κατανόηση των διαδικασιών.
- Καθορισμός του τι θα πρέπει να μετρηθεί.
- Επιλογή του είδους των μετρήσεων που θα χρησιμοποιηθεί.
- Προσδιορισμός σε ποιους και σε τι θα γίνουν οι μετρήσεις.
- Συλλογή στοιχείων.
- Ανάλυση των στοιχείων και εντοπισμός αποκλίσεων.
- Καθορισμός στόχων και ανάπτυξη σχεδίου δράσης.
- Παρακολούθηση και έλεγχος διαδικασιών.

Μέχρι στιγμής, έχουν αναπτυχθεί τέσσερις τύποι benchmarking [TEE, 2006 - Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002]:

- Benchmarking Διαδικασιών επικεντρώνεται σε συγκεκριμένες διαδικασίες και λειτουργικά συστήματα. Μπορεί να εξετάζει π.χ. τις υπηρεσίες στον πελάτη, την τιμολόγηση ή τη διαδικασία στρατηγικού σχεδιασμού. Το Benchmarking Διαδικασιών στοχεύει στο να προσδιορίσει τα πιο αποτελεσματικά λειτουργικά συστήματα από άλλες επιχειρήσεις/ οργανισμούς, οι οποίοι έχουν παρόμοια δραστηριότητα ή παρέχουν παρόμοιες υπηρεσίες.
- Benchmarking Επιδόσεων είναι ανταγωνιστικό benchmarking και επιτρέπει στους φορείς να εκτιμήσουν τις ανταγωνιστικές τους θέσεις με συγκρίσεις υπηρεσιών, ή ακόμη και προϊόντων. Είναι επίσης γνωστό ως benchmarking

άμεσων ανταγωνιστών (direct competitors). Αυτή η εφαρμογή επικεντρώνεται σε στοιχεία όπως η τιμή, η ποιότητα, η ταχύτητα, η αξιοπιστία και άλλα χαρακτηριστικά επίδοσης.

- Στρατηγικό Benchmarking εξετάζει πως ανταγωνίζονται οι υπηρεσίες μεταξύ τους. Αφορά κυρίως την αναζήτηση καλών πρακτικών που επέτρεψαν στους έχοντες υψηλές επιδόσεις να είναι επιτυχημένοι. Επηρεάζει κυρίως τα μακροπρόθεσμα σχέδια μιας υπηρεσίας και τα θετικά αποτελέσματα φαίνονται με πιο αργούς ρυθμούς από ότι στο Benchmarking Διαδικασιών.
- Επιπρόσθετα με αυτούς τους τρεις βασικούς τύπους benchmarking υπάρχει επίσης το Εσωτερικό Benchmarking. Αφορά στην αναζήτηση καλών πρακτικών στο εσωτερικό της υπηρεσίας και την προσπάθεια εγκαθίδρυσής τους σε σταθερή βάση σε ολόκληρη την υπηρεσία.

Στη συνέχεια αναφέρονται μερικοί δείκτες αξιολόγησης των υπηρεσιών καθαριότητας, κατηγοριοποιημένοι σε τρεις ομάδες: (α) αποκομιδή, (β) τελική διάθεση και (γ) καθαριότητα οδών [TEE, 2006 - Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002]:

Αποκομιδή απορριμμάτων

1. Δείκτες φόρτου εργασίας = Παρέχουν μέτρηση του φόρτου εργασίας – επιτρέπουν διαχρονική σύγκριση – παρέχουν δεδομένα για τον υπολογισμό του μοναδιαίου κόστους.

- Αριθμός πολιτών και νοικοκυριών που εξυπηρετούνται.
- Πυκνότητα πληθυσμού και νοικοκυριών.
- Ποσοστό αστικής περιοχής και εμπορικής δραστηριότητας.
- Τόνοι που παράγονται (ετησίως, εβδομαδιαίως, ημερησίως).
- Παραγωγή ανά άτομο.
- Παραγωγή ανά στρέμμα / ανά στρέμμα και νοικοκυριό / ανά στρέμμα και άτομο.
- Ποσοστό βιομηχανικής, αγροτικής και εμπορικής παραγωγής.

- Αριθμός υπαλλήλων (διοικητικών και εργατών).
- Αριθμός υπαλλήλων / κάτοικο - ανά νοικοκυριό - ανά στρέμμα - ανά νοικοκυριό και στρέμμα.
- Αριθμός οχημάτων.
- Αριθμός οχημάτων / κάτοικο - ανά νοικοκυριό. - ανά στρέμμα. - ανά κάτοικο (ή τόνο) και στρέμμα - ανά νοικοκυριό και στρέμμα.
- Συχνότητα αποκομιδής.
- Σύνθεση στερεών αποβλήτων.
- Κλιματολογικές συνθήκες.
- Έδαφος.
- Μέσος μισθός υπαλλήλων.
- Είδος φορέα αποκομιδής.
- Συνολικά χιλιόμετρα δρομολογίων.
- Αριθμός πληρώματος σε κάθε όχημα.
- Είδη κάδων.
- Είδη οχημάτων.

2. Δείκτες αποτελεσματικότητας = Προσδιορίζουν ποσοτικά εάν επιτεύχθηκαν οι στόχοι της υπηρεσίας.

- Ποσοστό προγραμματισμένων δρομολογίων που δεν έγιναν.
- Ποσοστό δρομολογίων που δεν ολοκληρώθηκαν σύμφωνα με το πρόγραμμα.
- Ποσοστό δρόμων που κρίνονται ως καθαροί (στόχοι υπηρεσίας).
- Μέσος όρος ικανοποίησης πελατών.
- Αριθμός παραπόνων πελατών.

3. Δείκτες αποδοτικότητας

- Κόστος ανά τόνο στερεών αποβλήτων που συλλέχθηκαν.
- Κόστος ανά άτομο / ανά άτομο και τόνο συλλογής / ανά νοικοκυριό / ανά στρέμμα (ή χιλιόμετρο δρομολογίων) / ανά νοικοκυριό και στρέμμα (ή χιλιόμετρο δρομολογίων) / ανά άτομο και στρέμμα (ή χιλιόμετρο δρομολογίων).
- Τόνοι συλλογής ανά υπάλληλο συλλογής / ανά όχημα.

- Αριθμός διοικητικών / εργατοϋπαλλήλων αποκομιδής.
- Μέσος όρος νοικοκυριών ή ατόμων ανά χιλιόμετρο διαδρομής αποκομιδής.
- Ποσοστό ανακυκλώσιμων που ανακυκλώνονται.

Διάθεση στερεών αποβλήτων

1. Δείκτες φόρτου εργασίας

- Αριθμός προσωπικού / ανά νοικοκυριό ή ανά άτομο που εξυπηρετείται ή ανά τόνο που δέχεται ο χώρος.
- Αριθμός οχημάτων.
- Τόνοι που διατίθενται στο χώρο.
- Πραγματικοί τόνοι που υπέστησαν επεξεργασία σε μια χρονική περίοδο.
- Μέσος όρος απορριμμάτων που υπόκεινται σε επεξεργασία ημερησίως.
- Όγκος της χωματερής που χρησιμοποιήθηκε.
- Σύνθεση απορριμμάτων που διατίθενται στο χώρο.
- Είδος φορτηγού χώρου.
- Είδος και όγκος κάλυψης χωματερής.
- Είδη ελέγχων ρύπανσης.
- Κλιματολογικές συνθήκες.
- Μελλοντική χρήση χωματερής (αριθμός τόνων υπολειπόμενης).
- Δυναμικότητα (χωρητικότητα).
- Όγκος ημερήσιας επεξεργασίας (σε τόνους).
- Αριθμός ετών λειτουργίας.

2. Δείκτες αποτελεσματικότητας

- Ποσοστό ημερών που τα περιβαλλοντικά πρότυπα τηρούνται (απόπλυση επιφανειακά ύδατα, υπόγεια ύδατα, επιβλαβή αέρια) : εκτιμά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Τόνοι τοξικών υλικών ως ποσοστό του συνόλου των υλικών που εναποτίθενται στο χώρο : εκτιμά τη ζημία στο έδαφος.
- Ποσοστό ανεξάρτητων επιθεωρήσεων που ανιχνεύουν οσμές, μπάζα, ή ηχορύπανση.
- Αριθμός παραπόνων πολιτών.

- Δαπάνες για ανθρώπινους τραυματισμούς ή υλικές ζημιές εξ αιτίας της λειτουργίας του χώρου.
- Έσοδα από τη διάθεση.
- Έσοδα ανά άτομο ή νοικοκυριό ή τόνο-> δηλώνει την οικονομική συνεισφορά του χώρου.
- Ποσοστό εσόδων ως προς τα συνολικά έξοδα.

3. Δείκτες αποδοτικότητας

- Κόστος ανά τόνο απορριμμάτων που επεξεργάστηκαν ή διατέθηκαν προς ταφή.

Καθαριότητα δρόμων

1. Δείκτες φόρτου εργασίας

- Αριθμός προσωπικού / προσωπικού ανά άτομο / ανά άτομο και χιλιόμετρο δρόμων / ανά χιλιόμετρο δρόμων.
- Αριθμός οχημάτων / ανά άτομο / ανά άτομο και χιλιόμετρο δρόμων / ανά χιλιόμετρο δρόμων.
- Αριθμός οδικών χιλιομέτρων που καθαρίζονται.
- Τόνοι απορριμμάτων που συλλέγονται.
- Τόνοι ανά οδικό χιλιόμετρο.
- Συχνότητα καθαρισμών των δρόμων ανά χρονική περίοδο.
- Οδικά χιλιόμετρα προς καθαρισμό.
- Έδαφος.
- Κλιματολογικές συνθήκες.
- Κυκλοφοριακή κίνηση οχημάτων.
- Κίνηση πεζών.
- Συνθήκες παρκαρίσματος.
- Πυκνότητα δόμησης.
- Έκταση.
- Πυκνότητα πληθυσμού.

2. Δείκτες αποτελεσματικότητας

- Ποσοστό σκουπισμάτων που δεν ολοκληρώθηκαν σύμφωνα με το πρόγραμμα.
- Μέσος όρος ικανοποίησης πολιτών.
- Ποσοστό δρόμων που κρίθηκαν αποδεκτά καθαροί.

3. Δείκτες αποδοτικότητας

- Κόστος ανά καθαρισμένο οδικό χιλιόμετρο.
- Κόστος ανά τόνο απορριμμάτων που συλλέχθηκαν.

Πιθανά αποτελέσματα του Benchmarking αποτελούν τα εξής:

- Ποσοτικοποίηση και μέτρηση της απόδοσης των υπηρεσιών καθαριότητας.
- Βελτίωση της παραγωγικότητας, απόδοσης και αποδοτικότητας.
- Δημιουργία ανταγωνιστικού περιβάλλοντος.
- Προσδιορισμός βέλτιστων πρακτικών.
- Μείωση κόστους και κατανάλωσης χρόνου.
- Βελτίωση διαδικασίας λήψης αποφάσεων.
- Επικέντρωση στα προβλήματα και στα κενά της υπηρεσίας.
- Βελτίωση τεχνολογίας και αναβάθμιση τεχνογνωσίας.
- Προσδιορισμός αναγκών εκπαίδευσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

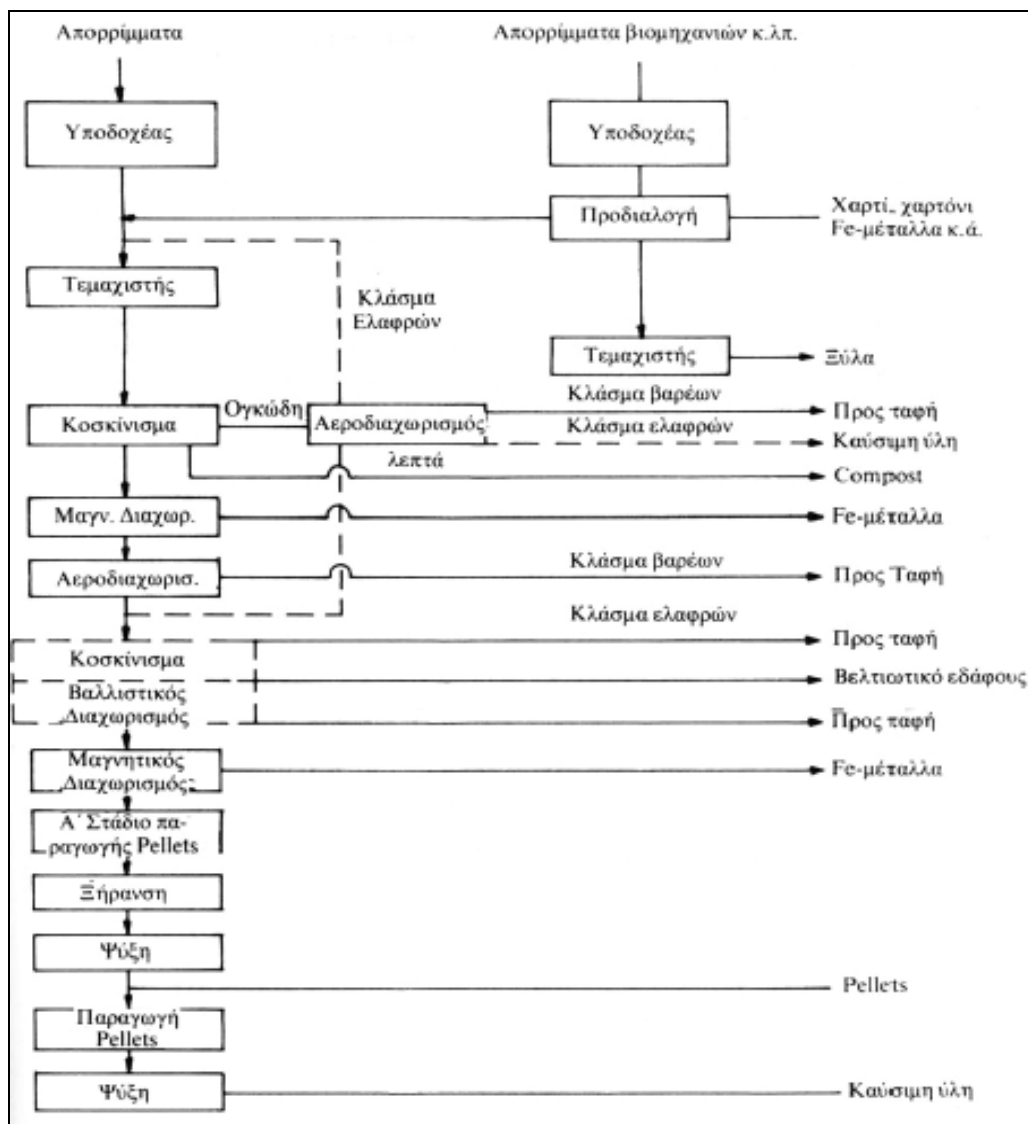
Ανακύκλωση

3.1 Βασικές αρχές

Η ανακύκλωση αποτελεί μια τεχνική μετατροπής υλικών, κατά την οποία από ένα μίγμα αποβλήτων είναι δυνατό να ανακτηθούν αξιοποιήσιμα υλικά, μέσω διεργασιών διαχωρισμού και ταξινόμησης (Διάγραμμα 3.1). Τα υλικά, που ανακτώνται, ονομάζονται και δευτερογενείς πρώτες ύλες. Για το λόγο αυτό μια διεργασία ανακύκλωσης μπορεί να χαρακτηριστεί και ως διαδικασία παραγωγής νέων υλικών. Η παραγωγική αυτή διαδικασία αποτελείται από διαφορετικά στάδια, τα οποία και αλληλοσυμπληρώνονται, έτσι ώστε να αποτελέσουν τη βάση για την τροποποίηση των υπαρχόντων υλικών και την ανάκτηση νέων υλικών από αυτά.

Τόσο η πρωτογενής παραγωγική διαδικασία, όσο και η ανακύκλωση, δέχονται και δημιουργούν νέα απόβλητα. Τα υλικά, που εισέρχονται στη διεργασία, ονομάζονται ρεύμα εισόδου, ενώ αυτά που εξέρχονται χαρακτηρίζονται ως ρεύμα εξόδου. Για την αύξηση της απόδοσης και την ανάπτυξη νέων διεργασιών ανακύκλωσης, από τις οποίες τελικά θα προκύπτουν υλικά υψηλής αξίας, απαιτείται ο καθορισμός της σύνθεσης του ρεύματος των αποβλήτων.

Σε μια διεργασία ανακύκλωσης ανάλογα με το σύστημα συλλογής ή διαχωρισμού δημιουργούνται διαφορετικά μίγματα ποσοτήτων των αποβλήτων στο ρεύμα εισόδου. Για το λόγο αυτό, κατά το σχεδιασμό μιας διεργασίας, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ο τρόπος συλλογής των αποβλήτων. Το είδος και ο τρόπος ανάμιξης του μίγματος είναι επίσης κύριος παράγοντας για τη διαμόρφωση της τεχνικής που θα εφαρμοστεί σε μια μονάδα ανακύκλωσης αποβλήτων [Γιδαράκος, 2004].

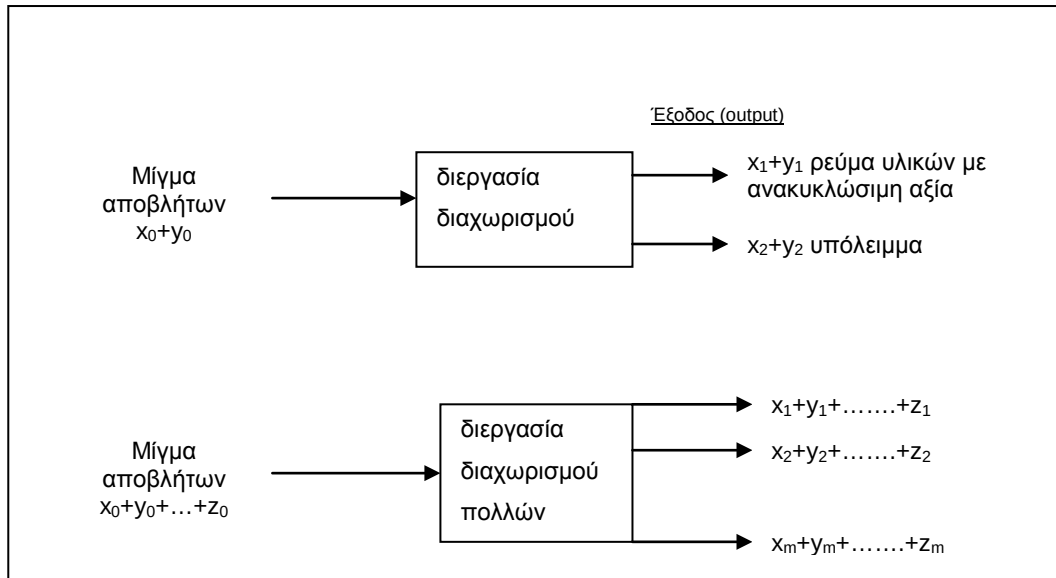


Διάγραμμα 3.1: Μονάδα ανακύκλωσης υλικών στη Βιέννη [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

3.2 Εκτίμηση απόδοσης

Σε μια παραγωγική μονάδα, ανάλογα με το σύστημα συλλογής ή διαχωρισμού των παραγόμενων αποβλήτων, δημιουργούνται διακεκριμένα ρεύματα αποβλήτων, κάθε ένα από τα οποία αποτελεί ξεχωριστό ρεύμα εισόδου (input) στην εκάστοτε εφαρμοζόμενη διεργασία ανακύκλωσης, ενώ παράλληλα διακρίνονται δυο ή περισσότερα ρεύματα εξόδου (output). Για παράδειγμα, κατά το διαχωρισμό του μεταλλικού σιδήρου από το κυρίως ρεύμα αποβλήτων με μαγνητική διεργασία δημιουργούνται δύο επιμέρους ρεύματα, ενώ κατά την ταξινόμηση μεγέθους με κοσκίνισμα δημιουργούνται περισσότερα από δύο επίπεδα διαχωρισμού. Στο

Διάγραμμα 3.2 απεικονίζονται δύο διαφορετικές διεργασίες διαχωρισμού, όπου στην πρώτη πραγματοποιείται διαχωρισμός σε δύο διαφορετικά ρεύματα, ενώ στην δεύτερη πραγματοποιείται διαχωρισμός σε πολλαπλά ρεύματα.



Διάγραμμα 3.2: Διεργασίες διαχωρισμού με δύο και πολλαπλά ρεύματα εξόδου.

Στην πρώτη περίπτωση στην είσοδο υπάρχει ένα μίγμα υλικών (σε tn/h ή m^3/h) x_0 και y_0 . Μετά τη διαδικασία της ανακύκλωσης έχουν δημιουργηθεί δύο νέα ρεύματα:

- $x_1 + y_1$: ανακυκλωμένο υλικό, που μπορεί να αξιοποιηθεί χωρίς πρόβλημα,
- $x_2 + y_2$: υπόλειμμα, που περιέχει χρήσιμα προς ανάκτηση υλικά και μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία.

Το πόσο αποτελεσματική είναι μια μονάδα ανακύκλωσης κατά το διαχωρισμό των συστατικών ενός μίγματος αποβλήτων εκφράζεται από την παράμετρο R_m , η οποία ονομάζεται δείκτης ανακύκλωσης και εκφράζει τη μάζα ενός συστατικού του προς ανακύκλωση μίγματος αποβλήτων, που ανακυκλώθηκε, προς την αρχική μάζα των αποβλήτων πριν την ανακύκλωση. Η παράμετρος R_m παρέχεται ως ποσοστό επί τοις εκατό για το ανακυκλωμένο υλικό x_1 από την ακόλουθη σχέση:

$$R(x_1) = \frac{x_1}{x_0} \cdot 100(\%) \quad (3-1)$$

όπου: $x_0 = x_1 + x_2$

Επομένως:

$$R(x_1) = \frac{x_0 - x_2}{x_1 + x_2} \cdot 100(\%) \quad (3-2)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται ευρέως στις διεργασίες ανακύκλωσης και εκφράζουν την ικανότητα ανακύκλωσης υλικών μέσω μιας συγκεκριμένης διεργασίας.

Παρόλα αυτά, η παράμετρος R_m δεν είναι δυνατόν να αποτελέσει τη μοναδική παράμετρο αξιολόγησης μιας διεργασίας ανακύκλωσης, εφόσον αν θεωρηθεί ότι $x_2=y_2=0$, τότε το ρεύμα εισόδου ταυτίζεται με το ρεύμα εξόδου και ενώ ουσιαστικά δεν έχει επιτευχθεί ανακύκλωση υλικών, ο δείκτης ανακύκλωσης R_m δείχνει ποσοστό απόδοσης της διεργασίας της ανακύκλωσης ίσο με 100%.

Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός μιας δεύτερης παραμέτρου P_m , η οποία ονομάζεται βαθμός καθαρότητας του ανακυκλώσιμου υλικού και χαρακτηρίζει την ποιότητα του υλικού που προκύπτει στην έξοδο της διεργασίας. Η παράμετρος αυτή λαμβάνει υπόψη και την παράμετρο y (ποσοστό των προσμίξεων) και προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$P(x_0) = \frac{x_1}{x_1 + y_1} \cdot 100(\%) \quad (3-3)$$

Κανονικά, για την περιγραφή μιας διεργασίας ανακύκλωσης με δύο ρεύματα εξόδου απαιτούνται και οι δύο παράμετροι P_m και R_m , προκειμένου να εκτιμηθεί απόλυτα ο βαθμός ανακύκλωσης των αποβλήτων.

Μια άλλη εξίσου σημαντική παράμετρος εκτίμησης της απόδοσης μιας διεργασίας ανακύκλωσης είναι η παράμετρος R_C (βαθμός διαχωρισμού υλικού), η οποία ορίζεται με τη βοήθεια της συγκέντρωσης ενός συγκεκριμένου συστατικού στο ρεύμα εισόδου (c_0) και στο ρεύμα εξόδου (c_1 και c_2), σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

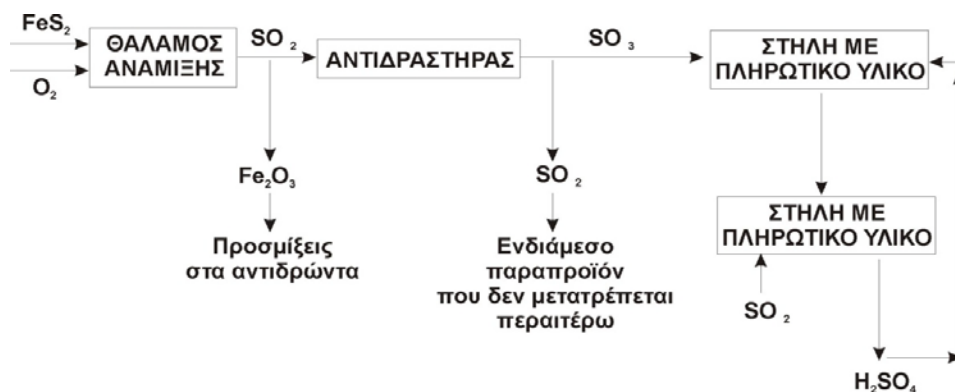
$$R(x_1) = \frac{x_1 c_1}{x_0 c_0} \cdot 100(\%) \quad (3-4)$$

όπου: $x_0 c_0 = x_1 c_1 + x_2 c_2$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$R(x_1) = \frac{c_1(c_0 - c_2)}{c_0(c_1 - c_2)} \cdot 100(\%) \quad (3-5)$$

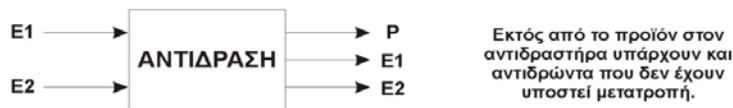
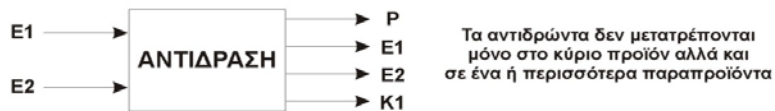
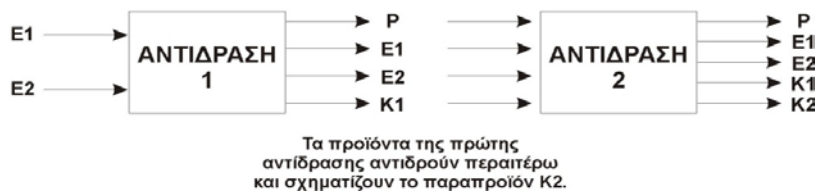
Ειδικά στην περίπτωση των χημικών βιομηχανιών υπάρχουν πολλά καλά παραδείγματα για το πώς μέσα από την τροποποίηση και την περιβαλλοντική βελτιστοποίηση μιας διεργασίας επιτυγχάνεται ο στόχος μιας «παραγωγικής διαδικασίας με ελάχιστα απόβλητα». Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μιας χημικής διεργασίας παραγωγής θειικού οξέος.



Σχήμα 3-1: Παράδειγμα χημικής διεργασίας παραγωγής H₂SO₄.

Οι περισσότερες χημικές αντιδράσεις είναι αμφίδρομες. Αποτέλεσμα αυτού είναι, ότι κατά την επίτευξη της χημικής ισορροπίας δεν επέρχεται πλήρης μετατροπή των αντιδρώντων σε προϊόντα. Παράλληλα, εξαιτίας δευτερευόντων αντιδράσεων, που λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα με την κύρια αντίδραση, παράγονται και πολλά ανεπιθύμητα παραπροϊόντα (Σχήμα 3-2).

Εκτός των παραπροϊόντων, εξαιτίας των αντιδράσεων, στο τελικό προϊόν εμπεριέχονται και άλλες προσμίξεις, που προέρχονται από την εφαρμογή της διεργασίας. Για την επίτευξη μεγάλης καθαρότητας του τελικού προϊόντος και για το διαχωρισμό του από προσμίξεις και παραπροϊόντα, έχουν αναπτυχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό διεργασίες διαχωρισμού. Με τον διαχωρισμό επιτυγχάνεται εκτός της βελτιστοποίησης της ποιότητας του προϊόντος, ανάκτηση χημικών ουσιών, που οδηγούνται εκ' νέου στην παραγωγική διαδικασία ως βοηθητικά υλικά.

ΚΥΡΙΑ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ**ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ****ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΥΡΙΑ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ****Σχήμα 3-2:** Επιγραμματική περιγραφή αντιδράσεων.

Βασικός στόχος κατά την εφαρμογή μιας παραγωγικής διαδικασίας με ελάχιστα απόβλητα είναι η ελαχιστοποίηση των παραπροϊόντων και των προσμίξεων. Με την ελαχιστοποίηση αυτή επιτυγχάνεται μείωση του κόστους λειτουργίας, αφού δεν απαιτούνται πλέον διεργασίες διαχωρισμού των παραπροϊόντων και των προσμίξεων.

Η παραγωγική διαδικασία μπορεί να τροποποιηθεί στα σημεία παραγωγής παραπροϊόντων ή να περιλαμβάνει κατάλληλη προεπεξεργασία των αντιδρώντων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η παραγωγή παραπροϊόντων. Για την ελαχιστοποίηση της ποσότητας των αντιδρώντων, που λόγω χημικής ισορροπίας δεν μετατρέπονται σε προϊόν, εφαρμόζονται κυρίως οι δύο ακόλουθες στρατηγικές:

- απομάκρυνση του προϊόντος από τον αντιδραστήρα (μετακίνηση της ισορροπίας της αντίδρασης προς την πλευρά των προϊόντων)
- επαναχρησιμοποίηση των αντιδρώντων, που εμπεριέχονται στο τελικό προϊόν μετά από διαχωρισμό και ανάκτησή τους

Βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας επέρχεται επίσης με την εφαρμογή καινούργιων και αποδοτικότερων διεργασιών, κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας και χρήση καταλυτών που υποβοηθούν την κύρια αντίδραση παραγωγής προϊόντος.

3.3 Υλικά ανακύκλωσης

Από τα υλικά, τα οποία περιλαμβάνονται στα οικιακά απορρίμματα, το χαρτί, το γυαλί, τα σιδηρούχα μέταλλα, το αλουμίνιο, τα πλαστικά και τα απορρίμματα κήπων (και γενικότερα τα βιοαποικοδομήσιμα οργανικά) θεωρούνται κατά τεκμήριο ανακυκλώσιμα. Συγκεκριμένα τα απορρίμματα που μπορούν να ανακυκλώνονται περιλαμβάνουν:

- Χαρτιά, χαρτόνια.
- Γυαλιά.
- PVC και άλλα πλαστικά.
- Μέταλλα όπως σίδηρος, αλουμίνιο, ψευδάργυρος κ.λ.π.
- Οργανικά απόβλητα
- Παλιά υφάσματα, ρούχα, κουρέλια.
- Ορυκτέλαια.
- Μεγάλου μεγέθους απόβλητα όπως έπιπλα που γίνονται αντίκες, ηλεκτρονικοί υπολογιστές και άλλες ηλεκτρικές-ηλεκτρονικές συσκευές, κ.λ.π.

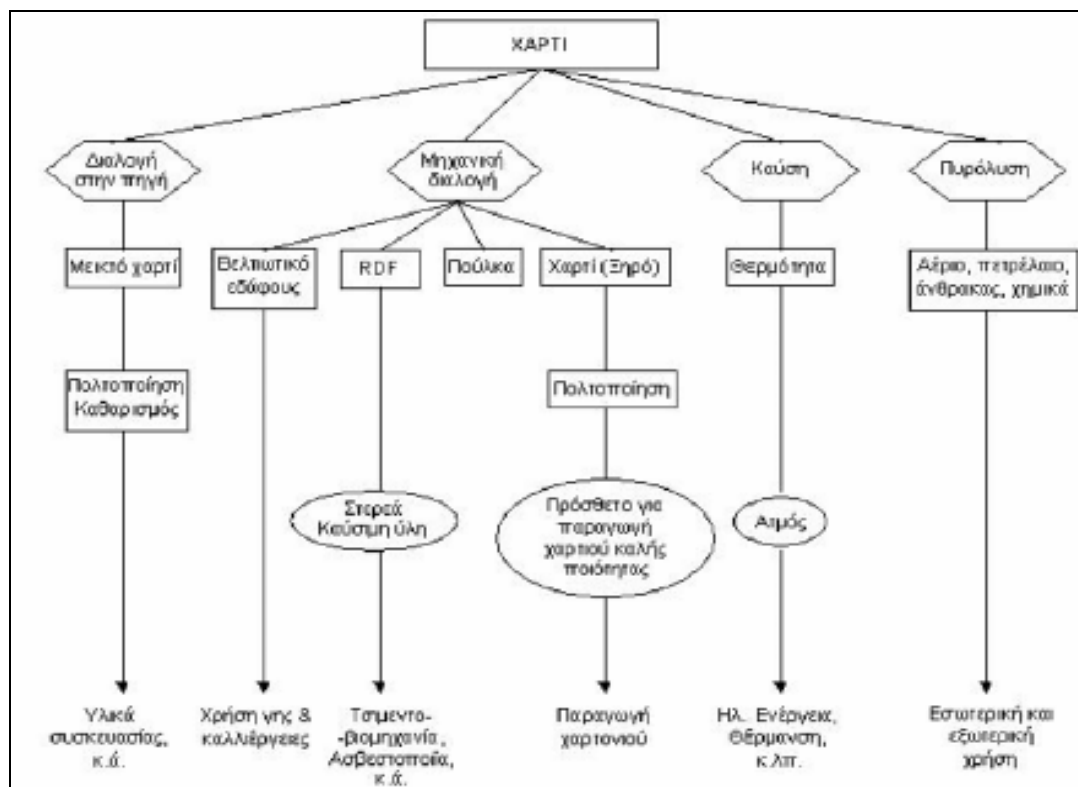
Χαρτί

Τα είδη του χαρτιού που συνήθως ανακτώνται μέσω των προγραμμάτων ανακύκλωσης είναι εφημερίδες, χαρτοσακούλες, χαρτόνι και χαρτί γραφείου. Το χαρτί των απορριμμάτων χωρίζεται σε κατηγορίες (ποιότητες), ανάλογα με την ποιότητα των ινών και τον βαθμό των ξένων προσμίξεων. Γενικά θεωρείται ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι ίνες τόσο καθαρότερο και καλύτερης ποιότητας είναι το χαρτί και κατά συνέπεια τόσο υψηλότερη είναι και η τιμή αγοράς του. Με την ανακύκλωση υποβαθμίζονται οι ίνες του χαρτιού (π.χ. η ανάμειξη και επεξεργασία του με νερό θραύει και μικραίνει τις ίνες). Κατά συνέπεια δεν μπορεί να ανακυκλώνεται απεριόριστα, λόγω της φθοράς που οι ίνες αυτές υφίστανται. Η ανάκτηση του χαρτιού γίνεται με πολλούς τρόπους, όπως συλλογή στο σπίτι ή την επιχείρηση και συλλογή σε κάδους (με πιθανή τη διαλογή του χαρτιού κατά ποιότητα).

Η κατάσταση στο χώρο της ανακύκλωσης χαρτιού έχει υποστεί αρκετές αλλαγές από την αναθεώρηση του ευρωπαϊκού προτύπου EN643. Το πρότυπο αυτό είναι ένας ευρωπαϊκός κατάλογος που διαβαθμίζει το ανακτώμενο χαρτί και χαρτόνι σε κατηγορίες αποσκοπώντας στην υποστήριξη επαγγελματιών χάρτου στην αγορά και

πώληση πρώτων υλών που μπορούν να ανακυκλωθούν από τη βιομηχανία χάρτου. Ο κατάλογος αυτός περιλαμβάνει μια ομάδα πέντε (5) διαβαθμίσεων ανακτώμενου χάρτου που στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να ανακυκλωθεί χρησιμοποιώντας ειδική διαδικασία ή που μπορεί να προκαλέσει κάποια συγκεκριμένα προβλήματα στην ανακύκλωση. Διάφορα είδη χαρτιού παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- **Εφημερίδες:** Η ανακύκλωση εφημερίδων αποτελεί βασική συνιστώσα των περισσότερων προγραμμάτων ανακύκλωσης και ιδιαίτερα Διαλογής στην Πηγή (ΔσΠ). Στο σπίτι οι εφημερίδες δένονται ή τοποθετούνται σε σακούλες, ώστε να είναι έτοιμες για συλλογή και μεταφορά στο κέντρο ανακύκλωσης. Εκεί το χαρτί συνήθως δεματοποιείται για να μεταφερθεί ευκολότερα και οικονομικότερα στον τελικό αγοραστή – χρήστη.
- **Χαρτόνι:** Συνήθως το χαρτόνι αποτελεί τη συσκευασία για μεταφορά άλλων προϊόντων. Πηγές παραγωγής απορριμμάτων χαρτονιού είναι τα super – markets, οι αποθήκες χοντρικής, τα εργοστάσια κλπ. Η ανάκτηση και ανακύκλωση για το χαρτόνι είναι διαφορετική από αυτήν για τις εφημερίδες. Τα κουτιά γίνονται επίπεδα και δένονται για μεταφορά σε χαρτοβιομηχανίες με στόχο την κατασκευή χαρτονιού και κουτιών διαφορετικού τύπου.
- **Χαρτί υψηλής ποιότητας:** Είναι το χαρτί γραφείου (φωτοτυπικό, εκτύπωσης κ.λ.π.) που περιέχει ίνες υψηλής ποιότητας. Το παραγόμενο νέο προϊόν μπορεί να είναι χαρτί γραφής ή χαρτομάντιλα, χαρτοπετσέτες κ.λ.π..
- **Μικτό χαρτί:** Περιλαμβάνει περιοδικά, βιβλία, εφημερίδες που αποτελούν τη χαμηλότερη ποιότητα χαρτιού, που περιέχεται στα οικιακά απορρίμματα. Μετά τη συλλογή, το χαρτί μεταφέρεται στον τελικό χρήστη ως έχει ή μετά από επιλογή, ανάλογα με τις ποσότητες και το κόστος της πρόσθετης διαλογής του. Τα προϊόντα που παράγονται από ανακυκλωμένο χαρτί είναι πισσόχαρτο, χαρτί μονώσεων, χαρτί γραφής, χαρτομάντηλα και χάρτινα κουτιά. Για λόγους καλαισθησίας μπορεί να προστεθεί λευκό χαρτί στην εξωτερική επιφάνεια του νέου προϊόντος. Οι προσμίξεις που συνήθως απαντώνται στο χαρτί που ανακτάται είναι πλαστικά, μεταλλικά αντικείμενα (π.χ. συνδετήρες), πλαστική ή κέρινη επικάλυψη και φαγητά. Στο Διάγραμμα 3.3 παρουσιάζονται οι κύριες δυνατότητες διαχείρισης (ανακύκλωσης) του χαρτιού [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].



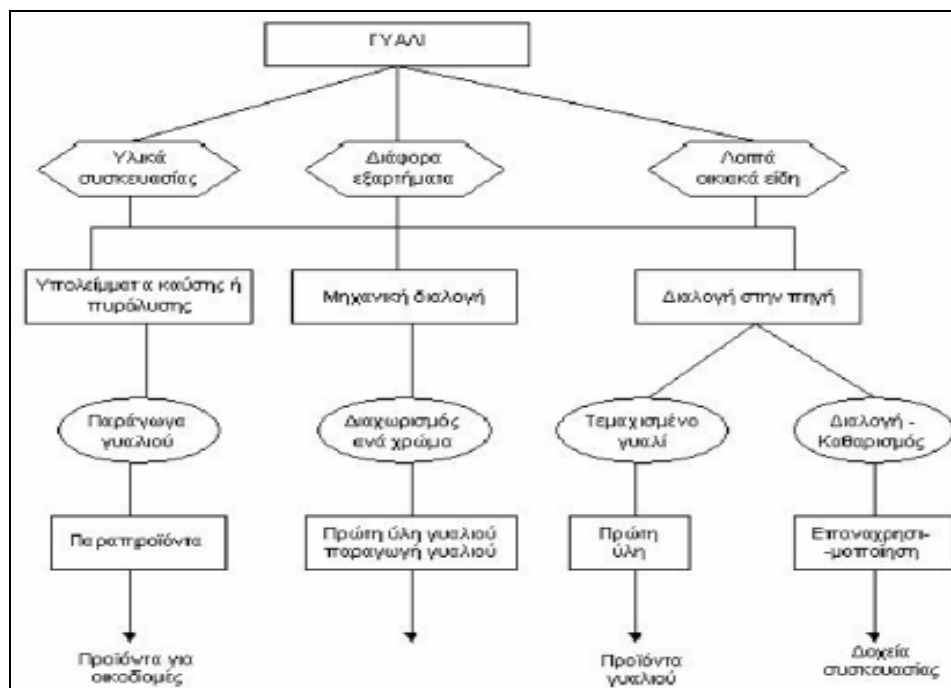
Διάγραμμα 3.3: Δυνατότητες διαχείρισης χαρτιού.

Γυαλί

Η ανακύκλωση του γυαλιού αφορά στις φιάλες, τα γυάλινα δοχεία και άλλα γυάλινα υλικά (τζάμια, πιάτα, γυαλιά υψηλής αντοχής σε θερμότητα, κρύσταλλα, κ.λ.π.). Πηγές παραγωγής απορριμμάτων γυαλιού είναι τα εργοστάσια κατασκευής, εμφιάλωσης και συσκευασίας, τα κέντρα διασκέδασης, τα ξενοδοχεία, τα εστιατόρια, τα νοικοκυριά και διάφορα καταστήματα.

Το γυαλί υποδιαιρείται σε τρεις κατηγορίες λευκό, πράσινο και καφέ. Κατά τη συλλογή, θραύεται για να μειωθεί ο όγκος του και δημιουργείται το υαλόθραυσμα. Γυαλί καφέ χρώματος χρησιμοποιείται για μπουκάλια μπίρας και φαρμάκων, τα οποία είναι χημικά ευαίσθητα στο φως και πράσινου χρώματος για μπουκάλια κρασιού και αναψυκτικών. Το προς ανακύκλωση γυαλί συλλέγεται είτε ανάμεικτο, είτε σε χωριστά δοχεία για κάθε χρώμα, είτε σε κέντρα ανακύκλωσης ή με τη μέθοδο της συλλογής πόρτα – πόρτα. Οι τιμές αγοράς του διαχωρισμένου γυαλιού είναι υψηλότερες από εκείνες του ανάμεικτου, το οποίο χρησιμοποιείται μόνο για παραγωγή πράσινου γυαλιού.

Το τελικό προϊόν της ανακύκλωσης γυαλιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή υαλοβάμβακα, ινών υάλου, σημάτων για τους δρόμους, κ.λ.π. Το υαλόθραυσμα μικτού χρώματος χρησιμοποιείται στα πυρότουβλα, τα τούβλα, το τσιμέντο και την ασφαλτο. Όσον αφορά στις προσμίξεις, οι ετικέτες δεν αποτελούν πρόβλημα. Προβληματικά κατά την επεξεργασία είναι τα πώματα, τα μεταλλικά αντικείμενα και δαχτυλίδια, τα κεραμικά, η σκόνη και οι πέτρες που πιθανόν να καταστήσουν τα προϊόντα ακατάλληλα για χρήση, επειδή μερικά από αυτά δεν τήκονται στο φούρνο και δημιουργούν φυσαλίδες στο τελικό προϊόν. Στο Διάγραμμα 3.4 παρουσιάζονται οι δυνατότητες διαχείρισης (ανακύκλωσης) του γυαλιού.

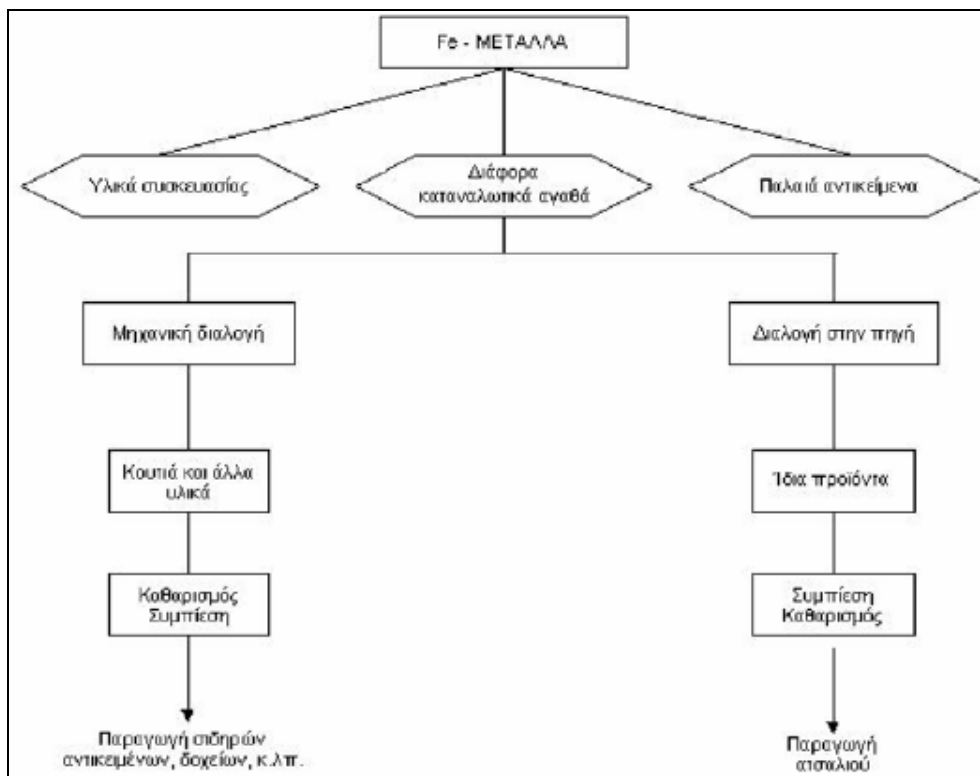


Διάγραμμα 3.4: Δυνατότητες διαχείρισης γυαλιού.

Σιδηρούχα μέταλλα

Τα σιδερένια κουτιά, που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία, αποτελούνται από χάλυβα με λεπτή εσωτερική επικάλυψη κασσίτερου (tin cans) για να αποφεύγεται το σκούριασμα και για να προστατεύεται το περιεχόμενο του κουτιού. Η επικάλυψη του κουτιού μπορεί να είναι και από χρώμιο. Ο κασσίτερος είναι υλικό αξίας μεγαλύτερης αυτής του χάλυβα και αντιπροσωπεύει το 0,5 – 1% του συνολικού βάρους του κουτιού.

Η διαλογή για ανακύκλωση των σιδερένιων κουτιών μπορεί να γίνει στο σπίτι ή σε δοχεία και από εκεί να μεταφερθούν σε κέντρο ανακύκλωσης. Εκεί με την χρήση μαγνητικού διαχωριστή τα σιδερένια κουτιά διαχωρίζονται από τα υπόλοιπα υλικά (π.χ. κουτιά αλουμινίου, πλαστικές φιάλες) και αφού θραυστούν και δεματοποιηθούν μεταφέρονται στη βιομηχανία. Διμεταλλικά κουτιά, π.χ. μπίρας και αναψυκτικών, που αποτελούνται από χάλυβα και έχουν αλουμινένιο καπάκι αποτελούν πρόβλημα, καθώς μετά τον ειδικό τεμαχισμό μπορεί να παραμένουν προσμίξεις αλουμινίου στο χάλυβα. Στο Διάγραμμα 3.5 παρουσιάζονται οι δυνατότητες διαχείρισης (ανακύκλωσης) των σιδηρούχων μετάλλων.



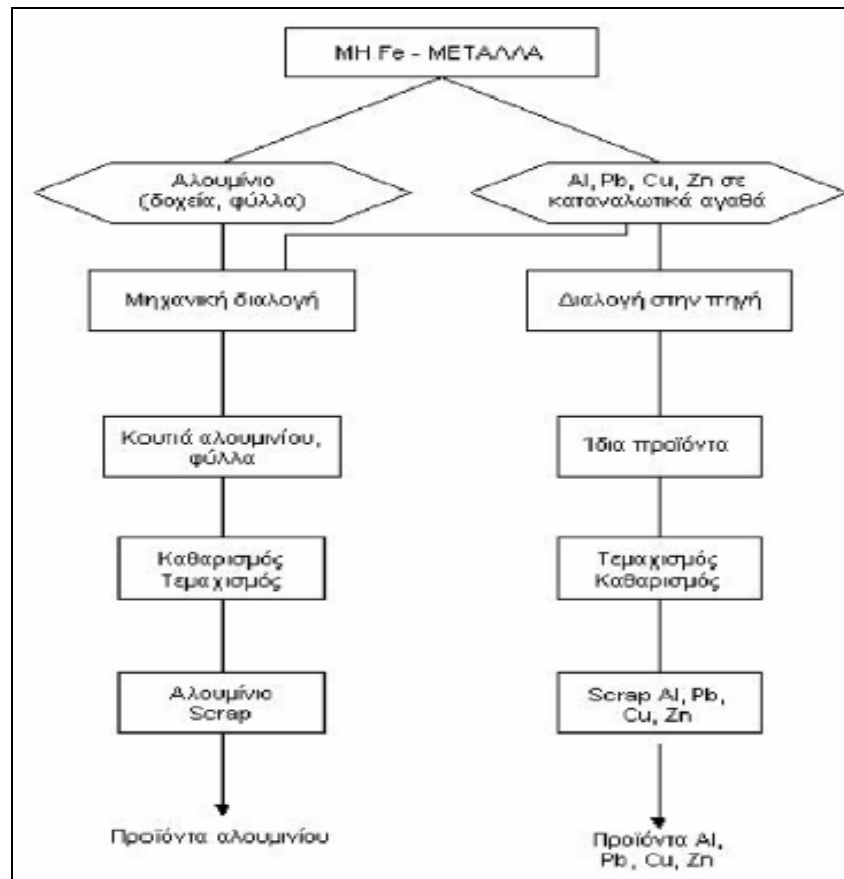
Διάγραμμα 3.5: Δυνατότητες διαχείρισης των σιδηρούχων μετάλλων

Αλουμίνιο

Η ανακύκλωση αλουμινίου αφορά κυρίως στα κουτιά αναψυκτικών και μπίρας, ενώ άλλα είδη αλουμινίου, που μπορούν να ανακυκλωθούν, είναι υδροροές, πλαίσια παραθύρων, έπιπλα κήπων, εξαρτήματα αυτοκινήτων κ.λ.π. Η μεταφορά των προς ανάκτηση αλουμινένιων κουτιών στη βιομηχανία μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, όπως χύμα, δεματοποιημένα και συμπιεσμένα.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα του αλουμινίου είναι η υψηλή τιμή, που το υλικό έχει ως scrap (λόγω της σημαντικής εξοικονόμησης ενέργειας, που έχει η βιομηχανία όταν το χρησιμοποιεί αντί για πρώτη ύλη), γεγονός που ευνοεί την ανακύκλωσή του.

Η ανάκτηση του αλουμινίου μπορεί να γίνει σε κάδους ή/και σε κέντρα ανακύκλωσης. Μετά τη συλλογή τους, τα κουτιά αλουμινίου διαχωρίζονται από τα σιδηρούχα και τα διμεταλλικά με την χρήση μαγνητικού διαχωριστή. Τα κουτιά του αλουμινίου μπορούν να ανακυκλωθούν απεριόριστα χωρίς το τελικό προϊόν να χάσει τις ιδιότητές του. Στο Διάγραμμα 3.6 παρουσιάζονται οι δυνατότητες ανακύκλωσης των μη σιδηρούχων μετάλλων.



Διάγραμμα 3.6: Δυνατότητες διαχείρισης μη σιδηρούχων μετάλλων.

Πλαστικό

Τα πλαστικά προϊόντα προέρχονται από πολλά ή από ένα είδος ρητίνης ή από σύνδεση ρητινών. Χαρακτηριστικό γνώρισμα των πλαστικών είναι η σχέση του βάρους προς τον όγκο που καταλαμβάνουν, η οποία φτάνει και μέχρι 1:3. Η αλλαγή

της συσκευασίας των προϊόντων προς όφελος του πλαστικού είχε ως συνέπεια τη δραματική αύξηση της συμμετοχής του στα απορρίμματα, τα τελευταία κυρίως χρόνια. Υπάρχουν πολλά προβλήματα με τα πλαστικά σε σχέση με τη δυνατότητα ανακύκλωσης. Αυτά οφείλονται στα εξής:

- υπάρχουν πολλές ποιότητες και τύποι πλαστικών με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση,
- τα διάφορα είδη είναι αρκετά δύσκολο να αναγνωρισθούν,
- υπάρχουν σε αυτά πολλές προσμίξεις.

Τα διάφορα είδη πλαστικών, που παρουσιάζονται στα αστικά απορρίμματα και οι χρήσεις τους, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Κατάταξη και χρήσεις των πιο συνηθισμένων πλαστικών [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Υλικό	Κωδικός SPI ⁴	Χρήσεις
Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο	1-PETE	φιάλες ανθρακούχων αναψυκτικών ή εμφιαλωμένου νερού
Υψηλής πυκνότητας Πολυαιθυλένιο	2-HDPE	κατασκευάζονται φιάλες γάλακτος, αναψυκτικών και απορρυπαντικών
Χλωριούχο βινύλιο / πολυβινύλιο	3-PVC	φιάλες για μεταλλικό νερό, βρώσιμα λάδια, χυμούς, καλλυντικά κλπ, πλαστικά σκαφίδια για τρόφιμα (π.χ. λαχανικά)
Χαμηλής πυκνότητας Πολυαιθυλένιο	4-LDPE	Μεμβράνες συσκευασίας, λεπτά περιτυλίγματα
Πολυπροπυλένιο	5-PP	Κιβώτια, θήκες, ετικέτες
Πολυστυρένιο	6-PS	Ποτήρια και πιάτα από αφρώδες υλικό (μιας χρήσεως)
Άλλες ρητίνες και σύνθετα υλικά (πολυεπίεδα).	7-Other	Σύνθετα, ανάμικτα πλαστικά

Η ανακύκλωση των πλαστικών αφορά κυρίως τα PVC (Polyvinyl / Vinyl Chloride), PET (PolyEthynene Terephthalate) και HDPE (High Density PolyEthelene). Λόγω της χαρακτηριστικής σχέσης όγκου / βάρους, τα πλαστικά μπουκάλια θραύονται και δεματοποιούνται για την οικονομικότερη μεταφορά τους στη βιομηχανία, όπου κατά την επεξεργασία τους απομακρύνονται οι προσμίξεις (ετικέτες, κατάλοιπα και σκόνη). Τα θερμοπλαστικά διαθέτουν τη δυνατότητα επαναθέρμανσης και επαναδιαμόρφωσης, αν και η επαναθέρμανση τελικά τα υποβαθμίζει. Άλλα προβλήματα στα ανακυκλωμένα πλαστικά εμφανίζονται λόγω βιολογικών προσμίξεων που δεν καταστρέφονται. Τα μπουκάλια PET και HDPE δεν

μπορούν να ξαναγίνουν μπουκάλια για τροφές. Αλεσμένες φιάλες PVC χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σωλήνων ύδρευσης, αποχέτευσης, άρδευσης κλπ.

Στο Σχήμα 3.3. απεικονίζονται κωδικοποιημένα οι διάφοροι τύποι πλαστικών.

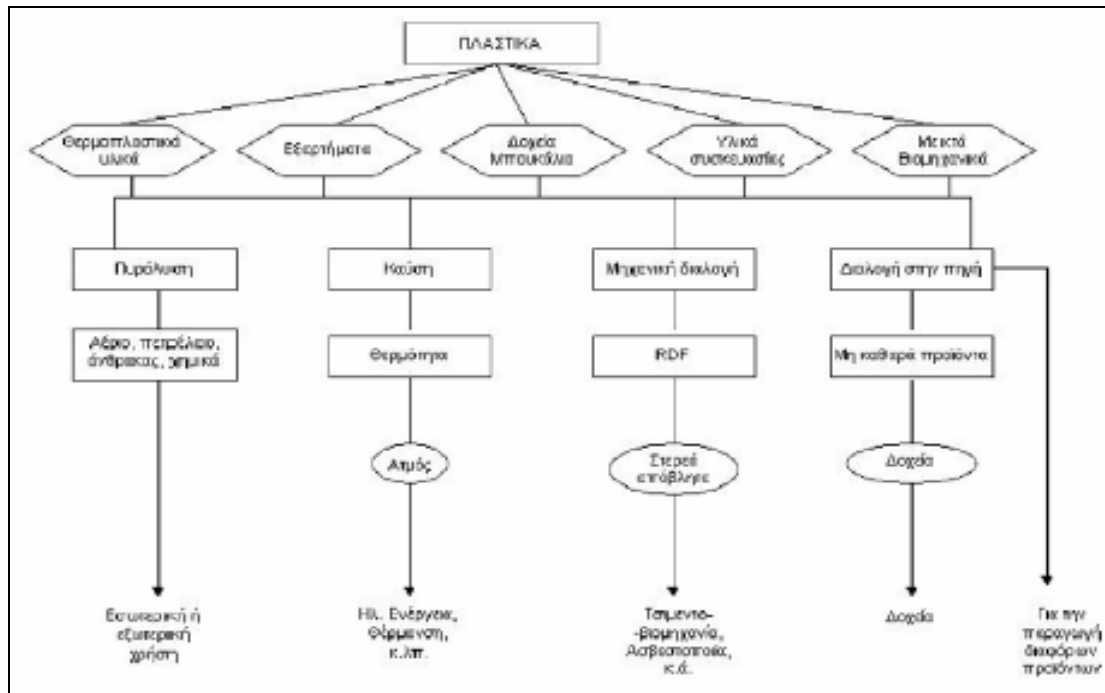


Σχήμα 3.3: Κωδικοποιημένη απεικόνιση διάφορων τύπων πλαστικών

Η ανακύκλωση στις μονάδες κατεργασίας πλαστικού είναι πιο εύκολη σε πολλές περιπτώσεις. Το πλαστικό scrap λειοτεμαχίζεται, αναμιγνύεται με παρθένους κόκκους (ρητίνες) και τήκεται στην κανονική διαδικασία κατασκευής πλαστικού. Σε πολλές περιπτώσεις, η επαναχρησιμοποίηση πλαστικού είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία. Κλειδί στην ανακύκλωση πλαστικού είναι η διάθεση ρητίνης γνωστού μοριακού βάρους χωρίς προσμίξεις. Εκτός των άλλων, αυτό αποτελεί κριτήριο για τη δυνατότητα της μετέπειτα ανακύκλωσής του. Ακριβώς λόγω των προβλημάτων που αναφέρθηκαν, η ανακύκλωση των πλαστικών βρίσκεται ακόμη σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Οι πηγές παραγωγής πλαστικών στα απορρίμματα είναι:

- Μεταφορές, όπως αυτοκίνητα, ποδήλατα, μοτοσικλέτες, φορτηγά, κ.λπ.
- Συσκευασία, όπως μπουκάλια, δοχεία τροφίμων, σακούλες και πλαστικά περιτυλίγματα.
- Οικοδομές και κατασκευές όπως σωλήνες, αποχετεύσεις, πατώματα, μονώσεις, πόρτες και παράθυρα.
- Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά, όπως καλώδια και συσκευές επικοινωνίας.
- Επιπλώσεις όπως έπιπλα, καρπέτα, κουρτίνες, έπιπλα γραφείου και καλύμματα τοίχων.
- Καταναλωτικά όπως τσάντες, παιχνίδια, εργαλεία κήπων και εξοπλισμός εργαστηρίων.
- Βιομηχανία.
- Θερμοκήπια. *(Σημειώνεται εδώ το πανελλήνιο δίκτυο που έχει αναπτυχθεί με έδρα την Κρήτη για τη συλλογή των χρησιμοποιημένων καλυμμάτων των θερμοκηπίων από PE, τα οποία οδηγούνται στην Κρήτη, όπου και ανακυκλώνονται από τοπική βιομηχανία.)*

Τέλος, προϊόντα από ανακυκλωμένο PET είναι διάφορα υποβοηθητικά υλικά για επιστρώσεις και επενδύσεις, σχοινιά και σπάγκοι, γεφυφάσματα και διαμορφωμένα πλαστικά, ενώ προϊόντα από ανακυκλωμένο HDPE είναι οι διάφορες βιομηχανικές επιστρώσεις δαπέδων, δεξαμενές και κάδοι, γλάστρες. Στο Διάγραμμα 3.7 παρουσιάζονται οι δυνατότητες ανακύκλωσης του πλαστικού.

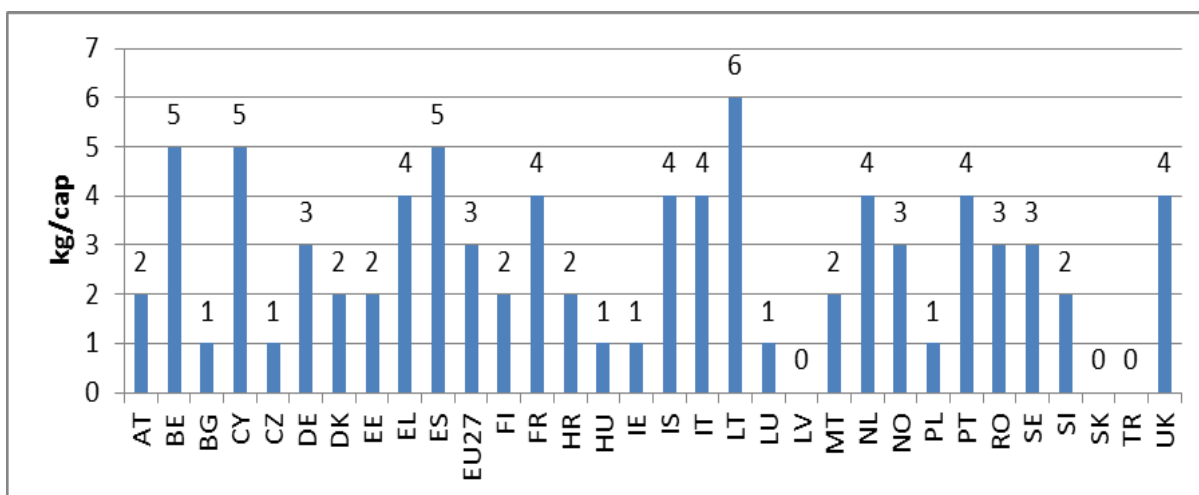


Διάγραμμα 3.7: Δυνατότητες διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων.

Μπαταρίες

Η διάθεση των μπαταριών έχει αυξημένη περιβαλλοντική σημασία, παρά τον μικρό όγκο που αυτές αντιπροσωπεύουν στο σύνολο των αποβλήτων, λόγω της ύπαρξης βαρέων μετάλλων, όπως υδραργύρου, μολύβδου και καδμίου. Οι μπαταρίες χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, για τις οποίες ενδείκνυνται διαφορετικές πρακτικές διαχείρισης και διάθεσης: οι μπαταρίες οχημάτων και οι συνήθεις μπαταρίες οικιακών συσκευών (ραδιοφώνων, φακών, ρολογιών, κλπ.).

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.8 στην ΕΕ παράγεται ένα σημαντικό ποσό μπαταριών προς απόρριψη. Το 2012 ο μέσος όρος παραγωγής αποβλήτων μπαταρίας έφτασε τα 3kg/κάτοικο. Η Οδηγία 2006/66/EC, περί μπαταριών και συσσωρευτών, θέτει τους παρακάτω στόχους:



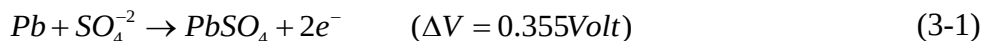
Διάγραμμα 3.8: Παραγωγή μπαταριών προς απόρριψη στην ΕΕ-27, 2012 [Eurostat, 2015].

- Συλλογή του 25% των μπαταριών που παράγονται σε μια χώρα μέχρι το 2012, ενώ το ποσοστό αυτό αυξάνεται μέχρι τα 45% το 2016.
- Ανακύκλωση του 65% για τις μπαταρίες μολύβδου, του 75% για τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου και του 50% για τα υπόλοιπα είδη μπαταριών.
- Απαγόρευση της ταφής και της αποτέφρωσης των βιομηχανικών συσσωρευτών και συσσωρευτών αυτοκινήτων

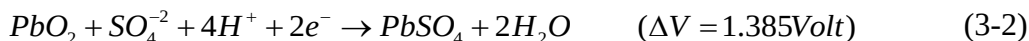
Η εφαρμογή προγράμματος ανάκτησης των μπαταριών από τον κύριο όγκο των οικιακών απορριμμάτων αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των ποσοτήτων μπαταριών, που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ, σε αποτεφρωτήρες ή εγκαταστάσεις κομποστοποίησης. Η ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων, που μπορεί να προκληθεί από την ύπαρξη μπαταριών σε ένα ΧΥΤΑ, είναι συνάρτηση της παραμένουσας φόρτισης της μπαταρίας, των συνθηκών που επικρατούν μέσα στο ΧΥΤΑ, της αποτελεσματικότητας του συστήματος στεγανοποίησης και της εγγύτητας του υδροφόρου ορίζοντα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι μπαταρίες περιέχουν χημικές ουσίες που είναι επικίνδυνες για την υγεία και το περιβάλλον, όπως π.χ. μολύβδο, ένα ιδιαίτερα τοξικό μέταλλο, θειικό οξύ και ηλεκτρολύτες. Μια τυπική μπαταρία αποτελείται από δυο ηλεκτρόδια, τα οποία βυθίζονται σε αραιωμένο θειικό οξύ. Τα ηλεκτρόδια αυτά αποτελούνται από μεταλλικά πλέγματα μολύβδου, τα οποία περιέχουν διοξείδιο του μολύβδου (άνοδος) και σπογγώδη μολύβδο (κάθοδος).

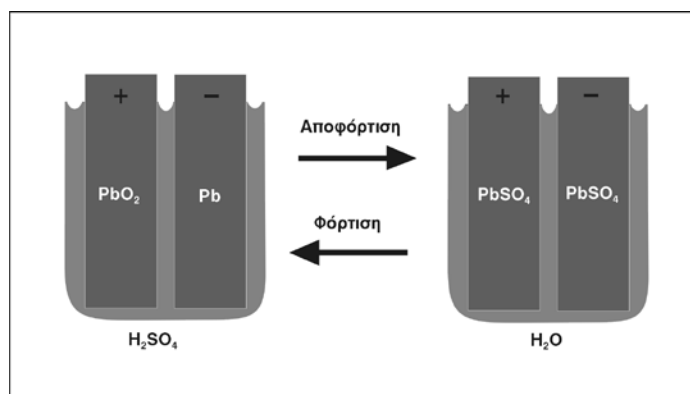
Η αντίδραση, που λαμβάνει χώρα, στο αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι η εξής:



Αντίθετα, η αντίδραση που λαμβάνει χώρα στο θετικό ηλεκτρόδιο είναι η ακόλουθη:



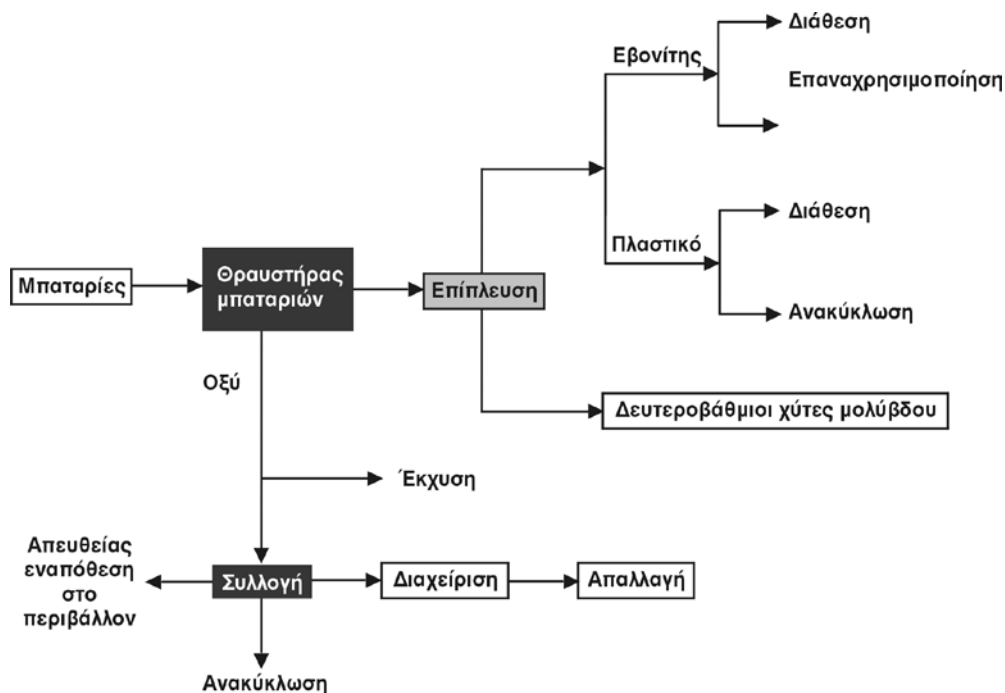
Καθώς η μπαταρία αποφορτίζεται, το διοξειδίο του μολύβδου αντιδρά προς σχηματισμό θεικού άλατος μολύβδου. Η σχετική διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4. Τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και τα άτομα μολύβδου ενώνονται με τα ιόντα θεικού άλατος στον ηλεκτρολύτη για να διαμορφώσουν το θεικό άλας. Όταν τα ηλεκτρόνια επανεισέρχονται στο θετικό ηλεκτρόδιο του διοξειδίου του μολύβδου, λαμβάνει χώρα μια άλλη χημική αντίδραση: το διοξειδίο του μολύβδου ενώνεται με τα πρωτόνια στον ηλεκτρολύτη και με τα ηλεκτρόνια, που επιστρέφουν από το νερό, ενώ παράλληλα απελευθερώνονται ιόντα μολύβδου στον ηλεκτρολύτη για να διαμορφώσουν το πρόσθετο θεικό άλας μολύβδου.



Σχήμα 3.4: Χημικές διεργασίες μπαταριών.

Μια μέση μπαταρία αυτοκινήτου π.χ. ζυγίζει 17,2 kg και περιέχει 8,6-9,1 kg μολύβδου (διαιρούμενα εξίσου στην άνοδο και στην κάθοδο), 1,4 kg πλαστικού (πολυπροπυλένιο) και 2 λίτρα θεικού οξέος 15-20 %. Τα προηγούμενα χρόνια, οι περισσότερες μπαταρίες κατασκευάζονταν από ένα ιδιαίτερα σκληρό υλικό, τον εβονίτη. Σήμερα όμως το μεγαλύτερο ποσοστό των μπαταριών κατασκευάζεται από προπυλένιο.

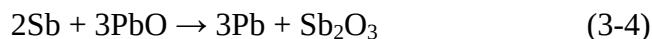
Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται η διαδικασία κατεργασίας, που προηγείται της ανακύκλωσης των μπαταριών. Εκτός από τον ίδιο το μόλυβδο απαντώνται και παράγωγά του, όπως ο θεικός μόλυβδος (PbSO_4), το οξείδιο του μολύβδου (PbO) και το διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2).



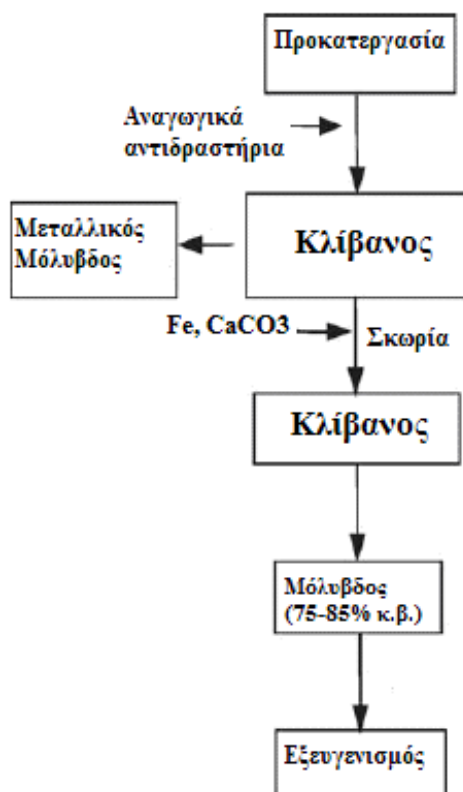
Σχήμα 3.5: Διαδικασία κατεργασίας και ανακύκλωσης μπαταριών.

Μετά από την παραπάνω προκατεργασία της τροφοδοσίας των αποβλήτων λαμβάνει χώρα η ανακύκλωση-ανάκτηση του μολύβδου με την χρήση ειδικού κλιβάνου, στον οποίο εισάγονται τα θρυμματισμένα και διαχωρισμένα τεμάχια μαζί με αναγωγικά αντιδραστήρια. Στον κλίβανο αυτόν λαμβάνει χώρα η αναγωγή των ενώσεων του μολύβδου προς μεταλλικό μόλυβδο και η οξείδωση των υπολοίπων προσμίξεων προς σκωρία. Ο μεταλλικός μόλυβδος έχει καθαρότητα σχεδόν 99,9% κ.β., ενώ η σκωρία περιέχει 60-70% μόλυβδο και εμφανίζεται ως ένα λεπτό ρευστό στρώμα στην επιφάνεια του βαρύτερου μεταλλικού μολύβδου. Τα περιεχόμενα στα εκπεμπόμενα απαέρια αιωρούμενα σωματίδια κατακρατούνται μέσω σακκόφιλτρων και επιστρέφονται εντός του κλιβάνου, προς ανάκτηση του περιεχόμενου σε αυτά μολύβδου.

Εντός του κλιβάνου λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθες χημικές αντιδράσεις:



Στη συνέχεια, η παραγόμενη στον πρώτο κλίβανο σκωρία τροφοδοτείται σε επόμενο κλίβανο, όπου προστίθενται ρινίσματα σιδήρου και ανθρακικό ασβέστιο προς διευκόλυνση της αντίδρασης και αύξηση της απόδοσης. Το κύριο επιθυμητό προϊόν του δεύτερου αυτού σταδίου αποτελείται από περίπου 75-85% κ.β. μόλυβδο και 15-25% κ.β. αντιμόνιο και οδηγείται σε ειδική εγκατάσταση προς τον τελικό εξευγενισμό του. Η παραγόμενη σκωρία, η οποία τελικώς περιέχει μόλις 1-3% κ.β. μόλυβδο, καθώς και CaO , SiO_2 και FeO , διατίθεται σε ειδικούς χώρους υγειονομικής ταφής. Η προαναφερθείσα διαδικασία παρατίθεται σχηματικά στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6: Διεργασίες ανάκτησης μολύβδου.

Υλικά οικοδομών

Στη συγκεκριμένη κατηγορία κατατάσσονται απορρίμματα, που προκύπτουν κατά τη διαδικασία ανέγερσης οικοδομών, καθώς και κατά την κατεδάφιση οικοδομών και λοιπών κατασκευών. Έξαρση στις ποσότητες υλικών οικοδομών, που διατίθενται προς απόρριψη, παρατηρείται προφανώς σε περιόδους κρίσης όπως πολέμων, σεισμών ή άλλων καταστροφών.

Τα απορρίμματα αυτού του τύπου περιέχουν κυρίως σκυρόδεμα (>60% κ.β.), τούβλα, κεραμίδια και άλλα δομικά στοιχεία κατασκευασμένα από άργιλο (15%), ξύλο (~20%), σίδηρο, χαλκό, μόλυβδο, αλουμίνιο, πλαστικό, γυαλί, κ.λ.π. Ενδιαφέρον για την ανακύκλωση παρουσιάζουν κυρίως το ξύλο, το οποίο βρίσκεται σε μεγάλες ποσότητες (οροφή, πατώματα, κουφώματα, ντουλάπια, κ.λ.π) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά ως δομικό υλικό ή ως καύσιμο, καθώς και τα διάφορα μέταλλα. Τα υλικά από τούβλα και σκυρόδεμα χαρακτηρίζονται ως αδρανή και είναι προτιμότερο να μη διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής, περιορίζοντας έτσι το διαθέσιμο για την υποδοχή οικιακών απορριμμάτων όγκο.

«Λευκά» απορρίμματα

Ως «λευκά» απορρίμματα χαρακτηρίζονται λόγω του συνήθους χρώματός τους, τα ψυγεία, τα πλυντήρια, οι κουζίνες, οι θερμοσίφωνες και άλλες ηλεκτρικές οικιακές συσκευές. Το ενδιαφέρον της βιομηχανίας ανακύκλωσης για τις συσκευές αυτές προέρχεται από τη δυνατότητα ανάκτησης σημαντικών ποσοτήτων σιδηροκραμάτων. Ένα ψυγείο, για παράδειγμα, περιέχει περίπου 35 Kg χάλυβα, η μεγαλύτερη ποσότητα του οποίου βρίσκεται σε μορφή φύλλων τοποθετημένων στα τοιχώματα και την πόρτα του.

3.4 Απόβλητα συσκευασίας

3.4.1. Νομικό πλαίσιο

Τα απόβλητα συσκευασίας αποτελούν σημαντικό μέρος του συνόλου των σύγχρονων ΑΣΑ γι' αυτό και η εθνική νομοθεσία με το Ν. 2939/2001 δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα και προσοχή στη σωστή και οργανωμένη διαχείρισή τους. Άλλωστε για τη διαχείριση των αποβλήτων συσκευασίας προβλέπεται και η ίδρυση Εθνικού

Οργανισμού Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (Ε.Ο.Ε.Δ.Σ.Α.Π.). Ως «συσκευασία» εννοείται κάθε προϊόν, κατασκευασμένο από οποιοδήποτε είδος υλικού από πρώτες ύλες μέχρι επεξεργασμένα υλικά και προοριζόμενο να χρησιμοποιείται για να περιέχει αγαθά με σκοπό την προστασία, τη διακίνηση, τη διάθεση και την παρουσίασή τους από τον παραγωγό μέχρι τον χρήστη ή τον καταναλωτή.

Ως συσκευασίες θεωρούνται όλα τα είδη μίας ή πολλαπλής χρήσης που χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό. Η εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων βασίζεται στις ακόλουθες αρχές:

1. Στην αρχή της πρόληψης της δημιουργίας αποβλήτων από τη διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων με τη μείωση του συνολικού όγκου τους και των επικινδύνων συστατικών τους, και περαιτέρω:

- Στην αρχή της κατά προτεραιότητα επαναχρησιμοποίησης των συσκευασιών και της ανάκτησης υλικών και της ανακύκλωσης των αποβλήτων των συσκευασιών και άλλων προϊόντων και εν συνεχεία,
- Στην ανάκτηση ενέργειας, χωρίς ρύπανση του περιβάλλοντος, ώστε να μειώνεται η τελική διάθεση των αποβλήτων αυτών

2. Στην αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει».

3. Στην αρχή της ευθύνης όλων των εμπλεκόμενων οικονομικών παραγόντων, δημόσιων και ιδιωτικών.

4. Στην αρχή της δημοσιότητας προς τους χρήστες και καταναλωτές ως προς τα μέτρα που λαμβάνονται για την εφαρμογή αυτού του νόμου προκειμένου να αναδειχθεί ο ρόλος τους ως παράγοντες συμβολής στην επαναχρησιμοποίηση ή αξιοποίηση (εναλλακτική διαχείριση) των συσκευασιών και άλλων προϊόντων. Στην αρχή της δημοσιότητας υπάγονται και τα μέτρα της υποχρεωτικής αναγραφής στη συσκευασία του εγγυοδοτικού αντιτίμου, όπου επιβάλλεται, καθώς και της ειδικής σήμανσης ότι η συσκευασία υπόκειται σε εναλλακτική διαχείριση. Σύμφωνα με το άρθρο 7 του Ν.2939/2001, η διαχείριση των συσκευασιών γίνεται από τους

«διαχειριστές», οι οποίοι και υποχρεώνονται να οργανώνουν ή να συμμετέχουν σε συστήματα διαχείρισης των αποβλήτων αυτών. Τα συστήματα αυτά αποβλέπουν:

- Στη συλλογή και επιστροφή χρησιμοποιημένων συσκευασιών ή αποβλήτων συσκευασίας.
- Στην επαναχρησιμοποίηση ή αξιοποίηση (π.χ. ανακύκλωση) των αποβλήτων αυτών με την χρήση καθαρών τεχνολογιών.

Η οργάνωση των συστημάτων αυτών γίνεται είτε ατομικά με την υποχρέωση εφαρμογής συστημάτων εγγυοδοσίας, είτε συλλογικά με οποιαδήποτε νομική μορφή (Α.Ε., Ε.Π.Ε., κοινοπραξίες, συνεταιρισμοί) αρκεί να έχει λάβει έγκριση από τον Εθνικό Οργανισμό Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (Ε.Ο.Ε.Δ.Σ.Α.Π.).

Συγκεκριμένα για τα δημοτικά απόβλητα η εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων συσκευασίας είναι υποχρεωτική για τους Οργανισμούς Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ) (άρθρο 8, Ν.2939/2001) και γίνεται είτε από τους δήμους, τις κοινότητες και τους ενιαίους συνδέσμους αυτών, είτε από τους «διαχειριστές» σε συνεργασία με τους παραπάνω φορείς. Ήδη έχει συσταθεί και λειτουργεί μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα οργανισμός με την ονομασία «Ελληνική Εταιρεία Ανακύκλωσης και Ανάκτησης» (ΕΕΑΑ) με αποστολή την ανάληψη των ευθυνών της βιομηχανίας που απορρέουν από το Ν. 2939/2001.

Σημαντικό σημείο του νόμου για την εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών αποτελεί η δυνατότητα των φορέων διαχείρισης να επιβάλλουν πρόστιμο στον καταναλωτή ή τελικό χρήστη αν ο τελευταίος δεν συμμορφωθεί με την υποχρέωση συλλογής και επιστροφής των συσκευασιών. Επίσης προβλέπεται ο ανά τριετία έλεγχος του συστήματος που εφαρμόζει ο κάθε «διαχειριστής» και η απονομή του Πιστοποιητικού Εναλλακτικής Διαχείρισης (Π.Ε.Δ.) στην περίπτωση που εφαρμόζεται με επιτυχία. Σε κάθε περίπτωση μη συμμόρφωσης με τις διατάξεις του νόμου για την εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών προβλέπονται κυρώσεις (ποινικές, διοικητικές, αστική ευθύνη).

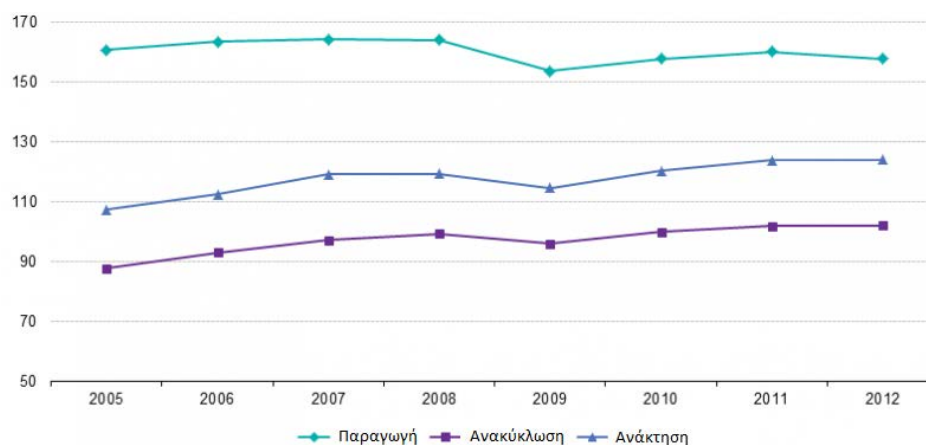
Με το Ν.2939/2001, όπως αυτός τροποποιήθηκε από την ΥΑ 9268/469/2007, τίθενται οι βασικοί ποσοτικοί στόχοι για την αξιοποίηση – επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων των συσκευασιών. Συγκεκριμένα:

- α) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2005 το αργότερο, πρέπει να αξιοποιείται ή να αποτεφρώνεται σε εγκαταστάσεις αποτέφρωσης αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας τουλάχιστον το 50 % κατά βάρος των αποβλήτων συσκευασίας.
- β) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2011 το αργότερο, αξιοποίηση ή αποτέφρωση σε εγκαταστάσεις αποτέφρωσης αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας 60 % τουλάχιστον κατά βάρος, των αποβλήτων συσκευασίας
- γ) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2005 το αργότερο, ανακύκλωση μεταξύ 25 % τουλάχιστον και 45 % το πολύ, κατά βάρος, του συνόλου των υλικών συσκευασίας που περιέχονται στα απόβλητα συσκευασίας, με ελάχιστο ποσοστό 15 % κατά βάρος, για κάθε υλικό συσκευασίας
- δ) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2011 το αργότερο, ανακύκλωση μεταξύ 55 % τουλάχιστον και 80 % το πολύ, κατά βάρος, των αποβλήτων συσκευασίας
- ε) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2011 το αργότερο, επίτευξη των ακόλουθων ελάχιστων στόχων ανακύκλωσης για υλικά που περιέχονται σε απόβλητα συσκευασίας:
- i) 60 %, κατά βάρος, για το γυαλί,
 - ii) 60 %, κατά βάρος, για το χαρτί και χαρτόνι,
 - iii) 50 %, κατά βάρος, για τα μέταλλα,
 - iv) 22,5 %, κατά βάρος, για τα πλαστικά, λαμβάνοντας αποκλειστικά υπόψη υλικά που ανακυκλώνονται εκ νέου σε πλαστικά,
 - v) 15 %, κατά βάρος, για το ξύλο.

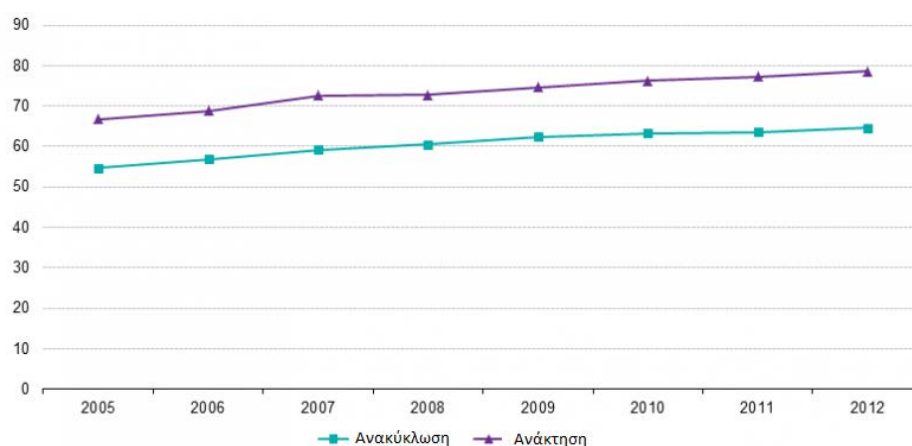
3.4.2. Στατιστικά στοιχεία

Όπως προκύπτει από τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία, στην Ευρώπη εκτρέπεται ένα διαρκώς αυξανόμενο ποσοστό απορριμμάτων συσκευασίας. Ενώ η παραγωγή τους παρέμεινε σχεδόν σταθερή (160kg/cap) την περίοδο 2005-2012 (Διάγραμμα 3.9), την ίδια περίοδο αυξήθηκε το ποσοστό που ανακυκλώνεται και ανακτάται από περίπου 55% και 65% σε 65% και 80%, αντίστοιχα (Διάγραμμα 3.10).

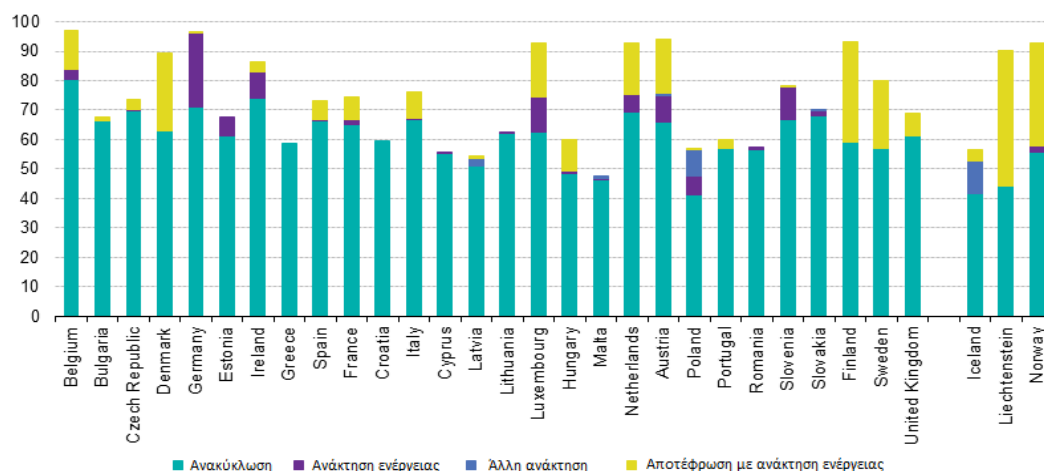
Οι κύριες μορφές εκτροπής είναι η ανακύκλωση και η αποτέφρωση για την παραγωγή ενέργειας (Διάγραμμα 3.11). Ποσοστά εκτροπής μεγαλύτερα από 90% φαίνεται να επιτυγχάνουν το Βέλγιο, η Γερμανία, το Λουξεμβούργο, η Ολλανδία, η Αυστρία και η Φιλανδία και η Νορβηγία. Το μικρότερο ποσοστό (<50%) παρουσιάζει η Μάλτα, ενώ η Ελλάδα επιτυγχάνει ποσοστό ελαφρώς μικρότερο από 60%.



Διάγραμμα 3.9: Πορεία παραγωγής, ανακύκλωσης και ανάκτησης απορριμμάτων συσκευασίας (kg/cap) στην ΕΕ την περίοδο 2005-2012 [Eurostat, 2015].

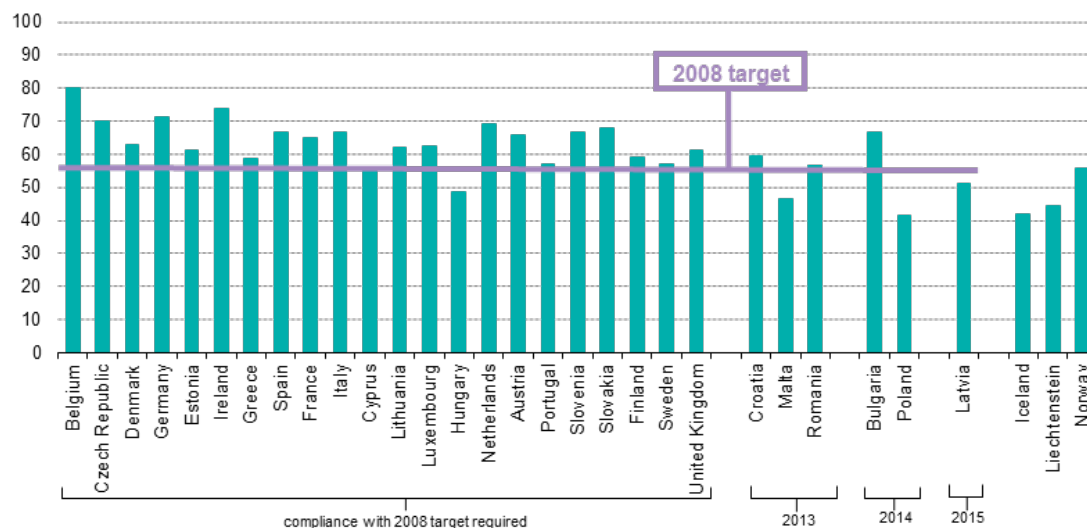


Διάγραμμα 3.10: Ποσοστά ανακύκλωσης και ανάκτησης απορριμμάτων συσκευασίας (%) στην ΕΕ την περίοδο 2005-2012 [Eurostat, 2015].



Διάγραμμα 3.11: Ποσοστά μεθόδων επεξεργασίας απορριμμάτων συσκευασίας (%) στην ΕΕ το έτος 2012 [Eurostat, 2015].

Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία, το έτος 2012 η ανακύκλωση των απορριμμάτων συσκευασίας στην Ελλάδα υπερβαίνει το 55%, που ήταν και ο στόχος που έχει θέσει γενικά η ΕΕ για το έτος 2008 (Διάγραμμα 3.12).



Διάγραμμα 3.12: Ποσοστά ανακύκλωσης απορριμμάτων συσκευασίας (%) στην ΕΕ το έτος 2012 [Eurostat, 2015].

3.4.3. Κατηγορίες

Η μελέτη των υλικών συσκευασίας που περιλαμβάνονται στα ΑΣΑ έδειξε ότι οι συσκευασίες, που πρέπει μετά την χρήση τους να διατεθούν ως απόβλητα περιλαμβάνουν:

- **Μεταλλικές συσκευασίες**

Οι μεταλλικές συσκευασίες χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία τροφίμων και χημικών προϊόντων (χρώματα, κόλλες, κ.λπ.).

- **Πλαστικές συσκευασίες**

Οι πλαστικές συσκευασίες χρησιμοποιούνται στους κλάδους τροφίμων και ποτών, χημικών προϊόντων, απορρυπαντικών, λιπαντικών και καλλυντικών, ρουχισμού, κ.λπ. Οι συνηθέστερες μορφές πλαστικής συσκευασίας περιλαμβάνουν:

- Κιβώτια – Κουτιά – Καφάσια – Κουβάδες
- Φιάλες

- Σακούλες – Τσάντες – Σάκοι
- Μεμβράνες – Φιλμ
- Καπάκια

Οι διάφοροι τύποι πρώτης ύλης πλαστικού που χρησιμοποιούνται στις πλαστικές συσκευασίες περιλαμβάνουν:

- Πολυαιθυλένιο – PE
- Πολυπροπυλένιο – PP
- Πολυβινυλοχλωρίδιο – PVC
- Πολυστυρένιο – PS
- Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο – PET

• Γυάλινες συσκευασίες

Οι γυάλινες συσκευασίες κατηγοριοποιούνται με τρεις τρόπους (Environmental Management Consultants Ltd, Εργαστήριο Γενικής Χημείας ΕΜΠ, 2001):

- ☐ Ανάλογα με την χρήση τους σε:
 - Φιάλες για τρόφιμα και ποτά (διαφόρων μεγεθών)
 - Φιαλίδια για χρήση κυρίως από το φαρμακευτικό κλάδο
 - Φιάλες για αποστείρωση
 - Βάζα τροφίμων
 - Γυάλινες συσκευασίες για τα υπόλοιπα προϊόντα
- ☐ Ανάλογα με το χρώμα τους:
 - Άχρωμες (διαφανείς)
 - Έγχρωμες (από καφέ, πράσινο γυαλί)
- ☐ Ανάλογα με τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής τους
 - Επαναχρησιμοποιήσιμες
 - Μιας χρήσης

• Χάρτινες συσκευασίες

Οι χάρτινες συσκευασίες χρησιμοποιούνται στους κλάδους τροφίμων και ποτών, χημικών προϊόντων, απορρυπαντικών, λιπαντικών και καλλυντικών, ρουχισμού, κ.λ.π. Οι συνηθέστερες μορφές χάρτινης συσκευασίας περιλαμβάνουν:

- ☐ Χαρτοκιβώτια

- ☐ Χαρτόκουτα
- ☐ Χαρτοσακούλες, χάρτινες τσάντες, χαρτόσακοι
- ☐ Tetrapak

• Ξύλινες συσκευασίες

Οι συνηθέστερες μορφές ξύλινων συσκευασιών αφορούν σε:

- ☐ Ξύλινα κιβώτια
- ☐ Ξύλινες παλέτες

Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά σε δύο τύπους σύνθετης συσκευασίας, που δεν καλύπτονται από την περιγραφή που δόθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Tetrapak συσκευασίες

Με τον όρο αυτό εννοούνται συσκευασίες υγρών (πόσιμων). Οι συσκευασίες αυτές είναι σύνθετες και αποτελούνται από κυτταρίνη και πολυαιθυλένιο (PE). Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται για προϊόντα μεγαλύτερης διάρκειας προστίθεται και ένα φύλλο αλουμινίου. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε συσκευασία 1L προϊόντος μόνο το 3% κ.β. είναι η συσκευασία. Οι μακριές ίνες χαρτιού των συσκευασιών αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή χαρτονιών και χαρτιού υγείας, ενώ το αλουμίνιο και το PE μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην τσιμεντοβιομηχανία.

Συσκευασίες Blister

Οι συσκευασίες αυτές αποτελούνται από ένα διάφανο πλαστικό φύλλο και από ένα φύλλο αλουμινίου ή χαρτιού κολλημένα μαζί. Χρησιμοποιούνται συνήθως για τη συσκευασία χαπιών, αλλά και άλλων προϊόντων (οδοντόβουρτσες, σωληνάρια κόλλας, κ.α.). Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται η χρήση blister για τη συσκευασία κόλλας και η αντικατάσταση της συσκευασίας με ένα έξυπνα σχεδιασμένο καπάκι, το οποίο φέρει γάντζο.



Σχήμα 3.7: Συσκευασία blister και αντικατάστασή της από τη βιομηχανία [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

3.4.4. Συλλογή και διαχωρισμός στην Ελλάδα

Σύμφωνα με το σύστημα που έχει αναπτυχθεί από την ΕΕΑΑ, η συλλογή των απορριμμάτων συσκευασίας υλοποιείται με το συνδυασμό:

- διαχωρισμού του ξηρού κλάσματος από τα οργανικά και
- διαλογής στην πηγή.

Για το λόγο αυτό θεωρείται ότι στην πηγή δημιουργούνται δύο παράλληλα ρεύματα αποβλήτων, τα ανακυκλώσιμα και τα βιοαποικοδομήσιμα. Τα απορρίμματα συσκευασίας που συλλέγονται, διαχωρίζονται και ανακτώνται είναι: μεταλλικά κουτιά, κουτιά αλουμινίου, γυάλινα μπουκάλια, χαρτόνια, σύνθετες συσκευασίες για υγρές τροφές, PET, PVC, HDPE, LDPE, και PS. Εκτός από τις συσκευασίες ανακτάται και χαρτί (λευκό χαρτί, εφημερίδες, περιοδικά κ.λ.π.). Η συλλογή γίνεται από κάθε νοικοκυριό ξεχωριστά με τη χρήση επαναχρησιμοποιήσιμων τσαντών (33L) μπλε χρώματος και από ειδικούς κάδους χρώματος μπλε και χωρητικότητας 1.100L. Το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα τοποθετείται σε πράσινους κάδους χωρητικότητας 1.100L [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Μηχανική – Βιολογική Επεξεργασία

4.1. Βασικές αρχές

Η μηχανική - βιολογική επεξεργασία (MBE) δεν είναι μια σαφώς καθορισμένη μέθοδος, αλλά περισσότερο ένας γενικευμένος όρος που περιγράφει μια ευρεία ομάδα διεργασιών, που συνδυάζονται με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους, προκειμένου να διαχωρίσουν και να ανακτήσουν υλικά από τα ΑΣΑ. Πρόκειται δηλαδή για μια «οικογένεια» τεχνολογιών επεξεργασίας, που μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, τόσο ως προς την πολυπλοκότητα και συνεπώς το κόστος, όσο και ως προς τους τελικούς στόχους της επεξεργασίας. Η απόδοση των διαφορετικών συνδυασμών μπορεί να ποικίλει σημαντικά και κάθε προσέγγιση έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα [DEFRA, 2005 and Archer et al. 2005].

Οι εγκαταστάσεις MBE συνδυάζουν μια ποικιλία μηχανικών και βιολογικών διεργασιών με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τα επιθυμητά προϊόντα και τους στόχους της επεξεργασίας. Οι μηχανικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση των ξηρών ανακυκλώσιμων και ενός ομογενοποιημένου στερεού καυσίμου (RDF – refuse derived fuel ή SRF – solid refuse fuel), ενώ οι βιολογικές για την απομάκρυνση της υγρασίας από τα απόβλητα (βιολογική ξήρανση), τη σταθεροποίηση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος και την παραγωγή (χαμηλής ποιότητας) κομπόστ και/ή βιοαερίου. Σε γενικές γραμμές η MBE μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συνδυασμός δύο μονάδων: ενός κέντρου διαλογής και ανάκτησης υλικών (ΚΔΑΥ) και μιας μονάδας βιολογικής επεξεργασίας. Οι κυριότερες διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα, είναι οι εξής:

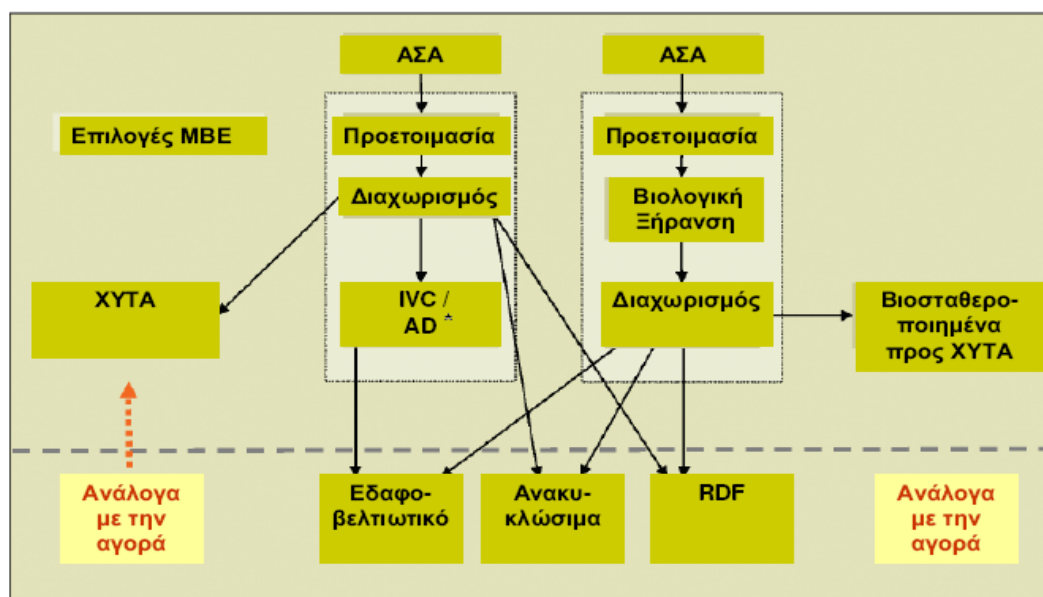
- ο Διάνοιξη σάκων (με διατάξεις τύπου μεταλλικών ταινιών, κοχλία, χτενιού, λάμας, κλπ).
- ο Μείωση του μεγέθους (με κονιορτοποίηση και τεμαχισμό, σε τεμαχιστές, περιστρεφόμενα τύμπανα, κλπ).

- ο Διαχωρισμός (βάση μεγέθους, αεροδιαχωρισμός, βαλλιστικός διαχωρισμός και άλλες διεργασίες μηχανικής ταξινόμησης των αποβλήτων)
- ο Μαγνητικός διαχωρισμός για τα σιδηρούχα μέταλλα και διαχωρισμός επαγωγικών ρευμάτων για το αλουμίνιο.
- ο Βιολογική ξήρανση.
- ο Κομποστοποίηση του εμπλουτισμένου οργανικού κλάσματος.
- ο Αναερόβια χώνευση.

Το κοινό στοιχείο όλων των μονάδων MBE είναι ότι χρησιμοποιούν διεργασίες μηχανικού διαχωρισμού για να διαχωρίσουν σύμμεικτα απόβλητα σε διαφορετικά ρεύματα και να ανακτήσουν κάποια ξηρά ανακυκλώσιμα. Επιπλέον, ανάλογα με το σχεδιασμό τους έχουν έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους στόχους:

- ο Να σταθεροποιήσουν επαρκώς το βιοαποδομήσιμο κλάσμα, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό επικάλυψης σε XYT ή να ταφεί χωρίς να θεωρείται ως βιοαποδομήσιμο απόβλητο, σύμφωνα με τους στόχους της Οδηγίας 99/31/ΕΕ για την Υγειονομική Ταφή.
- ο Να παράγουν ένα εμπλουτισμένο οργανικό κλάσμα για κομποστοποίηση ή αναερόβια χώνευση. Το παραγόμενο υπόστρωμα σε αυτή την περίπτωση είναι χαμηλής ποιότητας και περιορισμένης χρήσης (π.χ. υλικό κάλυψης σε XYT ή για αποκατάσταση λατομείων, ορυχείων κλπ.).
- ο Να παράγουν ένα διαχωρισμένο, σχετικά ομογενοποιημένο κλάσμα υψηλής θερμογόνου δύναμης, το οποίο αποτελείται κυρίως από χαρτί, πλαστικά και άλλα καύσιμα υλικά (RDF ή SRF), προς αξιοποίηση σε ειδική εγκατάσταση καύσης με ανάκτηση ενέργειας ή σε υπάρχοντες βιομηχανικούς κλιβάνους (π.χ. τσιμεντοβιομηχανία).

Το βιολογικό τμήμα της επεξεργασίας της MBE μπορεί να λάβει χώρα πριν ή μετά τη μηχανική διαλογή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Καθεμιά από αυτές τις δύο προσεγγίσεις παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα, ενώ επιτυχημένες εφαρμογές έχουν και οι δύο [I.T.A., 2007].



*IVC : λιπασματοποίηση σε κλειστούς θαλάμους (In Vessel Composting)

AD : αναερόβια χώνευση (Anaerobic Digestion)

Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών επιλογών διαμόρφωσης ενός συστήματος MBE [DEFRA, 2005].

4.2 Μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας

Οι μέθοδοι βιολογικής επεξεργασίας μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε απόβλητα που επιδέχονται τέτοιου είδους επεξεργασία, δηλαδή σε βιοαποδομήσιμα ή οργανικά απόβλητα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει μια μεγάλη ποικιλία αγροτικών αποβλήτων και υπολειμμάτων (κοπριές, φυτικά υπολείμματα καλλιεργειών, ελαιοπυρήνα κλπ), πολλών στερεών αποβλήτων και ιλύων από βιομηχανίες τροφίμων, η ιλύς βιολογικών καθαρισμών αστικών λυμάτων, καθώς και το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών αποβλήτων (BAA). Το τελευταίο, υπόκειται στους περιορισμούς της Οδηγίας 99/31/ΕΕ για την Υγειονομική Ταφή, που επιβάλλει τη σταδιακή εκτροπή του από τη διάθεση σε ΧΥΤ, από το 2010 έως το 2020 για την Ελλάδα [I.T.A., 2007].

Είναι εύλογο ότι τα μη βιοαποδομήσιμα υλικά, που εισέρχονται σε μια μονάδα βιολογικής επεξεργασίας, θα ληφθούν αναλλοίωτα στην έξοδό της. Στην περίπτωση των αστικών αποβλήτων τέτοια υλικά περιλαμβάνουν προσμίξεις ξένων σωμάτων, όπως γυαλί και πλαστικά, αλλά και μη βιοδιασπάσιμους ρύπους (βαρέα μέταλλα, επίμονους οργανικούς ρύπους - POPs), μη ορατούς μακροσκοπικά και μικροσκοπικά, που ανιχνεύονται όμως στο τελικό προϊόν, υποβαθμίζοντας την αξία του και περιορίζοντας τις δυνατότητες χρήσης του. Συνεπώς, η καθαρότητα των υλικών

εισόδου καθορίζει αναπόφευκτα την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Όσον αφορά στα αστικά απόβλητα, οι μονάδες βιολογικής επεξεργασίας μπορούν να δεχθούν:

- Το βιοαποδομήσιμο κλάσμα μετά από διαλογή στην πηγή, το οποίο μετά από μια αερόβια φάση βιοσταθεροποίησης μπορεί να θεωρηθεί «κομπόστ» και χαρακτηρίζεται από μέση ποιότητα, χαμηλές συγκεντρώσεις ρύπων και μερικές διεξόδους διάθεσης.
- Ένα εμπλουτισμένο σε βιοαποδομήσιμα υλικά κλάσμα, που προέρχεται από εγκαταστάσεις μηχανικής διαλογής, η ποιότητα του οποίου να μην εξαρτάται από τις επιμέρους διεργασίες της μηχανικής διαλογής, σε κάθε περίπτωση όμως είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή του επιλεγμένου στην πηγή κλάσματος.

Στη δεύτερη περίπτωση η βιολογική επεξεργασία μπορεί να λειτουργήσει εξ' ίσου καλά όσον αφορά στις βιολογικά εξαρτώμενες παραμέτρους (καταστροφή παθογόνων - υγιεινοποίηση και βιοσταθεροποίηση), όμως το τελικό προϊόν θα περιέχει όλες τις μη βιοδιασπώμενες προσμείξεις και ρύπους του υλικού εισόδου και πιθανότατα σε υψηλότερες συγκεντρώσεις, καθώς μέρος του οργανικού υλικού έχει αποδομηθεί σε διοξείδιο του άνθρακα. Σε αυτήν την περίπτωση το τελικό προϊόν είναι ένα βιοσταθεροποιημένο υλικό, τύπου «κομπόστ», το οποίο μπορεί να διατεθεί σε ΧΥΤ χωρίς να παραβιάζει τις απαιτήσεις της Οδηγίας 99/31/ΕΕ, έχει όμως περιορισμένες δυνατότητες άλλων χρήσεων στις περισσότερες χώρες της ΕΕ. Οι περιορισμοί αυτοί αναμένεται να επεκταθούν σε όλη την ΕΕ με υιοθέτηση σχετικής Οδηγίας με αυστηρές προδιαγραφές για το λεγόμενο «κομπόστ», η οποία πιθανότατα δεν θα επιτρέπει καν την χρήση του όρου για τα προϊόντα της βιοεπεξεργασίας, που δεν προέρχονται από διαχωρισμένα στην πηγή βιοαποδομήσιμα υλικά.

Οι δύο βασικές μορφές βιοεπεξεργασίας οργανικών αποβλήτων είναι:

- η κομποστοποίηση (αερόβια, θερμόφιλη βιο-οξειδωση) και
- η αναερόβια χώνευση.

Η πρώτη οδηγεί στην παραγωγή ενός σταθεροποιημένου εδαφοβελτιωτικού, το λεγόμενο κομπόστ, ενώ η δεύτερη στην παραγωγή ενέργειας (βιοαέριο) και ενός σχετικά σταθεροποιημένου υπολείμματος, το οποίο μετά από περεταίρω αερόβια σταθεροποίηση μπορεί να μετατραπεί επίσης σε κομπόστ και να έχει ανάλογες χρήσεις.

Κάθε μορφή βιοεπεξεργασίας βασίζεται στη δράση των μικροοργανισμών, πρόκειται δηλαδή για βιολογικά συστήματα, τα οποία, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα του τεχνολογικού τους μέρους – και του κόστους τους – ρυθμίζονται από κάποιες βιολογικές αρχές, που καθορίζουν το μέγιστο δυνατό ρυθμό αναπαραγωγής των μικροοργανισμών και διάσπασης των αποβλήτων.

Το βασικό όφελος των βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας αποβλήτων έγκειται στη δυνατότητα επιστροφής των οργανικών υλικών στο έδαφος, ολοκληρώνοντας έτσι έναν σημαντικό οικολογικό κύκλο και υποκαθιστώντας μέρος των εισροών χημικών λιπασμάτων στη γεωργία. Η βιοεπεξεργασία έχει ιδιαίτερη σημασία για τις Μεσογειακές χώρες, όπου οι κλιματικές συνθήκες και οι καλλιεργητικές πρακτικές έχουν ως αποτέλεσμα έναν υψηλό ρυθμό αποδόμησης της οργανικής ουσίας στο έδαφος, φέρνοντας πολλές περιοχές στα όρια της απερήμωσης. Η βιοεπεξεργασία των οργανικών αποβλήτων, κάτω από προϋποθέσεις, έχει τη δυνατότητα να συμβάλλει στην αντιμετώπιση και των δύο αυτών προβλημάτων: της διαχείρισης των αποβλήτων και της υποβάθμισης της ποιότητας του εδάφους, προσθέτοντας τον κρίκο που λείπει ώστε να κλείσει αειφορικά ο κύκλος της οργανικής ύλης [I.T.A., 2007].

Απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιοποίηση του οργανικού μέρους των αποβλήτων είναι η τήρηση υψηλών ποιοτικών προδιαγραφών, που να διασφαλίζουν τόσο την ανθρώπινη υγεία, όσο και την προστασία του περιβάλλοντος γενικότερα [Λαζαρίδη κ.α., 2002]. Παράμετροι ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, που συνήθως ρυθμίζονται από τη σχετική νομοθεσία, αποτελούν η συγκέντρωση σε βαρέα μέταλλα και άλλους πιθανούς τοξικούς ρύπους (PCBs, PAH, διοξίνες, υπολείμματα φυτοφαρμάκων), η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών για τον άνθρωπο ή τα φυτά, οι ξένες προσμίξεις (πλαστικό, αιχμηρά), η φυτοτοξικότητα, κ.ά. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι σήμερα η κυρίαρχη άποψη είναι ότι δεν είναι εφικτό να παρασκευαστεί υψηλής ποιότητας, ασφαλές για αγροτική χρήση, κομπόστ από ΑΣΑ, που δεν έχουν υποστεί διαλογή στην πηγή [Λαζαρίδη κ.α., 2002].

Στην επιλογή μεθόδων βιοεπεξεργασίας των οργανικών αποβλήτων σημαντικό ρόλο παίζει ο στόχος της επεξεργασίας και η δυνατότητα διάθεσης των προϊόντων, η οποία θα πρέπει να εξετάζεται από τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού. Το κομπόστ μπορεί εν μέρει να χρησιμοποιηθεί σε αγροτικές και θερμοκηπευτικές εφαρμογές, μπορεί να περιορίσει τη διάβρωση του εδάφους, να επιφέρει βελτιώσεις στη δομή και την υδατο-ικανότητα του εδάφους, να περιορίσει σε μικρό βαθμό την ανάγκη χρήσης

λιπασμάτων και να συμβάλλει στον έλεγχο ορισμένων φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών. Ωστόσο, το κομπόστ που προέρχεται από αστικά απόβλητα και λάσπες δεν είναι κατάλληλο για αγροτική εφαρμογή, ειδικά αν δεν πληροί υψηλές ποιοτικές προδιαγραφές και η διάθεσή του δεν πρέπει να θεωρείται εκ των προτέρων εξασφαλισμένη. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης, όπου η δυνατότητα αξιοποίησης της ενέργειας του παραγόμενου βιοαερίου, καθώς και η διασφάλιση της διάθεσης του στερεού καταλοίπου, πρέπει να εξετάζονται από την αρχή στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Σήμερα και έτσι όπως διαμορφώνονται οι ενεργειακές προτεραιότητες στην ΕΕ, ο κατάλληλος σχεδιασμός μπορεί να εξασφαλίσει την αξιοποίηση του βιοαερίου και σε συνδυασμό με στοχευμένες πολιτικές (π.χ. Ηνωμένο Βασίλειο), να οδηγήσει σε οικονομικά βιώσιμες συνδυασμένες λύσεις αναερόβιας και αερόβιας επεξεργασίας [Last, 2006].

Ο τύπος της απαιτούμενης προεπεξεργασίας των αποβλήτων, πριν εισέλθουν στην μονάδα της βιοεπεξεργασίας, εξαρτάται από το είδος και την καθαρότητα των αποβλήτων.

Αν πρόκειται για ΑΣΑ, οι απαιτούμενες διεργασίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με το σύστημα συλλογής. Σε περίπτωση συλλογής σύμμεικτων ΑΣΑ απαιτούνται πολύπλοκες εγκαταστάσεις μηχανικής διαλογής για τον διαχωρισμό τους κατά είδος με τη βοήθεια μηχανικών και φυσικών μεθόδων, όπως αναφέρονται παρακάτω. Τέτοια συστήματα απαιτούν προχωρημένη τεχνολογία και σημαντική επένδυση και αποδίδουν περιορισμένης καθαρότητας προϊόντα. Συνεισφέρουν όμως στην επίτευξη των στόχων της Οδηγίας 99/31/ΕΕ με έναν ευέλικτο και συχνά ανταγωνιστικό οικονομικά και περιβαλλοντικά τρόπο, ανάλογα με τις τοπικές περιστάσεις.

Στην περίπτωση που το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ συλλέγεται χωριστά, με διαλογή στην πηγή, απαιτείται πάλι μια προεπεξεργασία, ο βαθμός της οποίας εξαρτάται από την καθαρότητα του συλλεγόμενου υλικού και κατά συνέπεια από την ενεργό συμμετοχή των πολιτών στο πρόγραμμα χωριστής διαλογής. Στην περίπτωση που εφαρμόζεται κάποιο πρόγραμμα διαλογής στην πηγή για άλλο ρεύμα των ΑΣΑ (π.χ. υλικά συσκευασίας), η διεθνής εμπειρία έχει δείξει ότι δεν παρατηρείται αξιόλογη βελτίωση στην ποιότητα του οργανικού κλάσματος και έτσι απαιτούνται περίπου οι ίδιες πολύπλοκες εγκαταστάσεις προεπεξεργασίας όπως και στην περίπτωση συλλογής σύμμεικτων αποβλήτων.

4.3 Αερόβια Διεργασία

Η αερόβια διεργασία είναι μία μέθοδος διαχείρισης στερεών απορριμμάτων, όπου το οργανικό (ζυμώσιμο) κλάσμα αποικοδομείται βιολογικά υπό ελεγχόμενες συνθήκες, με αποτέλεσμα τη σταδιακή μετατροπή του σε ένα υλικό βιολογικά σταθερό κομπόστ. Το τελικό αυτό προϊόν (κομπόστ) πρέπει να είναι αρκετά σταθεροποιημένο για αποθήκευση και εφαρμογή στο έδαφος χωρίς ανεπιθύμητες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επομένως, η αερόβια μέθοδος, όπως εσφαλμένα επικράτησε να ονομάζεται, αποτελεί εξειδικευμένη μορφή βιοσταθεροποίησης αποβλήτων κατά την οποία οι συνθήκες υγρασίας και αερισμού είναι τέτοιες που να εξασφαλίζουν την ταχεία ανάπτυξη ελεγχόμενων υψηλών θερμοκρασιών, ευνοϊκών για την ανάπτυξη και επικράτηση θερμοφίλων μικροοργανισμών. Πρόκειται, λοιπόν, για μια ελεγχόμενη βιο-οξειδωτική διεργασία [Zucconi and de Bertoldi, 1987a,b].

Το 2007 στην ΕΕ παρήχθησαν 13,2 εκατομμύρια τόννοι κόμποστ (Πίνακας 4.1). Οι χώρες που παράγουν το μεγαλύτερο μέρος από την παραπάνω ποσότητα είναι η Γερμανία, η Ιταλία, η Ολλανδία και η Αυστρία. Τα “πράσινα” απόβλητα παραμένουν η κύρια πηγή πρώτης ύλης για την παραγωγή κόμποστ, λόγω ευκολίας στη συλλογή τους και απουσίας προσμίξεων στα συγκεκριμένα απόβλητα.

Πίνακας 4.1: Παραγωγή κόμποστ, σε εκατομμύρια τόννους, από διάφορες πηγές στην ΕΕ-27 το 2007 [Barth et al., 2008].

	Σύνολο	Βιολογικά Απόβλητα	"Πράσινα" Απόβλητα	Ιλύς βιολογικού καθαρισμού	Ανάμεικτα Απόβλητα
ΕΥ27	13.2	4.8 36%	5.7 43%	1.4 10.4%	1.4 10.3%

Οι φράσεις κλειδιά, που χρησιμοποιούνται στον ορισμό και διαφοροποιούν τη λεγόμενη λιπασματοποίηση από άλλες μεθόδους, είναι οι εξής:

- Βιολογική αποδόμηση.
- Οργανικό κλάσμα.
- Ελεγχόμενες συνθήκες.

Η φράση «αποικοδομείται βιολογικά» διαφοροποιεί την εν λόγω μέθοδο από άλλες μεθόδους διαχείρισης στερεών απορριμμάτων, όπως είναι η καύση, η πυρόλυση, η υγειονομική ταφή κ.λ.π. Ο όρος «οργανικό κλάσμα» έχει να κάνει με τη

βιολογική αποικοδόμηση. Γενικά, μόνο τα βιολογικής προέλευσης υλικά (π.χ. ξύλο, χαρτί, υπολείμματα κηπουρικής κ.λ.π.) μπορούν να αποικοδομηθούν βιολογικά. Η φράση «ελεγχόμενες συνθήκες» είναι ίσως η πιο σημαντική από τις φράσεις – κλειδιά, γιατί διαφοροποιεί τη λιπασματοποίηση από τη βιολογική αποικοδόμηση, που λαμβάνει χώρα στην φύση και είναι υπεύθυνη για την ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων. Ένας πολύ πρακτικός λόγος που η φράση περιέχει τη λέξη «ελεγχόμενες» είναι ότι, χωρίς τον έλεγχο, ακόμα και η πιο απλή περίπτωση βιολογικής αποικοδόμησης θα χαρακτηριζόταν ως λιπασματοποίηση.

Η τελευταία φράση του ορισμού, «ένα υλικό βιολογικά σταθερό (compost), το οποίο μπορεί να χρησιμεύσει σαν εδαφοβελτιωτικό», αν και δεν αποτελεί κάποια φράση – κλειδί, εν τούτοις υποδηλώνει ότι το υλικό έχει βιολογικά σταθεροποιηθεί. Αποτελεί επίσης μία ένδειξη του σκοπού της όλης διαδικασίας και ένα μέτρο που υποδηλώνει την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Ακόμα και εάν παραλειφθεί η φράση αυτή, ο ορισμός παραμένει δόκιμος.

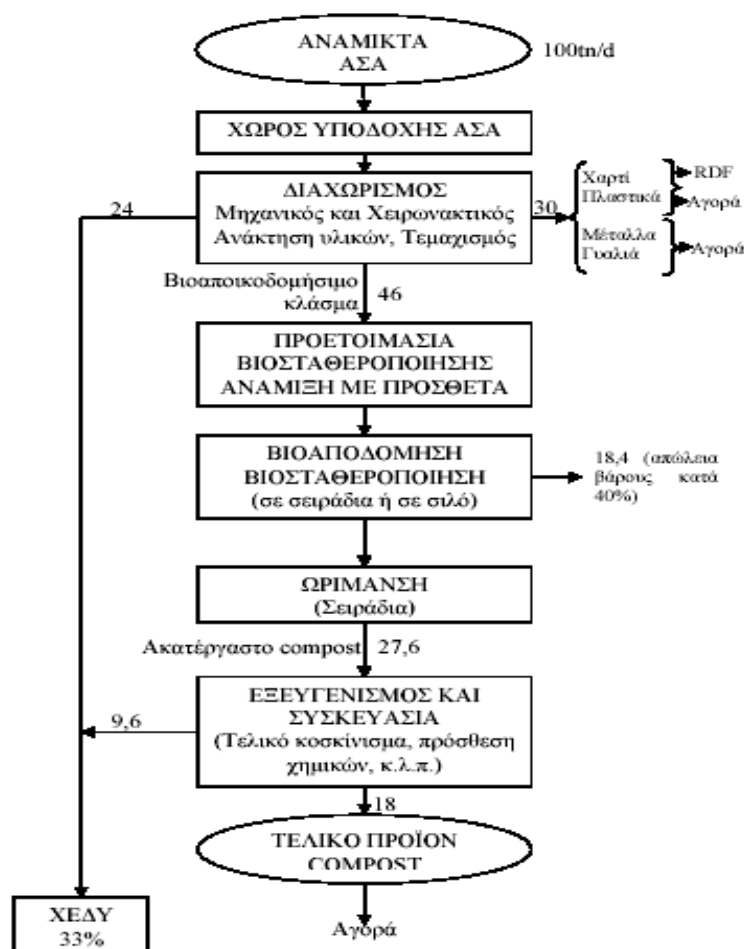
Στο Διάγραμμα 4.1 παρουσιάζεται η ροή μαζί με ένα ενδεικτικό ισοζύγιο μάζας μιας εγκατάστασης λιπασματοποίησης [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Όπως προαναφέρθηκε, το οργανικό (ζυμώσιμο) κλάσμα των στερεών απορριμμάτων είναι υλικό που μπορεί να αποικοδομηθεί βιολογικά και να παράγει ποσότητες κομπόστ. Το οργανικό κλάσμα των στερεών αστικών απορριμμάτων περιλαμβάνει:

- Τα οργανικά υπολείμματα της κουζίνας, όπως φλούδες, φύλλα, χαλασμένους καρπούς, υπολείμματα από σαλάτες, κρέατα, κόκαλα και ψάρια. Επίσης, τα κατακάθια του καφέ και τα υπολείμματα από κάθε είδος αφεψήματα, εκχυλίσματα κ.λ.π.
- Τα φυτικά υπολείμματα από πάρκα, δέντρα, κήπους, βεράντες(φύλλα, κλαριά, φλούδες, ρίζες, κλαδέματα από δένδρα, θάμνους, κ.λ.π.).

4.3.1 Είδη

Η αερόβια βιολογική επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ έχει εφαρμοστεί με διάφορες μορφές όπως:



Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα ροής και ενδεικτικό ισοζύγιο μάζας εγκατάστασης λιπασματοποίησης (αριθμοί σε tn/d).

- Μέθοδος αναδενόμενων σωρών.
- Μέθοδος δυναμικά αεριζόμενων σωρών.
- Μέθοδος βιοαντιδραστήρων (κλειστά συστήματα).

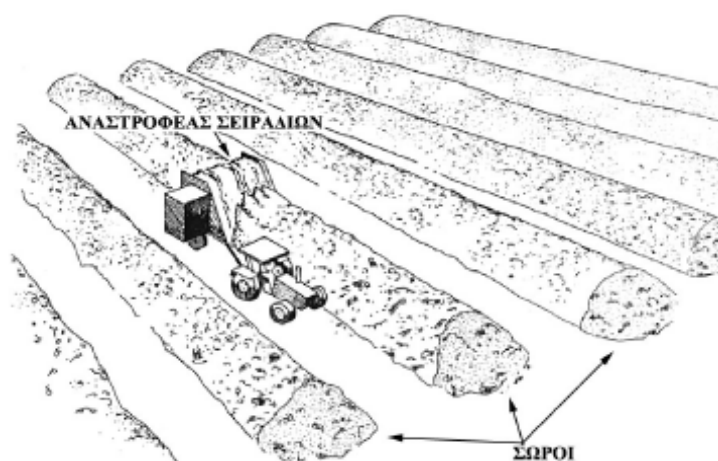
4.3.1.1. Μέθοδος αναδενόμενων σωρών

Απαιτεί την χρήση μεγάλου μήκους σωρών του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ. Οι σωροί αυτοί είναι συνήθως τριγωνικής διατομής με λόγο πλάτος βάσης/ύψος τουλάχιστον 2. Ο λόγος απαίτησης του σχήματος αυτού οφείλεται αφ' ενός στην ύπαρξη ενός επαρκούς μεγέθους σωρού, ώστε να εξασφαλίζεται η παραγωγή αρκετής θερμότητας και η οποία να διατηρείται στο εσωτερικό του και αφ' ετέρου στο ότι ο σωρός πρέπει να είναι αρκετά μικρός ώστε το οξυγόνο να μπορεί να διαχέεται ελεύθερα στο εσωτερικό του. Οι σωροί τοποθετούνται σε σταθερό έδαφος ώστε να

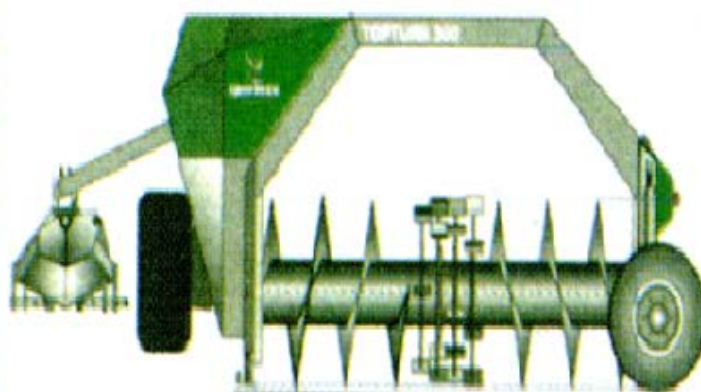
μπορούν να αναδεύονται περιοδικά (Σχήμα 4.2 και 4.3). Ο αερισμός του σωρού γίνεται στατικά, δηλαδή με την περιοδική ανάδευση του σωρού.

Ένας τυπικός σχηματισμός είναι τα *σειράδια* (ελεύθερα ή σε κανάλια) μήκους μέχρι 100m και πλάτους μέχρι 5m. Τα συστήματα αυτά είναι ανοικτά και λειτουργούν συνήθως κάτω από υπόστεγο [Tchobanoglous et al., 1993].

Όπως παρουσιάζεται και στα σχήματα (Σχήμα 4.2, 4.3 και 4.4) η αναστροφή των σειραδίων μπορεί να γίνει είτε επιτόπου, με διατήρηση της θέσης του κάθε σειραδίου, είτε με εκτόπιση του κόμποστ. Στη δεύτερη περίπτωση το κόμποστ μεταφέρεται στην διπλανή θέση, όπου σχηματίζεται ένα καινούργιο σειράδιο.



Σχήμα 4.2: Αναστροφέας σειραδίων [Tchobanoglous et al., 1993].



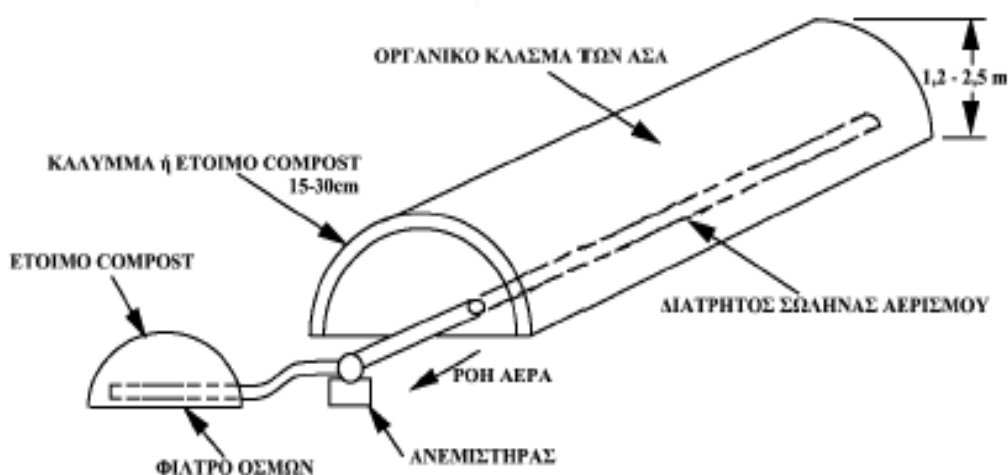
Σχήμα 4.3: Διάταξη επιτόπιας αναστροφής σειραδίων [Cossu, 2010].



Σχήμα 4.4: Διάταξη αναστροφής σειραδίων με εκτόπιση [Cossu, 2010].

4.3.1.2. Μέθοδος δυναμικά αεριζόμενων σωρών

Η μέθοδος αυτή (Σχήμα 4.5) απαιτεί ομοίως την τοποθέτηση των υλικών προς επεξεργασία σε σωρούς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως οι σωροί αερίζονται μηχανικά και τα συστήματα αυτά ονομάζονται και δυναμικά. Οι σωροί τοποθετούνται πάνω σε ένα δίκτυο αεριστήρων, οι οποίοι παρέχουν την απαραίτητη ποσότητα αέρα για τη βιολογική αποικοδόμηση. Ο αέρας είτε παρέχεται με θετική πίεση (τροφοδοσία αέρα στο σωρό), είτε με αρνητική πίεση (αναρρόφηση αέρα από το σωρό).



Σχήμα 4.5: Μέθοδος δυναμικά αεριζόμενων σωρών [Tchobanoglous et al., 1993].

Μέσω σωστού προγραμματισμού του ρυθμού και της ποσότητας του αερισμού μπορεί να ελεγχθεί και η θερμοκρασία που αναπτύσσει ο σωρός, ενώ τα απαέρια

μπορούν εύκολα να καθαριστούν από οσμές. Επειδή όμως οι σωροί δεν αναδεύονται υπάρχει το ενδεχόμενο η εξωτερική επιφάνεια του σωρού να μην αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία (550°C) για την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών. Για το λόγο αυτό τοποθετείται ένα κάλυμμα από έτοιμο κομπόστ, το οποίο δρα ως θερμομονωτικό. Οι απαιτήσεις χώρου για τη μέθοδο αυτή είναι αρκετά μικρότερες από τη μέθοδο των αναδευόμενων σωρών. Η περίοδος ωρίμανσης διαρκεί από 6 – 12 εβδομάδες.

4.3.1.3. Μέθοδος βιοαντιδραστήρων (κλειστά συστήματα)

Στα συστήματα αυτά το προς λιπασματοποίηση μίγμα των ΑΣΑ τοποθετείται μέσα σε βιοαντιδραστήρες, όπου και βιοαποικοδομείται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες αερισμού, υγρασίας και συνεχούς ανάδευσης. Οι αντιδραστήρες μπορούν να περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός διαμερίσματα (π.χ. πολυώροφα σιλό), να περιστρέφονται ή να περιλαμβάνουν μηχανισμούς περιστροφής και ανάδευσης των υλικών και μπορούν να τοποθετηθούν ακόμα και μέσα σε κτίρια. Συνήθως, είναι συστήματα συνεχούς ροής (Σχήμα 4.6), αλλά έχουν παρουσιαστεί και συστήματα διαλείποντος έργου (batch) (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.6: Βιοαντιδραστήρας με ανάδευση (CSTR).



Σχήμα 4.7: Βιοαντιδραστήρας κομποστοποίησης batch [Cossu, 2010].

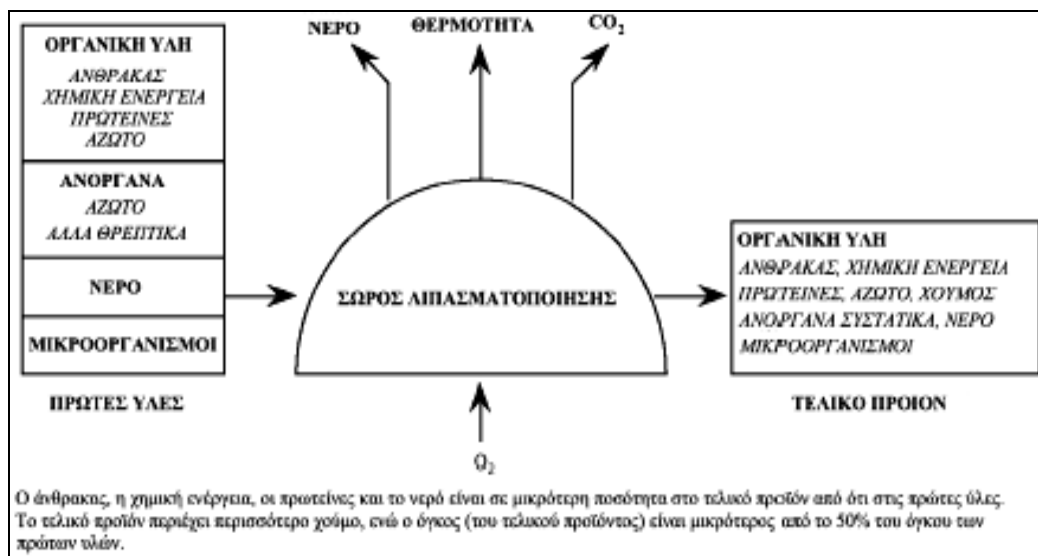
Σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι ότι η διαδικασία λαμβάνει χώρα κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες, ώστε να επιταχύνεται η λιπασματοποίηση. Η μέθοδος αυτή, αν και πιο πολύπλοκη από τις μεθόδους των σωρών, παράγει ελάχιστες οσμές και ελάχιστα ή καθόλου στραγγίσματα. Επίσης, η παροχή αέρα μπορεί να ελεγχθεί πλήρως, αφού με την χρήση αισθητήρων οξυγόνου ο αέρας μπορεί να κατευθυνθεί ακριβώς στην περιοχή που παρουσιάζεται έλλειμμα οξυγόνου. Ο χρόνος ωρίμανσης ποικίλει από μία έως τέσσερις εβδομάδες.

4.3.2. Προϊόντα

Τα τελικά προϊόντα, που προκύπτουν από τη διαδικασία της αερόβιας επεξεργασίας, είναι τα ακόλουθα:

- Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2).
- Νερό .
- Ένα χουμοειδές υλικό, που δεν μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια. Η διεθνής βιβλιογραφία το ονομάζει γενικά κομπόστ, χωρίς σαφή αναφορά σε συγκεκριμένο στάδιο αερόβιας επεξεργασίας.

Στο Διάγραμμα 4.2, που ακολουθεί, καταγράφονται τα υλικά και τα προϊόντα που παρέχονται σε μια τέτοια αερόβια διεργασία.



Διάγραμμα 4.2: Προϊόντα της αερόβιας επεξεργασίας [Tchobanoglous et al., 1993].

Η αερόβια επεξεργασία αποσκοπεί επίσης στην επίτευξη των παρακάτω:

- Την καταστροφή παθογόνων και άλλων ανεπιθύμητων οργανισμών, οι οποίοι είναι πιθανό να βρίσκονται στα στερεά απορρίμματα
- Τη διατήρηση του θρεπτικού επιπέδου του οργανικού υλικού σε υψηλά επίπεδα (περιεκτικότητα σε N, P και K), ώστε το προϊόν (compost) που θα προκύψει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους.

Επομένως, κατά την αερόβια διεργασία, με τη βοήθεια της μικροβιακής κοινότητας (βακτήρια, ακτινομύκητες και μήκυτες) και της μεταβολικής της δραστηριότητας, με τη δράση ενδοκυτταρικών και εξωκυτταρικών ενζύμων, επιτυγχάνεται η τροποποίηση και αποικοδόμηση της οργανικής ύλης που οδηγεί [Hang, 1993]:

- στο σχηματισμό ενός πλήθους μεταβολικών προϊόντων, όπως π.χ. χουμικών ουσιών και λιγνο-πρωτεϊνών,
- στην απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων από οργανικές ενώσεις και μεταφορά τους σε διαλυτά, ή αδιάλυτα ανόργανα άλατα και
- στην έκλυση αερίων, όπως π.χ. CO₂, NH₃, NO_x, H₂O, CH₄ και H₂S.

Γενικά, τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά του προϊόντος ποικίλουν ανάλογα με την αρχική ύλη, που διατέθηκε για επεξεργασία και τις συνθήκες, οι οποίες

επικράτησαν κατά τη διαδικασία και την έκταση της αποικοδόμησης. Το προϊόν έχει σκούρο χρώμα, εύθραυστη, χωμάτινη υφή και οσμή που μοιάζει με αυτές του εδάφους. Το τελικό προϊόν δεν έχει καμία σχέση, όσον αφορά στην φυσική μορφή, με αυτήν του αρχικού οργανικού υλικού από το οποίο παράχθηκε. Το καλής ποιότητας προϊόν πρέπει να έχει απαλλαγεί από ζιζάνια και παθογόνους οργανισμούς.

Μερικά από τα χαρακτηριστικά, που διαφοροποιούν το προϊόν από άλλα οργανικά υλικά, είναι:

- Το χρώμα του, το οποίο ποικίλλει από σκούρο καφέ έως μαύρο.
- Ο χαμηλός λόγος C/N σε σχέση με άλλα οργανικά υλικά.
- Η συνεχώς μεταβαλλόμενη σύνθεσή του, εξαιτίας της δράσης των μικροοργανισμών, ακόμα και μετά το στάδιο της ωρίμανσης.
- Η υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και προσρόφησης νερού.

4.3.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Στον Πίνακα 4.2 καταγράφονται τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αερόβιας επεξεργασίας, ως τρόπου διαχείρισης των στερεών απορριμμάτων.

Πίνακας 4.2: Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αερόβιας επεξεργασίας.

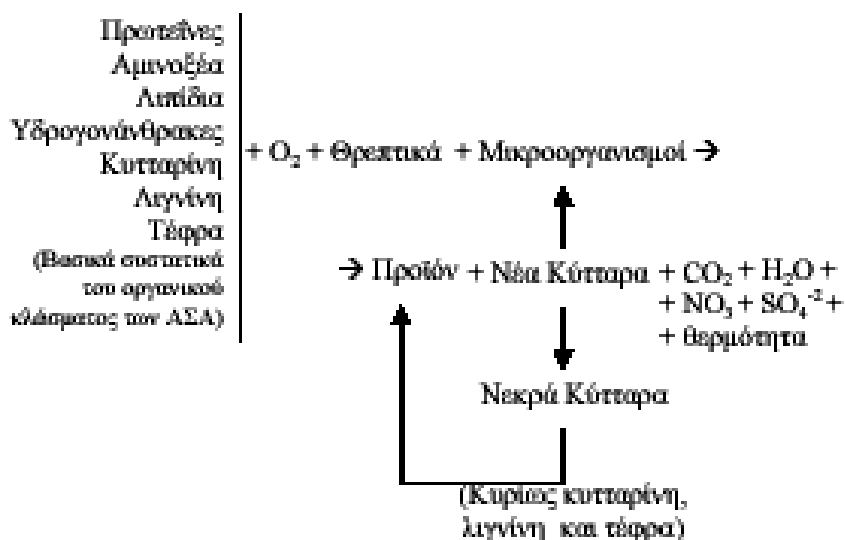
Πλεονεκτήματα
• Παραγωγή προϊόντος (compost) ή προϊόντων που διατίθενται στην αγορά • Δυνατή η από κοινού χουμοποίηση με λάσπη από βιολογική επεξεργασία • Αύξηση ζωής του χώρου υγειονομικής ταφής • Χαμηλότερα κόστη επένδυσης από ότι τα συστήματα καύσης • Συμβατή με προγράμματα ανακύκλωσης και καύσης • Χαμηλού επιπέδου περιβαλλοντικές επιπτώσεις • Καλύτερης ποιότητας απορρίμματα για ταφή στο ΧΥΤΑ
Μειονεκτήματα
• Αργός ρυθμός διαδικασίας • Πλήθος απρόβλεπτων παραγόντων που δυσχεραίνουν τον έλεγχο της διαδικασίας • Απαραίτητη η διάθεση / πώληση του προϊόντος (compost) • Μεγαλύτερες απαιτήσεις έκτασης σε σχέση με την καύση • Μεγαλύτερες απαιτήσεις εργατικού προσωπικού σε σχέση με την καύση

4.3.4. Στάδια

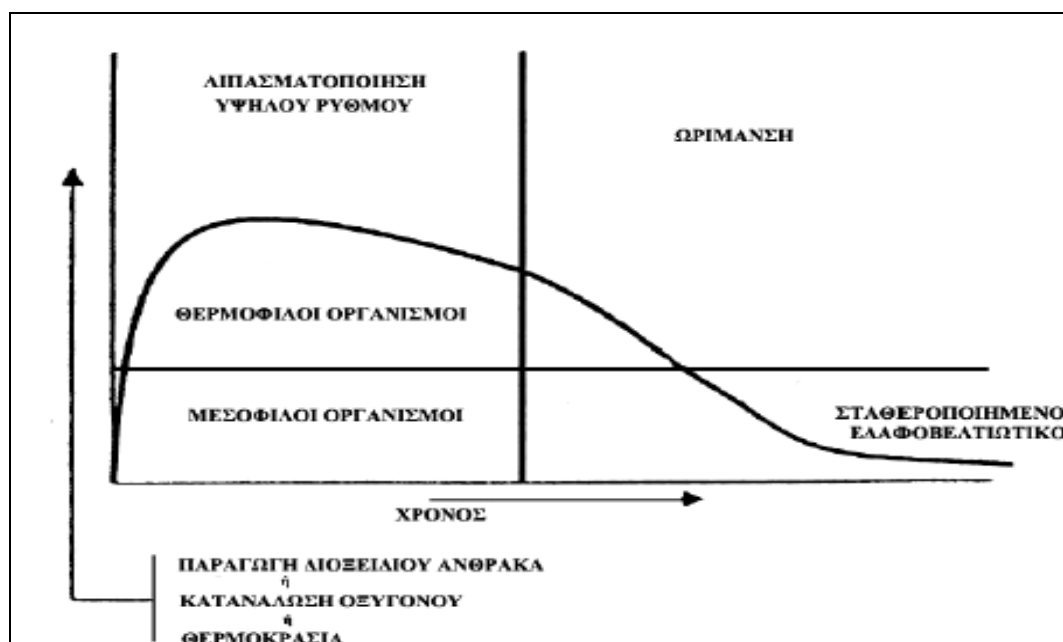
Η αερόβια διεργασία περιλαμβάνει τη δράση μικροοργανισμών σε βιοαποικοδομήσιμο οργανικό υλικό, το οποίο έχει σχηματιστεί σε σωρούς με αρκετά μεγάλο μήκος. Συγκεκριμένα, οι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν το προς επεξεργασία υλικό, καθώς τρέφονται από αυτό (θρεπτικό υπόστρωμα). Οι μικροοργανισμοί σπάνε τους χημικούς δεσμούς με τους οποίους συνδέονται τα άτομα του άνθρακα μεταξύ τους. Στη συνέχεια, σχηματίζουν πρωτεΐνες, συνδυάζοντας την χημική ενέργεια που εκλύεται, με τα άτομα άνθρακα και αζώτου, που βρίσκονται προσωρινά σε διάσπαση. Επειδή οι πρωτεΐνες αποτελούν το κύριο συστατικό των μικροοργανισμών, παρατηρείται αύξηση του πληθυσμού αυτών.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται όσο οι συνθήκες το επιτρέπουν και για την πραγματοποίησή της είναι απαραίτητο να υπάρχει μία κατάλληλη, για να αφομοιωθεί από τους μικροοργανισμούς, πρώτη ύλη, ένας κατάλληλος μικροβιακός πληθυσμός και φυσικά οι συνθήκες εκείνες που θα επιτρέψουν την αποικοδόμηση.

Το οργανικό κλάσμα των στερεών απορριμμάτων, όπως όλες οι οργανικές ενώσεις, θεωρείται ότι αποτελείται από πρωτεΐνες, αμινοξέα, λιπίδια, υδρογονάνθρακες, κυτταρίνη, λιγνίνη και τέφρα. Έτσι, η αερόβια διαδικασία, μπορεί να παραστεί σε μορφή εξίσωσης ως εξής:



Τα υλικά που συνιστούν τα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα, ανάλογα με το βαθμό βιοαποδομησιμότητάς τους, χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:



2^ο Στάδιο

Το pH της μάζας μετατρέπεται σε αλκαλικό και είναι δυνατό να ελευθερωθεί NH_3 , αν υπάρχει περίσσεια N. Στο τέλος αυτού του σταδίου, η μεταβολική δράση αυτών των μικροοργανισμών είναι τέτοια, ώστε η θερμοκρασία φτάνει τους 60-70°C. Έτσι, μόνο θερμοφιλικά βακτήρια και ακτινομύκητες μπορούν να συνεχίσουν την αποικοδόμηση του υλικού.

3^ο Στάδιο

Με τη συνεχή κατανάλωση του υποστρώματος, ο ρυθμός αποικοδόμησης μειώνεται, όπως και η θερμοκρασία. Έτσι, τα μη θερμοφιλικά βακτήρια και οι μύκητες ξαναγίνονται ενεργά.

4^ο Στάδιο

Στο τελικό αυτό στάδιο συμβαίνουν περίπλοκες αντιδράσεις πύκνωσης και πολυμερισμού. Το τελικό προϊόν αποτελείται από ένα σταθεροποιημένο οργανικό υπόλειμμα, παρόμοιο με τα χουμικά υλικά του εδάφους, που σχηματίζονται στην φύση από ζωικά και φυτικά υπολείμματα, με ανάλογη βιολογική διαδικασία. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι χημικοί και φυσικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της λιπασματοποίησης. Οι χημικοί παράγοντες είναι η υγρασία, ο λόγος C/N, το pH, και το οξυγόνο, που υπάρχει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, μέσω του αερισμού. Οι φυσικοί παράγοντες, που επηρεάζουν τη διαδικασία της λιπασματοποίησης, είναι το μέγεθος των τεμαχίων και η θερμοκρασία.

Παράγοντες	Βέλτιστες τιμές
Χημικοί	
• Υγρασία	40-60%
• Λόγος C/N	20-30
• pH	6-8
• Οξυγόνο	10-15%
Φυσικοί	
• Μέγεθος Τεμαχίων	*
• θερμοκρασία	32-60 ⁰ C

Πίνακας 4.3: Χημικοί και φυσικοί παράγοντες επιρροής λιπασματοποίησης [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

4.3.5. Χημικοί παράγοντες επιρροής

Υγρασία

Το νερό είναι μία απαραίτητη παράμετρος για όλες τις μορφές της ζωής. Οι μικροοργανισμοί, που αποικοδομούν το οργανικό υλικό σε ένα σωρό λιπασματοποίησης δεν αποτελούν εξαίρεση.

Τα περισσότερα οργανικά υλικά έχουν πολύ χαμηλά ποσοστά υγρασίας, που έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της λιπασματοποίησης. Η δράση των μικροοργανισμών μειώνεται σημαντικά αν το ποσοστό υγρασίας στο σωρό πέσει κάτω από 40%. Αν αντίθετα το ποσοστό αυξηθεί πάρα πολύ (> 60%), οι πόροι αέρος που βρίσκονται μέσα στο υλικό γεμίζουν με νερό δημιουργώντας αναερόβιες συνθήκες, που προκαλούν δυσάρεστες οσμές και τη δημιουργία διασταλλαγμάτων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αποσύνθεσης πολύπλοκων οργανικών ενώσεων, που οδηγούν στη δημιουργία CH_4 και CO_2 .

Λόγω της εξάτμισης υπάρχει συνήθως ένα έλλειμμα υγρασίας στον σωρό, παρότι η μικροβιακή δράση αυξάνει την υγρασία σε αυτόν κατά τη διάρκεια της ανοικοδόμησης. Σε μία τέτοια περίπτωση, η προσθήκη νερού στο σωρό είναι απαραίτητη για τη σωστή πορεία της διαδικασίας. Βέβαια, υπάρχει η δυνατότητα μείωσης της εξάτμισης ελέγχοντας το μέγεθος των σωρών (σωροί μεγάλου όγκου έχουν μικρότερη επιφάνεια εξάτμισης ανά μονάδα όγκου από σωρούς μικρότερου όγκου). Το προστιθέμενο νερό πρέπει να ανακατεύεται με όλο το σωρό, ώστε κάθε σημείο του προς λιπασματοποίηση υλικού να λαμβάνει μέρος στη διαδικασία κάτω από ίδιες συνθήκες [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Λόγος C/N

Ο λόγος άνθρακα προς άζωτο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της καταλληλότητας ενός είδους απορρίμματος, ως υποστρώματος για λιπασματοποίηση. Τα αποτελέσματα της εμπειρίας των ερευνητών στον τομέα της αερόβιας επεξεργασίας τις δύο τελευταίες δεκαετίες οδήγησαν στο συμπέρασμα πως μία τιμή του λόγου C/N μεταξύ 25 και 35 είναι «βέλτιστη» για τους περισσότερους τύπους απορριμμάτων και ειδικά για ΑΣΑ. Εάν ο λόγος διαφοροποιηθεί από αυτές τις τιμές, το όλο σύστημα θα χάσει σε απόδοση. Αυτό βέβαια γίνεται κατανοητό αν ληφθεί

υπόψη ότι οι μικροοργανισμοί υποχρεώνονται να αναπτύσσονται σε διαδοχικούς βιολογικούς κύκλους, οξειδώνοντας έτσι αργά τα πλεονάσματα του C μέχρι ο λόγος C/N λάβει ευνοϊκές τιμές για το μεταβολισμό τους. Σε αντίθεση, αν το αρχικό οργανικό υλικό παρουσιάζει τιμές C/N πάρα πολύ χαμηλές, ευνοούνται συνήθως απώλειες N λόγω της πτητικότητας της αμμωνίας, φαινόμενο ακόμη εντονότερο όταν συντρέχουν άλλες συνθήκες, όπως υψηλές τιμές θερμοκρασίας και pH.

Για παράδειγμα, εάν τα απορρίμματα περιέχουν ένα μεγάλο ποσοστό ξυλώδους υλικού ή χαρτιού, ο λόγος που προκύπτει είναι από 35/1 έως 45/1 (αυξημένη ποσότητα χαρτιού προσφέρει C έναντι υπολειμμάτων τροφών που προσφέρουν N). Αντίθετα, τα λεγόμενα πράσινα απόβλητα, όπως τα φρέσκα αγριόχορτα, τα κλαδέματα, η κοπριά και υπολείμματα από την κουζίνα, περιέχουν σχετικά μεγάλα ποσοστά αζώτου. Η ανάμειξη των δύο παραπάνω ειδών απορριμμάτων θα επιφέρει τις επιθυμητές αλλαγές στην τιμή του λόγου C/N και θα επιταχύνει τη διαδικασία αποικοδόμησης. Στον Πίνακα 4.4 δίνονται ενδεικτικά οι τιμές των λόγων C/N για διάφορα είδη απορριμμάτων.

Πίνακας 4.4: Ενδεικτικές τιμές λόγου C/N διάφορων ειδών [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Υλικά με μεγάλη περιεκτικότητα σε N	C/N
Δραστική Λάσπη	6/1
Χώμα	10/1
Γρασίδι	12/1-15/1
Υπολείμματα Τροφών	15/1
Κοπριά Πουλερικών	15/1
Χωνεμένη Λάσπη	16/1
Υπολείμματα Χλοοκοπής	19/1
Κοπριά Βοοειδών	20/1
Κοπριά Αλόγων	25/1
Φλούδες Πατάτας	25/1
Υλικά με μεγάλη περιεκτικότητα σε C	C/N
Φρούτα	35/1
Φυλλώματα	40/1-80/1
Άχυρο	80/1
Φλοιός Δέντρου	100/1-130/1
Χαρτί	150-200/1
Ξύλο και Πριονίδι	100/1-500/1

Αν είναι γνωστή η περιεκτικότητα του αζώτου σε ένα μίγμα μπορεί να υπολογιστεί η περιεκτικότητά του σε άνθρακα, βάσει του ποσοστού των πτητικών στερεών (Volatile Solids - VS), από την ακόλουθη σχέση:

$$\%C = \frac{\%VS}{1.8}$$

Αν είναι γνωστή η περιεκτικότητα των επιμέρους συστατικών ενός μίγματος σε άνθρακα και άζωτο, μπορεί να υπολογιστεί ο λόγος C/N από την ακόλουθη εξίσωση:

$$C/N = \frac{\sum Q_i [C_i \cdot (100 - M_i)]}{\sum Q_i [N_i \cdot (100 - M_i)]}$$

Όπου: Q_i = η υγρή μάζα του συστατικού i [M (μονάδες μάζας)]

C_i = η περιεκτικότητα του συστατικού i σε άνθρακα [%]

N_i = η περιεκτικότητα του συστατικού i σε άζωτο [%]

M_i = η υγρασία του συστατικού i [%]

Τέλος, αν είναι γνωστός ο επιθυμητός λόγος C/N ενός μίγματος, που αποτελείται από δύο συστατικά με γνωστό λόγο C/N (π.χ. ρυπασμένο έδαφος και πριονίδια), μπορεί να υπολογιστεί η απαιτούμενη μάζα του δεύτερου συστατικού, από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_2 = \frac{Q_1 \cdot N_1 \left(\frac{C}{N} - \frac{C_1}{N_1} \right) (100 - M_1)}{N_2 \left(\frac{C_2}{N_2} - \frac{C}{N} \right) (100 - M_2)}$$

pH

Άλλος ένας παράγοντας, ο οποίος είναι πολύ χρήσιμος στη διάγνωση και επίλυση ορισμένων λειτουργικών προβλημάτων κατά τη διαδικασία της αερόβιας επεξεργασίας, είναι το pH του σωρού. Με την έναρξη της διαδικασίας, η τιμή του pH αρχίζει να μειώνεται. Αυτό το γεγονός αποτελεί συνέπεια της δράσης των μικροοργανισμών, που δημιουργούν οξέα με τη διάσπαση των σύνθετων οργανικών ενώσεων. Η βέλτιστη τιμή του pH εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά των υπαρχόντων μικροοργανισμών. Όπως έχει αποδειχθεί, οι βέλτιστες τιμές του pH για την ανάπτυξη και τη δράση βακτηριδίων κυμαίνονται από 6 ως 7,5, ενώ για μύκητες από 5,5 ως 8. Όταν η τιμή του pH για παράδειγμα λάβει τιμές κάτω από 6 η διαδικασία επιβραδύνεται. Ο επιπλέον αερισμός μπορεί να αποτελέσει λύση αυτού του προβλήματος, αλλά σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να είναι χρήσιμη η προσθήκη ασβεστίου ή άλλου ουδέτερου χημικού παράγοντα για την επαναφορά του pH στην

προηγούμενη τιμή του. Από την άλλη μεριά, καλό είναι να αποφεύγονται τιμές άνω του 8, που μπορούν να προκαλέσουν εκπομπή ανεπιθύμητης αέριας αμμωνίας [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Οξυγόνο

Κατά τη διάρκεια της αερόβιας επεξεργασίας, κατά κανόνα, λαμβάνουν χώρα αερόβιες συνθήκες. Όμως, οι αναερόβιες συνθήκες, που ίσως προκύψουν κατά τη διάρκεια της αποικοδόμησης, είναι δυνατό να προκαλέσουν τη δημιουργία ανεπιθύμητων οσμών. Συνεπώς, ο σωρός θα πρέπει να επιτρέπει τη ροή του απαραίτητου για τη διαδικασία αέρα, αλλά και την έξοδο του CO₂ και άλλων παραγόμενων αερίων.

Η ροή του αέρα μπορεί να επιτευχθεί είτε μηχανικά, με την τοποθέτηση σωλήνων αερισμού, που ελέγχουν το επίπεδο του οξυγόνου στο σωρό, ή με ανάδευση του σωρού, με τη βοήθεια ειδικών συστημάτων, που εκθέτουν τα μικρόβια στον ατμοσφαιρικό αέρα και δημιουργούν περισσότερα κενά στο σωρό, τα οποία βοηθούν τη ροή του αέρα. Μία συγκέντρωση οξυγόνου της τάξης του 10-15% θεωρείται επαρκής. Μεγαλύτερες τιμές καλό είναι να αποφεύγονται γιατί υφίσταται η πιθανότητα μείωσης της απαιτούμενης, για τη διαδικασία, θερμοκρασίας. Επίσης, μία μεγαλύτερη ροή αέρα μπορεί να προκαλέσει επιπλέον εξάτμιση, που επιβραδύνει το ρυθμό αποικοδόμησης και αυξάνει το κόστος λειτουργίας της όλης εγκατάστασης [Γιδαράκος & Αϊβαλιώτη, 2005].

4.3.6. Φυσικοί παράγοντες επιρροής

Μέγεθος Τεμαχίων

Η μικροβιακή δράση λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια κάθε μικρού τεμαχίου του προς επεξεργασία υλικού. Τεμάχια με μεγαλύτερο εμβαδόν επιφανείας ανά μονάδα όγκου, επιτρέπουν στους μικροοργανισμούς την αποικοδόμηση περισσότερου υλικού, τη γρηγορότερή τους ανάπτυξη και την παραγωγή θερμότητας. Το «βέλτιστο μέγεθος» τεμαχίου είναι αυτό που έχει αρκετή επιφάνεια για μικροβιακή δράση, αλλά και αρκετό χώρο (κενά) για την απαιτούμενη ροή αέρα.

Θερμοκρασία

Κατά τη διάρκεια της αερόβιας επεξεργασίας, η πλήρης αποικοδόμηση επιταχύνεται όταν επικρατούν θερμοκρασίες μεταξύ 35 – 60 °C. Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 35 °C, η διαδικασία επιβραδύνεται σημαντικά, αφού επηρεάζεται αρνητικά ο μεταβολισμός των μικροοργανισμών. Αντίθετα, σε θερμοκρασίες άνω των 60 °C, οι περισσότεροι μικροοργανισμοί δεν μπορούν να επιζήσουν (Πίνακας 4.5).

Πίνακας 4.5: Τυπικές θερμοκρασίες διαφόρων βακτηρίων [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Τύπος	Θερμοκρασία, °C	
	Εύρος	Βέλτιστη
Ψυχροφιλικά (Κρυοφιλικά)	-10 έως 30	15
Μεσοφιλικά	20 έως 50	35
Θερμοφιλικά	45 έως 75	55

Παρότι η αερόβια επεξεργασία λαμβάνει χώρα όταν επικρατούν θερμοκρασίες από 35 – 60 °C, στην πράξη προτιμούνται θερμοκρασίες που βελτιστοποιούν τη δράση των θερμοφιλικών μικροοργανισμών για δύο λόγους:

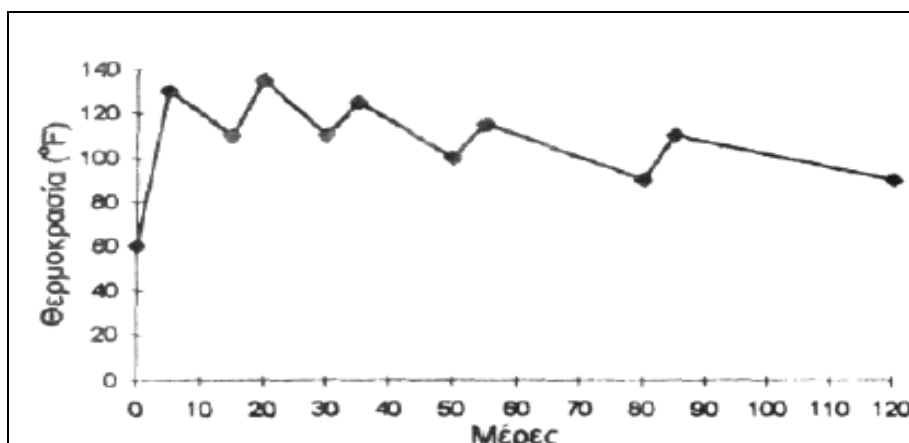
- (1) Για την επίτευξη ταχύτερης αποικοδόμησης.
- (2) Για την καταστροφή παθογόνων και ζιζανίων.

Η θερμοκρασία των σωρών εξαρτάται από την θερμότητα, που παράγεται με τη δράση των μικροοργανισμών, από τον αερισμό του σωρού και από την κατάσταση της επιφάνειας του σωρού, υπό την επήρεια των καιρικών συνθηκών. Σε πολύ ψυχρές περιόδους, οι σωροί ίσως χρειαστεί να είναι μεγαλύτεροι από ότι συνήθως, με σκοπό τη μείωση των απωλειών από την επιφάνεια.

Σε κλειστά συστήματα (*in vessel*), η καταστροφή των παθογόνων και των ζιζανίων επιτυγχάνεται όταν η θερμοκρασία της μάζας του υλικού διατηρηθεί στους 55°C για τουλάχιστον τρεις ημέρες. Σε συστήματα αναδευόμενων σωρών, η καταστροφή των παραπάνω ανεπιθύμητων οργανισμών επιτυγχάνεται όταν η θερμοκρασία διατηρηθεί στο επίπεδο των 53°C σε όλο τον όγκο του σωρού για τουλάχιστον 15 ημέρες. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι σωροί πρέπει να αναδευτούν τουλάχιστον πέντε φορές. Στη συνέχεια, και για τα δύο συστήματα, η

θερμοκρασία μπορεί να πέσει σε ελάχιστα κατώτερα επίπεδα (51 – 55°C). Προσοχή θα πρέπει να δοθεί, ώστε να αποφευχθεί επαφή μεταξύ μαζών του υλικού στις οποίες επικρατούν οι ελάχιστες θερμοκρασίες και μαζών που δεν τις έχουν. Μία τέτοια επαφή θα είχε ως αποτέλεσμα τη μόλυνση όλου του υλικού με παθογόνους μικροοργανισμούς και ζιζάνια.

Στο Διάγραμμα 4.4 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του σωρού, σε συνάρτηση με το χρόνο. Ενώ τις πρώτες 5 – 6 ημέρες η θερμοκρασία αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς, στη συνέχεια επέρχεται μία σταδιακή μείωσή της. Η μηχανική ανάμιξη του σωρού ανανεώνει την παροχή οξυγόνου και εκθέτει νέες επιφάνειες υλικού για αποικοδόμηση, γεγονός που οδηγεί στην εκ νέου αύξηση της θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 20°C, η αερόβια διαδικασία της λιπασματοποίησης έχει σχεδόν ολοκληρωθεί [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].



Διάγραμμα 4.4: Τυπικές θερμοκρασίες λιπασματοποίησης [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

4.3.7. Απαιτήσεις ποιότητας

Όπως αναφέρθηκε ήδη, το κοσμπόστ είναι ένα προϊόν που πρέπει να βρει την θέση του στην αγορά, καθώς οφείλει να πληρεί κάποιες βασικές ποιοτικές προδιαγραφές (Πίνακας 4.5), οι οποίες εξάλλου ορίζονται από τη νομοθεσία.

Παρότι στην ΕΕ δεν υπάρχει ένας ενιαίος κανονισμός, που να θεσμοθετεί και να ορίζει τα όρια ποιότητας του κόμποστ, οι περισσότερες χώρες ορίζουν τα όρια ποιότητας σε εθνικό επίπεδο. Τα όρια αυτά μπορεί να διαπραγματεύονται είτε την ποιότητα της πρώτης ύλης (π.χ. απορριμμάτων), είτε το στάδιο ωρίμανσης και την

ποιότητα του τελικού προϊόντος (π.χ. περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα). Η Αυστρία, ως ένα παράδειγμα ολοκληρωμένου εθνικού σχεδιασμού για τα θέματα της κομποστοποίησης, ορίζει τις εξής κατηγορίες ποιότητας κόμποστ και τους πιθανούς τομείς της εφαρμογής του:

- Class A+ - Κόμποστ ύψιστης ποιότητας προοριζόμενο για βιολογική γεωργία.
- Class A – Κόμποστ υψηλής ποιότητας προοριζόμενο για γεωργία.
- Class B – Κόμποστ προοριζόμενο για μη-γεωργικές εφαρμογές (π.χ. αποκατάσταση εδαφών).

Τα όρια ποιότητας για τις παραπάνω κατηγορίες του κόμποστ όπως επίσης και τα ποιοτικά όρια για τις πρώτες ύλες του (ιλύς βιολογικού) καταγράφονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.5: Οριακές τιμές compost (τύπου A και χωνεύματος τύπου A), σύμφωνα με τις ΚΥΑ 114218/1997 και Υ.Α. οικ. 56366/4351/2014.

Παράμετρος - Μονάδα	Οριακές Τιμές
Cd, mg/kg ξηρού βάρους	≤ 3
Cr, mg/kg ξηρού βάρους	≤ 250
Cu, mg/kg ξηρού βάρους	≤ 400
Hg, mg/kg ξηρού βάρους	$\leq 2,5$
Ni, mg/kg ξηρού βάρους	≤ 100
Pb, mg/kg ξηρού βάρους	≤ 300
Zn, mg/kg ξηρού βάρους	≤ 1.200
As, mg/kg ξηρού βάρους	≤ 10
PCBs, mg/kg ξηρού βάρους	$\leq 0,4$
PAHs, mg/kg ξηρού βάρους	≤ 3
Προσμίξεις > 2mm, % σε ξηρή βάση	≤ 3
Υγρασία	< 40%

Πίνακας 4.6: Απαιτούμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά compost όπως αυτά ορίζονται από την αυστριακή νομοθεσία [Barth et al., 2008].

<i>mg/kg d.m.</i>	Cd	Cr_{tot}	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Κόμποστ							
class A+ → <i>org. farming</i>	0.7	70	70	0.4	25	45	200
class.A → <i>agriculture</i>	1	70	150	0.7	60	120	500
class.B → <i>land reclamation.</i>	3	250	400/ 500*	3	100	200	1,200/ 1,800 *
Ιλύς Βιολογικού							
for ' <i>quality sludge compost</i>	2.0	70	300	2.0	60	100	1,200
for ' <i>compost</i> '	3.0	300	500	5.0	100	200	2,000

Η επιτυχημένη εκτροπή των βιοαποδομήσιμων απορριμμάτων από την υγειονομική ταφή εξαρτάται από τη διαλογή στην πηγή των απορριμμάτων αυτών. Παρότι το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα μπορεί να εξαχθεί από μεικτά απορρίμματα, ο τρόπος αυτός είναι επίπονος και παράγει μολυσμένα προϊόντα. Η διαλογή στην πηγή προσφέρει τη δυνατότητα μιας υψηλής ποιότητας πρώτης ύλης για αερόβια αποικοδόμηση και τη δυνατότητα παραγωγής ενός μη μολυσματικού προϊόντος.

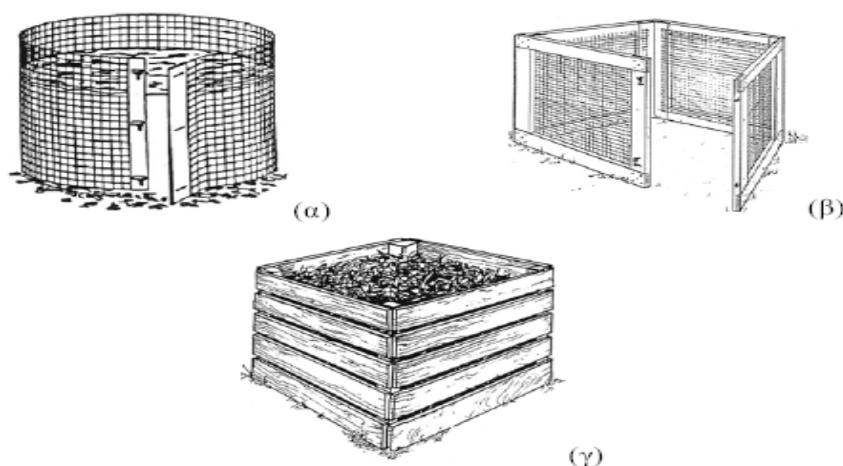
Η καθαρή πρώτη ύλη που συλλέγεται μέσω της διαλογής στην πηγή είναι πιο πιθανό να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές για το κόμποστ ώστε να είναι κατάλληλο για πώληση ή χρήση, επιφέροντας και περιβαλλοντικά οφέλη. Η χρήση του κόμποστ μειώνει τις απαιτήσεις για χρήση άλλων βελτιωτικών εδάφους, όπως η τύρφη, για αγροτικές ή κηπευτικές δραστηριότητες.

Η διαλογή στην πηγή των βιοαποδομήσιμων απορριμμάτων καθιστά δυνατή την προώθηση – ενίσχυση της κομποστοποίησης σε οικιακό επίπεδο ή στο επίπεδο μικρών τοπικών κοινοτήτων. Αυτός ο τρόπος διαχείρισης των βιοαποδομήσιμων απορριμμάτων προσφέρει δύο μεγάλα πλεονεκτήματα:

- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη μεταφορά και διαχείριση των απορριμμάτων αποφεύγονται.
- Το «κλείσιμο» της αλυσίδας της ανακύκλωσης, σε επίπεδο νοικοκυριού, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα περιβαλλοντικά οφέλη από τη μη χρησιμοποίηση άλλων προϊόντων (σε αντίθεση με τα προβλήματα που ανακύπτουν μερικές φορές από την εξεύρεση αγοράς για κόμποστ κεντρικών μονάδων).

Επιπλέον, η διαλογή των απορριμμάτων από τα ίδια τα νοικοκυριά θα αυξήσει την ενημέρωση και το ενδιαφέρον τους σχετικά με την παραγωγή των απορριμμάτων και θα βοηθήσει στην ανάπτυξη ενός αισθήματος υπευθυνότητας.

Γενικότερα, η αερόβια διεργασία είναι μια τεχνολογία προσαρμόσιμη και κατάλληλη για την επεξεργασία των απορριμμάτων σε ποικίλες κοινωνικο-οικονομικές και γεωγραφικές περιοχές. Παρότι το εύρος των τεχνολογιών επεξεργασίας από απλή οικιακή κομποστοποίηση (backyard composting) έως υψηλής τεχνολογίας κεντρικά συστήματα, τόσο η τεχνολογία όσο και το σχετιζόμενο με αυτή σύστημα συλλογής, μπορούν να εφαρμοστούν σχετικά απλά και χωρίς ιδιαίτερα έξοδα. Στο Σχήμα 4.8 φαίνονται απλές κατασκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές λιπασματοποίησης στο σπίτι, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχει αυξημένη παραγωγή οργανικών απορριμμάτων όπως, πχ. υπολείμματα κήπου.



Σχήμα 4.8: Κατασκευές για οικιακή λιπασματοποίηση: (α) καλωδιωτή, (β) συνδυασμός ξύλου και καλωδίου και (γ) ξύλινη.

Επιπλέον, το κομποστοποιήσιμο κλάσμα των απορριμμάτων είναι συχνά ένα από τα πιο μολυσματικά, οπότε η εφαρμογή ενός τέτοιου προγράμματος εκτρέπει τα απορρίμματα από παραδοσιακές οδούς διάθεσης, όπως η καύση και η υγειονομική ταφή, ένα από τα μεγαλύτερα κλάσματα των οικιακών απορριμμάτων. Η εκτροπή των οργανικών απορριμμάτων από την υγειονομική ταφή μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην επίτευξη των τοπικών στόχων για την ανακύκλωση.

4.4. Αναερόβια χώνευση

4.4.1 Βασικές αρχές και λειτουργία

Ο όρος «αναερόβια χώνευση» (AX) αναφέρεται στην ελεγχόμενη βιολογική αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων κάτω από συνθήκες έλλειψης οξυγόνου (αναερόβιες συνθήκες) και οδηγεί στην παραγωγή βιοαερίου (ένα μίγμα CH_4 και CO_2 , το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας) και ενός υδαρούς υπολείμματος (digestate = χωνεμένη ιλύς). Η χωνεμένη ιλύς μπορεί να διατεθεί απ' ευθείας στο έδαφος ή να υποστεί περαιτέρω αερόβια επεξεργασία για τη σταθεροποίησή της και να μετατραπεί σε κομπόστ (με την προϋπόθεση ότι ικανοποιεί κάποια θεσμοθετημένα κριτήρια ποιότητας) [I.T.A., 2007].

Η αναερόβια χώνευση έχει χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως για αρκετές δεκαετίες για την επεξεργασία της βιολογικής ιλύος από μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (ΜΕΛ) ή ρευστών αγροτικών αποβλήτων, αλλά μόνο σχετικά πρόσφατα εφαρμόζεται ως μέθοδος βιοεπεξεργασίας του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ, συχνά σε συνδυασμό με ιλύ βιολογικών καθαρισμών και / ή κτηνοτροφικά απόβλητα [Λαζαρίδη κ.ά. 2002, DEFRA, 2005].

Η αναερόβια χώνευση στερεών αποβλήτων συχνά αναφέρεται και ως βιοαεριοποίηση (biogasification). Ο τελευταίος όρος υπονοεί τη μερική μετατροπή των στερεών αποβλήτων σε αέριο (βιοαέριο), κύριο συστατικό του οποίου είναι το καύσιμο μεθάνιο. Η παραγωγή του μεθανίου κάνει την αναερόβια χώνευση μία βιολογική διεργασία μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια (waste-to-energy). Η αναερόβια χώνευση, η οποία αποτελεί μία διεργασία που λαμβάνει χώρα αυθόρμητα σε αναερόβια περιβάλλοντα, όπως οι ορυζώνες, τα έλη, οι ΧΥΤ και οι χωματερές, μπορεί να λειτουργήσει κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε ειδικές εγκαταστάσεις, με στόχο τη μεγιστοποίηση του παραγόμενου μεθανίου, καθώς και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών προβλημάτων και οχλήσεων (π.χ. διαφυγή μεθανίου, οσμές).

Η αναερόβια χώνευση περιλαμβάνει βιολογικές διεργασίες που μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις διακριτές φάσεις [ΕΑ, 2007 and Παναγιωτακόπουλος, 2007]:

- **Υδρόλυση** των πολυμερών οργανικών ενώσεων (λίπη, πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες) με τη βοήθεια ενζύμων, που εκλύονται από υδρόλυτικά

- βακτήρια και μετατροπή τους σε υδατοδιαλυτά προϊόντα μικρότερου μοριακού βάρους (μονοσακχαρίτες, αμινοξέα, κλπ).
- **Ζύμωση** των παραπάνω διαλυτών προϊόντων και μετατροπή τους σε μια ποικιλία ενδιάμεσων προϊόντων, όπως μικρού μήκους οργανικά οξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και αμμωνία.
 - **Οξεογένεση**, δηλαδή παραγωγή οξικού οξέος, διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου από τα προϊόντα του προηγούμενου σταδίου με τη βοήθεια υποχρεωτικά οξεογενών βακτηρίων. Στην φάση αυτή το διοξείδιο του άνθρακα είναι το κύριο συστατικό του βιοαερίου.
 - **Μεθανιογένεση**, κατά την οποία τα προϊόντα της προηγούμενης φάσης μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα από τα μεθανιογενή βακτήρια.

Καθεμία από τις παραπάνω φάσεις λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια συγκεκριμένων ομάδων βακτηρίων, τα οποία ταξινομούνται με βάση τις τροφικές τους απαιτήσεις. Ταυτόχρονα, λαμβάνουν χώρα πολλές άλλες αντιδράσεις στις οποίες συμμετέχουν και ομάδες βακτηρίων, ανταγωνιστικές με τα μεθανιογενή. Η όλη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται από την καλή ισορροπία και συνύπαρξη των παραπάνω ομάδων μικροοργανισμών, καθώς καμία από τις ομάδες δεν μπορεί να λειτουργήσει μόνη της. Έτσι, για παράδειγμα αν εκλείψουν τα αργά αναπτυσσόμενα μεθανιογενή βακτήρια, τότε το οξικό οξύ και τα άλλα οργανικά οξέα, που παράγονται κατά τις προηγούμενες φάσεις, δεν θα αποδομούνται και η οξύτητα του συστήματος θα αυξηθεί σταδιακά σε επίπεδα που θα παρεμποδίζουν, τόσο την ζύμωση, όσο και την οξεογένεση. Λόγω αυτής της αλληλεξάρτησης, η αναερόβια χώνευση είναι αρκετά πιο ευαίσθητη και απαιτητική διεργασία σε σχέση με την κομποστοποίηση και απαιτεί ένα υψηλότερο επίπεδο ελέγχου.

Η αναερόβια χώνευση είναι μια διεργασία που λαμβάνει χώρα στην υγρή φάση και χρησιμοποιείται σε υποστρώματα με σχετικά χαμηλή συγκέντρωση στερεών και υγρασία που κυμαίνεται από 60 έως 95%. Για υγρά υποστρώματα (>80% υγρασία), το τελικό στάδιο της μεθανιογένεσης είναι συνήθως το περιοριστικό της όλης διεργασίας. Για τα στερεά υποστρώματα όμως (60-80% υγρασία), όπως τα ΑΣΑ, η περιοριστική φάση στη συνολική διεργασία είναι η υδρόλυση των στερεών, δηλαδή

το πρώτο στάδιο. Σημειώνεται, ότι τα ΑΣΑ θα πρέπει να αναμειχθούν με νερό ή άλλα υγρά απόβλητα προκειμένου να επιτευχθούν αυτά τα επίπεδα υγρασίας.

Η αναερόβια χώνευση μπορεί να λειτουργήσει σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, ωστόσο υπάρχουν δύο περιοχές θερμοκρασίας όπου η απόδοσή της βελτιστοποιείται:

- ο η μεσόφιλη (περίπου 35°C) με εύρος από 30 έως 40°C, και
- ο η θεرمόφιλη περιοχή (περίπου 55°C) με εύρος από 50 έως 65°C.

Καθώς οι αναερόβιες διεργασίες δεν είναι έντονα εξώθερμες, η βιολογικά παραγόμενη θερμότητα δεν επαρκεί για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στο βέλτιστο επίπεδο, ακόμη και για τη μεσόφιλη χώνευση. Έτσι, χρειάζεται η παροχή πρόσθετης, εξωτερικής θερμότητας, η οποία όμως μπορεί να προέλθει από την καύση του παραγόμενου βιοαερίου, η ποσότητα του οποίου επαρκεί τόσο για τη διατήρησή της επιθυμητής θερμοκρασίας, όσο και για την παραγωγή περίσσειας ενέργειας (ηλεκτρισμού ή/και θερμότητας).

Άλλες παράμετροι που προσδιορίζουν την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης είναι το μέγεθος των σωματιδίων του υποστρώματος, ο λόγος άνθρακα προς άζωτο (C/N) και η πιθανή παρουσία τοξικών για τους μικροοργανισμούς ουσιών στο υπόστρωμα. Πιο συγκεκριμένα [Λαζαρίδη κ.ά., 2002]:

Μέγεθος σωματιδίων

Το βέλτιστο μέγεθος των σωματιδίων εξαρτάται από το βαθμό βιοδιασπασιμότητας του υποστρώματος. Έτσι υποστρώματα με μικρή έως μέτρια βιοαποδομησιμότητα (π.χ. χαρτί) θα πρέπει να είναι τεμαχισμένα σε ένα σχετικά μικρό μέγεθος σωματιδίων. Αντίθετα, για ταχέως βιοαποδομήσιμα απόβλητα (π.χ. υπολείμματα φαγητών), το μικρό μέγεθος αποτελεί μειονέκτημα, αφού οδηγεί σε μεγάλη παραγωγή οξέων, τα οποία χαμηλώνουν το pH, παρεμποδίζοντας την ανάπτυξη των περισσότερο «ευαίσθητων» μεθανιογενών βακτηρίων.

Λόγος C/N

Για υποστρώματα με μέτρια έως υψηλή βιοαποδομησιμότητα (π.χ. χαρτί, υπολείμματα τροφών), ο βέλτιστος λόγος άνθρακα προς άζωτο κυμαίνεται μεταξύ 25 και 35, ενώ για βραδέως βιοαποδομούμενα υποστρώματα (π.χ. ξύλα), ο λόγος αυτός

μπορεί και να ανέρχεται στο 40, καθώς σε αυτή την περίπτωση μόνο ένα μικρό μέρος του άνθρακα είναι άμεσα διαθέσιμο στους μικροοργανισμούς. Χαμηλές τιμές C/N γενικά έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη εκπομπή αζώτου με τη μορφή αέριας αμμωνίας, η συγκέντρωση της οποίας μπορεί να αποβεί τοξική για τον μικροβιακό πληθυσμό. Οι βέλτιστες τιμές C/N επιτυγχάνονται με την κατάλληλη μίξη συστατικών των αποβλήτων, κάτι που απαιτεί καλό σχεδιασμό για τα απόβλητα, που δέχεται κάθε εγκατάσταση, την αποθήκευσή τους και την τροφοδοσία του βιοαντιδραστήρα.

Πιθανή παρουσία τοξικών ουσιών στο υπόστρωμα

Η ύπαρξη ουσιών, που μπορούν να έχουν αρνητική επίδραση στον μικροβιακό πληθυσμό, είναι πιθανή σε ένα υπόστρωμα, όπως τα ΑΣΑ (βαρέα μέταλλα, τοξικές οργανικές ενώσεις κλπ.). Κάποιες ουσίες (π.χ. ορισμένα μέταλλα όπως Cu και Zn) είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών κάτω από συγκεκριμένες συγκεντρώσεις, μεγαλύτερες όμως συγκεντρώσεις μπορούν να αποβούν τοξικές. Ο Πίνακας 4.7 παρουσιάζει τις παρεμποδιστικές κατά την αναερόβια χώνευση συγκεντρώσεις συγκεκριμένων ενώσεων [Λαζαρίδη κ.ά., 2002].

Πίνακας 4.7: Όρια παρεμποδιστικών συγκεντρώσεων ορισμένων ουσιών στο υγρό κλάσμα κατά την αναερόβια χώνευση ΑΣΑ.

ΟΥΣΙΑ	ΚΑΤΩΦΛΙ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ (mg/l)	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Αέρια αμμωνία	1500 – 3000 mg/l (ως N)	Σε pH > 7.4
Αμμωνιακό κατιόν	3000 mg/l (ως N)	
Θειώδη (S-2)	50 – 100 mg/l	
Μέταλλα	< 10 συνήθως	
Na	3500	Θρεπτικό συστατικό σε επίπεδα 100 –200 mg/l
K	2500	Θρεπτικό συστατικό σε επίπεδα 200 –400 mg/l
Ca	2500	Θρεπτικό συστατικό σε επίπεδα 100 -200 mg/l
Mg	1000	Θρεπτικό συστατικό σε επίπεδα 75 –150 mg/l

Εκτός λίγων εξαιρέσεων, η χρήση της βιοαεριοποίησης σε αστικά στερεά απορρίμματα (ΑΣΑ) ήταν περιορισμένη παγκοσμίως έως και την αρχή της δεκαετίας του 1980. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας αυτής παρατηρήθηκε μία βαθμιαία αύξηση στην χρήση της τεχνικής αυτής ως συνοδευτικής ή εναλλακτικής λύσης της πιο συχνά χρησιμοποιούμενης αερόβιας βιοεπεξεργασίας (κομποστοποίησης) των ΑΣΑ. Το ενδιαφέρον αυξήθηκε με την ανάπτυξη τεχνολογιών Αναερόβιας Χώνευσης Υψηλού Ποσοστού Στερεών (ΑΧΥΠΣ). Η ΑΧΥΠΣ διαφέρει από την παραδοσιακή αναερόβια χώνευση που χρησιμοποιείται ευρέως για την ιλύ των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, καθώς το ποσοστό στερεών του οργανικού υποστρώματος είναι τουλάχιστον 25% (και μπορεί να φτάσει το 40%), ενώ στην παραδοσιακή αναερόβια χώνευση το ποσοστό στερεών δεν υπερβαίνει το 5-10%, δηλαδή το υπόστρωμα έχει τη μορφή της λάσπης (slurry).

4.4.2 Συστήματα και τεχνολογίες

Τα συστήματα αναερόβιας χώνευσης, που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των στερεών αποβλήτων, μπορούν να ταξινομηθούν στη βάση τεσσάρων κύριων χαρακτηριστικών, που προσδιορίζουν και τον τύπο της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας: α) τη θερμοκρασία, β) τη συγκέντρωση των στερεών, γ) το σύστημα ανάμειξης και δ) τον αριθμό των φάσεων / αντιδραστήρων (Πίνακας 4.8). Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών μπορεί να περιγράψει τα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα συστήματα, αν και κάποια συστήματα παραμένουν ενδιάμεσα αυτών των κατηγοριοποιήσεων [ΕΑ, 2002].

Πίνακας 4.8: Λειτουργικές παράμετροι των συστημάτων αναερόβιας χώνευσης [ΕΑ,2002].

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ	ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΙΞΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΔΙΩΝ
Μεσόφιλο (~35 °C)	Χαμηλά στερεά (<10% ξ.ο.)	Μηχανική ανάδευση	Ενός σταδίου (ένας αντιδραστήρας)
Θερμόφιλο (~55 °C)	Μεσαία στερεά (10-25% ξ.ο.)	Ανάδευση μέσω των αερίων	Πολλαπλών σταδίων
	Υψηλά στερεά (>25% ξ.ο.)	Στρωτής ροής	
		Διακοπτόμενης τροφοδοσίας	

Θερμοκρασία

Όπως προαναφέρθηκε, η αναερόβια χώνευση λειτουργεί σε δύο εύρη θερμοκρασιών, το μεσόφιλο, περίπου στους 35°C και το θερμόφιλο, περίπου στους 55°C. Το πλεονέκτημα της μεσόφιλης αναερόβιας χώνευσης είναι ότι είναι επαρκώς γνωστή και κατανοητή ως διεργασία, απαιτεί λιγότερη θέρμανση για τη λειτουργία της, επιτυγχάνει μεγαλύτερο βαθμό βιοσταθεροποίησης του οργανικού κλάσματος και θεωρείται πιο σταθερή / ανθεκτική, λόγω της μεγαλύτερης βιοποικιλότητας των μικροοργανισμών που συμμετέχουν. Ωστόσο, η θερμόφιλη αναερόβια χώνευση θεωρείται ότι επιτυγχάνει υψηλότερη ταχύτητα βιοαποδόμησης, συνεπώς χρειάζεται μικρότερους χρόνους παραμονής, ενώ τα επιχειρήματα για μικρότερο βαθμό σταθεροποίησης του υποστρώματος δεν έχουν επιβεβαιωθεί στην πράξη σε εγκαταστάσεις πλήρους κλίμακας.

Επιπλέον, η λειτουργία σε θερμόφιλα επίπεδα επιτυγχάνει ταχύτερη και πληρέστερη υγιεινοποίηση των αποβλήτων.

Η επιλογή του λειτουργικού συστήματος αναερόβιας χώνευσης ανάμεσα σε μεσόφιλα και θερμόφιλα συστήματα εξαρτάται από τις ειδικές τοπικές συνθήκες (διαθέσιμος χώρος, επιθυμητός βαθμός σταθεροποίησης, περεταίρω επεξεργασία και χρήση της χωνεμένης ιλύος, θεσμικές απαιτήσεις υγιεινοποίησης, κλπ).

Συγκέντρωση στερεών

Τα παραδοσιακά συστήματα αναερόβιας χώνευσης ιλύος και υγρών αποβλήτων λειτουργούν σε μια πολύ χαμηλή συγκέντρωση στερεών, της τάξης του 5%, το οποίο προσιδιάζει στην φύση του υποστρώματος. Η χρήση της αναερόβιας χώνευσης για την επεξεργασία ΑΣΑ παρέχει τη δυνατότητα αύξησης της συγκέντρωσης των στερεών στο βιοαντιδραστήρα, γεγονός που προσφέρει δύο πλεονεκτήματα: αύξηση της παραγωγής βιοαερίου ανά μονάδα όγκου του βιοαντιδραστήρα και μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για θέρμανση του υποστρώματος.

Ωστόσο υπάρχουν όρια στη δυνατότητα αύξησης της συγκέντρωσης των στερεών. Οι μικροβιακές διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε υγρή φάση και κατά συνέπεια απαιτούν ένα ελάχιστο ποσοστό υγρασίας της τάξης του 50-60%. Επιπλέον, τα τεχνικά προβλήματα άντλησης των αποβλήτων προς και από το βιοαντιδραστήρα απαιτούν το υπόστρωμα να είναι αρκετά ρευστό, περιορίζοντας έτσι τη μέγιστη συγκέντρωση στερεών στο 30-35% (π.χ. σύστημα DRANCO). Κάποια συστήματα

παρακάμπτουν αυτό το πρόβλημα αποφεύγοντας πλήρως την άντληση των αποβλήτων και συνεπώς και τη συνεχή τροφοδότηση της μονάδας. Σε αυτά ο βιοαντιδραστήρας είναι διακοπτόμενης τροφοδοσίας και η φόρτιση και το άδειασμά του γίνονται με τη βοήθεια μεταφορικών ταινιών.

Σύστημα μίξης

Η ανάγκη μίξης των αποβλήτων στο βιοαντιδραστήρα προκύπτει από την απαίτηση για καλή και ομοιόμορφη επαφή των μικροοργανισμών με το υπόστρωμα και για αποφυγή της τοπικής συγκέντρωσης των προϊόντων της χώνευσης, καθώς και του διαχωρισμού των αποβλήτων σε ελαφρύ και βαρύ κλάσμα εντός του βιοαντιδραστήρα. Επιπλέον, στα περισσότερα συστήματα υπάρχουν κάποια προβλήματα διαχωρισμού και συγκέντρωσης του βιοαερίου, τα οποία αντιμετωπίζονται με τη μίξη.

Υπάρχουν δύο τρόποι ανάδευσης των αποβλήτων στο βιοαντιδραστήρα: μηχανική ανάδευση ή ανάδευση μέσω των αερίων, με διαφορετικά πλεονεκτήματα και τεχνικές δυσκολίες το καθένα. Επιπλέον, υπάρχουν συστήματα που αποφεύγουν πλήρως την ανάδευση εντός του αντιδραστήρα και τις τεχνικές δυσκολίες που αυτή συνεπάγεται, χρησιμοποιώντας διακοπτόμενη τροφοδοσία. Σε αυτή την περίπτωση, η απαιτούμενη μίξη επιτυγχάνεται με την κατάλληλη προετοιμασία του υποστρώματος εκτός του αντιδραστήρα, καθώς επίσης και με την ανακύκλωση μέρους της επεξεργασμένης χωνεμένης ιλύος. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός ανάδευσης σε αυτήν την περίπτωση είναι εξωτερικός του βιοαντιδραστήρα, επιτρέποντας καλύτερο έλεγχο και συντήρηση. Τα συστήματα αυτά παρέχουν και μεγαλύτερη ασφάλεια στην εκτίμηση του χρόνου παραμονής των αποβλήτων σε ορισμένη θερμοκρασία, όπως απαιτείται για την υγιεινοποίησή τους.

Αριθμός σταδίων

Οι βέλτιστες περιβαλλοντικές συνθήκες για τις βιολογικές διεργασίες, που συμβαίνουν στις διακριτές φάσεις της αναερόβιας χώνευσης, διαφέρουν ελαφρώς από φάση σε φάση. Συνεπώς, όταν η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα εξ' ολοκλήρου σε ένα βιοαντιδραστήρα, δεν μπορούν να βελτιστοποιηθούν οι επιμέρους φάσεις της. Αντίθετα, ο διαχωρισμός της διεργασίας σε χωριστούς αντιδραστήρες, έτσι ώστε η υδρόλυση / οξεογένεση να λαμβάνουν χώρα ανεξάρτητα από τη μεθανιογένεση

επιτρέπει την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των διαφορετικών φάσεων και αυξάνει τη συνολική ταχύτητα και απόδοση όλης της αναερόβιας χώνευσης. Βέβαια, αυτό το πλεονέκτημα αντισταθμίζεται από το μειονέκτημα του αυξημένου κόστους του πρόσθετου βιοαντιδραστήρα και των συστημάτων μεταφοράς των αποβλήτων. Καθώς τα ΑΣΑ, λόγω της ανομοιογένειάς τους έχουν κάποιες πρόσθετες δυσκολίες χειρισμού, οι περισσότερες εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες τείνουν να προτιμούν τις απλούστερες λύσεις και έτσι σήμερα επικρατούν στην αγορά τα συστήματα ενός σταδίου, παρά τη μειωμένη απόδοση σε σχέση με τα συστήματα δύο φάσεων.

Με βάση την παραπάνω κατηγοριοποίηση, διακρίνονται δύο κύρια συστήματα αναερόβιας χώνευσης στερεών αποβλήτων [Λαζαρίδη κ.ά., 2002]:

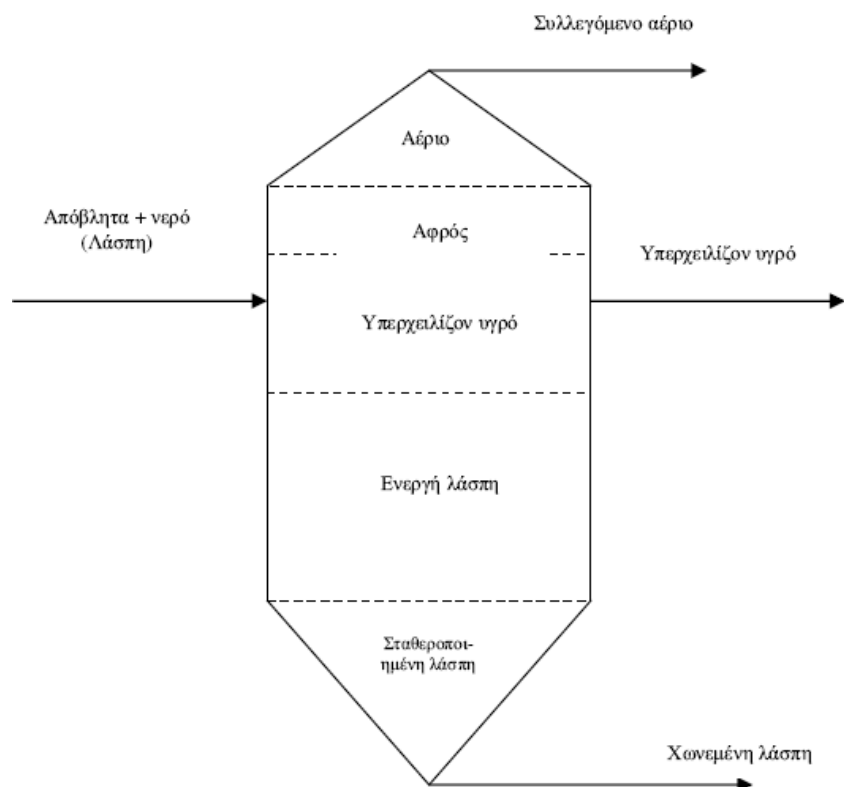
- Ο το κλασσικό (Σ1) και
- Ο το σύστημα υψηλού ρυθμού (Σ2).

Σ1: Κλασσικό σύστημα αναερόβιας χώνευσης, ενός αντιδραστήρα

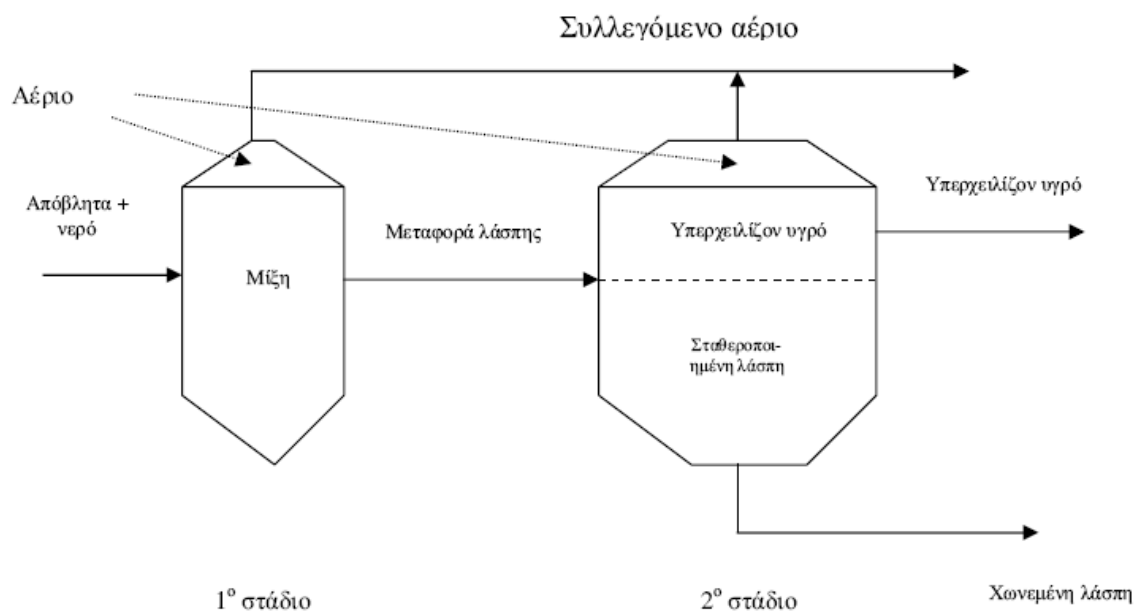
Αποτελείται από έναν αντιδραστήρα, με χρόνο παραμονής κάποιων εβδομάδων, στον οποίο συνήθως πραγματοποιείται ανάμιξη του περιεχομένου. Στόχος της ανάμιξης είναι η αποφυγή συσσώρευσης μεταβολικών προϊόντων, που μπορούν να οδηγήσουν στη θανάτωση των ενεργών μικροβίων. Στην περίπτωση μη ανάμιξης, δημιουργούνται τέσσερα στρώματα εντός του αντιδραστήρα – όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9 - ενώ στην κορυφή αυτού γίνεται συλλογή του παραγόμενου αερίου.

Σ2: Σύστημα υψηλού ρυθμού

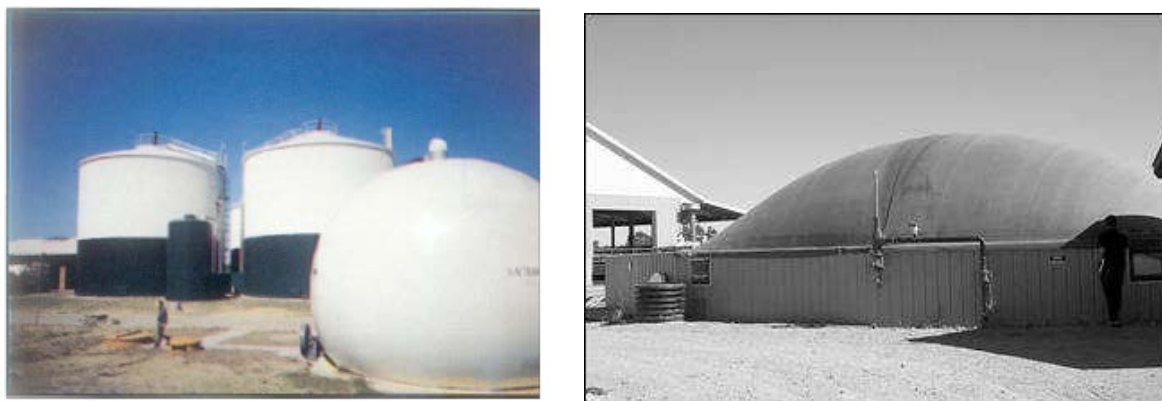
Τα συστήματα υψηλού ρυθμού αποτελούνται από δύο στάδια και περιλαμβάνουν τουλάχιστον δύο αντιδραστήρες που λειτουργούν σε σειρά (Σχήμα 4.10). Το ενεργό στάδιο της χώνευσης πραγματοποιείται στον πρώτο αντιδραστήρα. Τα περιεχόμενα του πρώτου αντιδραστήρα αναμιγνύονται πλήρως (με προσθήκη νερού) και ο χρόνος παραμονής είναι μερικές ημέρες. Στη συνέχεια, το περιεχόμενο του πρώτου αντιδραστήρα περνάει στο στάδιο 2, δηλαδή στον δεύτερο αντιδραστήρα. Στο στάδιο αυτό δεν γίνεται ανάμιξη και πραγματοποιείται καθίζηση του στερεού κλάσματος και διαχωρισμός του από το υγρό κλάσμα, καθώς και από το αέριο κλάσμα (βιοαέριο), το οποίο συλλέγεται στην κορυφή του αντιδραστήρα. Το συλλεγόμενο αέριο του δεύτερου σταδίου συνδυάζεται με το συλλεγόμενο αέριο του πρώτου σταδίου, αφού και σε αυτό παράγεται βιοαέριο [I.T.A., 2007].



Σχήμα 4.9: Σχηματική αναπαράσταση κλασσικού συστήματος ενός αντιδραστήρα (Σ1) [I.T.A., 2007].



Σχήμα 4.10: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος υψηλού ρυθμού (Σ2) [I.T.A., 2007].



Σχήμα 4.11: Εικόνα αντιδραστήρων αναερόβιας χώνευσης.

4.4.3 Αναερόβια ζύμωση οργανικών στερεών αποβλήτων

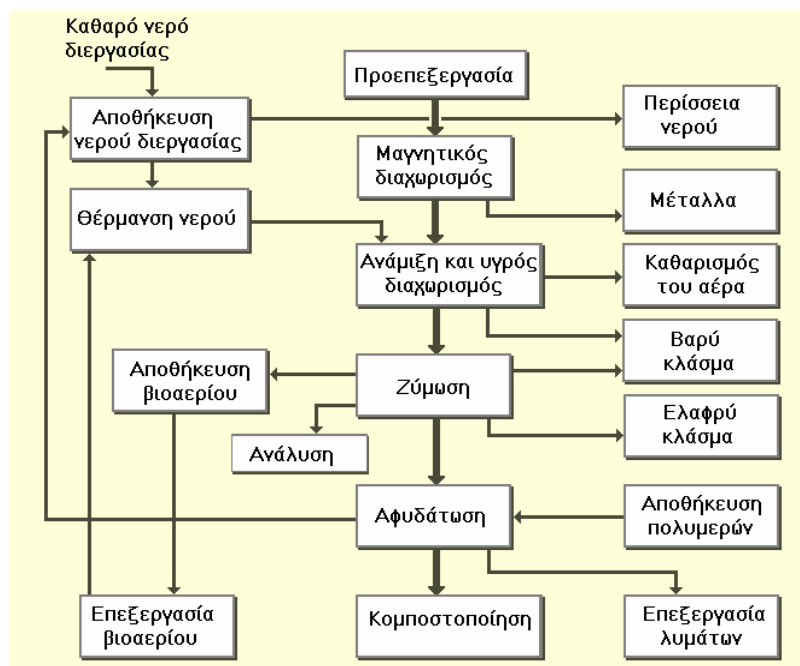
Τα τελευταία 15 χρόνια, το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την αναερόβια ζύμωση ως διεργασία επεξεργασίας αποβλήτων είχε ως συνέπεια την κατασκευή διαφόρων τύπων αντιδραστήρων, που λειτουργούν είτε σε θερμοφίλες, είτε σε μεσόφιλες θερμοκρασίες. Οι κυριότερες διεργασίες, που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται σε εμπορικές μονάδες, περιγράφονται στη συνέχεια [Μουσιόπουλος & Καραγιαννίδης, 2002].

Διεργασία Waasa

Μέχρι το 2000 είχαν κατασκευαστεί 3 μονάδες, που λειτουργούσαν με βάση τη διεργασία Waasa, ενώ άλλη μία ήταν υπό κατασκευή. Η δυναμικότητα των μονάδων κυμαίνεται μεταξύ 3.000-85.000 τόνων ανά έτος, ενώ οι συνθήκες λειτουργίας μπορεί να είναι είτε θερμοφίλες, είτε μεσόφιλες. Στη μονάδα της Waasa λειτουργούν παράλληλα και οι δύο τύποι διεργασιών, με τη θερμοφιλή διεργασία να έχει ένα χρόνο παραμονής 10 ημέρες, σε σύγκριση με τις 20 ημέρες του μεσόφιλου σχεδιασμού. Το διάγραμμα ροής της διεργασίας φαίνεται στο Σχήμα 4.12.

Η διεργασία έχει δοκιμαστεί για διάφορους τύπους αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένου και ενός μίγματος μηχανικά διαχωρισμένων δημοτικών ΣΑ και ιλύος υπονόμων και λειτουργεί με ένα εύρος στερεών συστατικών 10-15% κ.β. Ο αντιδραστήρας είναι μία κλειστή δεξαμενή η οποία έχει υποδιαιρεθεί εσωτερικά για να υπάρχει ένας θάλαμος προζύμωσης. Η ανάμιξη επιτυγχάνεται με την έγχυση βιοαερίου δια μέσου της βάσης του αντιδραστήρα με τη βοήθεια αντλίας. Η απόδοση της λειτουργίας συνίσταται στην παραγωγή 100-150 m³ βιοαερίου ανά τόνο

εισερχόμενων αποβλήτων, τη μείωση του όγκου κατά 60%, τη μείωση του βάρους κατά 50-60% και μια εσωτερική κατανάλωση βιοαερίου 20-30%. Το χωνευμένο υλικό μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω με αερόβια κομποστοποίηση, αλλά αυτό εξαρτάται από την ποιότητα των αποβλήτων.

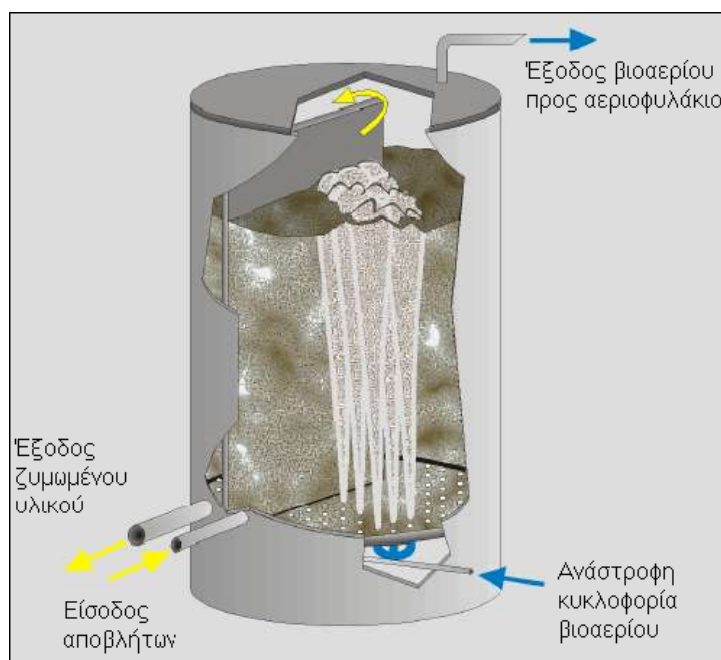


Σχήμα 4.12: Διάγραμμα ροής της διεργασίας Waasa (www.citec.fi).

Διεργασία Valorga

Η διεργασία της Valorga αναπτύχθηκε στη Γαλλία. Το σύστημα λειτουργεί τυπικά με περιεχόμενο σε στερεά ουσία 25-35% κ.β. και χρόνους παραμονής 18-25 ημέρες. Οι αντιδραστήρες είναι κάθετοι κύλινδροι με πλαϊνές τροχιές, για την κυκλοφορία του ζυμωμένου υλικού (Σχήμα 4.13). Περιέχουν έναν κάθετο, ενδιάμεσο, εσωτερικό τοίχωμα περίπου στα 2/3 της διαμέτρου. Η ανάμιξη μέσα στον αντιδραστήρα επιτυγχάνεται με την ανάστροφη κυκλοφορία μιας μικρής ποσότητας βιοαερίου υπό πίεση. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της διαδικασίας είναι η πλήρης απουσία μηχανικών μερών μέσα στον αντιδραστήρα. Αυτό επιτρέπει την απρόσκοπτη λειτουργία σε συνθήκες υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά με κυκλοφορία της ύλης, χωρίς ιδιαίτερη συντήρηση μηχανικών συσκευών. Τα προς επεξεργασία απόβλητα αποτελούνται από ζυμώσιμα υλικά και απορρίμματα κήπων. Η ποσοτική και ποιοτική σύσταση των αποβλήτων φανερώνει μια εποχική διακύμανση, που σχετίζεται με την εποχιακή παραγωγή αποβλήτων κήπων. Η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου

κυμαίνεται μεταξύ 210-290 m³ ανά τόνο συνολικών πτητικών στερεών (TVS) που εισέρχονται στον αντιδραστήρα ή μεταξύ 80 - 160 m³ ανά τόνο εισερχόμενων αποβλήτων, ανάλογα με το είδος τους. Το παραγόμενο βιοαέριο περιέχει μεθάνιο κατά 55-60%, αλλά όταν καθαριστεί, το μεθάνιο φτάνει μέχρι και το 97%. Το καθαρό βιοαέριο μπορεί να διοχετευτεί στο δίκτυο αερίου, να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ατμού βιομηχανικής χρήσης ή για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Το ζυμωμένο υλικό που βγαίνει από τους αντιδραστήρες, λόγω της βαρύτητας, εισάγεται κατευθείαν στις κοχλιόπρεσες για αφυδάτωση. Η υγρή ιλύς από τις πρέσες οδηγείται σε υδροκυκλώνιο για να αφαιρεθούν τα βαριά μόρια και σε μια μονάδα ιζηματοποίησης - φιλτραρίσματος για να απομακρυνθούν τα αιωρούμενα στερεά.



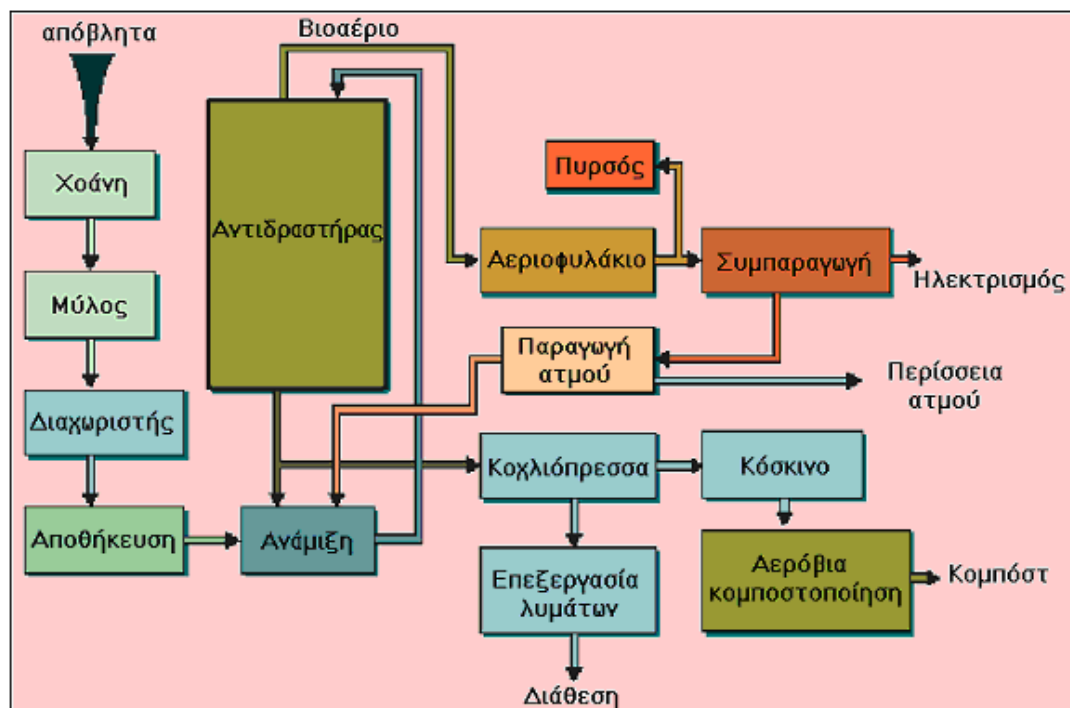
Σχήμα 4.13: Ο αντιδραστήρας της μεθόδου Valorga [www.biomaster.nl].

Τα στερεά συστατικά από τις πρέσες και το ταινιόφιλτρο αναμιγνύονται και αποθηκεύονται σε κλειστό χώρο για την πλήρη σταθεροποίησή τους κάτω από αερόβιες συνθήκες για 4 εβδομάδες. Το τελικό προϊόν είναι το κομπόστ. Για να προληφθεί οποιαδήποτε έκλυση οσμής, ο αέρας από τις μονάδες επεξεργασίας και του χώρου κομποστοποίησης διοχετεύεται προς καθαρισμό σε βιόφιλτρο.

Διεργασία Dranco

Το σύστημα της Dranco (Dry Anaerobic Composting) αναπτύχθηκε στο Gent του Βελγίου. Η διεργασία λειτουργεί κάτω από θερμοφίλες και ξηρές συνθήκες, με ένα περιεχόμενο σε στερεά συστατικά στον αντιδραστήρα μεταξύ 15 και 40% κ.β. Αναπτύχθηκε με σκοπό την επεξεργασία των στερεών οργανικών αποβλήτων και ειδικότερα του οργανικού κλάσματος των δημοτικών ΣΑ. Ως τελικά προϊόντα λαμβάνονται ενέργεια με τη μορφή βιοαερίου και κομπόστ. Το διάγραμμα ροής της διεργασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.14.

Τα απόβλητα που μεταφέρονται σε μια μονάδα Dranco υπόκεινται σε προεπεξεργασία, πριν οδηγηθούν μέσω αντλίας τροφοδότησης στον αντιδραστήρα. Εάν τα εισερχόμενα απόβλητα είναι ανάμικτα, τότε τα πρώτα βήματα της διεργασίας Dranco συνίστανται στη μείωση του όγκου και στο διαχωρισμό των διαφορετικών κλασμάτων στη ροή των αποβλήτων. Τα οργανικά απόβλητα, που έρχονται από την προεπεξεργασία, αναμιγνύονται σε μια μονάδα ανάμιξης με ζυμωμένο υλικό από τον αντιδραστήρα. Κατά τη διάρκεια της ανάμιξης προσδίδεται θερμότητα για να επιτευχθεί η θερμοκρασία των 50 – 55 °C, η οποία είναι απαραίτητη για τη θερμοφιλή αντίδραση.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα ροής της διεργασίας Dranco [www.ows.be].

Η ζύμωση λαμβάνει χώρα σε ένα κατακόρυφο αντιδραστήρα, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από χάλυβα. Ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται από την κορυφή, ενώ το υπόλειμμα εξάγεται από τον πυθμένα. Ο χρόνος παραμονής των αποβλήτων στον αντιδραστήρα είναι περίπου 20 ημέρες. Μέρος του ζυμωμένου υλικού οδηγείται πίσω στη μονάδα ανάμιξης, ενώ το υπόλοιπο υγρασίας και στην αερόβια κομποστοποίηση. Μετά από 10 με 14 ημέρες παράγεται το κομπόστ, το οποίο είναι σταθεροποιημένο και υψηλής ποιότητας. Η παραγωγή βιοαερίου κυμαίνεται μεταξύ 100-200 m³ ανά τόνο εισερχόμενων ΣΑ. Το 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται στη μονάδα, ενώ το υπόλοιπο διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Διεργασία Kompogas

Το σύστημα της Kompogas αναπτύχθηκε στην Ελβετία και δέχεται οργανικά απόβλητα από σύστημα ΔσΠ. Λειτουργεί σε θερμοκρασίες 55-60 °C και το περιεχόμενο σε στερεά συστατικά είναι υψηλό. Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας.



Σχήμα 4.15 : Διάγραμμα ροής της διεργασίας Kompogas [www.kompogas.ch].

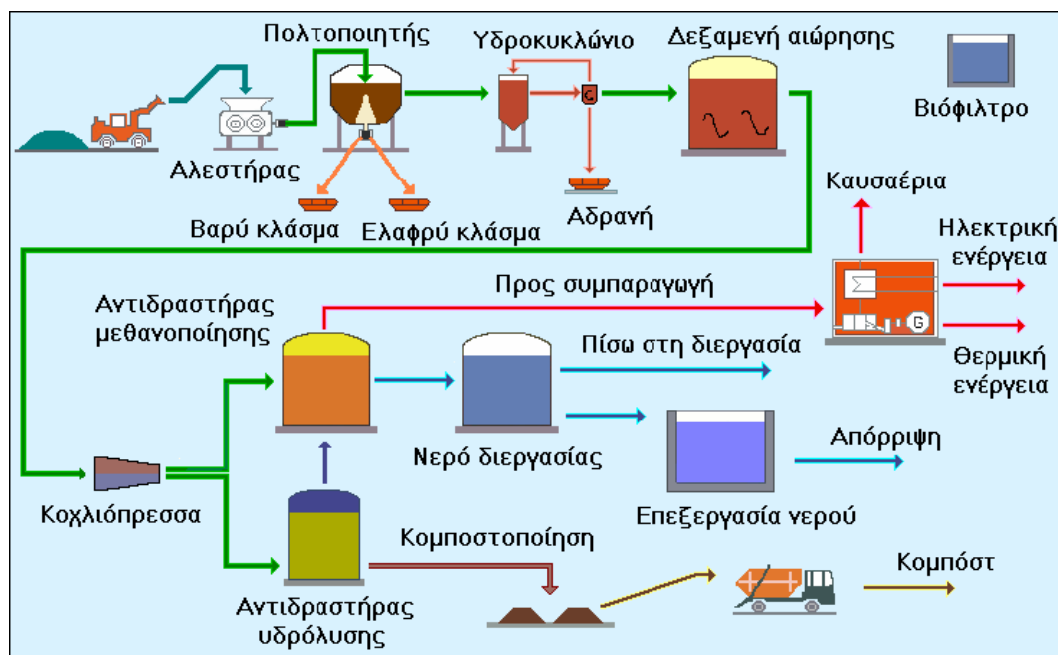
Τα απόβλητα συλλέγονται αρχικά σε μια δεξαμενή υποδοχής και στη συνέχεια οδηγούνται στο τμήμα διαλογής, στον τεμαχιστή και στη δεξαμενή αποθήκευσης. Το

προθερμασμένο, παχύρρευστο οργανικό υλικό εισέρχεται έπειτα στον οριζόντιο αντιδραστήρα ζύμωσης, όπου η βασική διεργασία λαμβάνει χώρα σε μια περίοδο 15 - 20 ημερών και αναδύεται περιοδικά. Το στερεό υπόλειμμα υφίσταται μείωση της υγρασίας του σε κοχλιόπρεσσα και στη συνέχεια μεταφέρεται σε ένα αντιδραστήρα δευτερογενούς ζύμωσης, όπου πραγματοποιείται η μετατροπή του σε ώριμο κομπόστ με παρουσία ατμοσφαιρικού οξυγόνου. Το παραγόμενο βιοαέριο ($0,1 \text{ m}^3$ αερίου ανά kg οργανικού αποβλήτου) υφίσταται επεξεργασία και αποθηκεύεται σε αεριοφυλάκιο. Στη συνέχεια αντλείται στη μονάδα συμπαραγωγής, όπου μετατρέπεται σε θερμική και ηλεκτρική ενέργεια. Εναλλακτικά, το βιοαέριο μπορεί να αναβαθμιστεί μέχρι 98% κ.ό. μεθάνιο και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στα οχήματα μεταφοράς.

Διεργασία BTA

Η διεργασία της BTA αναπτύχθηκε στη Γερμανία και συνδυάζει τη μηχανική με τη βιολογική επεξεργασία. Στη δεξαμενή πολτοποίησης το μίγμα τροφοδοσίας αναμιγνύεται με νερό διεργασίας. Απόβλητα όπως πλαστικά, υφάσματα, πέτρες και μέταλλα διαχωρίζονται μηχανικά με ένα κτένι καθαρισμού και ένα συλλέκτη βαρέων κλασμάτων. Από τα οργανικά, που περιέχονται στο μίγμα, παράγεται ένας παχύρρευστος, αντλήσιμος πολτός, που μπορεί να επεξεργαστεί και να υποστεί ζύμωση. Ένα προαιρετικό αλλά σημαντικό στοιχείο της διεργασίας είναι το σύστημα απομάκρυνσης άμμου, το οποίο διαχωρίζει τα εναπομείναντα μικρά κομμάτια (άμμος, χαλίκια και γυαλιά) από τον πολτό με τη βοήθεια ενός υδροκυκλώνιου, προστατεύοντας τη μονάδα από την απόξεση. Το γενικό διάγραμμα ροής απεικονίζεται στο Σχήμα 4.16.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη βιολογική επεξεργασία του πολτού, σε σχέση με τη δυναμικότητα της μονάδας, την ανακτώμενη ενέργεια και το κομπόστ. Κατά τη μονοφασική ζύμωση, ο πολτός υφίσταται αναερόβια ζύμωση σε έναν αντιδραστήρα. Αυτή η μέθοδος καθιστά δυνατή την χρήση της τεχνολογίας BTA ακόμα και σε σχετικά μικρές, αποκεντρωμένες μονάδες διαχείρισης αποβλήτων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπάρχοντες αντιδραστήρες (π.χ. μιας μονάδας βιολογικού καθαρισμού ή μιας μονάδας παραγωγής βιοαερίου από αγροτικά απόβλητα) με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του επενδυτικού και λειτουργικού κόστους.



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα ροής της διεργασίας BTA [www.canadacomposting.com].

Για μονάδες με δυναμικότητα πάνω από 50.000 τόνους ανά έτος αναπτύχθηκε η πολυφασική ζύμωση, κατά την οποία διαχωρίζεται ο πολτός σε στερεή και υγρή φάση με την χρήση φυγοκεντρικού διαχωριστή. Η υγρή φάση οδηγείται απ' ευθείας στον αντιδραστήρα, όπου παραμένει 2 μέρες μέχρι να υποστεί μεθανοποίηση. Το στερεό υλικό, που περιέχει αδιάλυτες οργανικές ενώσεις, αναμειγνύεται ξανά με νερό και τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα υδρόλυσης. Μετά από 4 μέρες το υλικό υφίσταται μείωση υγρασίας, ενώ το υγρό κλάσμα οδηγείται στον αντιδραστήρα μεθανοποίησης. Διανέμοντας τη διεργασία αποδόμησης σε διαφορετικούς αντιδραστήρες (αιώρησης, υδρόλυσης και μεθανοποίησης) μπορούν να ρυθμιστούν ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης για όλα τα είδη των μικροοργανισμών. Αυτό επιτρέπει μια γρήγορη και εκτεταμένη αποδόμηση των οργανικών ενώσεων με υψηλή παραγωγή βιοαερίου.

Για μονάδες με μεσαία δυναμικότητα είναι διαθέσιμη μια περαιτέρω παραλλαγή, η διφασική ζύμωση. Είναι βασισμένη στην ιδέα της πολυφασικής ζύμωσης, αλλά χωρίς το διαχωρισμό υγρής/στερεής φάσης. Ο πολτός τροφοδοτείται σε έναν αντιδραστήρα υδρόλυσης, ο οποίος συνδέεται στη συνέχεια με έναν αντιδραστήρα μεθανοποίησης. Το βιοαέριο αποτελείται από μεθάνιο 60-65% κ.ό. Η παραγωγή βιοαερίου καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της μονάδας και το πλεόνασμα μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα και ηλεκτρισμό. Το κομποστ σύμφωνα με τη μέθοδο BTA προκύπτει μετά από αερόβια επεξεργασία που διαρκεί 1-3 εβδομάδες. Λόγω του

υψηλού ποσοστού σε οργανικές ύλες και θρεπτικά συστατικά, αλλά και λόγω του χαμηλού περιεχόμενου σε άλατα και βαρέα μέταλλα, το υλικό αυτό βρίσκει μεγάλο εύρος εφαρμογών στον αγροτικό και φυτοκομικό τομέα.

4.4.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της αναερόβιας ζύμωσης σε μονάδες είναι:

- ο Η ύπαρξη ενός κλειστού συστήματος, που καθιστά δυνατή τη συλλογή και εκμετάλλευση του παραγόμενου βιοαερίου, σε αντίθεση με τους χώρους διάθεσης, όπου συλλέγεται μόνο το 30-40% της συνολικής παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου.
- ο Το βιοαέριο που παράγεται σε μονάδα περιέχει περισσότερο μεθάνιο και επομένως έχει υψηλότερη θερμογόνο δύναμη.
- ο Καθίσταται δυνατή η ανάκτηση υλικών (κομπόστ).
- ο Η διαδικασία της βιοαποδόμησης είναι ταχύτερη από την αντίστοιχη των χώρων διάθεσης, όπου ορισμένα υλικά συνεχίζουν να βιοαποδομούνται μέχρι και 100 χρόνια.
- ο Οι μονάδες είναι ερμητικά κλεισμένες, οπότε αποφεύγεται η εκπομπή οσμών.
- ο Οι απαιτούμενες εκτάσεις είναι πολύ μικρότερες από αυτές των χώρων διάθεσης.

Τα μειονεκτήματα στις μονάδες αναερόβιας ζύμωσης είναι:

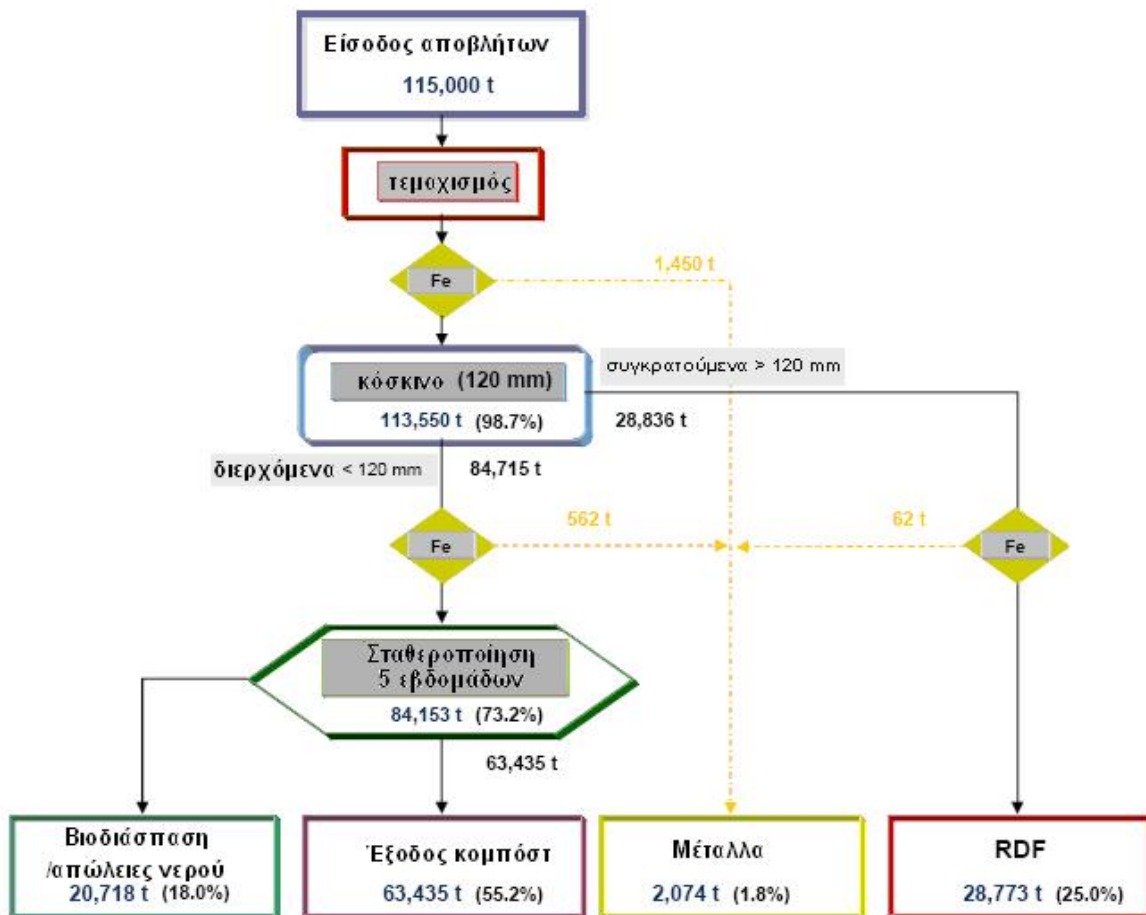
- ο Υψηλότερο κόστος συλλογής του βιοαερίου από το αντίστοιχο ενός χώρου διάθεσης.
- ο Πολύπλοκη τεχνολογία και απαίτηση συνεχούς επίβλεψης.
- ο Επεξεργασία των υγρών αποβλήτων σε μονάδα βιολογικού καθαρισμού.

4.5. Ισοζύγια

4.5.1 Μάζας

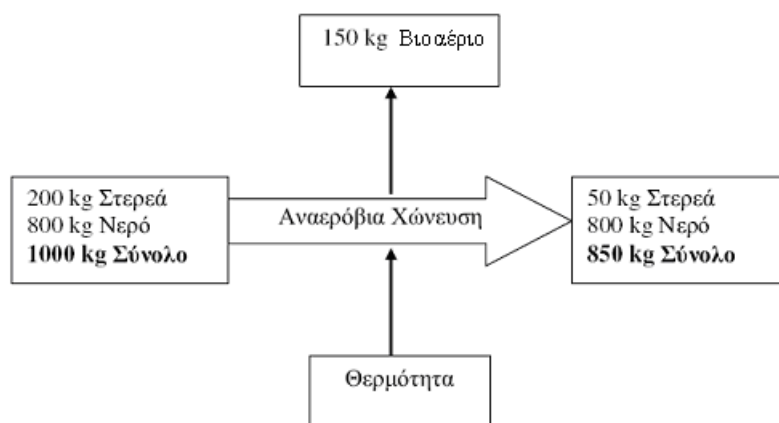
Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζεται το ισοζύγιο μάζας των απορριμμάτων κατά τη μηχανική και βιολογική επεξεργασία τους, όπου λαμβάνει χώρα διαδοχικά ο τεμαχισμός των υλικών, το κοσκίνισμά τους και η βιοσταθεροποίησή τους για

διάρκεια 5 εβδομάδων. Παρατηρείται ότι, μετά τη διαλογή, υφίσταται ανάκτηση υλικών (μετάλλων, RDF), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλες χρήσεις σε ποσοστό 26,8%, ενώ έπειτα από τη σταθεροποίηση των αποβλήτων το 55,2% της αρχικής μάζας μετατρέπεται σε compost και επέρχεται μείωση του όγκου των απορριμμάτων κατά 18%.



Σχήμα 4.17 : Κατανομή μάζας κατά τη μηχανική- βιολογική επεξεργασία.

Ειδικά όσον αφορά στην αναερόβια χώνευση, ένα τυπικό ισοζύγιο μάζας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.18. Μετά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης το υπόλειμμα ανέρχεται σε ποσοστό 25% (50kg), ενώ το 75 % (150kg) των στερεών μετατρέπεται σε βιοαέριο.



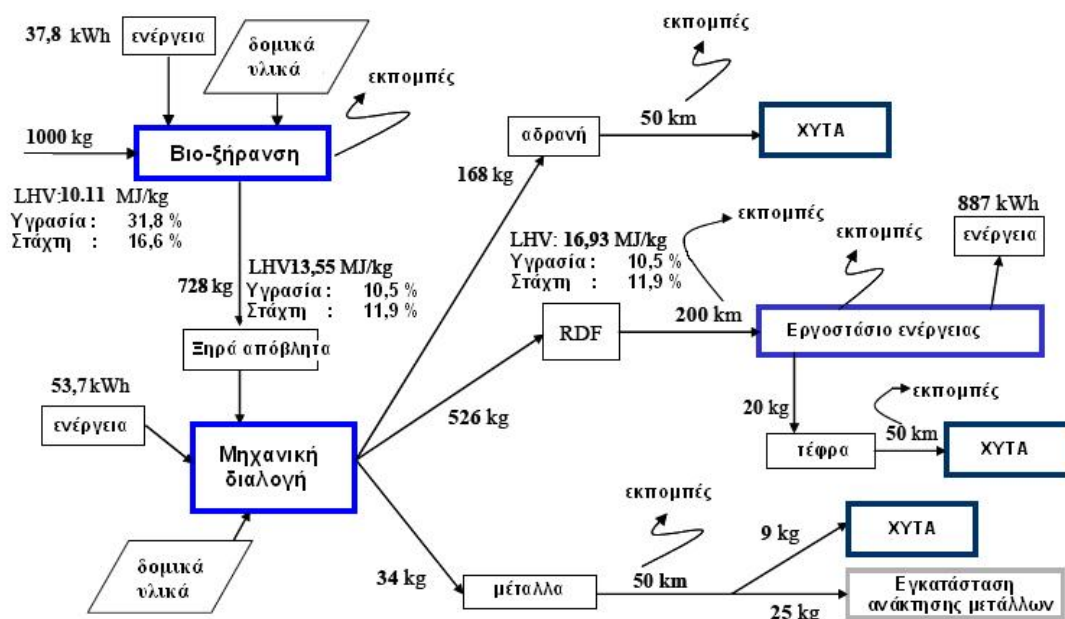
Σχήμα 4.18 : Κατανομή μάζας κατά την αναερόβια χώνευση.

4.5.2 Ρύπων

Σε μια εγκατάσταση μηχανικής-βιολογικής επεξεργασίας με παραγωγή RDF (MBT/RDF) ένας τόνος απορριμμάτων παράγει περίπου 130m^3 CO_2 , μέσω της διαδικασίας της λιπασματοποίησης. Επίσης, παράγεται και κάποια ποσότητα, κατά την καύση του RDF, αλλά αυτή η ποσότητα έχει ουδέτερο αποτέλεσμα στην ατμόσφαιρα γιατί παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία διαφορετικά θα παραγόταν με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, τα οποία επίσης θα δημιουργούσαν CO_2 . Συνολικά, μια εγκατάσταση MBT/RDF παράγει περίπου 130m^3 CO_2 /ton απορριμμάτων. Στην περίπτωση που η ποσότητα αυτή των απορριμμάτων καταλήξει σε έναν ΧΥΤΑ η εικόνα είναι πολύ διαφορετική. Εκεί, θα διασπαστεί από τους αναερόβιους μικροοργανισμούς και θα παραχθούν 120m^3 CH_4 και 80m^3 CO_2 , αντίστοιχα. Σε έναν σύμφωνο με όλες τις νόμιμες προδιαγραφές ΧΥΤΑ μπορεί να γίνει συλλογή της μισής ποσότητας μεθανίου και να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, οι συνολικές εκπομπές από το ΧΥΤΑ ανέρχονται σε 60m^3 CH_4 και 80m^3 CO_2 . Λαμβάνοντας υπόψη ότι το CH_4 είναι 21 φορές πιο επιβλαβές από το CO_2 , οι συνολικές εκπομπές από το ΧΥΤΑ ανέρχονται σε 1300m^3 ισοδύναμου CO_2 , που είναι δεκαπλάσιο των εκπομπών μιας εγκατάστασης MBT/RDF.

4.5.3 Ενέργειας

Στο Σχήμα 4.19 απεικονίζεται το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας κατά την επεξεργασία των απορριμμάτων σε RDF και την χρήση τους για σύγκαιση σε εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 4.19 : Κατανομή ενέργειας –μάζας κατά τη μηχανική βιολογική επεξεργασία [προσαρμογή από Consonni et al., 2006].

Όπως φαίνεται, με τη βιοξήρανση επιτυγχάνεται μείωση της υγρασίας και του όγκου των απορριμμάτων κατά περίπου 30%. Μετά τη μηχανική διαλογή το ανακτώμενο RDF αντιστοιχεί περίπου στο 52% της αρχικής μάζας και το οποίο περιέχει το 88% της αρχικής ενέργειας των απορριμμάτων.

Κατά την αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα η μετατροπή διαφόρων βιοδιασπώμενων οργανικών υλικών σε βιοαέριο, δηλαδή σε ένα μίγμα CH_4 (50-60%) και σε CO_2 (50-40%). Η οργανική ύλη μεταβολίζεται από βακτήρια σε ένα αναερόβιο περιβάλλον και παράγεται ένα αέριο με ενεργειακό περιεχόμενο περίπου 20-40% χαμηλότερο από το αρχικό θερμικό δυναμικό. Το βιοαέριο αυτό χαρακτηρίζεται από ένα υψηλό θερμιδικό δυναμικό 16-20 MJ / Nm^3 και μπορεί να μετατραπεί εύκολα σε οποιαδήποτε μορφή ενέργειας [Alibarti & Cossu, 2006].

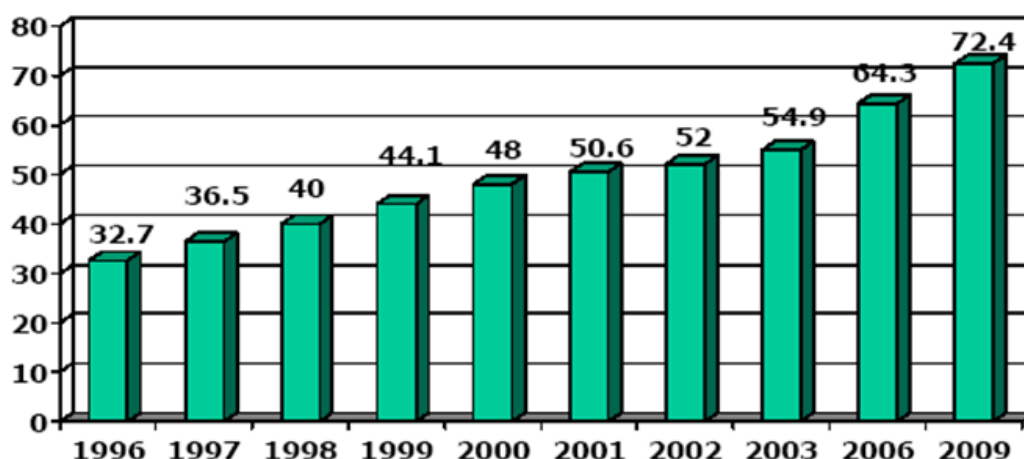
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Θερμική Επεξεργασία

5.1 Εισαγωγή

Σκοπός της θερμικής επεξεργασίας των απορριμμάτων είναι η ελάττωση του όγκου τους, η μετατροπή τους σε υλικά μη επιβλαβή για την υγεία του ανθρώπου και η κατά το δυνατόν εκμετάλλευση της ευρισκόμενης στα απορρίμματα ενέργειας ως θέρμανση, ατμό, ηλεκτρικό ρεύμα ή καύσιμο υλικό (ΚΥΑ 114218/1997).

Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5.1, η αποτέφρωση, είτε με εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας, είτε χωρίς αυτήν, κερδίζει έδαφος στην ΕΕ. Το 1996 με καύση επεξεργάστηκαν 32,7 εκατομμύρια τόνοι απορριμμάτων, ενώ το 2009 η ποσότητα αυτήν διαμορφώθηκε στα 72,4 εκατομμύρια τόννους, σημειώνοντας αύξηση μεγαλύτερη από 120%. Η Ελλάδα και η Ιρλανδία είναι οι μόνες χώρες της ΕΕ που δεν περιλαμβάνουν την θερμική επεξεργασία στη διαχείριση των στερεών απορριμμάτων τους.



Διάγραμμα 5.1: Αποτέφρωση σε εκατομμύρια τόννους/έτος ως μέθοδος επεξεργασίας στερεών απορριμμάτων στην ΕΕ [Eurostat, 2010].

Η θερμική επεξεργασία των στερεών αποβλήτων περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες μετατροπής του περιεχομένου τους σε αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα, με ταυτόχρονη ή συνεπακόλουθη αποδέσμευση θερμικής ενέργειας.

Οι τεχνικές θερμικής επεξεργασίας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Αποτέφρωση – καύση (incineration - combustion)
- Αεριοποίηση (gasification)
- Πυρόλυση (pyrolysis)
- Τεχνική του πλάσματος (plasma technology)

Βασικός στόχος σχεδιασμού πρέπει να αποτελεί η μείωση των αποβλήτων και όχι μόνο η ανάκτηση ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιτυγχάνεται πλήρης διάσπαση όλων των οργανικών ουσιών και να αποτρέπεται ο επανασχηματισμός τους κατά την φάση της ψύξης.

Τη διαδικασία της θερμικής επεξεργασίας των αποβλήτων επηρεάζουν οι εξής βασικές παράμετροι:

- Η ομοιογένεια των αποβλήτων.
- Το μέγεθος των κόκκων ή τεμαχίων των αποβλήτων και η κατανομή τους.
- Η ειδική επιφάνεια των κόκκων ή τεμαχίων των αποβλήτων.
- Η θερμική αγωγιμότητα των αποβλήτων.
- Η θερμοκρασία ανάφλεξης των αποβλήτων.
- Η δυνατότητα αποθήκευσης των αποβλήτων.
- Το ειδικό βάρος των αποβλήτων.
- Η θερμογόνο τιμή της καύσιμης ύλης των αποβλήτων.
- Η ποσοτική σύνθεση των αποβλήτων.
- Η περιεκτικότητα των αποβλήτων σε πτητικά.
- Η περιεκτικότητα των αποβλήτων σε βλαβερές ουσίες.

5.2 Αποτέφρωση – Καύση

Η αποτέφρωση (ή καύση) των στερεών αποβλήτων είναι η οξείδωση, δηλαδή η ένωση των χημικών στοιχείων, που περιέχονται σε αυτά, με το οξυγόνο. Αυτό

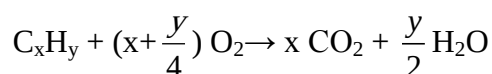
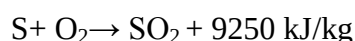
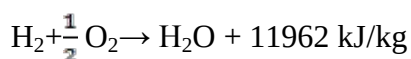
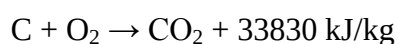
πραγματοποιείται με χρήση είτε της απαιτούμενης στοιχειομετρικά ποσότητας αέρα (stoichiometric combustion), είτε με περίσσεια αέρα (excess – air combustion).

Τα στοιχεία, που διαφεύγουν από το εσωτερικό των μορίων και μεταφέρονται στην εξωτερική επιφάνεια, κατά τη διαδικασία της απαεριοποίησης, αναμιγνύονται με το οξυγόνο. Όταν επικρατούν συνθήκες ανάφλεξης, δηλαδή υπάρχει η απαιτούμενη συγκέντρωση εύφλεκτου αερίου (πάνω από το κατώτερο όριο ανάφλεξης) και η απαιτούμενη θερμοκρασία, τότε το αέριο μίγμα αναφλέγεται και καίγεται.

Κατά την κανονική διαδικασία της καύσης τα αέρια καύσιμα οξειδώνονται πλήρως. Τα προϊόντα καύσης αποτελούνται κυρίως από CO₂ και ατμούς. Η σημαντικότερη παράμετρος κατά την καύση είναι η παρουσία οξυγόνου. Κατά την πλήρη καύση επικρατεί περίσσεια οξυγόνου, συνεπώς ο στοιχειομετρικός συντελεστής του οξυγόνου στην αντίδραση καύσης είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας. Εάν ο στοιχειομετρικός συντελεστής του αέρα είναι $n=1$ τότε υπάρχει ακριβώς τόσο οξυγόνο όσο απαιτείται για την πλήρη οξείδωση του άνθρακα σε CO₂, γεγονός που θεωρητικά σημαίνει ότι δεν σχηματίζεται CO. Σε αυτήν την περίπτωση η μέση θερμοκρασία του αερίου είναι 1.200°C.

Οι χημικές αντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα, σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής:

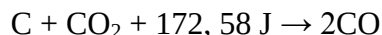
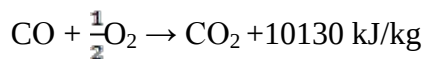
- Πλήρης καύση:



Σε περίπτωση έλλειψης οξυγόνου, συμβαίνουν αντιδράσεις αεριοποίησης, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως «αντιδράσεις ατελούς καύσης», το οποίο σημαίνει ότι το ήδη σχηματισμένο διοξείδιο του άνθρακα ενώνεται με τον άνθρακα, που δεν έχει καταναλωθεί και μετατρέπεται σε μονοξείδιο του άνθρακα σε υψηλότερες θερμοκρασίες:

- Μη πλήρης καύση:





Επιπλέον διαδικασίες, που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της καύσης, είναι η θερμική διάσπαση του νερού, η οξείδωση του θείου, όπως και η χημική αντίδραση με άζωτο.

Οι προϋποθέσεις για την επίτευξη πλήρους καύσης των αποβλήτων είναι:

- Επαρκής ποσότητα καύσιμου υλικού και οξειδωτικού μέσου (O_2) στην εστία καύσης.
- Επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας ανάφλεξης.
- Σωστή αναλογία μίγματος (καύσιμης ύλης – οξυγόνου).
- Συνεχής απομάκρυνση των αερίων (απαερίων), τα οποία παράγονται κατά την καύση.
- Συνεχής απομάκρυνση των υπολειμμάτων της καύσης.

Οι μονάδες καύσης μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τον τρόπο που κινούνται τα απόβλητα μέσα στην ζώνη καύσης. Οι πιο συχνοί τύποι είναι:

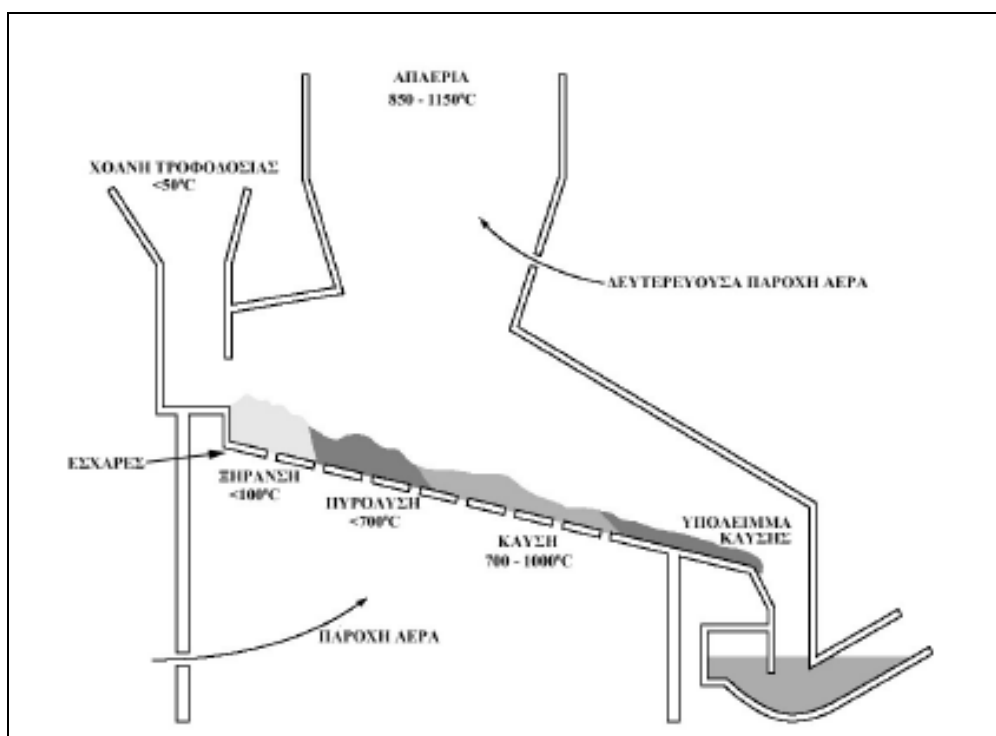
- Κινούμενων εσχάρων.
- Περιστρεφόμενου κλιβάνου.
- Ρευστοποιημένης κλίνης.

Ένα σύστημα καύσης κινούμενων εσχάρων απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Τα βασικά στάδια της όλης διεργασίας είναι:

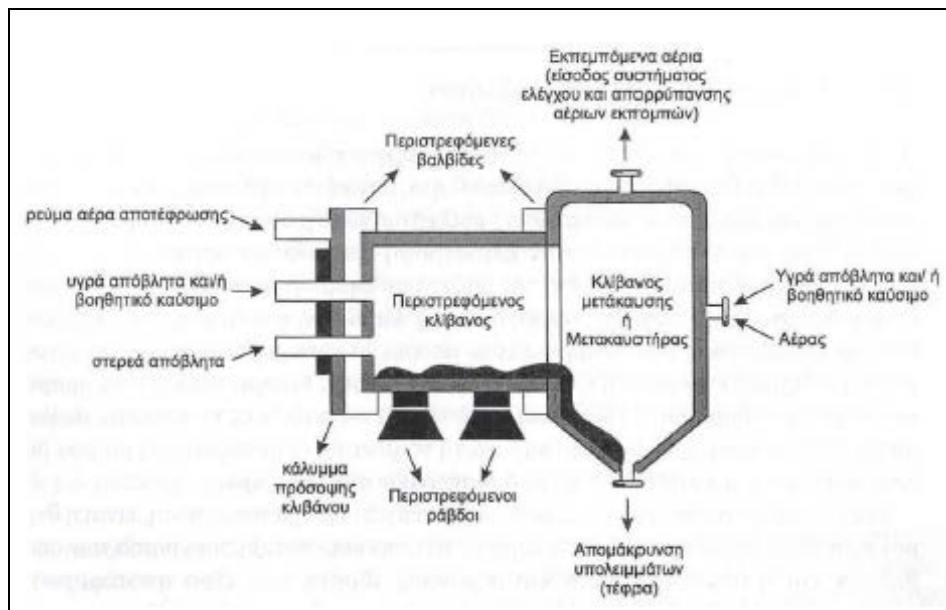
- **Ξήρανση:** Τα εισερχόμενα απόβλητα λαμβάνουν θερμότητα με ακτινοβολία από την φλόγα και με συναγωγή από την παροχή του θερμού αέρα. Το αποτέλεσμα είναι η εξάτμιση της περιεχόμενης στα απόβλητα υγρασίας και των πτητικών συστατικών.
- **Πυρόλυση:** Με την αύξηση της θερμοκρασίας τα περισσότερα πτητικά συστατικά εξατμίζονται.
- **Έναυση:** Η απαιτούμενη θερμότητα για την έναυση της καύσιμης ύλης προσδίδεται στα απόβλητα μέσω ακτινοβολίας από τη φλόγα και τα τοιχώματα του φλογοθαλάμου.

- **Αεριοποίηση και καύση:** Η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας της πλήρους έναυσης των αποβλήτων προκαλεί την αεριοποίηση μιας ποικιλίας υλικών που περιέχονται σε αυτά. Ο εναπομένον άνθρακας οξειδώνεται πλήρως, ενώ στο φλογοθάλαμο καίγονται τα αέρια, που παράχθηκαν από τις φάσεις της πυρόλυσης και της αεριοποίησης.
- **Ολοκλήρωση της καύσης:** Η ολοκλήρωση της καύσης αποδίδει αρκετά αδρανοποιημένο (ανόργανο) στερεό υπόλειμμα στο τέλος της εσχάρας.

Ένας αποτεφρωτής περιστρεφόμενου κλιβάνου κλίσης 15-20° επεξεργάζεται με επιτυχία πολλά είδη αποβλήτων και ρύπους, που άλλες τεχνολογίες δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν. Στα Σχήματα 5.2 & 5.3 απεικονίζεται ένας τέτοιου είδους αποτεφρωτής, ο οποίος αποτελείται από έναν περιστρεφόμενο κλίβανο, έναν μετακαυστήρα και ένα σύστημα ελέγχου των παραγόμενων αέριων εκπομπών.



Σχήμα 5.1: Στάδια της μαζικής καύσης αποβλήτων σε αποτεφρωτήρα με κινούμενες εσχάρες [Γιδαράκος, 2005].



Σχήμα 5.2: Αποτεφρωτής περιστροφικού κλιβάνου [La Grega et al., 2001].



Σχήμα 5.3: Αποτεφρωτής περιστροφικού κλιβάνου [www.pdhenineer.com].

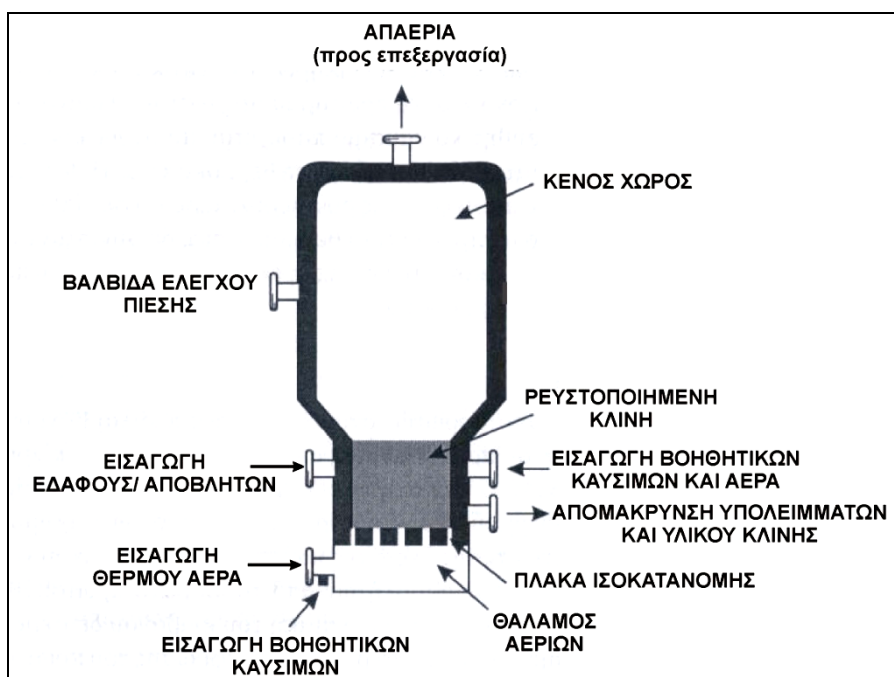
Βασικές παράμετροι λειτουργίας ενός αποτεφρωτή περιστρεφόμενου κλιβάνου είναι:

- η θερμοκρασία εξόδου του περιστροφικού κλιβάνου και του μετακαυστήρα, η οποία πρέπει να οδηγεί σε πλήρη αποτέφρωση των αποβλήτων,
- η εσωτερική πίεση του κλιβάνου, που πρέπει να είναι αρνητική για την αποφυγή αέριων εκπομπών και σωματιδίων στην ατμόσφαιρα,

- ο ρυθμός παροχής αέρα (οξυγόνου) και των αποβλήτων, έτσι ώστε οι συνθήκες λειτουργίας του καυστήρα να είναι οι βέλτιστες.

Ο χρόνος παραμονής των αποβλήτων καθορίζει τον βαθμό ανάμιξής τους εντός του κλιβάνου, δεδομένου ότι αυτός περιστρέφεται, όπως επίσης και τον χρόνο επεξεργασίας των αποβλήτων. Η αργή περιστροφή του κλιβάνου (10-20 περιστροφές/ώρα) έχει ως αποτέλεσμα την ανάδευση των αποβλήτων και ως εκ τούτου την πλήρη καύση τους. Η σύσταση των αερίων καύσης αποτελεί δείκτη απόδοσης του κλιβάνου και δεδομένου ότι λειτουργεί με περίσσεια οξυγόνου, τα απαέρια θα πρέπει να περιέχουν χαμηλές συγκεντρώσεις CO, υδρογονανθράκων και μειωμένες ποσότητες υπολειμμάτων αποτέφρωσης.

Ο αποτεφρωτής ρευστοποιημένης κλίνης του Σχήματος 5.4 χρησιμοποιεί ένα στρώμα άμμου ή αλουμίνας (κλίνη), πάνω στο οποίο εισάγεται το προς επεξεργασία έδαφος. Κάτω από το στρώμα αυτό διοχετεύεται αέρας με τέτοια παροχή ώστε ολόκληρη η κλίνη να βρίσκεται σε αιώρηση και σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία ανάφλεξης των υφιστάμενων ρύπων. Το παρεχόμενο οξυγόνο, οι έντονες συνθήκες ανάμιξης και η αυξημένη θερμοκρασία έχουν ως αποτέλεσμα την εξάτμιση και την καταστροφή των οργανικών ρύπων.



Σχήμα 5.4: Αποτεφρωτής ρευστοποιημένης κλίνης [La Grega et al., 2001].

Λειτουργική παράμετρος αποτελεί η θερμοκρασία, η οποία ορίζεται σύμφωνα με την τροφοδοσία των αποβλήτων, των παραγόμενων αερίων και ενός βοηθητικού υλικού καύσης. Η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ 750 – 880°C, χαμηλότερη σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες αποτέφρωσης, γεγονός που οφείλεται στην καλή ανάμιξη του υλικού. Το απαιτούμενο οξυγόνο καύσης και ο χρόνος παραμονής των αποβλήτων αποτελούν επίσης παραμέτρους λειτουργίας του αποτεφρωτή ρευστοποιημένης κλίνης και καθορίζονται με βάση τον ρυθμό τροφοδοσίας των προς επεξεργασία αποβλήτων. Η συγκέντρωση του οξυγόνου ρυθμίζεται και ελέγχεται ώστε να εξασφαλίζονται οι συνθήκες τέλει αποτέφρωσης.

Κατά την καύση, εκτός των τυπικών προϊόντων καύσης (διοξείδιο του άνθρακα, ατμός, μονοξείδιο του άνθρακα), παράγεται ανάλογα με την ποιότητα των αποβλήτων και μια σειρά άλλων ουσιών, όπως διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου, υδροχλώριο, υδροφθόριο, πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες κλπ. Επίσης, κατά την καύση των στερεών αποβλήτων παραμένουν στερεά υπολείμματα, τα οποία αντιστοιχούν στο 25 – 40% του βάρους των εισερχομένων αποβλήτων.

Η ποσότητα των υπολειμμάτων εξαρτάται από τη σύνθεση των αποβλήτων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης. Τα υπολείμματα διακρίνονται σε τέφρα, που παράγεται στο χώρο της καύσης (απομακρύνεται μετά την εσχάρα), τέφρα από τους λέβητες (υπολείμματα, τα οποία δημιουργούνται στις θερμαντικές επιφάνειες των λεβήτων και συγκεντρώνονται στις χοάνες κάτω από το λέβητα), ιπτάμενη τέφρα και σκόνη, που κατακρατείται στα φίλτρα (συγκεντρώνεται στις χοάνες κάτω από τα ηλεκτρόφιλτρα ή σακκόφιλτρα) και υπολείμματα, τα οποία παράγονται από τα συστήματα καθαρισμού των αερίων.

Για τον πλήρη έλεγχο των εκπομπών απαιτείται διενέργεια δειγματοληψιών και αναλύσεων για προσδιορισμό της σύστασης των:

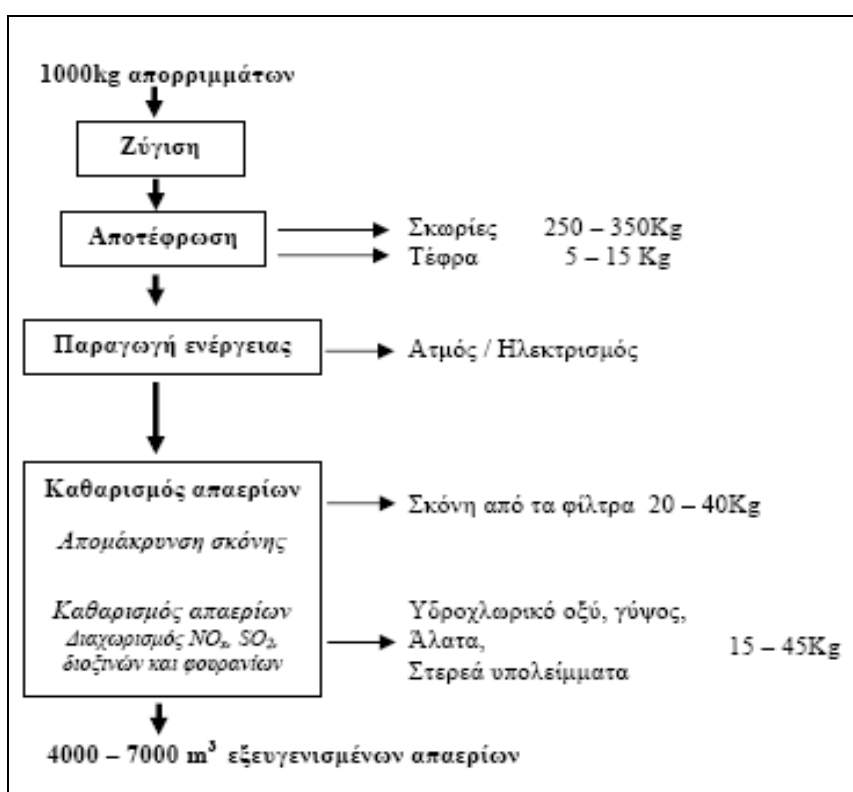
- Εισερχομένων στερεών αποβλήτων.
- Παραγόμενων στερεών (υπολείμματα - ιπτάμενη τέφρα).
- Παραγόμενων αερίων.
- Υγρών αποβλήτων που παράγονται κατά την επεξεργασία των αερίων.

Η κοινοτική νομοθεσία (Οδηγία 2000/76/EK) έχει θέσει τα όρια που πρέπει να πληρούν οι ατμοσφαιρικές εκπομπές, τα υγρά απόβλητα από τον καθαρισμό των

απαερίων και τα στερεά υπολείμματα από τη λειτουργία μονάδων αποτέφρωσης αποβλήτων.

Η ελληνική νομοθεσία (ΚΥΑ 114218/1997) θέτει τεχνικές προδιαγραφές όσον αφορά στην ποιότητα του RDF, δηλαδή των καύσιμων κλασμάτων των αστικών αποβλήτων (ΑΣΑ). Συγκεκριμένα η κατώτερη θερμογόνο δύναμη ορίζεται σε 4.000 Kcal/g, η υγρασία < 20% και το ποσοστό των χαρτιών και πλαστικών >95% (ξηρό βάρος).

Η τεχνική της αποτέφρωσης, όπως έχει εφαρμοστεί στη Γερμανία για την καύση αστικών απορριμμάτων (DS – Documents, 2003), μπορεί να περιγραφεί με το Διάγραμμα 5.1.



Διάγραμμα 5.1: Διάγραμμα ροής μιας εγκατάστασης αποτέφρωσης αστικών αποβλήτων.

5.3 Πυρόλυση

Οι περισσότερες οργανικές ουσίες είναι θερμικά ασταθείς και κατά την θέρμανσή τους, απουσία οξυγόνου, διαχωρίζονται μέσω ενός συνδυασμού θερμικής διάσπασης και συμπύκνωσης σε αέρια, υγρά και στερεά κλάσματα. Στον Πίνακα 5.2 δίνονται οι

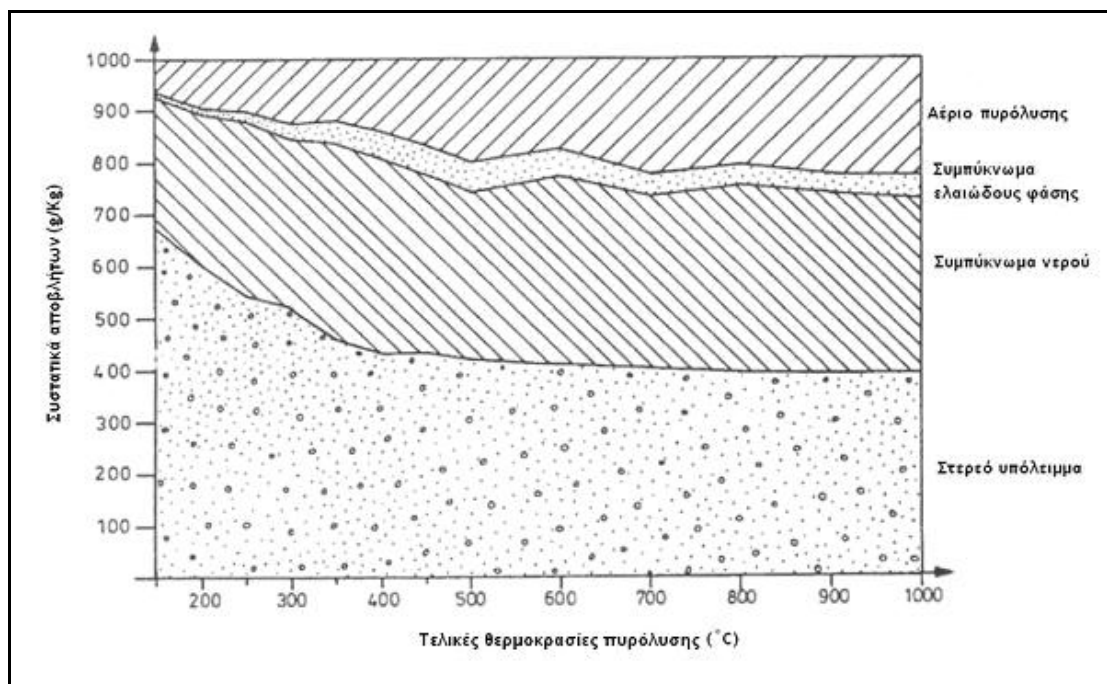
χημικές αντιδράσεις της πυρολυτικής αποδόμησης των οργανικών ενώσεων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία πυρόλυσης.

Στο δε Διάγραμμα 5.2 απεικονίζεται γραφικά η σχέση μεταξύ του ισοζυγίου μάζας των συστατικών των αποβλήτων (g/Kg) κατά τη διαδικασία της πυρόλυσης, ανάλογα με την τελική θερμοκρασία πυρόλυσης (°C).

Η πυρολυτική διεργασία, σε αντίθεση με την καύση και την αεριοποίηση, είναι ισχυρά ενδόθερμη και για τη διεξαγωγή της απαιτείται εξωτερική πηγή ενέργειας. Βασικές παράμετροι για την εφαρμογή της αποτελούν η σύσταση των στερεών αποβλήτων, η θερμογόνο δύναμή τους, η περιεχόμενη υγρασία κ.λ.π.

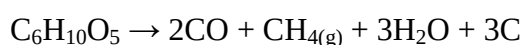
Πίνακας 5.2: Πυρολυτική αποδόμηση οργανικών ενώσεων [Bilitewski et al., 2000].

ΕΥΡΟΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (°C)	ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ
100 μέχρι 200	Θερμική ξήρανση, εξάτμιση H ₂ O.
250	Αναγωγή, αποθείωση; απομάκρυνση δεσμευμένου στη μοριακή δομή H ₂ O και CO ₂ ; διάσπαση πολυμερισμένων μορίων; έναρξη διαχωρισμού H ₂ S (αποθείωση).
340	Σχάση αλειφατικών ενώσεων. Έναρξη απομάκρυνσης μεθανίου και άλλων αλειφατικών ενώσεων.
380	Φάση εξανθράκωσης (εμπλουτισμός υλικού σε άνθρακα).
400	Σχάση δεσμών άνθρακα-οξυγόνου και άνθρακα-αζώτου στις οργανικές ενώσεις.
400 μέχρι 600	Μετατροπή των πισσασφαλτούχων υλικών (βιτουμενίου) σε καύσιμη ύλη και πίσσα.
600	Cracking βιτουμενίου και μετατροπή του σε θερμικά ανθεκτικότερες ενώσεις (σε μικρής αλυσίδας αέριες οργανικές ενώσεις); δημιουργία αρωματικών ενώσεων (παραγωγή βενζολίου).
>600	Μετατροπή των ολεφινών (αιθυλενίων), αφυδρογόνωση προς σχηματισμό βουτανίου, αντίδραση με αιθυλένιο προς σχηματισμό κυκλοεξανίου, θερμική αρωματοποίηση βενζολίου και αρωματικών ενώσεων με υψηλότερο σημείο βρασμού-αεριοποίησης.



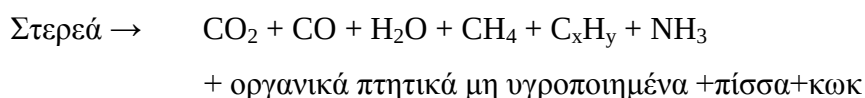
Διάγραμμα 5.2: Ισοζύγιο μάζας συστατικών πυρόλυσης [Bilitewski et al., 2000].

Για τις κυτταρίνες π.χ. λαμβάνει χώρα η ακόλουθη αντίδραση:



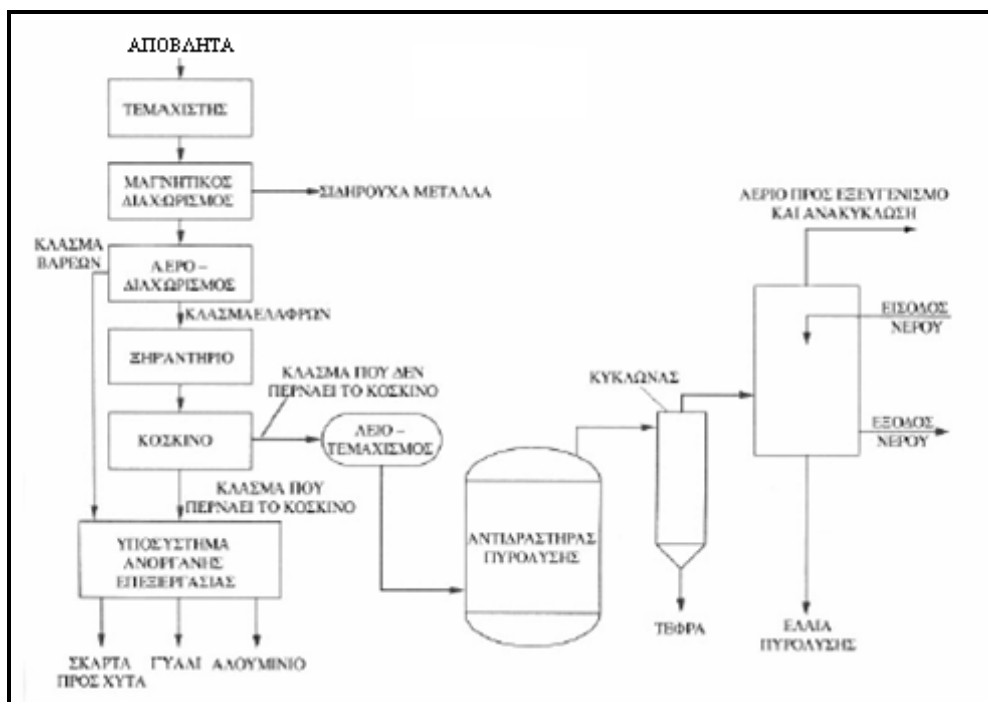
Σε αυτήν την αντίδραση δεν προστίθεται οξυγόνο.

Τυπικά η πυρόλυση των οξυγονωμένων υδρογονανθράκων σε στερεά μορφή είναι η ακόλουθη:



Η πίσσα περιέχει πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, ενώ το κωκ δεν αποτελείται από καθαρό άνθρακα, αλλά περιέχει υδρογόνο και οξυγόνο. Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας της πυρόλυσης.

Οι περισσότερες οργανικές ουσίες στα απόβλητα πυρολύονται κατά 75 – 90 % σε πτητικές ενώσεις και 10 – 25 % σε στερεό υπόλειμμα κωκ. Λόγω όμως της παρουσίας υγρασίας και ανόργανων ουσιών, η ποσότητα των πτητικών κυμαίνεται από 60 – 70 % και του κωκ από 30 – 40 %.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ροής της διεργασίας πυρόλυσης [Bilitewski et al., 2000].

Με την πυρόλυση των στερεών αποβλήτων σχηματίζονται προϊόντα, όπως:

- Αέρια: Αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και διάφορα άλλα αέρια, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των στερεών αποβλήτων. Τα αέρια αυτά είναι καύσιμα και η θερμογόνος δύναμή τους κυμαίνεται μεταξύ 3.000 και 5.000 kcal/Nm³. Δεν περιέχουν πρακτικά NO_x.
- Υγρά: Το υγρό κλάσμα είναι ελαιώδες με υψηλή πυκνότητα και ιξώδες, περιέχει απλά καρβοξυλικά οξέα (π.χ. οξικό οξύ), κετόνες (π.χ. ακετόνη), αλκοόλες (π.χ. μεθανόλη), καθώς και σύνθετους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες. Με περαιτέρω επεξεργασία το κλάσμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο.
- Στερεά: Το στερεό υπόλειμμα περιέχει σχεδόν καθαρό άνθρακα και τυχόν αδρανή υλικά, που υπάρχουν στα στερεά απόβλητα και προορίζεται για καύσιμο ή για να μετατραπεί σε ενεργό άνθρακα.

Η αναλογία των παραπάνω κλασμάτων εξαρτάται σημαντικά από τις κάτωθι παραμέτρους:

- Τη σύσταση του αποβλήτου.

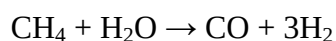
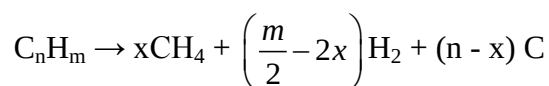
- Τις συνθήκες θέρμανσης.
- Τη θερμοκρασία πυρόλυσης.
- Τον χρόνο αντίδρασης.

Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει αισθητά το στερεό υπόλειμμα, ελαττώνει το υγρό κλάσμα και αυξάνει τα αέρια προϊόντα. Το ενεργειακό περιεχόμενο του υγρού κλάσματος εκτιμάται γύρω στα 1,6 MJ/kg, ενώ του αερίου – σε συνθήκες μέγιστης παραγωγής – στα 335 MJ/m³. Αν η πυρόλυση λαμβάνει χώρα σε χαμηλές θερμοκρασίες (~500°C), τότε στα αέρια υπάρχουν και αρωματικές ενώσεις και φαινόλες. Οι φαινόλες κατά την ψύξη τους συμπυκνώνονται σε πισσώδη υλικά. Η μείωση των οργανικών αυτών ενώσεων επιτυγχάνεται με διάσπασή τους κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης σε θερμοκρασίες 1.000 - 1.300°C.

5.4 Αεριοποίηση

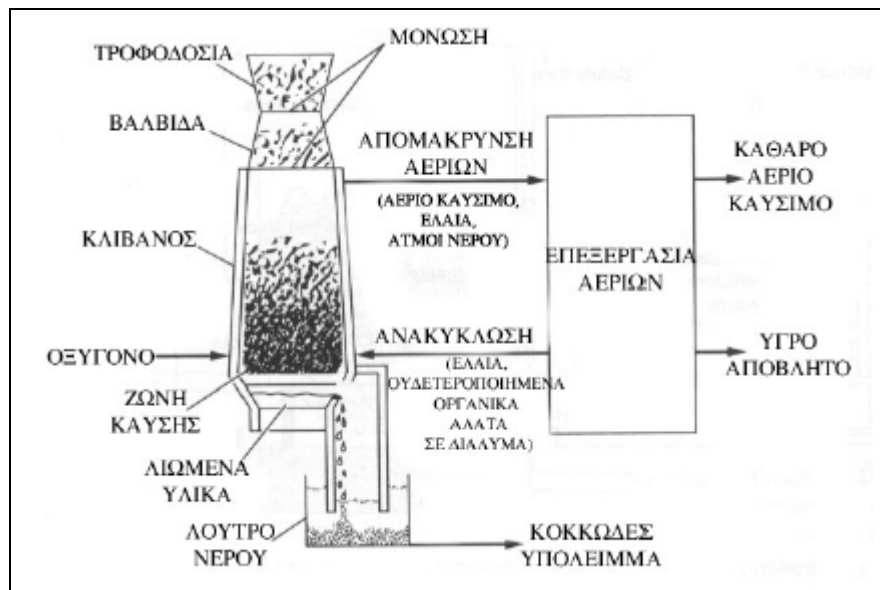
Η αεριοποίηση είναι μια μέθοδος θερμικής επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων, η οποία μέσω της ελεγχόμενης ατελούς καύσης αυτών, επιτυγχάνεται η παραγωγή καύσιμου αερίου πλούσιο σε H₂ και κορεσμένους υδρογονάνθρακες (κυρίως CH₄).

Κατά τη διάρκεια της αεριοποίησης λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθες αντιδράσεις:



Η διαφορά της αεριοποίησης με την πυρόλυση έγκειται στο γεγονός ότι στην αεριοποίηση τροφοδοτείται πρόσθετο καύσιμο αέριο για την επιπλέον μετατροπή των οργανικών υπολειμμάτων σε αέρια προϊόντα. Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της διεργασίας αεριοποίησης σύμφωνα με τη μέθοδο Purox.

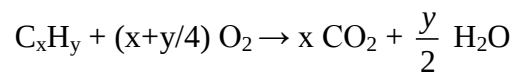
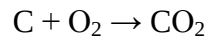
Η αεριοποίηση αποτελεί, θεωρητικά, το επόμενο στάδιο της πυρόλυσης. Στο στάδιο αυτό το υπολειμματικό κωκ της πυρόλυσης οξειδώνεται (όχι με στοιχειομετρική αναλογία O₂) σε θερμοκρασίες >800°C. Ως μέσο αεριοποίησης χρησιμοποιείται ατμός, CO₂, O₂ ή αέρας. Η αεριοποίηση, όπως και η πυρόλυση, είναι διεργασίες που μπορούν να αποτελέσουν είτε τμήμα, είτε το σύνολο, της θερμικής επεξεργασίας των αποβλήτων.



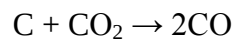
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ροής της διεργασίας της αεριοποίησης (Purox) [Γιδαράκος, 2006].

Οι κύριες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης είναι:

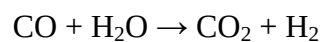
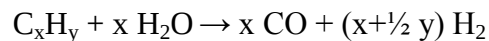
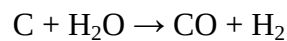
Οξείδωση (εξώθερμη)



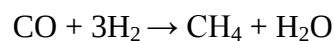
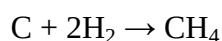
Αντίδραση Boudouard (ενδόθερμη)



Αντίδραση εξάτμισης νερού (ενδόθερμη)



Αντίδραση σχηματισμού μεθανίου (εξώθερμη)



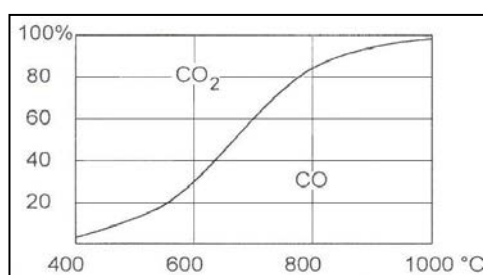
όπου: m, n, x, y, z = συντελεστές κατανομής

Τα τελικά προϊόντα της αεριοποίησης είναι:

- Αέριο πλούσιο σε μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και κορεσμένους υδρογονάνθρακες (κυρίως μεθάνιο), που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.
- Στερεό υπόλειμμα, που αποτελείται από άνθρακα και αδρανή.
- Συμπυκνωμένο υγρό υπόλειμμα, που παρουσιάζει σύσταση παρόμοια με αυτήν του υγρού κλάσματος, που παράγεται κατά την πυρόλυση.

Η ενέργεια, που απαιτείται για την αντίδραση αεριοποίησης, παράγεται με καύση μέρους του οργανικού υλικού στον αντιδραστήρα αεριοποίησης. Τα παραγόμενα αέρια εξαρτώνται από το είδος του μέσου αεριοποίησης (αέρα ή οξυγόνο).

Στο Διάγραμμα 5.3 απεικονίζεται γραφικά η αναλογία CO/CO₂, σύμφωνα με την αντίδραση Boudouard, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

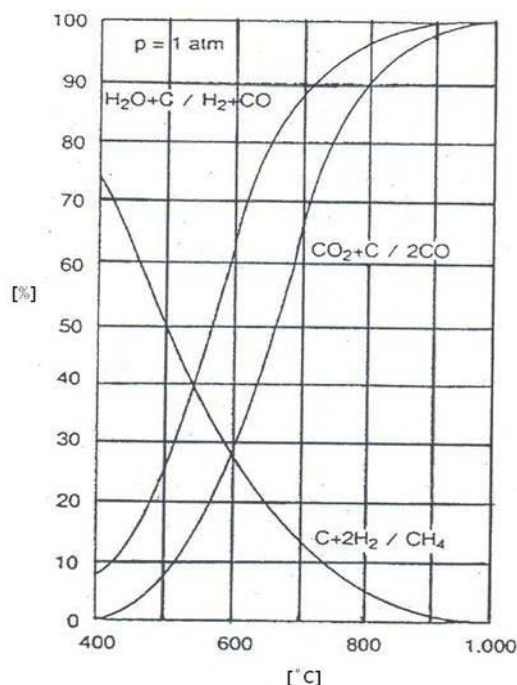


Διάγραμμα 5.3: Ισορροπία της αντίδρασης Boudouard σε ατμοσφαιρική πίεση [Bilitewski et al., 2000].

Ανάλογα λαμβάνουν χώρα και άλλες αντιδράσεις στις οποίες με προσθήκη H₂O σε χαμηλές θερμοκρασίες σχηματίζεται CO₂, ενώ σε υψηλότερες CO. Η ένωση με το H₂O, καθώς και η αντίδραση Boudouard, είναι ενδόθερμες, σε αντίθεση με την οξείδωση του C, που είναι εξώθερμη.

Η ταχύτητα αντίδρασης αεριοποίησης εξαρτάται εκτός από την θερμοκρασία και από το πορώδες, τη διάμετρο των πόρων και από την εσωτερική δομή της καύσιμης ύλης. Απόβλητα, που έχουν προέρθει από πυρόλυση, αεριοποιούνται ευκολότερα από μη επεξεργασμένα απόβλητα. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση συμπαγούς συνεκτικού υλικού σε σχέση με χαλαρό ψαθυρό υλικό. Συμπαγή υλικά, όπως οι μπριγκέτες, επιτρέπουν την καλύτερη διέλευση του αερίου διαμέσου του στερεού υποστρώματος στον αντιδραστήρα.

Στο Διάγραμμα 5.4 απεικονίζονται οι καμπύλες ισορροπίας της αεριοποίησης του C συναρτήσει της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 5.4: Καμπύλες ισορροπίας της αεριοποίησης C συναρτήσει της θερμοκρασίας [Thomé-Kozmiensky, 1994].

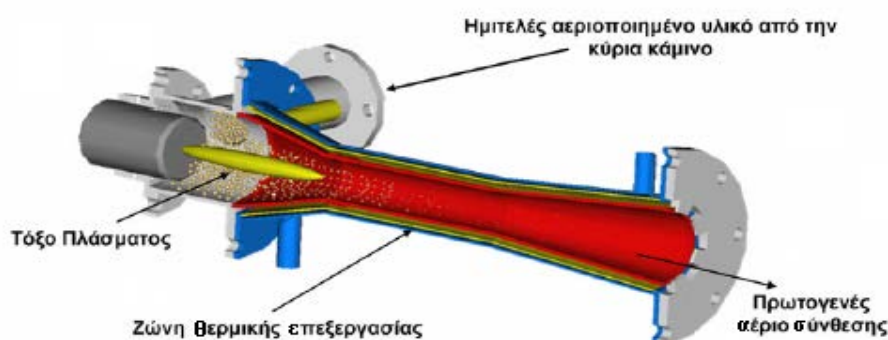
Το στερεό υπόλειμμα παρουσιάζει προσροφητικές ιδιότητες παρόμοιες με τον ενεργό άνθρακα του εμπορίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις τριτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων ή νερού που προορίζεται για διάφορες χρήσεις.

Η μέθοδος έχει ως αρχή την αποφυγή δημιουργίας αερίων εκπομπών, το οποίο ισχύει και κατά την πυρόλυση, σε αντίθεση με την καύση. Σε κάθε περίπτωση όμως, αναφορικά με τις επιτρεπτές τιμές στις παραγόμενες εκπομπές κατά την πυρόλυση, αυτές ταυτίζονται με το σύνολο των τεχνικών θερμικής επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων.

5.5 Τεχνική Πλάσματος

Ο όρος πλάσμα (plasma) περιγράφει κάθε αέριο, του οποίου τουλάχιστον ένα ποσοστό των ατόμων ή μορίων του είναι μερικά ή ολικά ιονισμένο. Ο ιονισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Στην περίπτωση της επεξεργασίας

αποβλήτων με την τεχνική του πλάσματος, το αέριο μεταπίπτει στην κατάσταση του πλάσματος, συνήθως με τη βοήθεια της θερμότητας που δημιουργείται από ηλεκτρική αντίσταση τόξου στήλης πλάσματος. Το τόξο αυτό βρίσκεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (άνοδος και κάθοδος) και αποτελείται από ένα ηλεκτρικά αγώγιμο αέριο, μετατρέποντας έτσι τον ηλεκτρισμό σε θερμότητα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες, σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνικές θερμικής επεξεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, η μέση θερμοκρασία του αερίου μπορεί να υπερβεί τους 6.000°C. Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζονται τα βασικά μέρη ενός αεριοποιητή πλάσματος.



Σχήμα 5.7: Αεριοποιητής πλάσματος [Γιδαράκος, 2006].

Το αέριο, σε κατάσταση πλάσματος, είναι χημικά πολύ δραστικό συγκριτικά με τα περισσότερα αέρια σε μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις και μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε μια ποικιλία χημικών αντιδράσεων. Τα πλεονεκτήματα από την χρήση της τεχνολογίας αυτής προκύπτουν κατά κύριο λόγο από την υψηλή κινητική ενέργεια, που χαρακτηρίζει τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια του πλάσματος, αλλά και τα άτομα του ουδετέρου αερίου. Η μερική μεταφορά αυτής της ενέργειας στις χημικές ενώσεις έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ισχυρών χημικών αντιδράσεων, οι οποίες δεν θα μπορούσαν να ενεργοποιηθούν από τις εξώθερμες αντιδράσεις των συμβατικών διαδικασιών καύσης.

Εφαρμόζοντας την τεχνική του πλάσματος, λαμβάνει χώρα η αεριοποίηση/υαλοποίηση του περιεχομένου των εισερχομένων στερεών αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, υπό την επίδραση των πολύ υψηλών θερμοκρασιών, το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων αεριοποιείται και σχηματίζει συνθετικό αέριο (μίγμα μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου) και απαέρια. Ο χρόνος που απαιτείται

προκειμένου να λάβει χώρα η καταστροφή των οργανικών ενώσεων εξαρτάται από την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας και το χρόνο παραμονής των οργανικών ενώσεων στην ιονισμένη ατμόσφαιρα ή σε υψηλή θερμοκρασία. Παράλληλα, το ανόργανο μέρος των αποβλήτων μετατρέπεται σε τηγμένο υπόλειμμα, το οποίο μετά από ψύξη σχηματίζει ένα σταθερό, αδρανές, υψηλής πυκνότητας υαλώδες υλικό.

Σε διεθνές επίπεδο, η χρήση της τεχνολογίας αυτής βρίσκεται σε πιλοτικό στάδιο και η σχετική εμπειρία είναι περιορισμένη, αφού η συγκεκριμένη τεχνική εμφανίστηκε πρόσφατα, σε σχέση με το σύνολο των υπόλοιπων τεχνικών θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων.

Εν τούτοις, η τεχνική αυτή έχει όλες τις προϋποθέσεις να εξελιχθεί και να επεκταθεί σε ευρεία κλίμακα, ειδικά εάν ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Οι μονάδες πλάσματος χαρακτηρίζονται από συγκριτικά μικρότερες απαιτήσεις χώρου, σε σχέση με άλλες θερμικές μεθόδους επεξεργασίας.
- Η άνοδος της θερμοκρασίας σε υψηλά επίπεδα επιτρέπει την επεξεργασία των αποβλήτων σε ένα κύριο στάδιο, περιορίζοντας την πολυπλοκότητα της μεθόδου.
- Οι υψηλές θερμοκρασίες, που αναπτύσσονται, οδηγούν σε αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα.
- Η μέθοδος παρουσιάζει σημαντική ευελιξία αναφορικά με το είδος των προς επεξεργασία αποβλήτων και επιπλέον οδηγεί στην παραγωγή μικρότερου όγκου απαερίων και μειωμένου ρυπαντικού φορτίου, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους καύσης.

Τα τελικά προϊόντα από την εφαρμογή της τεχνολογίας του πλάσματος είναι:

- **Το παραγόμενο αέριο σύνθεσης**, το οποίο προκύπτει από την πλήρη αεριοποίηση όλων των πτητικών συστατικών (οργανικό μέρος των αποβλήτων) του εισερχόμενου ρεύματος. Η σύσταση του αερίου, καθώς και το ενεργειακό του περιεχόμενο, εξαρτώνται άμεσα από το είδος και το οργανικό περιεχόμενο του εισερχόμενου προς επεξεργασία ρεύματος αποβλήτων. Το παραπάνω μίγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποδοτικό καύσιμο στη μονάδα πλάσματος, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το λειτουργικό κόστος ή εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εμπορεύσιμο προϊόν.

- **Το υαλώδους μορφής αδρανές υλικό**, το οποίο δημιουργείται από την υαλοποίηση του ανόργανου μέρους των επεξεργαζόμενων αποβλήτων. Το υπόλειμμα αυτό είναι ομογενές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατασκευαστικό υλικό σε διάφορες εφαρμογές (π.χ. κατασκευή δρόμων, κατασκευή τούβλων και πλακιδίων πολύ υψηλής ποιότητας, κατασκευή υλικών πεζοδρόμησης, κ.λ.π.).
- **Τα απαέρια**, τα οποία ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα. Αναφορικά με τα ανώτατα επιτρεπτά όρια των εκπομπών από μονάδες, που χρησιμοποιούν τη τεχνολογία του πλάσματος, ισχύουν τα ίδια όρια με τις υπόλοιπες μονάδες θερμικής επεξεργασίας.
- **Τα υγρά απόβλητα**, τα οποία προκύπτουν από τη διαδικασία καθαρισμού των απαερίων. Ανάλογα με την ποιοτική και ποσοτική σύσταση των αποβλήτων αυτών, είναι δυνατόν να απαιτείται ειδική εγκατάσταση επεξεργασίας, ώστε να είναι ασφαλής η τελική τους διάθεση [Γιδαράκος, 2006].

Σε κάθε περίπτωση, οι επιτρεπτές τιμές στις παραγόμενες εκπομπές ταυτίζονται με εκείνες που ισχύουν για το σύνολο των τεχνικών θερμικής επεξεργασίας των στερεών αποβλήτων.

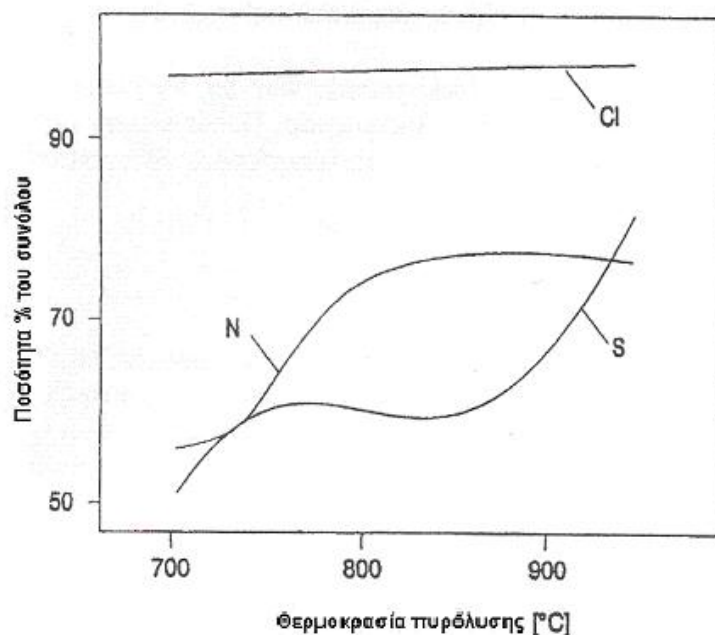
5.6 Μηχανισμοί σχηματισμού και συμπεριφορά επικινδύνων ουσιών

Η ποιοτική και ποσοτική σύσταση των επικινδύνων ουσιών, που σχηματίζονται κατά τη διαδικασία των διαφόρων θερμικών διεργασιών, εξαρτάται από το είδος της θερμικής διεργασίας και την σύσταση των προς επεξεργασία αποβλήτων.

Κατά τη διεργασία πυρόλυσης, οι παραγόμενοι ρύποι μπορεί να διαχωριστούν σε αυτούς που εξαρτώνται από το όλο σύστημα λειτουργίας (ύπαρξη ενώσεων θείου, φθορίου, χλωρίου, βαρέων μετάλλων και υδραργύρου στα απόβλητα) και σε αυτούς που παράγονται από τη διεργασία. Οι ρύποι, που παράγονται κατά τη διεργασία, ονομάζονται ρύποι διεργασίας και διακρίνονται από τους άλλους ρύπους διότι ανιχνεύονται μόνο έπειτα από την θερμική επεξεργασία. Το είδος της εγκατάστασης και οι συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, χρόνος παραμονής) καθορίζουν την ποιοτική και ποσοτική σύσταση αυτών.

Οι οργανικές ενώσεις κατά την πυρόλυση αποδομούνται σε απλά μόρια όπως H_2 , CO και CO_2 . Μαζί με τα κύρια προϊόντα της πυρόλυσης, εξαιτίας της επικρατούσας αναγωγικής ατμόσφαιρας του αντιδραστήρα, σχηματίζονται ως παραπροϊόντα ενώσεις του υδρογόνου όπως NH_3 , H_2S και HCl . Όταν η πυρόλυση λαμβάνει χώρα σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία ως $500\text{ }^{\circ}C$ σχηματίζονται σε αρκετά υψηλές ποσότητες αρωματικές και φαινολικές ενώσεις. Αυτές κατά την ψύξη είτε συμπυκνώνονται (σχηματίζοντας υψηλού μοριακού βάρους ενώσεις) στο κλάσμα της πίσσας, είτε εισέρχονται στο συμπυκνωμένο νερό. Όσες παραμένουν στην αέρια φάση παγιδεύονται στο νερό πλύσης του αερίου. Για την αποφυγή της ρύπανσης του νερού πλύσης των αερίων πυρόλυσης από τις αρωματικές και φαινολικές ενώσεις συστήνεται η απευθείας καύση του, λαμβάνοντας όμως μέτρα για τον καθαρισμό των απαερίων της καύσης.

Στο Διάγραμμα 5.5 δίνεται η εξάρτηση της ποσότητας των σχηματιζόμενων ενώσεων υδρογόνου με θείο, χλώριο και άζωτο (ως ποσοστό από τη συνολική τους ποσότητα στα απόβλητα) από τη θερμοκρασία. Σε θερμοκρασία πυρόλυσης άνω των $750\text{ }^{\circ}C$ παρατηρείται μια απότομη αύξηση της ποσότητας του αζώτου, η οποία σταματά όταν η συγκέντρωση του αζώτου φτάσει το 77 % της συνολικής.



Διάγραμμα 5.5: Κατανομή του ποσοστού % επί της συνολικής των ενώσεων υδρογόνου με S, N και Cl συναρτήσει της θερμοκρασίας [Bilitewski et al., 2000].

Η μεγαλύτερη ποσότητα του χλωρίου προέρχεται από απόβλητα PVC και σε χαμηλή θερμοκρασία το 98% του συνολικού χλωρίου απαντάται ως HCl. Το ποσοστό αυτό αυξάνεται βαθμιαία με αύξηση της θερμοκρασίας.

Η εξάρτηση του θείου από την θερμοκρασία είναι διαφορετική. Σε θερμοκρασία 700 – 750 °C εμφανίζεται αύξηση της ποσότητάς του, έπειτα σταθεροποιείται μέχρι τους 850 °C και για θερμοκρασίες >850 °C παρατηρείται αύξηση μέχρι την τιμή 80%.

Μια δυνατότητα μείωσης των οργανικών ρύπων είναι η αποδόμησή τους κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης με διοχέτευσή τους, κατά ομορροή, στην θερμότερη ζώνη του αντιδραστήρα. Σε θερμοκρασίες 1.000 ως 1.300 °C αποδομούνται και οι ενώσεις υψηλού μοριακού βάρους. Δυστυχώς η διοχέτευση αέρα για την ευκολότερη αποδόμηση των οργανικών επιφέρει μείωση της θερμοκρασίας του φλογοθαλάμου.

Η έξοδος των βαρέων μετάλλων με το ρεύμα του αερίου (με εναπόθεση σε μικρά σωματίδια τέφρας) εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία. Σε θερμοκρασίες περίπου 500 °C μόνο περιορισμένη ποσότητα βαρέων μετάλλων διαφεύγει στο αέριο ρεύμα.

Το υγρό πυρόλυσης προέρχεται από την υγρασία των αποβλήτων και από τις διάφορες αντιδράσεις αποδόμησης και καύσης. Ένα ποσοστό της ποσότητας του H₂O καταναλώνεται συμμετέχοντας στις αντιδράσεις. Το υγρό πυρόλυσης εξέρχεται από το φλογοθάλαμο ως ατμός και υγροποιείται κατά τη ψύξη. Συνήθως στο υγρό πυρόλυσης περιλαμβάνονται και τα υγρά πλύσης του αερίου και το υγρό ψύξης. Η συνολική ποσότητα του υγρού πυρόλυσης κυμαίνεται στα 2 m³/Mg επεξεργασμένων αποβλήτων. Το επιβαρημένο με οργανικά (κυρίως έλαια, φαινόλες και πίσσα) υγρό πυρόλυσης, προερχόμενο, π.χ. από την καύση αστικών αποβλήτων, καθιστά αναγκαία την φυσικοχημική προεπεξεργασία του πριν το στάδιο του βιολογικού καθαρισμού. Το υγρό πλύσης του αερίου για τη συγκράτηση στερεών σωματιδίων μπορεί μέχρι έναν βαθμό να εκχυλίσει υδατοδιαλυτές ενώσεις (ενώσεις ασβεστίου, χλωριδίων και οργανικές).

Στα υγρά επέρχεται σε σύντομο χρονικό διάστημα κορεσμός από το στερεό υπόλειμμα, το πυρολυτικό κωκ. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, ο χρόνος για να επέλθει ο κορεσμός αυτός είναι μικρότερος, όπως μικρότερη είναι και η διαλυμένη ποσότητα του κωκ συγκριτικά με αυτή σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ο χρόνος κορεσμού σε χαμηλές θερμοκρασίες (450 °C) είναι 45 ημέρες (αντιστοιχεί σε χρόνο λειτουργίας 1,5 χρόνου), ενώ για τις υψηλές (1.000 °C) είναι 73 ημέρες (αντιστοιχεί σε 2,5 χρόνια). Η

ποσότητα εισόδου των βαρέων μετάλλων στα εκχυλίσματα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και ιδιαίτερα εκείνων με χαμηλό σημείο τήξης. Για αυτό το λόγο η πυρόλυση διεξάγεται σε χαμηλές θερμοκρασίες (400 – 500°C) και η μεγαλύτερη ποσότητα από τα βαρέα μέταλλα (πλην του πτητικού υδραργύρου) απαντάται στο πυρολυτικό στερεό υπόλειμμα.

Κατά τη διεργασία της πυρόλυσης σχηματίζονται διάφοροι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH). Ο αριθμός αυτών κυμαίνεται στις λίγες εκατοντάδες. Η αρχική συγκέντρωση των PAHs στα απόβλητα είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή που απαντάται στο στερεό πυρολυτικό υπόλειμμα. Επομένως, με την πυρόλυση επιτυγχάνεται μείωση της συνολικής ποσότητας των PAHs στη στερεά φάση. Πολυχλωριωμένες – π – διβενζο – διοξίνες και –φουράνια (PCDD και PCDF) σχηματίζονται σε πολύ μικρό βαθμό συγκριτικά με την ποσότητα που σχηματίζεται κατά την καύση. Αυτό δικαιολογείται, δεδομένου ότι αναγκαία προϋπόθεση για το σχηματισμό τους είναι η παρουσία O₂.

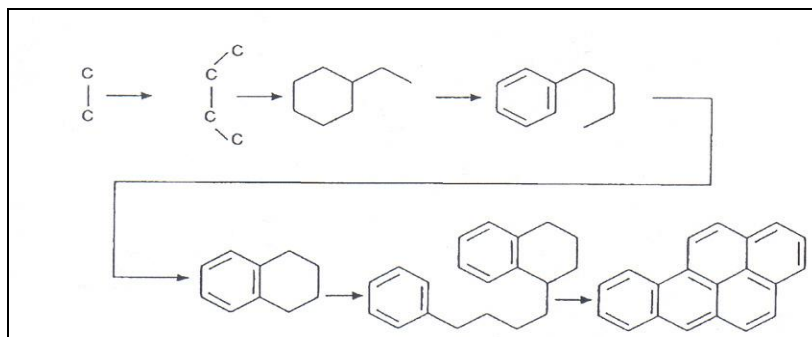
Γενικά, κατά τη διαδικασία της καύσης δημιουργούνται διάφοροι επικίνδυνοι ρύποι, οι οποίοι απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα αν δεν υπάρχει το κατάλληλο σύστημα πρόληψης και δεν γίνει επεξεργασία αυτών.

5.6.1 Μονοξείδιο του άνθρακα και προϊόντα ατελούς καύσης

Οι κυριότεροι αέριοι ρύποι αποτελούνται από τα προϊόντα ατελούς καύσης (PICs) και τα αέρια οξέα. Τα προϊόντα ατελούς καύσης περιλαμβάνουν εκτός από το CO, HCl, PAHs, κλπ.

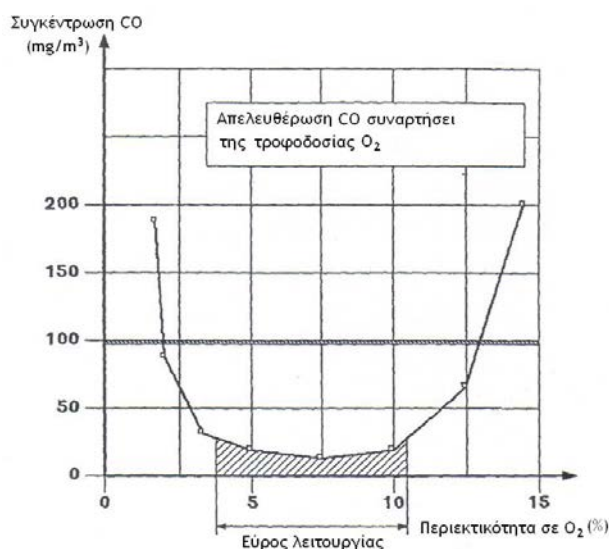
Η ξήρανση και η καύση των αποβλήτων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για τον σχηματισμό σταθερών οργανικών ενώσεων. Τα απόβλητα αναφλέγονται τοπικά, ενώ γειτονικά σημεία δεν έχουν φτάσει ακόμα την θερμοκρασία ανάφλεξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία περιοχής μετάδοσης θερμότητας, στην οποία επικρατεί ένα σχετικά χαμηλό επίπεδο θερμοκρασίας. Το γεγονός συνοδεύεται με την δημιουργία αυξημένης συγκέντρωσης CO και επιβλαβών οργανικών ενώσεων. Δεδομένου ότι οι επιβλαβείς οργανικές ενώσεις και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) εμφανίζονται συγχρόνως, εξαιτίας του ίδιου μηχανισμού σχηματισμού τους, το CO μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης προειδοποίησης ατελούς καύσης. Ένα τοξικό προϊόν, που σχετίζεται με την ατελή καύση, είναι οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), οι οποίοι προκύπτουν από τον σχηματισμό κυκλικών και

αρωματοποίηση μικρών αλειφατικών οργανικών ενώσεων. Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζεται σχηματικά ο μηχανισμός δημιουργίας των PAHs.



Σχήμα 5.8: Σχηματική αναπαράσταση των PAHs κατά την καύση.

Σημαντική παράμετρος σχηματισμού του CO κατά την καύση είναι η διαθέσιμη ποσότητα αέρα. Σε περίπτωση έλλειψης ή περίσσειας αέρα προκύπτει αυξημένη παραγωγή CO. Όταν η τροφοδοσία σε αέρα είναι χαμηλή σχηματίζεται CO εξαιτίας της έλλειψης αέρα, δεδομένου ότι δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για την πλήρη οξείδωσή του. Στο Διάγραμμα 5.6 απεικονίζεται η εξάρτηση της απελευθέρωσης CO σε συνάρτηση της περιεκτικότητας του αερίου τροφοδοσίας σε οξυγόνο.



Διάγραμμα 5.6: Απελευθέρωση CO συναρτήσει της παραχής οξυγόνου κατά την τροφοδοσία [Christmann, 1995].

Όταν η τροφοδοσία σε αέρα είναι υψηλή, σχηματίζεται CO εξαιτίας της λεγόμενης “κρύας καύσης”, δεδομένου ότι δεν επιτυγχάνεται η απαιτούμενη

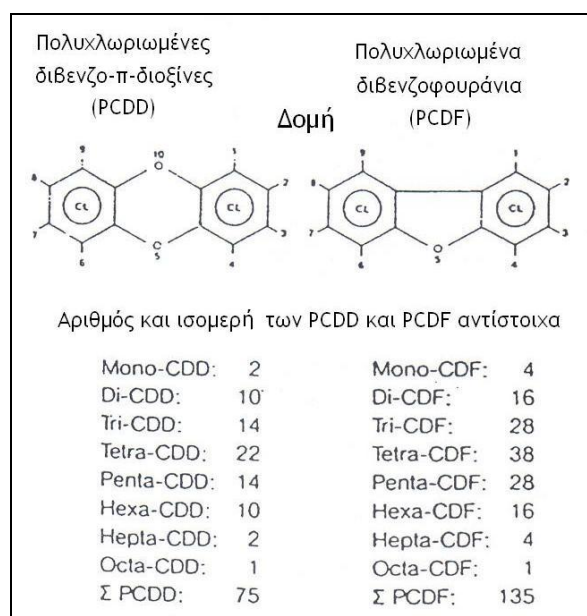
θερμοκρασία αντίδρασης ή διακόπτεται η αντίδραση οξείδωσης εξαιτίας της ψύξης. Υπάρχει λοιπόν ένα συγκεκριμένο εύρος τροφοδοσίας αέρος το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 4,0 και 10,5%.

Το SO₂ δημιουργείται στη διεργασία της καύσης μέσω οξείδωσης του υπολειμματικού θείου, που βρίσκεται στα απόβλητα ή την ιλύ. Το SO₂ στη συνέχεια αντιδρά με την υγρασία και σχηματίζει H₂SO₄.

Το υδροχλωρικό οξύ (HCl) δημιουργείται κατά την καύση, λόγω της περιεκτικότητας του χλωρίου στα απόβλητα ή στην ιλύ. Πρόσθετα όξινα αέρια δημιουργούνται σε μικρότερες ποσότητες, συμπεριλαμβανομένων του υδροφθορικού και του υδροβρωμικού οξέος. Στην ανθρώπινη υγεία είναι σε θέση να προκαλέσουν ερεθισμό του αναπνευστικού συστήματος (π.χ. άσθμα).

5.6.2 Διοξίνες και φουράνια

Αυτή η ομάδα ενώσεων περιλαμβάνει συνολικά 75 πολυχλωριωμένες διβενζο-π-διοξίνες (PCDD) και 135 πολυχλωριωμένα διβενζοφουράνια (PCDF) (Σχήμα 5.9). Παράλληλα με τα χλωρο-υποκατεστημένα παράγωγα απαντώνται και τα βρωμοπαράγωγα, που μπορεί να σχηματιστούν ως ιχνοστοιχεία κατά τις θερμικές διαδικασίες. Οι πολυαλογονομένες διοξίνες και τα φουράνια αποτελούν επιβλαβείς ενώσεις και χαρακτηρίζονται από υψηλή τοξικότητα.



Σχήμα 5.9: Σχηματική αναπαράσταση PCDD και PCDF (αριθμός και ισομερή αυτών).

Ως το πιο δηλητηριώδες συστατικό ορίζεται η 2,3,7,8-τετραχλωροδιβενζο-π-διοξίνη (TCDD), η οποία είναι γνωστή και ως δηλητήριο Seveso. Όταν αναφερόμαστε στην έκθεση από διοξίνες, τότε συνήθως, μιλάμε για έκθεση σε ένα μίγμα από PCDD και PCDF, η τοξικότητα του οποίου μετράται με τους συντελεστές τοξικής ισοδυναμίας (Toxic Equivalent Factors, I-TEF), οι οποίοι μετρούνται σε σχέση με την τοξική επίδραση της 2,3,7,8 TCDD. Στον Πίνακα 5.3 αναφέρονται τα ισομερή διοξινών, φουρανίων και οι διεθνείς συντελεστές τοξικής ισοδυναμίας (I-TEFs).

Πίνακας 5.3: Διεθνείς συντελεστές τοξικής ισοδυναμίας (I-TEFs) διαφόρων ισομερών [Γιδαράκος, 2006].

Ισομερές	I-TEFs	Ισομερές	I-TEFs
2,3,7,8-TCDD	1	2,3,7,8-TCDF	0,1
1,2,3,7,8-PeCDD	0,5	2,3,4,7,8-PeCDF	0,5
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0,1	1,2,3,7,8-PeCDF	0,05
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0,1	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0,1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0,1	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0,1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0,01	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0,1
OCDD	0,001	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0,1
		1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0,01
		1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0,01
		OCDF	0,001

Από τον άνθρωπο μπορούν να προσληφθούν μέσω της αναπνοής ή της απορρόφησης από το δέρμα (αλλά μόνο σε περιπτώσεις που εκλύονται σε πολύ μικρή απόσταση από τους αποδέκτες). Η παρουσία διοξινών και/ή φουρανίων σε συγκεντρώσεις υποβάθρου στον ανθρώπινο οργανισμό οφείλεται σχεδόν εξολοκλήρου στην εισαγωγή τους μέσω των τροφών. Τόσο οι πτητικές, όσο και οι δεσμευμένες σε σωματίδια διοξίνες και φουράνες αποτίθενται σε φυτά, καθώς και στα φρούτα και τα λαχανικά που προορίζονται για κατανάλωση από τον άνθρωπο.

Όταν εναποτίθενται στο έδαφος, δεσμεύονται από τα σωματίδια του εδάφους και δεν εισέρχονται άμεσα στην τροφική αλυσίδα. Στο ανθρώπινο σώμα οι διοξίνες και οι

φουράνες είναι λιποδιαλυτές και παραμένουν για μεγάλες χρονικές περιόδους, ειδικά στο συκώτι και στους λιπαρούς ιστούς.

Οι διοξίνες είναι ενώσεις που δεν εμφανίζονται στην φύση, αλλά παράγονται σχεδόν αποκλειστικά από ανθρώπινες δραστηριότητες. Δημιουργούνται ως υπολειμματικά παραπροϊόντα στις βιομηχανικές διαδικασίες, κυρίως στη βιομηχανία χλωρίου και κατά τη διάρκεια της καύσης, όπως για παράδειγμα κατά τον εξευγενισμό μετάλλων και την αποτέφρωση των αποβλήτων. Η καύση των αποβλήτων αποτελούσε μέχρι τη δεκαετία του 80' την κύρια πηγή εκπομπής των διοξινών. Μετά από την εφαρμογή και επιβολή πολλαπλών μέτρων περιορισμού και ελέγχου εκπομπών στην ατμόσφαιρα, με τη βελτιστοποίηση των συνθηκών καύσης και τον καθαρισμό των αέριων εκπομπών, το πρόβλημα μειώθηκε. Οι διοξίνες μπορούν επίσης να ανιχνευτούν στις εκπομπές αυτοκινήτων και σταθμών παραγωγής ενέργειας. Δημιουργούνται κατά την παραγωγή φυτοφαρμάκων και συντηρητικών ξύλου. Σε χώρες με σημαντική βιομηχανική ανάπτυξη, τα επίπεδα των διοξινών και των φουρανίων σε αστικές περιοχές είναι περίπου 4 φορές υψηλότερα από αυτά της υπαίθρου.

Στη Γερμανία η 17.BimSchV (Πρόληψη από ατμοσφαιρική ρύπανση) ορίζει ως ανώτερο επιτρεπτό όριο διοξινών στα απαέρια αποτέφρωσης των αστικών αποβλήτων τα $0,1 \text{ ng/m}^3$. Από την έναρξη της εφαρμογής της βιομηχανίας χλωρίου σε ευρεία κλίμακα, ίχνη διοξινών συναντώνται σε όλα τα περιβαλλοντικά μέσα (νερό, αέρας, έδαφος) και μικροποσότητες διοξινών μπορεί να συναντήσει κανείς ακόμα και στους πόλους.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι σχηματισμού PCDDs και PCDFs. Μπορούν να σχηματιστούν από συγγενικές χλωριωμένες πρόδρομες ενώσεις των διοξινών, όπως τα PCBs, τις χλωριωμένες φαινόλες και τα χλωριωμένα βενζένια, κατά τη διαδικασία της καύσης σε ένα εύρος θερμοκρασιών $300 - 600^\circ\text{C}$. Ένας άλλος τρόπος σχηματισμού των PCDDs και PCDFs είναι *via de novo synthesis* (εκ νέας σύνθεσης), που γίνεται παρουσία άνθρακα, οξυγόνου και χλωρίου. Αυτό σημαίνει ότι σχηματίζονται από την πυρόλυση των χημικά μη συγγενικών ενώσεων, όπως είναι το PVC, και/ή την καύση των μη χλωριωμένων οργανικών υλικών, όπως είναι το πολυστυρένιο, η κελουλόζη, η λιγνίνη και ο άνθρακας, στην θέση του δότη χλωρίου.

Οι διοξίνες παρουσιάζουν μεγάλη θερμική σταθερότητα μέχρι ένα εύρος θερμοκρασιών από $700 - 800^\circ\text{C}$, ενώ σε υψηλότερες θερμοκρασίες μετατρέπονται σε

θερμικά μη σταθερές. Για αυτόν τον λόγο η 17.BimSchV ορίζει ως ελάχιστη θερμοκρασία καύσης των αποβλήτων μια τιμή των 850°C (για κλιβάνους αποτέφρωσης τοξικών και επικίνδυνων αποβλήτων >1.200°C) και διάρκεια παραμονής των αποβλήτων εντός του κλιβάνου τουλάχιστον 2 sec. Με αυτόν τον τρόπο καταστρέφονται θερμικά στον κλίβανο οι διοξίνες που υπάρχουν ήδη στα εισερχόμενα για την αποτέφρωση απόβλητα.

Περισσότερο προβληματική παρουσιάζεται η αποφυγή δημιουργίας διοξινών στο αέριο υπόλειμμα της καύσης (απαέρια). Δυστυχώς στην περιοχή του ηλεκτρικού φίλτρου υπάρχουν συνθήκες που ευνοούν την δημιουργία διοξινών *via de novo synthesis*. Οι συνθήκες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Εύρος θερμοκρασίας 250-400°C.
- Παρουσία ενώσεων άνθρακα στα απαέρια.
- Επαρκής ποσότητα οξυγόνου.
- Παρουσία χαλκού στα απαέρια, που λειτουργεί ως καταλύτης.

Ως μέτρο αποφυγής σχηματισμού διοξινών ορίζεται μια θερμοκρασία διέλευσης διαμέσου του φίλτρου κατώτερη της θερμοκρασίας σχηματισμού των διοξινών (200°C) ή πραγματοποιείται απότομη ψύξη αυτών.

5.6.3 Οξείδια αζώτου NO_x

Οξείδια αζώτου μπορούν να βρεθούν σε διάφορες μορφές στα αέρια προϊόντα των θερμικών διεργασιών, όταν το N αντιδράσει με ένα ή και περισσότερα άτομα οξυγόνου (NO, NO₂, NO₃, κτλ). Οι εκπομπές NO_x είναι αποτέλεσμα δυο κυρίως αντιδράσεων καύσης:

1. Αντίδραση του N των αποβλήτων με περίσσεια O₂ και δημιουργία NO_x σε υψηλές θερμοκρασίες.
2. Αντίδραση του ατμοσφαιρικού N με περίσσεια O₂ και δημιουργία NO_x σε υψηλές θερμοκρασίες (>1.100°C).

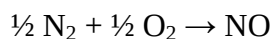
Η πιο επιβλαβής συνέπεια των NO_x είναι η δημιουργία αερίων οξέων στην ατμόσφαιρα, όταν τα αέρια αντιδρούν με την υγρασία. Επίσης, αποτελούν παράγοντα που συντελεί στη δημιουργία του νέφους.

Το οξείδιο του αζώτου δημιουργείται με τους ακόλουθους μηχανισμούς κατά τη διεργασία της καύσης:

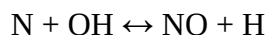
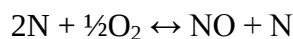
(α) Θερμικός σχηματισμός NO

Το NO σχηματίζεται με οξείδωση του ατμοσφαιρικού αζώτου, που περιέχεται στον αέρα καύσης, με καταλύτη τη θερμοκρασία. Ο σχηματισμός του NO εξαρτάται από την θερμοκρασία, τον χρόνο παραμονής των αερίων στα φίλτρα και την ατμοσφαιρική πίεση. Ο σχηματισμός του NO αρχίζει σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1.300°C. Χαμηλές συγκεντρώσεις οξειδίου του αζώτου επιτυγχάνονται με μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας της φλόγας και μείωση του χρόνου παραμονής σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η βασική χημική αντίδραση σχηματισμού είναι:



Ο θερμικός σχηματισμός NO περιγράφεται με τον μηχανισμό Zeldovic, ο οποίος αποτελείται από τις ακόλουθες αντιδράσεις:



(β) Ακαριαίος σχηματισμός NO

Ο ακαριαίος σχηματισμός του NO, σύμφωνα με τον Fenimore είναι ένας δεύτερος τρόπος σχηματισμού οξειδίων του αζώτου από ατμοσφαιρικό άζωτο. Επιτυγχάνεται μέσω των ενδιάμεσων προϊόντων NH_3 και HCN . Ο σχηματισμός αυτός θεωρείται αμελητέος στην περίπτωση τεχνικής πύρωσης, εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας.

(γ) Σχηματισμός NO από άζωτο που περιέχεται στην καύσιμη ύλη

Ο σχηματισμός του οξειδίου του αζώτου από αντίδραση του αζώτου των αποβλήτων με οξυγόνο είναι πολύπλοκος και δεν έχει μελετηθεί αρκετά η κινητική τάξη της εν λόγω αντίδρασης. Σύμφωνα με τα τωρινά δεδομένα ο σχηματισμός γίνεται μέσω μιας σειράς ριζών όπως NH_2 , NH , CN και N , οι οποίες σχηματίζονται στον κλίβανο για χρονική διάρκεια περίπου 1 ms. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι

κατά την καύση δεν μετατρέπεται όλο το άζωτο της καύσιμης ύλης σε οξείδιο του αζώτου, αλλά μόνο ένα μέρος με αλυσιδωτές αντιδράσεις μπορεί να μετατραπεί σε μοριακό άζωτο και να αντιδράσει. Κατά την καύση των αποβλήτων το σχηματιζόμενο NO προέρχεται κυρίως από το άζωτο που περιέχεται στην καύσιμη ύλη. Μόνο ένα μικρό μέρος σχηματίζεται θερμικά μέσα στον κλίβανο.

5.6.4 Βαρέα μέταλλα

Οι εκπομπές βαρέων μετάλλων αποτελούν ένα μέρος των συνολικών σωματιδιακών εκπομπών από τους αποτεφρωτές. Βαρέα μέταλλα περιέχονται σε πλήθος προϊόντων (Πίνακας 5.4), που υπάρχουν στα απόβλητα. Αυτά μπορούν μέσα στον κλίβανο μιας μονάδας καύσης σε συνάρτηση της θερμοκρασίας καύσης, του χρόνου παραμονής, της χημικής τους δομής (στοιχείο, οξείδιο, άλας κλπ) και του είδους δέσμευσης εντός της μάζας του προϊόντος (π.χ. ως χρωστική ουσία σε χαρτί ή κράμα μετάλλου) να κινητοποιηθούν και συνεπώς να μεταφερθούν στα αέρια της καύσης.

Ανάλογα με το είδος του μετάλλου και την πίεση των ατμών του, τα μέταλλα μπορούν να διαφύγουν από τον αποτεφρωτή είτε σε αέρια, είτε σε στερεή μορφή. Ο υδράργυρος και σε μικρότερο βαθμό το κάδμιο, απελευθερώνονται κυρίως στην αέρια φάση. Η διαδικασία της καύσης καθιστά ορισμένα μέταλλα βιολογικά περισσότερο ενεργά, π.χ. μετατρέπει ένα μέρος του καδμίου σε μορφή διαλυτών χλωριούχων και θειικών αλάτων και το μεγαλύτερο μέρος του χρωμίου στην εξασθενή καρκινογόνο μορφή του (Cr^{VI}).

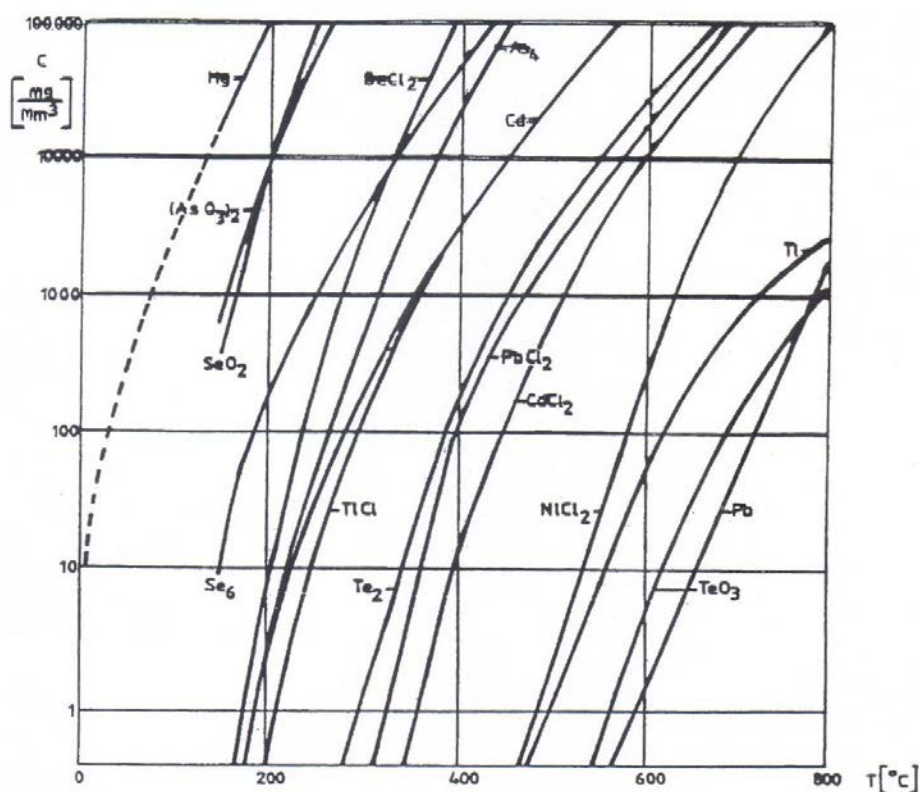
Μια σειρά συγγενών μετάλλων - Fe, Cu, Cr, Ni, Zn, Pb, Cd, Zn – όταν βρίσκονται με μορφή χλωριδίων, παρουσιάζουν θερμοκρασία αεριοποίησης μέχρι και 1.300°C και αποκτούν την τάση, σε κανονικές θερμοκρασίες καύσης, να μεταφέρονται στην αέρια φάση. Η εξάρτηση της συγκέντρωσης μερικών ενώσεων μετάλλων συναρτήσει της θερμοκρασίας παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.7. Κατά την ψύξη των απαερίων στον κλίβανο συμπυκνώνονται τα βαρέα μέταλλα στην επιφάνεια άλλων μορίων και απομακρύνονται ως ιπτάμενη τέφρα. Ο Zn και το Cd ατμοποιούνται σε στοιχειακή μορφή και μεταφέρονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους στην αέρια φάση. Σε αντίθεση με τα οξείδια των μετάλλων που κατά κύριο λόγο είναι δυσδιάλυτα.

Πίνακας 5.4: Κύριες περιοχές χρήσης μετάλλων [Mast et al., 1996].

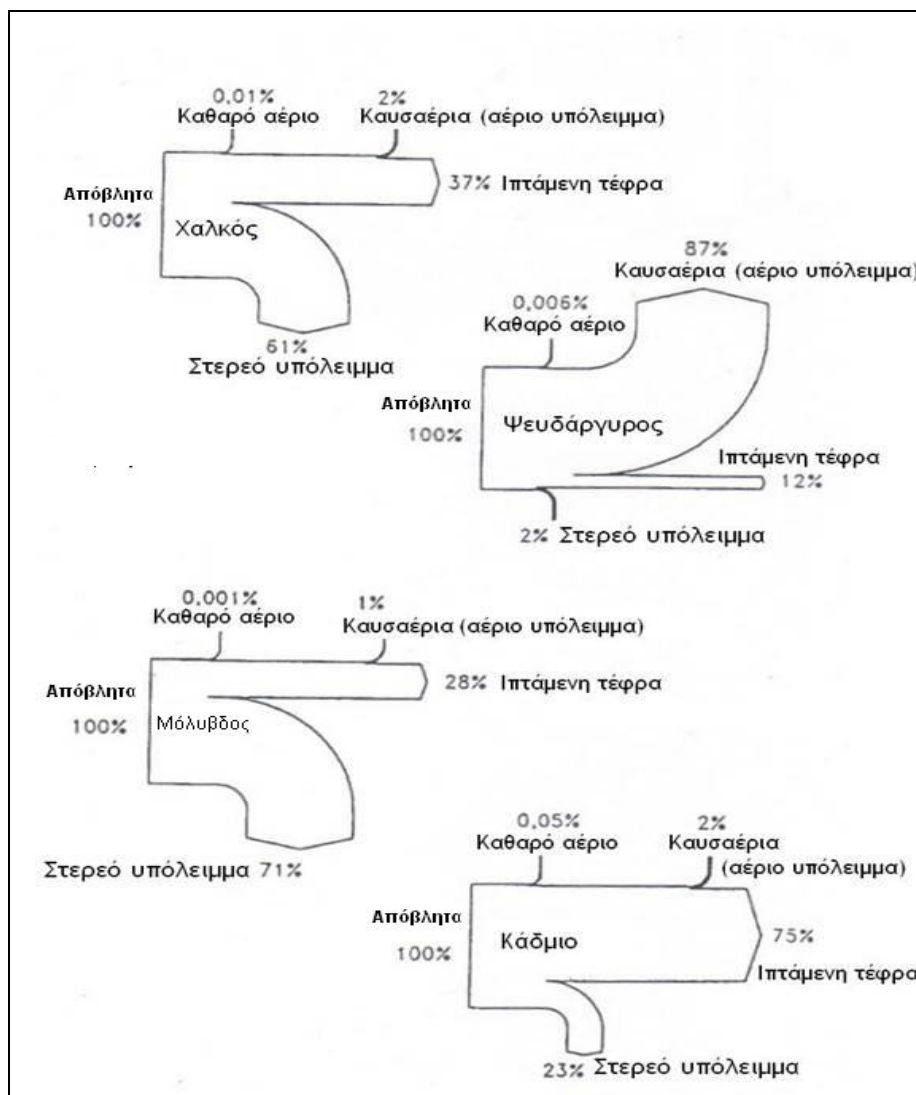
ΜΕΤΑΛΛΟ	ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	ΠΡΟΪΟΝΤΑ
As	Κράματα μετάλλων (π.χ. Pb και Cu)	Χρωματιστό γυαλί / Προστατευτικό ξύλου Ζιζανιοκτόνα / Χρωστικές ουσίες Βιομηχανία κεραμικών Linoleum (μουνσαμάς δαπέδων) Προστατευτικό φωτιάς πλαστικών
Cd	Κράματα μετάλλων	Χρώματα / Γαλβανοβιομηχανία Σταθεροποιητής PVC/ Καταλύτες Μπαταρίες / Γυαλί και πορσελάνη Συσσωρευτές
Cr	Κράματα μετάλλων πολλών διαφορετικών ειδών ατσαλιού Αντισκωρικά / Επικαλύψεις στέγης	Χρωστικές ουσίες / Δέρμα Υφάσματα / Προστατευτικό ξύλου Βιομηχανία χαρτιού
Cu	Ηλεκτρικές συσκευές Κράματα (π.χ. ορείχαλκος, μπρούντζος)	Προστατευτικό ξύλου / Χρώματα Ζιζανιοκτόνα / Χρωστική Λιπάσματα/ Καταλύτες Υφάσματα/ Ζωοτροφές
Hg	Μπαταρίες / Θερμόμετρο Ηλεκτρικές συσκευές Λάμπες με χαμηλή κατανάλωση Κράματα	Ηλεκτρόδια / Χρώματα Φάρμακα / Ζιζανιοκτόνα Συντηρητικά / Χρωστικές σε πλαστικά Μπαταρίες
Mo	Εξαρτήματα που πρέπει να είναι ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. σε κλιβάνους) Κράματα μετάλλων (σκληρό ατσάλι)	Αλοιφές / Καταλύτες Προστατευτικό φωτιάς ειδικών πλαστικών Χρώματα / Χρωστικές ουσίες Λιπάσματα
Ni	Κράματα μετάλλων (π.χ. AlumeI, Αντισκωρικό Cr, Ni, ατσάλι, Monel)	Χρωστική / Γαλβανοβιομηχανία Σταθεροποιητής χρωμάτων Ελαστικά
Pb	Κράματα μετάλλων / Συσσωρευτές / Στέγες / Επένδυση καλωδίων Προστατευτικό ακτίνων X Πώμα μπουκαλιών / Καλούπια Πυρομαχικά	Χρωστική / Αντικροτικό βενζίνης Επικαλύψεις κεραμικών / Συσσωρευτές Αλοιφές Ελαστικά / Ζιζανιοκτόνα Σκληρυντικό λούστρου Σταθεροποιητής PVC
Sb	Κράματα μετάλλων Ηλεκτρονικά (π.χ. ημιαγωγοί, συμπτυκνωτές, πλάκες εκτύπωσης)	Προστατευτικό φωτιάς υφασμάτων και πλαστικών Χρωστική TL-Λάμπες
Zn	Κράματα μετάλλων (Ορείχαλκος) Σωλήνες στεγών / Στέγες Περίβλημα μπαταριών Επικάλυψη σιδήρου με ψευδάργυρο	Χρώματα / Προστατευτικό ξύλου Ελαστικά / Ζωοτροφές / Φάρμακα Γυαλί / Καλλυντικά / Επικαλύψεις Σταθεροποιητές χρωμάτων Μπαταρίες / Πηλός / Συγκόλληση

Στο Διάγραμμα 5.7 απεικονίζεται γραφικά η μεταβολή της συγκέντρωσης κορεσμού διαφόρων βαρέων μετάλλων συναρτήσει της θερμοκρασίας, ενώ στο Σχήμα 5.10 αναφέρονται τα ποσοστά βαρέων μετάλλων στα διαφορετικά κλάσματα των υπολειμμάτων μονάδας καύσης.

Η κύρια οδός για την έκθεση του ανθρώπινου οργανισμού στα βαρέα μέταλλα, που απελευθερώνονται μέσω της αποτέφρωσης, είναι η τροφική αλυσίδα. Ο υδράργυρος για παράδειγμα εναποτίθεται στην επιφάνεια του νερού και του εδάφους. Η εκπομπή καδμίου στον αέρα γίνεται σε σωματιδιακή μορφή. Μετά την εναπόθεσή του στο έδαφος μπορεί να διοχετευθεί στα λαχανικά και στους καρπούς. Οι αναφερθείσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία έχουν παρατηρηθεί σε περιπτώσεις που σχετίζονται είτε με υψηλή, είτε με χρόνια έκθεση σε σωματιδιακή μορφή. Λιγότερο γνωστό είναι εάν μικρότερες δόσεις μπορούν να έχουν κάποια συγκεκριμένα επιβλαβή αποτελέσματα. Αναλύσεις επικινδυνότητας έχουν δείξει ότι γενικώς ο κίνδυνος από μέταλλα των αποτεφρωτών είναι υψηλότερος από τον κίνδυνο λόγω των οργανικών ενώσεων.



Διάγραμμα 5.7: Συγκέντρωση κορεσμού βαρέων μετάλλων συναρτήσει της θερμοκρασίας [Kost, 1999].



Σχήμα 5.10: Ποσοστά βαρέων μετάλλων στα διαφορετικά κλάσματα υπολειμμάτων καύσης [Kost, 1999].

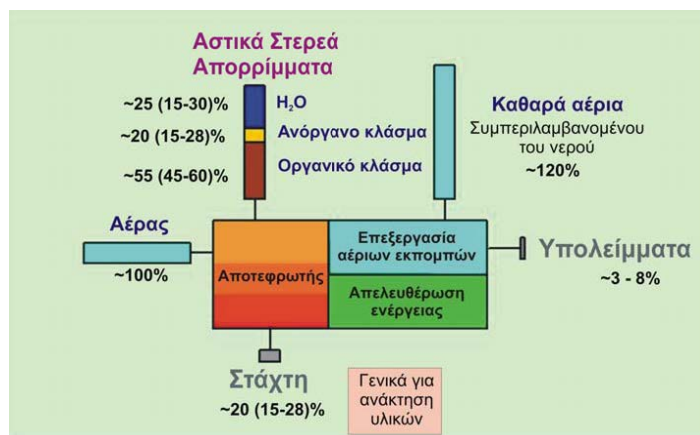
Η σωματιδιακή ρύπανση οφείλεται στα στερεά, τα οποία αποβάλλονται από τους αποτεφρωτές. Ένα ποσοστό της τέφρας ή και ολόκληρη η τέφρα, στην περίπτωση των καυστήρων ρευστοποιημένης κλίνης, διαφεύγει από τον κλίβανο ως ιπτάμενη τέφρα. Η ρευστοποιημένη σωματιδιακή ύλη μπορεί να προκαλέσει αφενός προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα και αφετέρου μειωμένη ορατότητα.

5.7 Ισοζύγια

5.7.1 Μάζας

Αποτέφρωση

Στο Σχήμα 5.11 απεικονίζεται το ισοζύγιο των υλικών κατά την διεργασία της αποτέφρωσης.



Σχήμα 5.11 : Κατανομή μάζας κατά την αποτέφρωση [Reimann, 2006].

Αρχικά, θεωρείται ότι η σύνθεση των αποβλήτων αποτελείται περίπου από 25% νερό, 20% ανόργανο κλάσμα και 55% οργανικό κλάσμα. Μετά την αποτέφρωση η υπολειμματική τέφρα ανέρχεται στο 15-28 % της αρχικής μάζας με μια μέση τιμή περίπου στο 20%. Τα υπολείμματα, τα οποία κατακρατούνται από τα συστήματα ελέγχου των αερίων εκπομπών, κυμαίνονται μεταξύ 3 – 8 %. Η τέφρα πρέπει να μεταφερθεί και να διατεθεί με ασφάλεια σε ειδικούς χώρους υγειονομικής ταφής ενώ εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό υλικό [Reimann, 2006].

Πυρόλυση

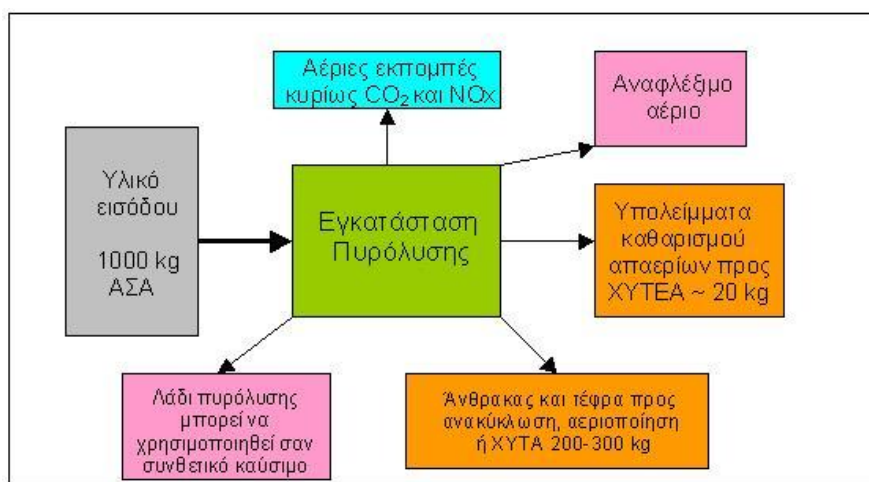
Η πυρολυτική μετατροπή των απορριμμάτων έχει ως αποτέλεσμα μια ποικιλία προϊόντων, η σύνθεση των οποίων καθορίζεται από:

- Τη σύνθεση του αρχικού μίγματος.
- Τις παραμέτρους θερμότητας.
- Την πυρολυτική θερμοκρασία.
- Τον χρόνο αντίδρασης και παραμονής.

Τα τρία βασικά κλάσματα, που παράγονται από τη διαδικασία της πυρόλυσης, είναι:

1. Ένα ρεύμα αερίων, που περιέχει βασικά υδρογόνο, μεθάνιο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, και διάφορα άλλα αέρια ανάλογα με τα οργανικά χαρακτηριστικά των ΑΣΑ.
2. Ένα υγρό κλάσμα, που αποτελείται από ένα ρεύμα πίσσας ή λαδιού που περιέχει ακετικό οξύ, ακετόνη, μεθανόλη και σύμπλεγμα οξυγονωμένων υδατανθράκων. Με περαιτέρω επεξεργασία, το υγρό αυτό κλάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνθετικό καύσιμο.
3. Ένα υπόλειμμα, το οποίο αποτελείται από σχεδόν καθαρό άνθρακα και όποιο άλλο αδρανές υλικό υπήρχε αρχικά στα στερεά απορρίμματα (Σχήμα 5.12).

Στον Πίνακα 5.5 φαίνονται τα ποσοστά των διαφόρων κλασμάτων ανάλογα με τη θερμοκρασία της διαδικασίας [Ανδρεαδάκης, 2001].



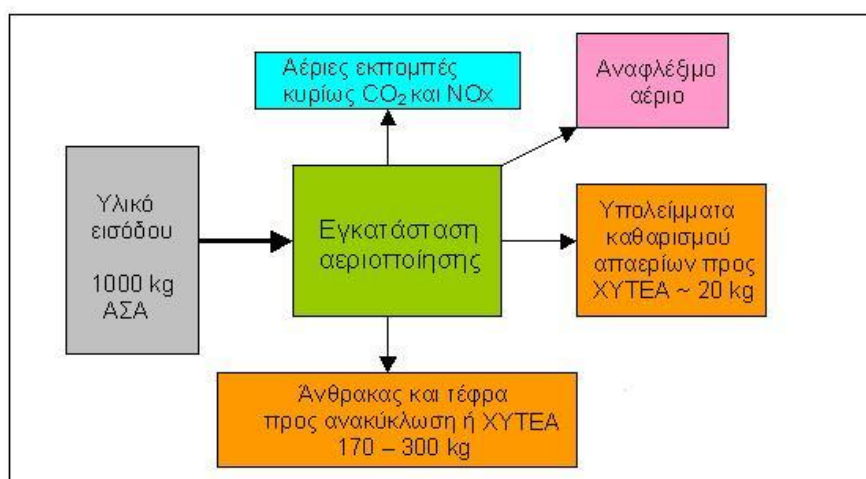
Σχήμα 5.12 : Κατανομή μάζας κατά την πυρόλυση.

Πίνακας 5.5 : Ποσοστά κλασμάτων πυρόλυσης

Θερμοκρασία [°C]	Απορρίμματα [kg]	Αέρια [kg]	Οξέα και Πίσσες [kg]	Υπόλειμμα [kg]	Τελική μάζα [kg]
480	1000	120,33	610,08	240,71	980,12
650	1000	180,64	590,18	210,80	990,62
800	1000	230,69	590,67	170,24	1000,59
900	1000	240,36	580,70	170,67	1000,73

Αεριοποίηση

Με βάση τα στοιχεία από τις εγκαταστάσεις αεριοποίησης το στερεό υπόλειμμα, που παραμένει στον κλίβανο σε μορφή άνθρακα και καθιζάνουσας τέφρας, κυμαίνεται από 17 - 30%, τα υπολείμματα από τα συστήματα καθαρισμού των αερίων ανέρχονται στο 2%, ενώ υφίσταται και απελευθέρωση αερίων εκπομπών, κυρίως CO₂ και NO_x (Σχήμα 5.13).



Σχήμα 5.13 : Κατανομή μάζας κατά την αεριοποίηση.

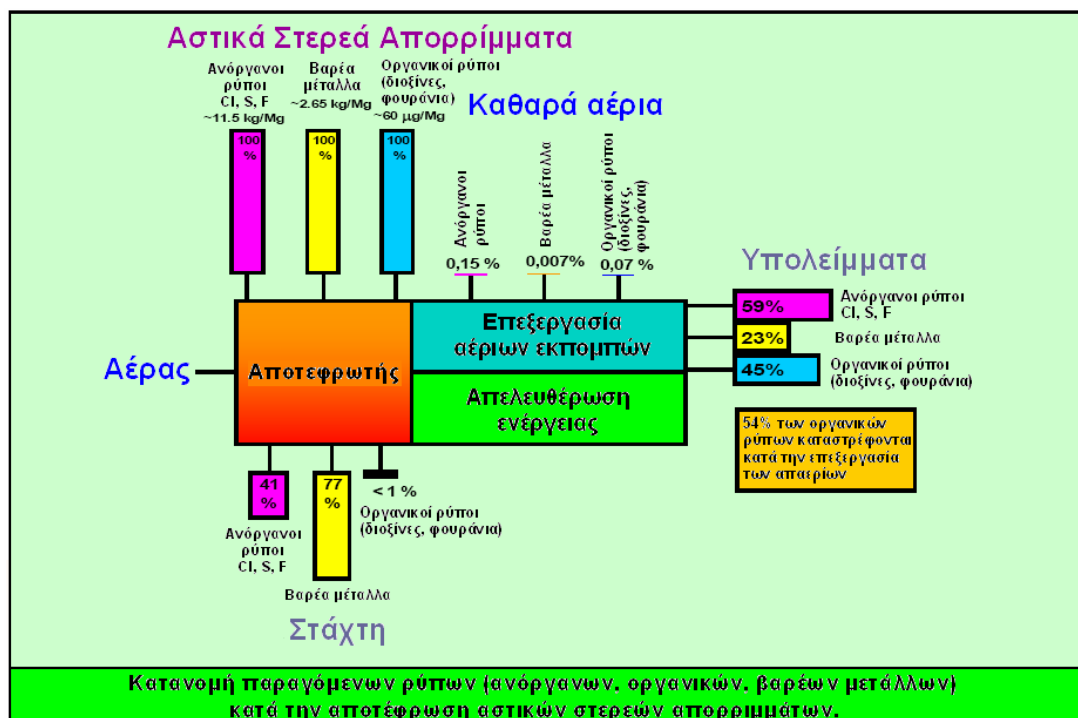
5.7.2 Ρύπων

Αποτέφρωση

Στο Σχήμα 5.14 διακρίνεται η μεταβολή των συγκεντρώσεων των διαφόρων ρύπων κατά τη διαδικασία της καύσης. Έτσι, αρχικά σε 1 Mg ΑΣΑ υπάρχουν, ανάλογα με τη σύνθεσή τους, περίπου 11,5 kg ανόργανων ρύπων, όπως Cl, S, F, κ.α, 65 μg οργανικών ρύπων, όπως διοξίνες και φουράνια, καθώς και 2,65 kg βαρέων μετάλλων.

Μετά την αποτέφρωση, στην υπολειμματική τέφρα απαντάται το 41% των ανόργανων ρύπων, δηλαδή περίπου 4,72 kg. Οι οργανικοί ρύποι στην τέφρα αντιπροσωπεύουν υπό κανονικές συνθήκες λιγότερο από το 1% της μάζας της, με PCDD's και PCDF's συχνά σε μη ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις.

Όσα βαρέα μέταλλα δε διαφεύγουν μαζί με τα αέρια, παραμένουν στην τέφρα και το ποσοστό τους φτάνει το 77%, δηλαδή περίπου 2,04 kg [Reimann, 2006].



Σχήμα 5.14 : Κατανομή ρύπων κατά την αποτέφρωση [Reimann, 2006].

Η συγκράτηση του υδραργύρου από την τέφρα είναι πολύ χαμηλή (0,5%) καθώς οδηγείται στα απαέρια. Για τα περισσότερα βαρέα μέταλλα (Zn, Cu, Pb, Cr, Ni, Cd) έχει βρεθεί ότι τα ποσοστά, τα οποία συγκρατούνται στην τέφρα, είναι σχετικά υψηλά, μεταξύ 60-100%, με την προϋπόθεση βέβαια, ότι λειτουργεί ένα αποτελεσματικό σύστημα επεξεργασίας των απαερίων. Δεδομένου ότι επιτυγχάνεται μία σημαντική μείωση των στερεών κατά την καύση, οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων στην τέφρα είναι συνήθως υψηλότερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα ΑΣΑ.

Παρά το γεγονός ότι η τέφρα περιέχει αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων, έχει διαπιστωθεί ότι η διάθεση σε χώρους ταφής είναι μία αποδεκτή μέθοδος, η οποία δεν δημιουργεί σημαντικά προβλήματα ρύπανσης, λόγω διηθημάτων ή εν πάση περιπτώσει προβλήματα ανάλογα με αυτά που δημιουργούνται από τη διάθεση στερεών αποβλήτων και ιλύων σε χωματερές. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η καύση μετατρέπει τα κινητικά βαρέα μέταλλα σε πιο σταθερές μορφές, αποτρέποντας έτσι, όπως έχει αποδειχθεί από πολυάριθμες δοκιμές, την εκτεταμένη διαφυγή τους με τα στραγγίσματα. Το αρσενικό, το κάδμιο, ο χαλκός, ο υδράργυρος, το νικέλιο, ο μόλυβδος και ο ψευδάργυρος βρέθηκαν να εκχυλίζονται σε ποσότητες που αντιστοιχούν σε λιγότερο από το 1% της ολικής περιεκτικότητας στην

τέφρα, ενώ αυξημένες τιμές παρατηρήθηκαν για το ασβέστιο και το μολυβδένιο. Δύο είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που οδηγούν στο ξέπλυμα των βαρέων μετάλλων:

- ο Ο πρώτος αφορά στην τέφρα από την καύση ιλύος και συνδέεται με την χρήση χημικών (Fe ή Al) κατά την επεξεργασία των λυμάτων. Έχει παρατηρηθεί ότι η προσθήκη αλάτων αυξάνει σημαντικά τη διαλυτότητα των Cd, Cr, Ni και Pb και πιθανά και άλλων μετάλλων.
- ο Ο δεύτερος παράγοντας συνδέεται με την υιοθετούμενη μέθοδο διάθεσης σε χώρους ταφής. Η συνδιάθεση της τέφρας με αστικά απορρίμματα μπορεί να ενισχύσει τη διήθηση των βαρέων μετάλλων, λόγω δημιουργίας οργανικών οξέων, προερχομένων από την αναερόβια αποσύνθεση των αστικών απορριμμάτων (αν και η παραγωγή υδροθείου και η συνεπαγόμενη δημιουργία αδιάλυτων θειούχων ενώσεων των μετάλλων εν μέρει εξισορροπεί τις επιπτώσεις από τα οργανικά οξέα).

Γι' αυτό το λόγο το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο προτείνει την αναθεώρηση της Οδηγίας για τη διάθεση σε χώρους ταφής, με στόχο την αποτροπή της συνδιάθεσης και για να περιορίσει την επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα της τέφρας, που διατίθεται στους χώρους ταφής. Λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, προτείνεται η συνδιάθεση να αποφευχθεί και η τέφρα από την εγκατάσταση καύσης να διατίθενται σε ειδικούς χώρους. Στο μέλλον είναι δυνατό να εξετασθούν και κάποιες εναλλακτικές δυνατότητες. Η ανάκτηση των μετάλλων από την τέφρα με χημική επεξεργασία προκύπτει ότι είναι αντισυμβατική, αλλά η σύντηξη της τέφρας, χρησιμοποιώντας θερμότητα και τσιμέντο, μπορεί να αποδειχθεί μία ελκυστική μακροπρόθεσμη λύση για τον έλεγχο των περιεχομένων βαρέων μετάλλων [Ανδρεαδάκης, 2001].

Στα απαέρια, μετά την επεξεργασία τους, τα ποσοστά των ανόργανων και των οργανικών ρύπων, καθώς και των μετάλλων, ανέρχονται σε 0,15, 0,07 και 0,007%, αντίστοιχα. Στα υπολείμματα από τον καθαρισμό των απαερίων απαντάται το 59% των ανόργανων ρύπων, το 45% των οργανικών ρύπων και το 23% των βαρέων μετάλλων. Όπως παρατηρείται, κατά την επεξεργασία των απαερίων, καταστρέφεται το 54% των οργανικών ρύπων που αρχικά υπήρχαν στα απορρίμματα [Reimann, 2006].

Πυρόλυση - Αεριοποίηση

Κατά την πυρόλυση και την αεριοποίηση το παραγόμενο αέριο περιέχει ελάχιστες επικίνδυνες ενώσεις, όπως $\text{SO}_2 = 20 \text{ mg/Nm}^3$, $\text{HCl} = 23 \text{ mg/Nm}^3$ και $\text{HF} = 1.3 \text{ mg/Nm}^3$. Επίσης, εκτός του αναφλέξιμου αερίου και σε εξάρτηση από την θερμοκρασία λειτουργίας, παράγονται και υπολείμματα τέφρας ή σκωρίας. Τα στερεά υπολείμματα από τη διαδικασία της αεριοποίησης είναι παρόμοια με αυτά της αποτέφρωσης και παρουσιάζουν ομοίως υψηλό ποσοστό σε τέφρα και χαμηλό ποσοστό σε άνθρακα [Bilitewski, 2006].

Είναι βασικό ότι στις διεργασίες αυτές ένας μεγάλος αριθμός ρύπων (π.χ. θείο, βαρέα μέταλλα, κα.) παραμένει στην παραγόμενη τέφρα, χωρίς να μεταφέρεται στην αέρια φάση και να επιβαρύνει την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι το παραγόμενο αέριο χρησιμοποιείται περαιτέρω ως καύσιμο, πολλές φορές περιορίζει τον αριθμό και το είδος των αναγκαίων τεχνολογιών αντιρρύπανσης.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι η παραγόμενη τέφρα, από όλες τις μεθόδους θερμικής διεργασίας, θεωρείται επικίνδυνο απόβλητο (λόγω της περιεκτικότητάς της σε βαρέα μέταλλα, διοξίνες και άλλους τοξικούς ρύπους), το οποίο χρήζει κατάλληλης επεξεργασίας πριν την τελική του διάθεση.

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι αέριες εκπομπές από την καύση και την αεριοποίηση απορριμμάτων (σε κιλά ρύπων ετησίως).

Πίνακας 5.6 : Αέριες εκπομπές από την καύση και την αεριοποίηση απορριμμάτων (σε κιλά ρύπων ετησίως).

Ρύπος	Καύση	Αεριοποίηση	% διαφορά αεριοποίησης σε σχέση με καύση
Διοξίνες / φουράνια	0,027	0,050	+85%
Υδράργυρος	92,6	92,6	0%
Μόλυβδος	50	46,8	-6,4%
Διοξείδιο του θείου	57.335	53.524	-6,7%
Οξείδια αζώτου	40.930	52.364	+28%
Μονοξείδιο του άνθρακα	7.673	4.955	-35,4%

5.7.3 Ενέργειας

Αποτέφρωση

Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζεται η ανάκτηση της ενέργειας είτε ως ατμός, είτε ως θερμότητα. Θεωρείται ότι η αρχική ενέργεια των απορριμμάτων είναι περίπου 3 MWh/Mg ή αλλιώς 10,8 GJ/Mg, ενώ απαιτείται και ένα πρόσθετο ποσό εξωτερικής ενέργειας της τάξης του 3%. Η συνολική ανακτώμενη ενέργεια ανέρχεται σε 82%, ενώ το υπόλοιπο 18 % συγκεντρώνεται στα απαέρια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω παραγωγή ενέργειας.



Σχήμα 5.15 :Κατανομή ενέργειας κατά την αποτέφρωση [Reimann, 2006].

Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η μέση κατανομή ενέργειας με συγκεκριμένα δεδομένα και ποσοστά της συνολικής εισερχόμενης ενέργειας, με χρήση της εξίσωσης υπολογισμού της θερμικής αξίας. Η συνολική είσοδος της ενέργειας είναι 2,852 MWh abs/Mg, η θερμική αξία των απορριμμάτων 2,774 MWh abs/ Mg και η συνολική εισαγόμενη ενέργεια 0,078 MWh abs / Mg. Η θερμότητα από την καύση των απορριμμάτων αποτελεί το 30,8% της συνολικής, η ηλεκτρική ενέργεια που εξάγεται ανέρχεται στο 10,6 %, ενώ η περίσσεια ενέργειας είναι της τάξης του 30% [Reimann, 2006].

Η κατανομή της ενέργειας και της μάζας γίνεται βάσει του ακόλουθου διαγράμματος ροής που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.17. Έτσι ισχύει ότι από μια μεγάλη εγκατάσταση (600.000t/yr) μπορεί να παραχθεί ενέργεια που φτάνει τα 807

Πυρόλυση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά την πυρόλυση η αναλογία των κλασμάτων εξαρτάται σημαντικά από τη σύσταση των εισερχομένων αποβλήτων, τη θερμοκρασία, στην οποία διεξάγεται η πυρόλυση και την πίεση στον αντιδραστήρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει αισθητά το στερεό υπόλειμμα, ελαττώνει το υγρό κλάσμα και αυξάνει τα αέρια προϊόντα. Το ενεργειακό περιεχόμενο του υγρού κλάσματος εκτιμάται γύρω στα 20,3 MJ/ kg, ενώ του αερίου – σε συνθήκες μέγιστης παραγωγής – στα 25,7 MJ / Nm³ [Φάττα, 2006].

Στον Πίνακα 5.7 που ακολουθεί φαίνεται η % κατά όγκο σύνθεση των αερίων της πυρόλυσης σε σχέση με την θερμοκρασία [Ανδρεαδάκης, 2001].

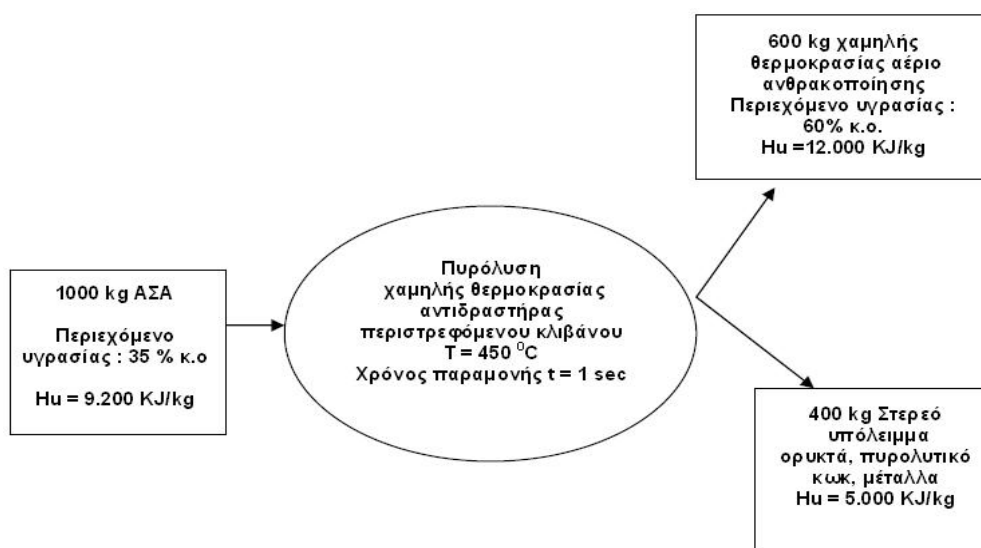
Πίνακας 5.7 : % κατά όγκο σύνθεση των αερίων της πυρόλυσης σε σχέση με την θερμοκρασία.

Αέρια	500°C	650°C	800°C	900°C
H	5.56	16.58	28.55	32.48
CH ₄	12.43	15.91	13.73	10.45
CO	33.50	30.49	34.12	35.25
CO ₂	44.77	31.78	20.59	18.31
C ₂ H ₄	0.45	2.18	2.24	2.43
C ₂ H ₆	3.03	3.06	0.77	1.07
Σύνολο	99.74	100.0	100.00	99.99

Η αντίστοιχη σχηματική απεικόνιση του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας δίνεται στο Σχήμα 5.18.

Αεριοποίηση

Οι εγκαταστάσεις αεριοποίησης μπορούν να λειτουργήσουν είτε με τροφοδοσία αέρα, είτε με τροφοδοσία καθαρού οξυγόνου. Στην περίπτωση που υπάρχει τροφοδοσία με αέρα, λόγω της παρουσίας του ατμοσφαιρικού αζώτου, η θερμογόνος δύναμη του αερίου προϊόντος είναι χαμηλή και κυμαίνεται στα 4-6 MJ / Nm³. Η δε τυπική σύστασή του είναι: 10% CO₂, 20% CO, 15% H₂, 2% CH₄ και 53% N₂. Στην περίπτωση που η τροφοδοσία είναι καθαρό οξυγόνο, το ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου προϊόντος ανέρχεται στα 9 - 10 MJ / Nm³. Η δε τυπική σύστασή του είναι: 14% CO₂, 50% CO, 30% H₂, 4% CH₄, 1% C_xH_y και 1% N₂ [Φάττα, 2006].



Σχήμα 5.18 : Κατανομή ενέργειας κατά την πυρόλυση [Bilitewski 2006].

5.7.4 Σύγκριση με μηχανική – βιολογική επεξεργασία

Στον Πίνακα 5.8 γίνεται μια σύνοψη όλων των ισοζυγίων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Παρατηρείται ότι για τις βιολογικές μεθόδους υπάρχουν τεχνολογίες που έχουν δοκιμαστεί και μπορούν να λειτουργήσουν. Από τις θερμικές διεργασίες μόνο η αποτέφρωση είναι πλήρως αποδεδειγμένη τεχνολογία, ενώ η πυρόλυση και η αεριοποίηση χρήζουν περαιτέρων δοκιμών και δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ακόμη σε ευρεία κλίμακα. Το κόστος των βιολογικών μεθόδων είναι γενικά χαμηλότερο από αυτό των θερμικών διεργασιών με την αεριοποίηση να παρουσιάζεται ως η πιο ακριβή μέθοδος.

Όσον αφορά στην επεξεργασία των απορριμμάτων, όλες οι μέθοδοι, πλην της αποτέφρωσης, που μπορεί να δεχτεί όλα τα ΑΣΑ, απαιτούν τη διαλογή στην πηγή, ενώ όλες είναι δυνατό να δεχτούν και υγρά ΑΣΑ. Επίσης, με την χρήση θερμικών διεργασιών και αναερόβιας χώνευσης μπορεί να γίνει ανάκτηση ενέργειας, κάτι που δεν είναι εφικτό με την κομποστοποίηση. Ακόμα, με την χρήση βιολογικών διεργασιών μπορούν να ανακτηθούν θρεπτικά συστατικά (P, N, K), που περιέχονται στα απορρίμματα, ενώ αυτό δεν είναι εφικτό με τις θερμικές διεργασίες. Τα υπολείμματα της αποτέφρωσης και της πυρόλυσης αποτελούνται κυρίως από τέφρα και μέταλλα σε ποσοστό περίπου 20-30% και διαφέρουν από αυτά της αεριοποίησης, που είναι κυρίως υαλοποιημένο υπόλειμμα, λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Από την κομποστοποίηση προκύπτει κομπόστ, RDF και μέταλλα, ενώ από την αναερόβια χώνευση προκύπτουν 25% στερεά.

Πίνακας 5.8 : Σύνοψη τεχνολογιών για τη διαχείριση ΑΣΑ.

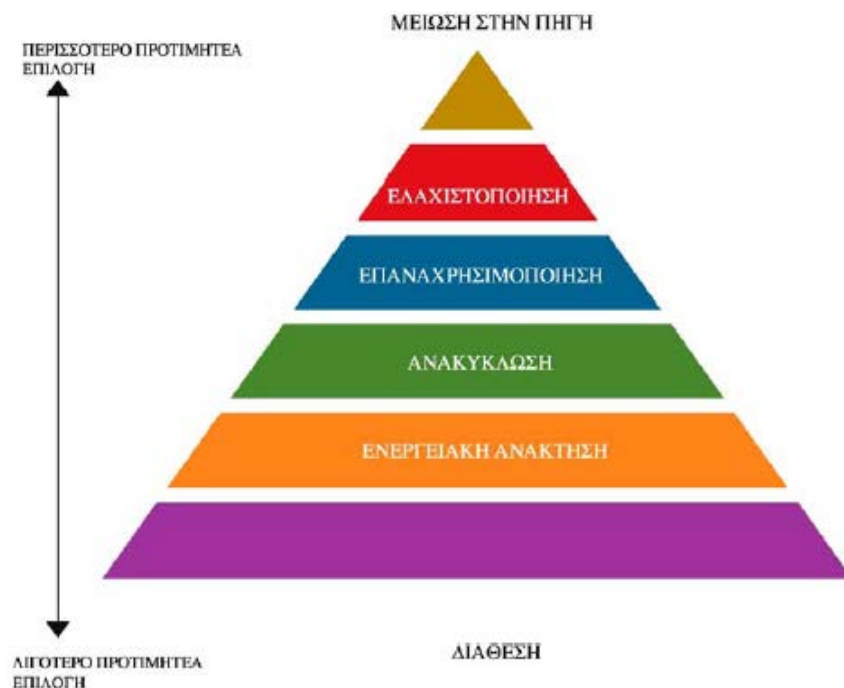
Σύνοψη των τεχνολογιών για τη διαχείριση των ΑΣΑ	Βιολογικές μέθοδοι		Θερμικές μέθοδοι		
	Κομποστοποίηση	Αναερόβια χώνευση	Αποτέφρωση	Πυρόλυση	Αεριοποίηση
Αποδεδειγμένη τεχνολογία	Ναι	Ναι	Ναι	Μερικώς	Μερικώς
Κόστος διαχείρισης	Χαμηλό έως υψηλό	Μέσο έως υψηλό	Μέσο έως υψηλό	Μέσο έως υψηλό	Υψηλό έως πολύ υψηλό
Καταλληλότητα	Καλή	Καλή	Καλή	Μέση	Εξαρτώμενη από την τεχνολογία
Είδη ΑΣΑ	Διαχωρισμένα στην πηγή απόβλητα	Διαχωρισμένα στην πηγή απόβλητα	Όλα τα απορρίμματα	Διαχωρισμένα ξηρά απόβλητα	Διαχωρισμένα στην πηγή
Αποδοχή υγρών ΑΣΑ	Ναι	Ναι	Ναι	Πιθανό αλλά συνήθως όχι	Πιθανό αλλά συνήθως όχι
Ανάκτηση ενέργειας	Όχι	Ναι - 3.200MJ/Mg	Ναι - 2.700 MJ/Mg	Ναι - περίπου 70% της καύσης + ενέργεια που περιέχεται στα παραπροϊόντα	Ναι – όπως η καύση
Ανάκτηση θρεπτικών (kg θρεπτικών / Mg ΑΣΑ)	Ναι – 2.5 -10 kg N 0.5-1 kg P 1-2 kg K	Ναι – 4 – 4.5 kg N 0.5-1 kg P 2.5-3 kg K	Όχι	Όχι	Όχι
Υπολείμματα	50- 60% κομπόστ 25-30% RDF-μέταλλα	25% στερεά	15-28% τέφρα 3-8 % συστήματα καθαρισμού	20-30% τέφρα, σκωρία, γυαλί, μέταλλα 2% συστήματα καθαρισμού	17-30% υαλοποιημένο υπόλειμμα, μέταλλα 2% συστήματα καθαρισμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

Υγειονομική Ταφή Απορριμμάτων

6.1 Διάθεση απορριμμάτων

Η διάθεση αποτελεί το τελευταίο (καταληκτικό) υποσύστημα του υπερ-συστήματος ολοκληρωμένης διαχείρισης ΑΣΑ. Σε αυτό, είναι δυνατόν να καταλήξουν τα ΑΣΑ χωρίς καμιά επεξεργασία ή τα υπολείμματά τους μετά από διαχωρισμό και ανάκτηση χρήσιμων υλικών. Τα υπολείμματα είναι συστατικά των ΑΣΑ που δεν ανακυκλώνονται. Ιστορικά, η διάθεση των ΑΣΑ γινόταν είτε με διάθεση στο έδαφος, είτε με διάθεση στη θάλασσα. Η διάθεση στο έδαφος (σε χώρο διάθεσης απορριμμάτων) αποτελεί τη διεθνώς επικρατούσα μέθοδο τελικής διάθεσης ΑΣΑ (Διάγραμμα 6.1).



Διάγραμμα 6.1: Ιεραρχία επιλογών Διαχείρισης Αστικών Στερεών Απορριμμάτων.

Σύμφωνα με την εθνική νομοθεσία: «Η διάθεση των αποβλήτων πρέπει να γίνεται χωρίς να προκαλείται κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία και χωρίς να χρησιμοποιούνται διαδικασίες ή μέθοδοι που μπορούσαν να βλάψουν το περιβάλλον.». Οι εργασίες διάθεσης σύμφωνα με το παράρτημα IV του Εθνικού και Περιφερειακού Σχεδιασμού Διαχείρισης είναι:

1. Απόθεση επάνω ή μέσα στο έδαφος (π.χ. υγειονομική ταφή, κλπ).
2. Επεξεργασία σε χερσαίο χώρο (π.χ. βιοαποικοδόμηση αποβλήτων σε υγρή κατάσταση ή ιλύος στο έδαφος, κλπ).
3. Έγχυση σε βάθος (π.χ. έγχυση αντλήσιμων αποβλήτων σε φρέατα, σε θόλους άλατος ή σε φυσικά γεωλογικά ρήγματα, κλπ).
4. Τελμάτωση (π.χ. έκχυση υγρών αποβλήτων ή ιλύων σε φρέατα, μικρές λίμνες ή λεκάνες, κλπ).
5. Απόθεση σε ειδικά σχεδιασμένους και εξοπλισμένους χώρους υγειονομικής ταφής (π.χ. τοποθέτηση σε χωριστές στεγανές κυψελοειδείς κατασκευές, επικαλυμμένες και στεγανοποιημένες, τόσο μεταξύ τους, όσο και σε σχέση με το περιβάλλον, κλπ).
6. Απόρριψη στερεών αποβλήτων σε υδατικό περιβάλλον, εκτός από τις απορρίψεις στη θάλασσα.
7. Καταβύθιση στις θάλασσες, συμπεριλαμβανομένης της απόθεσης στο θαλάσσιο πυθμένα.
8. Βιολογική επεξεργασία μη διευκρινιζόμενη σε άλλο σημείο του Παραρτήματος IV του Εθνικού Σχεδιασμού, η οποία καταλήγει σε ενώσεις ή μείγματα, η διάθεση των οποίων γίνεται με μία από τις εργασίες που περιγράφονται στο προαναφερθέν Παράρτημα.
9. Φυσική ή χημική επεξεργασία μη διευκρινιζόμενη σε άλλο σημείο του Παραρτήματος, η οποία καταλήγει σε ενώσεις ή σε μίγματα, η διάθεση των οποίων γίνεται με μία από τις εργασίες που αναγράφονται στον παρόντα Πίνακα (π.χ. εξάτμιση, ξήρανση, ορυκτοποίηση κ.λ.π).
10. Αποτέφρωση επί του εδάφους.
11. Αποτέφρωση στην θάλασσα.
12. Μόνιμη εναποθήκευση (π.χ. τοποθέτηση κιβωτίων σε ορυχείο, κλπ).
13. Ανάμειξη πριν από τις εργασίες που αναφέρονται στο παρόν Παράρτημα.

14. Επανασυσκευασία πριν από μια από τις εργασίες που αναφέρονται στο παρόν Παράρτημα.
15. Αποθήκευση ενώ διαρκεί μία από τις εργασίες που αναγράφονται στο παρόν Παράρτημα εκτός από την προσωρινή αποθήκευση κατά τη διάρκεια της συλλογής, στο χώρο που παράγονται τα απόβλητα.

6.2 Υγειονομική Ταφή (ΥΤ)

Η υγειονομική ταφή, αποτελεί μια μέθοδο διαχείρισης ΑΣΑ, η οποία οφείλει να λαμβάνει χώρα σε συγκεκριμένους χώρους (χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων – ΧΥΤΑ), που σύμφωνα με την Κοινοτική Οδηγία 1999/31/ΕΚ μπορεί να είναι: «κάθε χώρος διάθεσης αποβλήτων για την απόθεση των αποβλήτων επί ή εντός του εδάφους ή υπογείως, συμπεριλαμβανομένων:

- ☐ των εσωτερικών χώρων διάθεσης των αποβλήτων (δηλαδή των ΧΥΤΑ στους οποίους ένας παραγωγός αποβλήτων πραγματοποιεί τη διάθεσή τους στον τόπο παραγωγής) και
- ☐ κάθε μόνιμος (δηλαδή χρησιμοποιούμενος άνω του έτους) χώρος προσωρινής εναποθήκευσης αποβλήτων,
- ☐ Αλλά εξαιρουμένων:
 - των εγκαταστάσεων στις οποίες εκφορτώνονται τα απόβλητα με σκοπό την προετοιμασία τους για περαιτέρω μεταφορά τους προς ανάκτηση χρήσιμων υλών, επεξεργασία ή διάθεση αλλού και
 - της εναποθήκευσης των αποβλήτων πριν από την ανάκτηση χρήσιμων υλών ή την επεξεργασία για διάστημα μικρότερο των τριών ετών κατά γενικό κανόνα,
 - της εναποθήκευσης αποβλήτων πριν από τη διάθεση για διάστημα μικρότερο του έτους».
- ☐ Κάθε χώρος ταφής κατατάσσεται σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες:
 - Χώρος ταφής επικίνδυνων αποβλήτων.
 - Χώρος ταφής μη επικίνδυνων αποβλήτων.
 - Χώρος ταφής αδρανών αποβλήτων.».

Οι χώροι υγειονομικής ταφής ΑΣΑ ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία. Σε χώρο ταφής επικίνδυνων αποβλήτων γίνονται δεκτά μόνον επικίνδυνα απόβλητα, τα οποία

πληρούν κριτήρια, που καθορίζονται σύμφωνα με την οδηγία 1999/31/EK, παράρτημα II. Σε χώρους ταφής επικινδύνων αποβλήτων μπορούν να διατίθενται απόβλητα, που καταρχήν καλύπτονται από την οδηγία 91/689/ΕΟΚ. Ωστόσο, αυτά τα απόβλητα δεν πρέπει να γίνονται δεκτά χωρίς προηγούμενη επεξεργασία, εάν παρουσιάζουν συνολική περιεκτικότητα ή στραγγισιμότητα δυνητικά επικίνδυνων συστατικών αρκετά υψηλή, ώστε να ενέχει βραχυπρόθεσμους επαγγελματικούς ή περιβαλλοντικούς κινδύνους ή να εμποδίζει την επαρκή σταθεροποίηση των αποβλήτων εντός της προβλεπόμενης διάρκειας λειτουργίας του χώρου ταφής.

Σε κάθε περίπτωση σε έναν ΧΥΤΑ καταλήγουν μη υγρά επικίνδυνα απόβλητα, τα οποία δεν μπορούν να επεξεργαστούν ή διατεθούν με άλλο τρόπο, σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία. Η δυναμική ενός ΧΥΤΑ να ρυπάνει το περιβάλλον αποτελείται από 3 φάσεις:

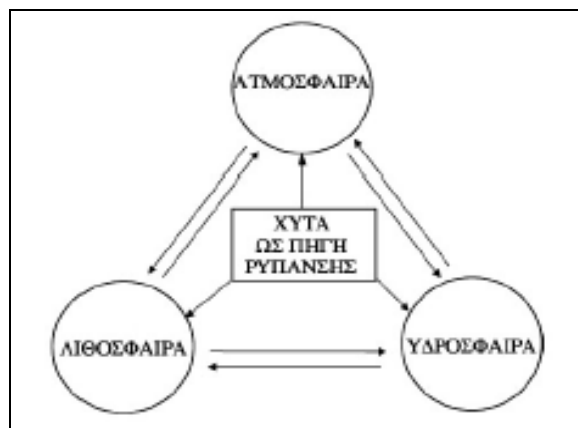
- ☐ Στερεή (Αποδομημένα απορρίμματα)
- ☐ Υγρή (Στραγγίσματα)
- ☐ Αέρια (Βιοαέριο)

Στο Διάγραμμα 6.2 απεικονίζεται σχηματικά η διαδικασία αποδόμησης των απορριμμάτων σε έναν ΧΥΤΑ με τις διάφορες αντιδράσεις και προϊόντα.



Διάγραμμα 6.2: Συστημική απεικόνιση ενός ΧΥΤΑ.

Επιπλέον, οι ΧΥΤΑ μπορούν να ρυπάνουν και τα 3 κυρίαρχα μέσα ύλης στο περιβάλλον: ατμόσφαιρα, λιθόσφαιρα και υδρόσφαιρα (Διάγραμμα 6.3). Έτσι, η ρύπανση, που μεταφέρεται μέσω αυτών των μέσων, έχει είτε άμεσες, είτε έμμεσες επιπτώσεις στον άνθρωπο, την χλωρίδα, την πανίδα, αλλά και τις ανθρώπινες κατασκευές.



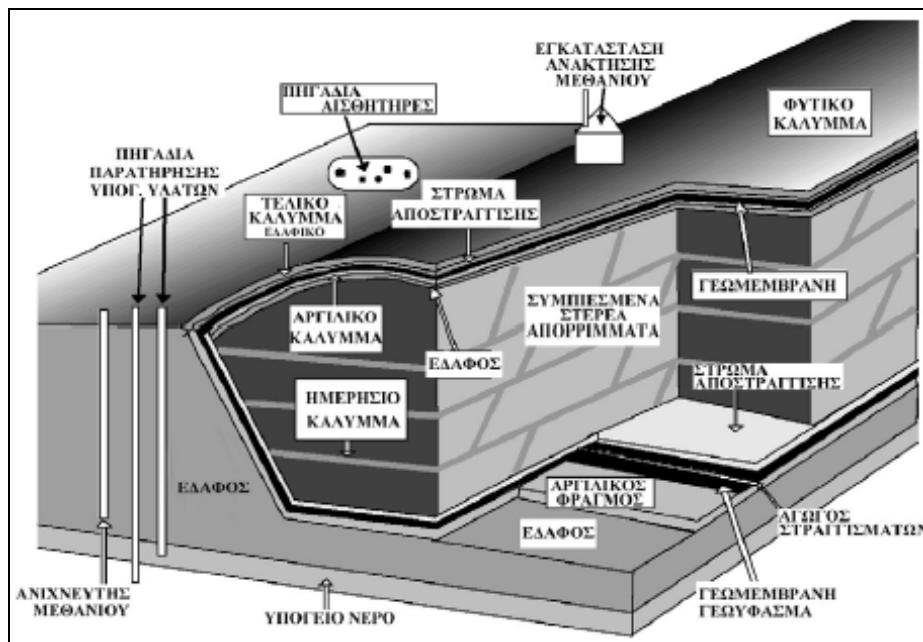
Διάγραμμα 6.3: Τα 3 κύρια περιβαλλοντικά μέσα και οι κύριοι οδοί ρύπανσης από ΧΥΤΑ.

Η διάθεση σε ΧΥΤ είναι η πλέον οικονομική και περιβαλλοντικά αποδεκτή μέθοδος διάθεσης ΑΣΑ. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία η ελαχιστοποίηση στην πηγή, η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση, η ανάκτηση ενέργειας και η λιπασματοποίηση έχουν προτεραιότητα έναντι της υγειονομικής ταφής, ως εναλλακτικές μορφές διαχείρισης των ΑΣΑ. Επειδή όμως πάντοτε υπάρχουν ΑΣΑ, που δεν μπορούν να ανακυκλωθούν ή να αξιοποιηθούν, η υγειονομική ταφή θα αποτελεί το τελευταίο, αλλά απαραίτητο τμήμα κάθε συστήματος διαχείρισης.

Η Οδηγία του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης 1999/31/EC προχωρεί ουσιαστικά στη σταδιακή κατάργηση του ΧΥΤΑ σαν αποδέκτη βιοαποικοδομήσιμης οργανικής ύλης. Η απαίτηση αυτή θα οδηγήσει σε πρόσθετες μεγάλες ποσότητες ΑΣΑ για καύση.

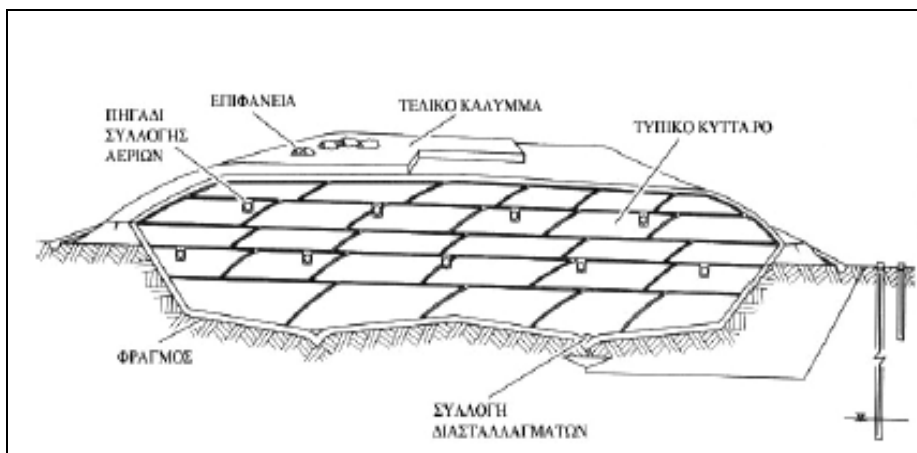
Επομένως, η σημερινή σημασία του όρου «υγειονομική ταφή» είναι χώρος διαμορφωμένος, με βάση τις αρχές της επιστήμης του μηχανικού, που χρησιμοποιείται για την **εναπόθεση των υπολειμμάτων των ΑΣΑ** επί του εδάφους, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οι αρνητικές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία.

Το Σχήμα 6.1 απεικονίζει έναν τέτοιο ΧΥΤΑ, ο οποίος διαθέτει στρώματα προστασίας του εδάφους. Κάθε στρώμα πρέπει να έχει ξεχωριστό σύστημα συλλογής στραγγισμάτων, ώστε να εξασφαλίζει την παρεμπόδιση εισροής στραγγισμάτων στο έδαφος. Γύρω από το πεδίο του ΧΥΤΑ πρέπει να υπάρχει εκτεταμένο σύστημα παρακολούθησης των υπογείων υδάτων, προκειμένου να εντοπίζονται τυχόν διαρροές και να προλαμβάνεται η εκτεταμένη ρύπανση του υπόγειου υδροφορέα.

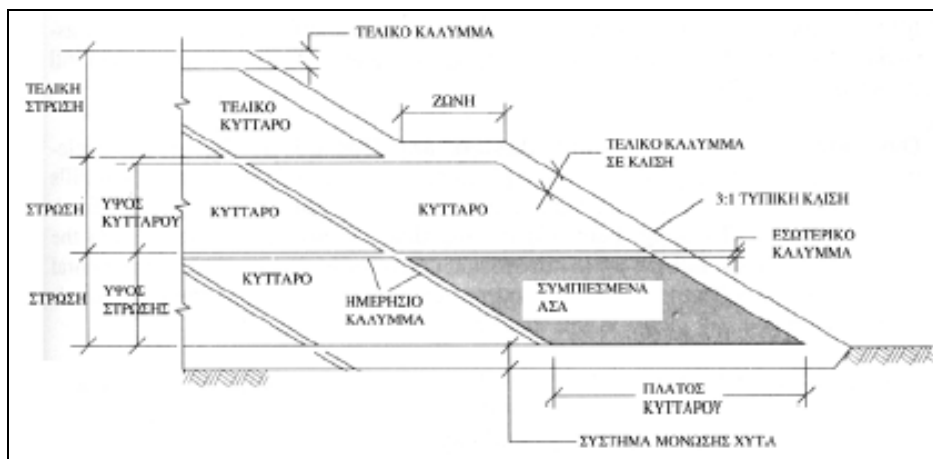


Σχήμα 6.1: Απεικόνιση ενός χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) [Tchobanoglous et al., 1993].

- Το βασικό χαρακτηριστικό και δομικό στοιχείο ενός ΧΥΤΑ είναι το **κύτταρο (cell)** (Σχήμα 6.2), που αποτελείται από τα απορρίμματα μιας λειτουργικής περιόδου, συνήθως μιας ημέρας, συμπιεσμένα και καλυμμένα με στρώση εδαφικού υλικού. Η στρώση του εδαφικού υλικού αποτελείται από 15 – 30cm χώματος ή άλλων εναλλακτικών υλικών (π.χ. compost) και αποσκοπεί στο να παρεμποδίζει την είσοδο και έξοδο τρωκτικών και εντόμων, την είσοδο ύδατος στον χώρο των ΑΣΑ, καθώς και το διασκορπισμό των ΑΣΑ με τον άνεμο, τα ύδατα και τα ζώα από τον ΧΥΤΑ προς τον περιβάλλοντα χώρο.



Σχήμα 6.2: Δομή και κύρια χαρακτηριστικά ενός ΧΥΤΑ [Tchobanoglous et al., 1993].

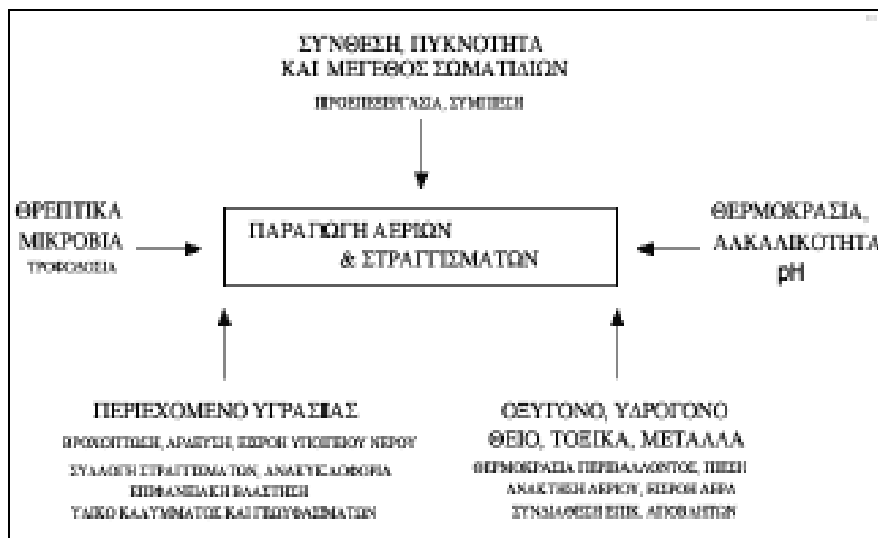


Σχήμα 6.3: Τομή χώρου υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) [Tchobanoglous et al., 1993].

❑ **Ταμπάνι ή στρώση (lift)** είναι μια πλήρης οριζόντια σειρά από κύτταρα του ίδιου ύψους. Ένας ΧΥΤΑ αποτελείται από μια σειρά τέτοιων στρώσεων η μία επάνω στην άλλη. Η ζώνη (bench ή terrace) χρησιμοποιείται συχνά όπου το ύψος του ΧΥΤΑ ανέρχεται στα 15 – 25m. Οι ζώνες χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν τη σταθερότητα των πρανών, για την τοποθέτηση τάφρων ή αγωγών της επιφανειακής απορροής και την τοποθέτηση αγωγών συλλογής βιοαερίου. Ένα τελικό κάλυμμα τοποθετείται σε όλη την επιφάνεια του ΧΥΤΑ. Το τελικό αυτό κάλυμμα αποτελείται συνήθως από πολλαπλές στρώσεις χώματος ή/και γεωμεμβράνες και αποσκοπεί στην παρεμπόδιση της κατείσδυσης των ομβρίων και στη στήριξη της επιφανειακής βλάστησης και των φυτεύσεων.

❑ **Διασταλλάγματα ή στραγγίσματα (leachates)** είναι τα υγρά που συλλέγονται στον πυθμένα του ΧΥΤΑ. Είναι το αποτέλεσμα της κατείσδυσης ομβρίων, ανεξέλεγκτης επιφανειακής απορροής, ύδατος που περιέχεται αρχικά στα απόβλητα και υπογείου ύδατος σε περιοχές ρηχού υδροφόρου ορίζοντα [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004]. Στο Διάγραμμα 6.4 αναφέρονται οι σπουδαιότερες παράμετροι, που επιδρούν τόσο στην παραγωγή στραγγισμάτων, όσο και αερίων σε ΧΥΤΑ.

Η χημική σύνθεση των στραγγισμάτων ποικίλλει ανάλογα με την ηλικία του ΧΥΤΑ. Για παράδειγμα, στραγγίσματα που παράγονται στην όξινη φάση έχουν συγκριτικά χαμηλό pH και υψηλές συγκεντρώσεις BOD₅, COD, TOC, θρεπτικών και βαρέων μετάλλων.



Διάγραμμα 6.4: Παράγοντες που επιδρούν στην παραγωγή στραγγισμάτων και αερίων σε ΧΥΤΑ.

Απεναντίας, στραγγίσματα που παράγονται στην φάση της μεθανιογένεσης έχουν συγκριτικά υψηλότερο pH (6,5 – 7,5) και πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις BOD₅, COD, TOC, θρεπτικών και μετάλλων. Το pH εξαρτάται όχι μόνο από τις συγκεντρώσεις των λιπαρών οξέων, αλλά και από τη μερική πίεση του CO₂ στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ.

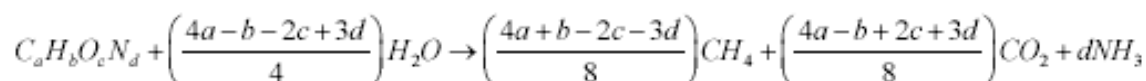
Αντιπροσωπευτικά χαρακτηριστικά στραγγισμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1, τόσο για νέους, όσο και για παλαιούς ΧΥΤΑ [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004]. Η βιοαποικοδομησιμότητα του στραγγίσματος είναι συνάρτηση του χρόνου, όπως συνάγεται από τη μεταβολή του λόγου BOD₅/COD. Αρχικά, η τιμή του λόγου αυτού είναι μεγαλύτερη ή ίση από 0,5, ενώ η διακύμανση στην περιοχή 0,4 - 0,6 εκλαμβάνεται ως ένδειξη ότι το οργανικό περιεχόμενο του στραγγίσματος είναι εύκολα βιοαποικοδομήσιμο. Σε παλαιούς ΧΥΤΑ, η τιμή του λόγου BOD₅/COD είναι στην περιοχή 0,05 - 0,2 που αποτελεί ένδειξη χαμηλής βιοαποικοδομησιμότητας, λόγω μετατροπής της οργανικής ύλης σε φουλβικά και χουμικά οξέα.

□ Το **βιοαέριο (biogas ή landfill gas)** είναι μίγμα αερίων (CH₄, CO₂) που αποτελούν προϊόντα της αναερόβιας αποδόμησης της οργανικής ύλης των αποβλήτων. Τα άλλα συστατικά του βιοαερίου είναι ατμοσφαιρικό N₂, O₂, NH₃ και μικρές συγκεντρώσεις οργανικών ενώσεων.

Πίνακας 6.1: Τιμές (mg/L*) περιεχ. στραγγίσματος από νέους & ώριμους ΧΥΤΑ [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Συστατικά	Νέοι ΧΥΤΑ (< 2ετών)		Ωριμοί ΧΥΤΑ (> 10 ετών)
	Διακύμανση	Τυπική Τιμή	Διακύμανση
BOD ₅	2000 - 30000	10000	100 - 200
TOC	1500 - 20000	6000	80 - 160
COD	3000 - 60000	18000	100 - 500
Ολικά αιωρούμενα στερεά	200 - 2000	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
Ορθοφώσφορος	4 - 80	20	4 - 8
Αλκαλικότητα σαν CaCO ₃	1000 - 10000	3000	200 - 1000
PH	4,5 - 7,5	6	6,6 - 7,5
Ολική σκληρότητα σαν CaCO ₃	300 - 10000	3500	200 - 500
Ασβέστιο	200 - 3000	1000	100 - 400
Μαγνήσιο	50 - 1500	250	50 - 200
Κάλιο	200 - 1000	300	50 - 400
Νάτριο	200 - 2500	500	100 - 200
Χλώριο	200 - 3000	500	100 - 400
Θειικά άλατα	50 - 1000	300	20 - 50
Ολικός Σίδηρος	50 - 1200	60	20 - 200

Η ολική ποσότητα του παραγόμενου αερίου μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη στοιχειομετρία της αντιδράσεως:



Η πραγματική ποσότητα είναι συνήθως μικρότερη αυτής που υπολογίζεται με βάση τη στοιχειομετρία, διότι δεν βιοαποικοδομείται ολόκληρη η διαθέσιμη οργανική ύλη, αλλά ένα μέρος αυτής. Μία τυπική κατανομή των συστατικών σε αέρια ΧΥΤΑ παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2. Όπως φαίνεται, το CH₄ και το CO₂ είναι τα κύρια συστατικά. Μίγματα μεθανίου στον αέρα σε συγκέντρωση 5 – 15% είναι εκρηκτικά. Επειδή μόνο μικρή ποσότητα οξυγόνου υπάρχει σε ένα ΧΥΤΑ, όταν η συγκέντρωση μεθανίου περιέχεται στην ως άνω περιοχή, ο κίνδυνος εκρήξεως στον ΧΥΤΑ είναι πολύ μικρός. Πολλές από τις ενώσεις του Πίνακα 6.2 ανήκουν στην κατηγορία των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs).

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά των αερίων που απαντώνται σε ΧΥΤΑ [Ντζαμίλης & Χάβας, 2004].

Χαρακτηριστικό	% Ξηρού όγκου*
Μεθάνιο	45-60
Διοξείδιο του άνθρακος	40-60
Άζωτο	2-5
Οξυγόνο	0,1-1
Σουλφίδια, μερκαπτάνες, <i>etc.</i>	0-1
Αμμωνία	0,1-1
Υδρογόνο	0-0.2
Μονοξείδιο του άνθρακος	0-0,2
Ιχνοαέρια	0,01-0.6
θερμοκρασία, °C	38-50
Ειδικό βάρος (ως προς αέρα)	1,02-1,06
Περιεχόμενο υγρασίας	Κεκορεσμένο
θερμογόνος δύναμη, KJ/m ³	14.900-20.500

Τα βασικά **πλεονεκτήματα** της υγειονομικής ταφής, έναντι άλλων μεθόδων επεξεργασίας και διάθεσης, είναι:

- Η σχετικά εύκολη τεχνολογία.
- Η μικρότερη δαπάνη υποδομής και λειτουργίας.
- Η επαναχρησιμοποίηση του χώρου μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ.
- Η πιθανή αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου.

Τα βασικά **μειονεκτήματα** είναι:

- Οι μεγάλοι απαιτούμενοι χώροι.
- Το σύνδρομο «όχι στη δική μου αυλή» ως κοινωνική αντίδραση για την χωροθέτηση και λειτουργία του ΧΥΤΑ.
- Η έκλυση αερίων CO₂ και CH₄ (αέρια θερμοκηπίου).
- Το γεγονός ότι η περίοδος της μεταφροντίδας είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη άλλων μεθόδων διαχείρισης.

Και βέβαια θεωρείται λανθασμένα ως «τελική διάθεση» η υγειονομική ταφή, αφού τόσο τα ανεπεξέργαστα ΑΣΑ, όσο και τα επεξεργασμένα υπολείμματα (μετά από διαχωρισμό, κομποστοποίηση και καύση) περιέχουν ουσίες που δεν επιτρέπουν *επίτευξη κατάστασης τελικής διάθεσης*.

6.3 Διασταλλάγματα

6.3.1 Παραγωγή

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.

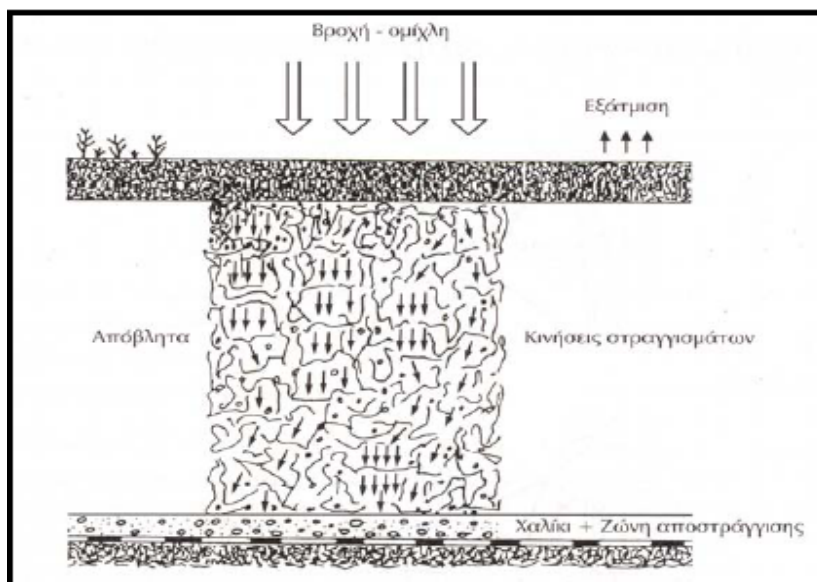
Ως **αποπλύματα** ορίζονται τα νερά που ρέουν και εκρέουν από το ΧΥΤΑ. Στο ΦΕΚ 1572/2002 τα στραγγίσματα ορίζονται ως εξής: *Οποιαδήποτε υγρά ρέουν δια μέσου των αποτεθέντων αποβλήτων και εκρέουν από το χώρο ταφής ή περιέχονται μέσα του*. Αρκετά πλήρεις εμφανίζονται και κάποιοι ορισμοί στην βιβλιογραφία: 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 [Γκούσκος, 2005].

Οι πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ υδατικού ισοζυγίου και βιολογικής αποσύνθεσης στα αστικά απόβλητα έχουν ως 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 ταξινόμησή τους κατά μέγεθος, τα κάνει να προσομοιάζουν σε μίγμα από χοντρή άμμο, χαλίκια και βότσαλα αναμεμειγμένα με

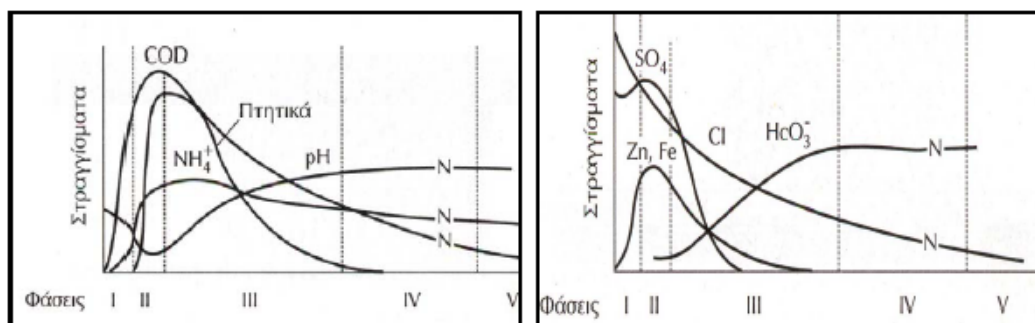
οργανικές ουσίες. Η δομή αυτή σε συνάρτηση με τον εκάστοτε τρόπο λειτουργίας δυσκολεύει τη χρήση μαθηματικών μοντέλων για την περιγραφή της διακίνησης των στραγγισμάτων. Στο Σχήμα 6.4 απεικονίζεται η δημιουργία των στραγγισμάτων.



Σχήμα 6.4: Κίνηση – δημιουργία στραγγισμάτων.

Η παραγωγή των στραγγισμάτων από έναν 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 BOD₅, το COD, το TOC και εξαρτώνται από την ηλικία της εγκατάστασης, το είδος της εφαρμοσμένης συμπίεσης και φυσικά τη σύνθεση των αποβλήτων. Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των στραγγισμάτων σε χώρο διάθεσης αστικών αποβλήτων. Οι οργανικές ουσίες δείχνουν τάση μείωσης της συγκέντρωσής 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, Mn, Zn).
- 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).



Σχήμα 6.5: Διαχρονική εξέλιξη συγκεντρώσεων παραμέτρων ΧΥΤΑ.

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 6.3.

Πίνακας 6.3: Τιμές χαρακτηριστικών παραμέτρων των διασταλλαγμάτων [Γκούσκος, 2005].

Παράμετροι	Τιμές (mg/L)		
	Νέοι ΧΥΤΑ (ηλικίας <2 ετών)		Ψηροί 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

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 βιοαποικοδόμηση 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 Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4: Παράμετροι παρακολούθησης των διασταλλαγμάτων [Γκούσκος, 2005].

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	Θεία	
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	
		Κάλιο	
		σκληρότητα	
		Β. μέταλλα (Pb, Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Fe, Mn, Hg, Ba, Ag)	
		Αρσενικό	
		Σελήνιο	

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 (Σχήμα 6.5) τότε η τιμή του pH θα είναι χαμηλή, ενώ οι τιμές των συγκεντρώσεων των BOD₅, 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 BOD₅, 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 CO₂ 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 BOD₅/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 BOD₅/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.

Στον Πίνακα 6.5 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.

6.3.2 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

Πίνακας 6.5: Τιμές σύστασης των στραγγισμάτων στην Ελλάδα [Gidarakos & Geneiatakis, 2005].

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-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

οξυγόνο παγιδεύεται στα νέα απορρίμματα και εφοδιάζεται σε οξυγόνο, μέσω της υδατικής κατακρήμνισης. Στην φάση αυτή (Φάση I, Σχήμα 6.5) 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 αποθεθεί, 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 οξειδοαναγωγικό δυναμικό πολύ υψηλό για το σχηματισμό μεθανίου [Γκούσκος, 2005].

Φάσεις αναερόβιας αποδόμησης

Τρεις διαφορετικές φάσεις μπορούν να αναγνωρισθούν στην αναερόβια αποδόμηση των απορριμμάτων. Η πρώτη φάση (Φάση II) 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_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+).

Η αρχικά υψηλή συγκέντρωση των θεικών 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 στη 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 BOD₅ (συνήθως > 10000 mg/L), υψηλές αναλογίες BOD₅/ COD (συνήθως > 0,7) και όξινες τιμές του pH (τυπικές τιμές 5 – 6).

Η δεύτερη φάση (φάση III,) 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 θεικών 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 μαγγανίου και των βαρέων μετάλλων. Τα τελευταία κατακρημνίζονται πιθανώς ως σουλφίδια.

Η τρίτη φάση (φάση IV) της αναερόβιας αποδόμησης χαρακτηρίζεται από τη μεθανογένεση από τα 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 [Γκούσκος, 2005].

Ο Πίνακας 6.6 αναφέρει κάποιες παραμέτρους σύμφωνα με τις οποίες μπορεί να ανιχνευθεί ο βαθμός σταθεροποίησης στον οποίο βρίσκονται τα απόβλητα στο ΧΥΤΑ.

Πίνακας 6.6: Παράμετροι ανίχνευσης βαθμού σταθεροποίησης αποβλήτων [Γκούσκος, 2005].

Παράμετρος	Δείκτης
Φυσικές	
pH	Όξινο –βασικό / Δείκτης φάσης σταθεροποίησης
ORP	Οξειδωση-αναγωγή / Δείκτης φάσης σταθεροποίησης
Αγωγιμότητα	Ιοντική Ισχύς / Δείκτης δραστηριότητας
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

6.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την σύνθεση

Η χημική σύνθεση των στραγγισμάτων εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αφορούν στη μάζα των απορριμμάτων και την περιοχή που προέρχονται, αλλά και εκείνες που αφορούν στη 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 τη βιοαποικοδόμησή 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 την 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

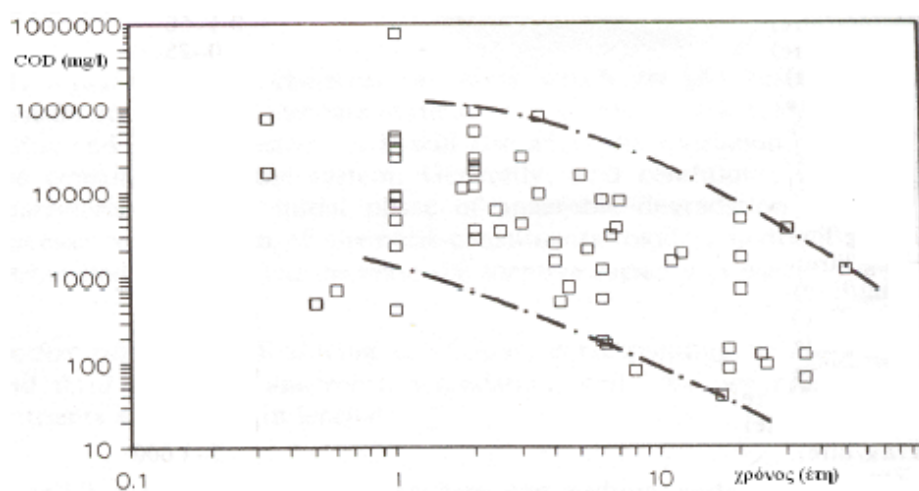
Οι αναγωγικές συνθήκες, κατά τη δεύτερη και τρίτη φάση της αναερόβιας αποδόμησης, επηρεάζουν τη διαλυτότητα των θρεπτικών ουσιών και των μετάλλων των στραγγισμάτων.

Η ηλικία του XYTA

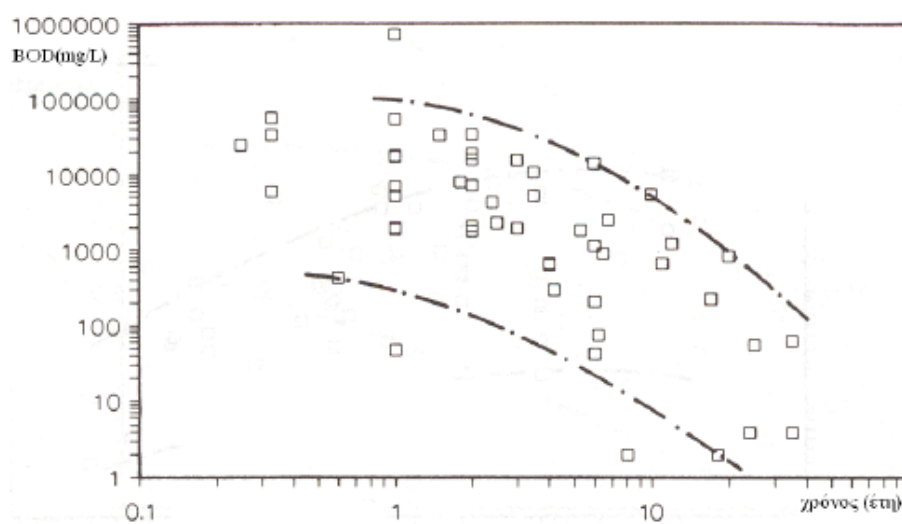
Οι διακυμάνσεις στη σύνθεση και ποσότητα των στραγγισμάτων σε ρύπους, που παρασύρονται από τα απορρίμματα, είναι συχνά χαρακτηριστικό της ηλικίας του XYTA. Ο χρόνος αυτός μπορεί να μετρηθεί από την χρονική στιγμή απόθεσης των αποβλήτων ή τη στιγμή εμφάνισης των πρώτων στραγγισμάτων. Η ηλικία του XYTA 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 XYTA (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_4^{2-} , κλπ) [Γκούσκος, 2005].

6.3.4 Χημικά χαρακτηριστικά

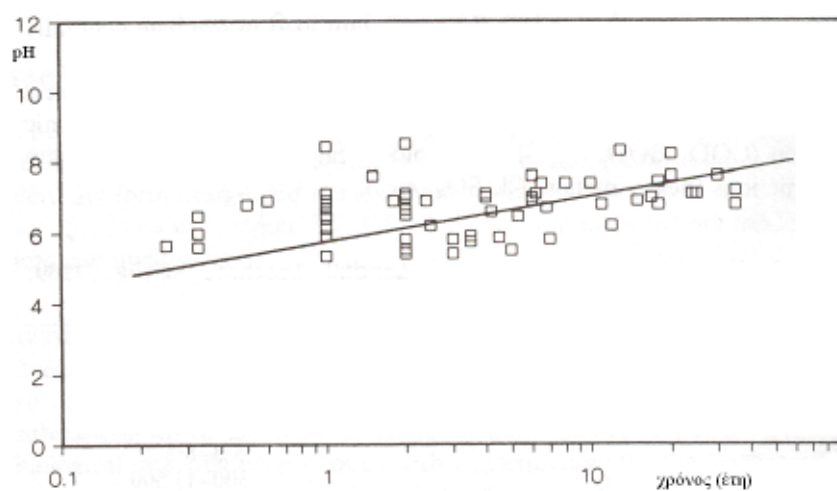
Τα Διαγράμματα 6.5 έως 6.10 [Γκούσκος, 2005] δείχνουν αναλυτικά την τάση σε σχέση με το χρόνο κάποιων βασικών παραμέτρων των στραγγισμάτων.



Διάγραμμα 6.5: Χρονική εξέλιξη COD.



Διάγραμμα 6.6: Χρονική εξέλιξη BOD.

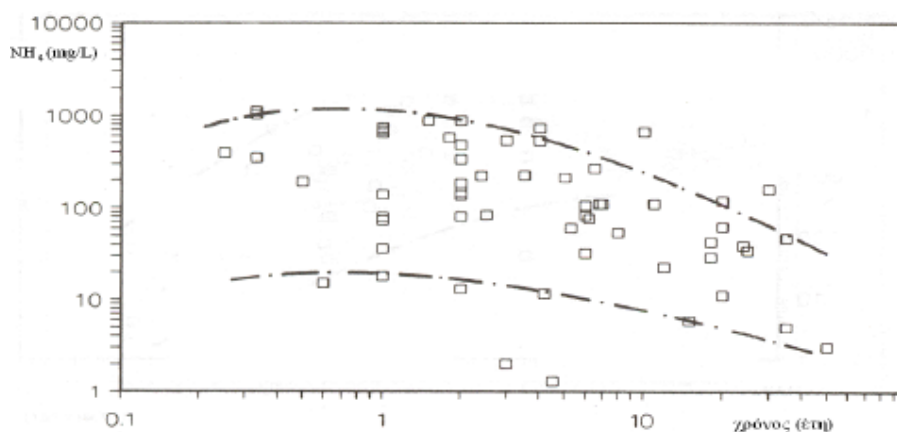


Διάγραμμα 6.7: Χρονική εξέλιξη pH.

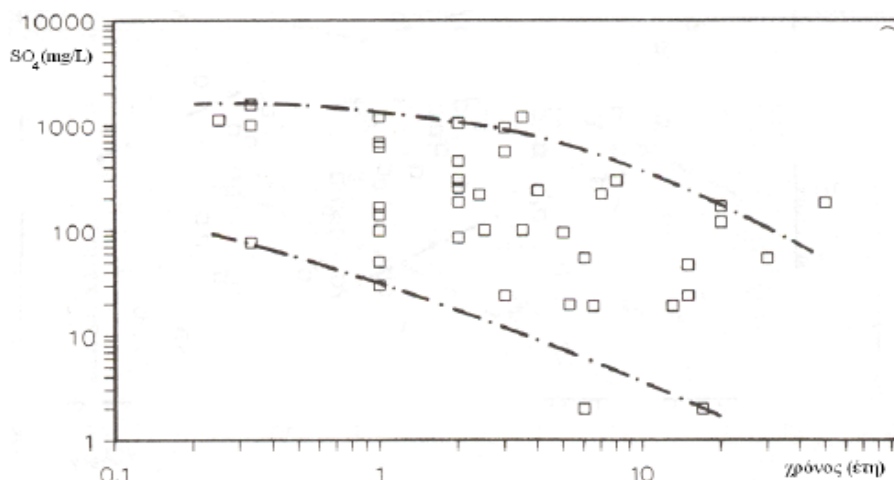
Γενικά, οι συγκεντρώσεις των οργανικών ενώσεων κατά το πέρασμα από την όξινη φάση στην φάση μεθανογένεσης σταδιακά μειώνονται. Όμοια, το pH παρουσιάζει μια τάση αύξησης, σύμφωνα με την εξέλιξη των βιοχημικών διαδικασιών, που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

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 την θεωρητική τάση του Διαγράμματος 6.8.

Παράλληλα, η συγκέντρωση των θεικών και των χλωριούχων σε ένα νέο ΧΥΤΑ είναι υψηλή. Η μείωση των σουλφιδίων σε ένα αναερόβιο περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των θεικών.

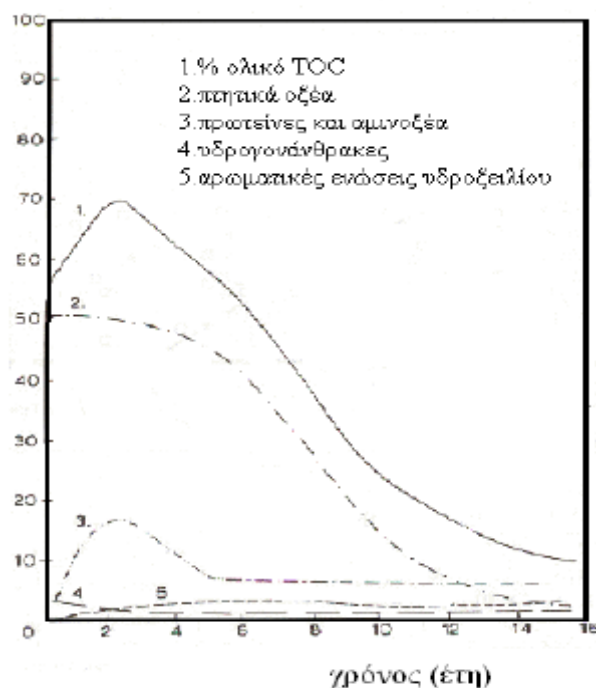


Διάγραμμα 6.8: Χρονική εξέλιξη NH_4 .



Διάγραμμα 6.9: Χρονική εξέλιξη SO_4 .

Η τάση του οργανικού τμήματος των στραγγισμάτων σε σχέση με την ηλικία του ΧΥΤΑ, εκφρασμένο ως ποσοστό του TOC, παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.10. 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 μετάλλων, 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 και κατά συνέπεια μείωση της διαλυτότητας των μετάλλων.



Διάγραμμα 6.10 Χρονική εξέλιξη TOC και άλλων παραμέτρων.

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.

6.3.5 Συστήματα μόνωσης και συλλογής

Η μεθοδολογία και τα βήματα, που πρέπει να ακολουθηθούν, για το σχεδιασμό συστημάτων συλλογής και απομάκρυνσης διασταλλαγμάτων είναι οι εξής:

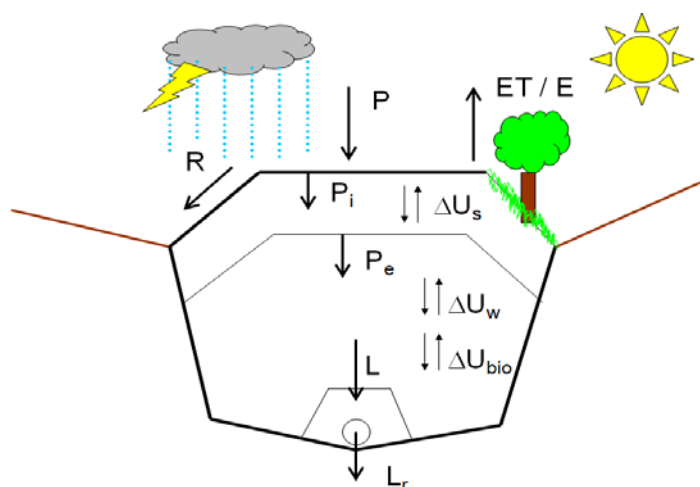
- ☐ Υπολογισμός παραγωγής διασταλλαγμάτων.
- ☐ Διαμόρφωση κλίσης της βάσης και τοποθέτηση των συστημάτων συλλογής – απαγωγής.
- ☐ Καθορισμός και επίτευξη κατάλληλης υδραυλικής αγωγιμότητας στραγγιστικής ζώνης.
- ☐ Διάταξη του συστήματος συλλογής και απομάκρυνσης διασταλλαγμάτων.
- ☐ Επιλογή και χαρακτηριστικά των αγωγών.
- ☐ Καθορισμός φρεατίων συλλογής και χώρων αποθήκευσης διασταλλαγμάτων.
- ☐ Μελέτη φαινομένων φραξίματος και διήθησης.

Η ποσότητα των παραγόμενων διασταλλαγμάτων (στραγγισμάτων) σε έναν χώρο ταφής απορριμμάτων εξαρτάται από:

- ☐ Τα χαρακτηριστικά του χώρου (π.χ. κλίση εδάφους).
- ☐ Τις κλιματικές και μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής (βροχοπτώσεις, μέση θερμοκρασία αέρα κλπ.).
- ☐ Τα φυσικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων (ποσοστά οργανικού κλάσματος, περιεχόμενη υγρασία κλπ.).
- ☐ Τα χαρακτηριστικά του συστήματος φραγμάτων (διαπερατότητα των υλικών κάλυψης και μόνωσης).
- ☐ Την αρχή λειτουργίας του ΧΥΤ (αναερόβιος, αερόβιος, ημι-αερόβιος).

- Την ποσότητα που φτάνει στον πυθμένα του ΧΥΤ και είναι σε θέση να εκτιμηθεί με διαφορετικούς τρόπους. Συνήθως υιοθετείται μια μονοδιάστατη ανάλυση κίνησης του νερού δια μέσου του υλικού τελικής κάλυψης και των διαδοχικών στρώσεων των συμπυκνωμένων αποβλήτων.

Η εκτίμηση της ποσότητας των παραγόμενων στραγγισμάτων μπορεί να γίνει βάσει του υδατικού ισοζυγίου ενός ΧΥΤ, όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6. Με βάση τους υπολογισμούς, η ποσότητα που φτάνει στον πυθμένα του ΧΥΤ προσεγγίζει τον όγκο των παραγόμενων διασταλλαγμάτων.



Σχήμα 6.6: Σχηματική απεικόνιση υδατικού ισοζυγίου ενός ΧΥΤ [Cossu, 2010].

- όπου: P = βροχόπτωση (mm/year)
 P_i = βροχόπτωση που διεισδύει στο υλικό κάλυψης (mm/year)
 P_e = βροχόπτωση που διεισδύει στο σώμα του ΧΥΤ (mm/year)
 R = επιφανειακή απορροή (mm/year)
 ET = εξατμισοδιαπνοή (mm/year)
 E = εξάτμιση (mm/year)
 L = διασταλλάγματα [σύνολο] (mm/year)
 L_r = διασταλλάγματα [συλλογή] (mm/year)
 ΔU_s = αλλαγή υγρασίας του υλικού κάλυψης (mm/year)
 ΔU_w = αλλαγή υγρασίας των απορριμμάτων (mm/year)
 ΔU_{bio} = νερό που καταναλώνεται ή παράγεται από την δράση των μ/ο (mm/year)

Με βάση τα παραπάνω και θεωρώντας αμελητέες τις διαρροές του συστήματος ($L=L_r$) προκύπτουν τα παρακάτω ισοζύγια:

$$P_i = P - R - ET/E \quad (6.1)$$

$$L_r = L = P - R - ET \pm \Delta U_s \pm \Delta U_w \pm \Delta U_{bio} \quad (6.2)$$

Ο όρος R (επιφανειακή απορροή), από τα παραπάνω, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R = C \cdot P \quad (6.3)$$

Ο αδιάστατος όρος C αντιπροσωπεύει το συντελεστή απορροής και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση 6.4. Πολλές φορές για λόγους απλοποίησης, ειδικά σε ξηρά κλίματα, ο όρος αυτός μπορεί να θεωρηθεί μηδέν.

$$C = a \cdot b_i \quad (6.4)$$

όπου: a = φυσική παράμετρος, που εξαρτάται από την ύπαρξη της τελικής κάλυψης, το υλικό που χρησιμοποιείται και την κλίση αυτής

b_i = φυσική παράμετρος, που εξαρτάται από την υγρασία του υλικού κάλυψης τους διάφορους μήνες του χρόνου

Τυπικές τιμές σχεδιασμού για τη παράμετρο a παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7: Τυπικές τιμές της μεταβλητής a [Cossu, 2010].

ΧΥΤ	Είδος υλικού κάλυψης	Κλίση υλικού κάλυψης		
		<5%	5-10%	>10%
Ανενεργός	αμμώδεις	0,05-0,10	0,10-0,15	0,15-0,20
	αργιλώδεις	0,13-0,17	0,18-0,22	0,25-0,35
Ενεργός	αμμώδεις	0,08-0,13	0,13-0,18	0,18-0,25
	αργιλώδεις	0,16-0,20	0,21-0,25	0,27-0,38

Ο όρος της εξατμισοδιαπνοής (ET) στις εξισώσεις (6.1) και (6.2) μπορεί να αντικατασταθεί με την εξάτμιση (E) στην περίπτωση που δεν υπάρχει βλάστηση (δέντρα, θάμνοι κλπ.) πάνω στο υλικό κάλυψης.

Σε μερικές περιπτώσεις τους “υγρούς” μήνες (όχι καλοκαίρι) η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να αντικατασταθεί με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή (Potential Evapotranspiration - PE). Η δυνητική είναι η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή που παρατηρείται σε μια επιφάνεια καλυμμένη με ομογενή βλάστηση με βέλτιστη παροχή νερού. Η εξατμισοδιαπνοή (συμπεριλαμβανομένης της δυνητικής) εξαρτάται από:

- Μετεωρολογικούς παράγοντες: άνεμος, θερμοκρασία, σχετική υγρασία.
- Εδαφικούς και βιοτικούς παράγοντες: είδος/κατάσταση βλάστησης, είδος του εδαφικού υλικού.

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση του THORNTWAITE:

$$PET_i = 16 \left(\frac{10T_i}{I_T} \right)^a \cdot C_i \quad (6.5)$$

όπου: PET_i = δυνητική εξατμισοδιαπνοή για τον μήνα i (mm/month)

T_i = μέση θερμοκρασία για τον μήνα i (°C)

I_T = δείκτης θερμότητας που προσδιορίζεται από την εξίσωση (6.6)

$$I_T = \sum_{i=01}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (6.6)$$

a = παράμετρος που εξαρτάται από το δείκτη θερμότητας (I_T) και προσδιορίζεται από την εξίσωση (8.7)

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I_T^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I_T^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I_T + 0,49239 \quad (6.7)$$

C_i = μηνιαίος συντελεστής προσαρμογής που εξαρτάται από τις ώρες ηλιοφάνειας του μήνα i και το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (Πίνακας 6.8)

Πίνακας 6.8: Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή C_i [Cossu, 2010].

Μήνας	Γεωγραφικό πλάτος		
	40°	45°	50°
Ιανουάριος	0.8	0.77	0.71
Φεβρουάριος	0.89	0.88	0.83
Μάρτιος	0.99	0.99	0.98
Απρίλιος	1.11	1.12	1.14
Μάιος	1.2	1.23	1.28
Ιούνιος	1.25	1.3	1.36
Ιούλιος	1.23	1.28	1.33
Αύγουστος	1.14	1.18	1.2
Σεπτέμβριος	1.04	1.05	1.05
Οκτώβριος	0.93	0.91	0.89
Νοέμβριος	0.83	0.8	0.75
Δεκέμβριος	0.78	0.73	0.68

Στην περίπτωση των καλοκαιρινών μηνών η εφαρμογή της εξίσωσης (6.5) για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής μπορεί να επιφέρει σημαντικά σφάλματα. Σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να εφαρμοστεί η παρακάτω εξίσωση (6.8) για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής (ET).

$$ET = PE \cdot U / FC \quad (6.8)$$

όπου: U = πραγματική υγρασία του εδάφους (% w/w)

FC = υδατοϊκανότητα του εδάφους (% w/w)

Αντίθετα, στην περίπτωση μη ύπαρξης βλαστησης, η εξάτμιση υπολογίζεται από την εξίσωση του TURC:

$$E = \frac{P + a}{\sqrt{1 + \frac{P + a}{L}}} \quad (6.9)$$

όπου: E = εξάτμιση 10 ημερών (mm)

P = μέση βροχόπτωση 10 ημερών (mm)

α = παράμετρος που εξαρτάται από τη συχνότητα βροχοπτώσεων και προσδιορίζεται από την εξίσωση (6.10)

$$\alpha = 10 - 0,01 * \sqrt{t} \quad (6.10)$$

t = χρόνος από την τελευταία βροχόπτωση (s)

L = ηλιοθερμικός παράγοντας

Ο υπολογισμός του ηλιοθερμικού παράγοντα μπορεί να γίνει από την εξίσωση (8.11) που ακολουθεί.

$$L = \frac{1}{16}(T+2)\sqrt{I_g} \quad (6.11)$$

όπου: T = μέση θερμοκρασία (°C)

I_g = πραγματική μέγιστη ακτινοβολία (cal/cm²/day) που προσδιορίζεται από την εξίσωση (6.12)

$$I_g = I_0(0.18 + 0.62 * n/N) \quad (6.12)$$

όπου: I_0 = θεωρητική μέγιστη ακτινοβολία (cal/cm²/day) (Πίνακας 6.9)

N = θεωρητικό μέγιστο ωρών ηλιακής ακτινοβολίας (h) (Πίνακας 6.10)

n = πραγματικές ώρες ηλιακής ακτινοβολίας (h)

Γνωρίζοντας όλα τα παραπάνω, μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα του νερού που διεισδύει στο σώμα ενός XYT, η οποία όμως ποσότητα δεν ισούται με την ποσότητα των παραγόμενων στραγγισμάτων. Η απορριμματική μάζα έχει την ικανότητα να απορροφάει και να κατακρατάει τα εισερχόμενα ύδατα. Αυτός ο μηχανισμός χαρακτηρίζεται με τον όρο υδατοϊκανότητα (Field Capacity). Το νερό μπορεί να διαπεράσει το στρώμα ενός υλικού μόνο όταν η ιδατοϊκανότητά του θα ξεπεράσει τα 100%. Έχει παρατηρηθεί πως στην περίπτωση των απορριμμάτων, ενός σχετικά διαπερατού υλικού, το νερό μπορεί να διαπεράσει τη μάζα σε επίπεδα υδατοϊκανότητας > 50%.

Πίνακας 6.9: Ενδεικτικές τιμές θεωρητικής μέγιστης ακτινοβολίας I_0 (cal/cm²/day) [Cossu, 2010].

Μήνας	Γεωγραφικό πλάτος		
	40°	45°	50°
Ιανουάριος	365	293	220
Φεβρουάριος	495	425	354
Μάρτιος	655	600	545
Απρίλιος	815	783	750
Μάιος	940	928	915
Ιούνιος	985	983	980
Ιούλιος	960	955	950
Αύγουστος	865	838	810
Σεπτέμβριος	715	665	615
Οκτώβριος	550	485	420
Νοέμβριος	400	330	260
Δεκέμβριος	330	255	180

Πίνακας 6.10: Ενδεικτικές τιμές θεωρητικού μεγίστου ωρών ηλιακής ακτινοβολίας N, h [Cossu, 2010].

Μήνας	Γεωγραφικό πλάτος		
	40°	45°	50°
Ιανουάριος	9.60	9.24	8.52
Φεβρουάριος	10.68	10.56	9.96
Μάρτιος	11.88	11.88	11.76
Απρίλιος	13.32	13.44	13.68
Μάιος	14.40	14.76	15.36
Ιούνιος	15.00	15.60	16.32
Ιούλιος	14.76	15.36	15.96
Αύγουστος	13.68	14.16	14.40
Σεπτέμβριος	12.48	12.60	12.60
Οκτώβριος	11.16	10.92	10.68
Νοέμβριος	9.96	9.60	9.00
Δεκέμβριος	9.36	8.76	8.16

Η υδατοϊκανότητα μπορεί να υπολογιστεί από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο (6.13).

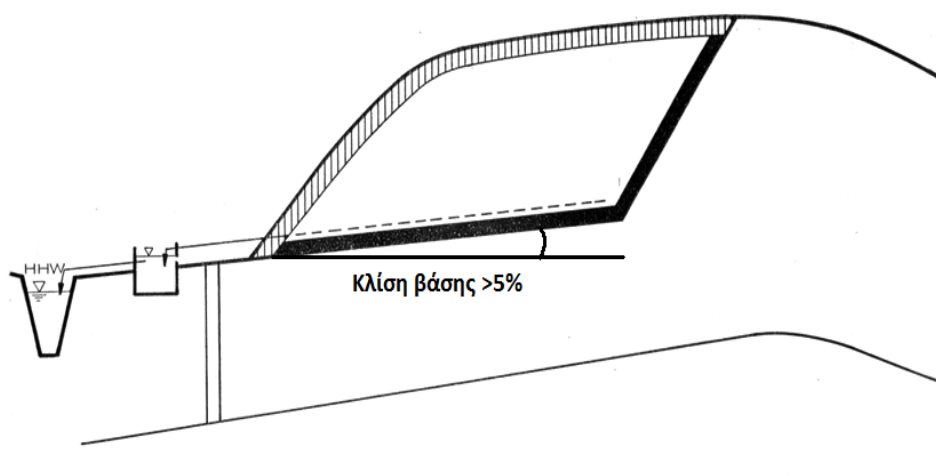
$$FC = 0.6 - 0.55 \frac{W}{4535 + W} \quad (6.13)$$

όπου: FC = υδατοϊκανότητα των απορριμμάτων (% ξηρού βάρους)

W = μέση πυκνότητα των απορριμμάτων (kg/m³)

6.3.5.1 Κλίση βάσης και τοποθέτηση συστημάτων

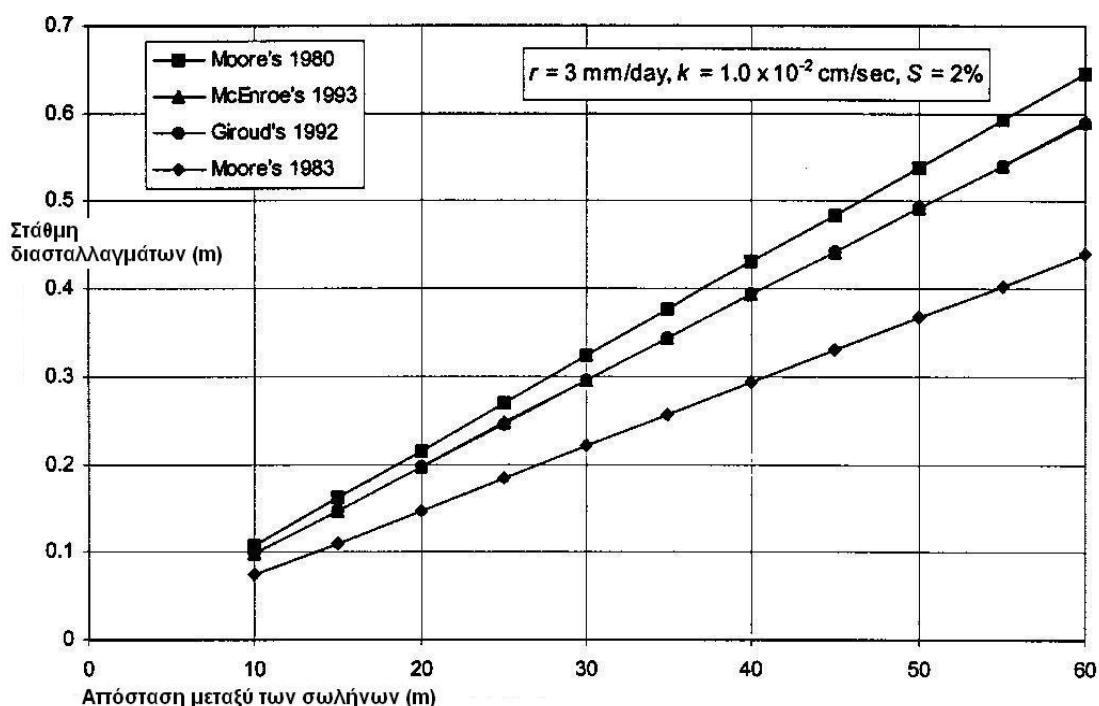
Για να αποφευχθεί η συσσώρευση των στραγγισμάτων στον πυθμένα του ΧΥΤ και η κατά συνέπεια επακόλουθη ρευστοποίηση της απορριμματικής μάζας, σε όλα τα σημεία της βάσης πρέπει να υφίσταται μια ελάχιστη κλίση 5% (Σχήμα 6.7), η οποία θα πρέπει να διατηρηθεί και μετά το κλείσιμο του ΧΥΤ. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος είναι απαραίτητη η γεωτεχνική μελέτη της περιοχής, που θα προσδιορίσει την συμπίεστικότητα του υπεδάφους και την επιλογή της αρχικής κλίσης της βάσης.



Σχήμα 6.7: Σχηματική απεικόνιση κυττάρου ενός ΧΥΤ.

Σε εξαιρετικές περιπτώσεις, για αδιαπέρατα εδάφη ή πολύ σκληρά γεωλογικά υλικά (οπου οι καθιζήσεις είναι αμελητέες), μπορεί να χρησιμοποιηθεί κλίση <5%, αλλά και περισσότεροι σωλήνες συλλογής με στραγγιστική ζώνη μεγαλύτερης διαπερατότητας, έτσι ώστε η μέγιστη στάθμη των διασταλλαγμάτων να μην υπερβαίνει μια ορισμένη τιμή (~30cm).

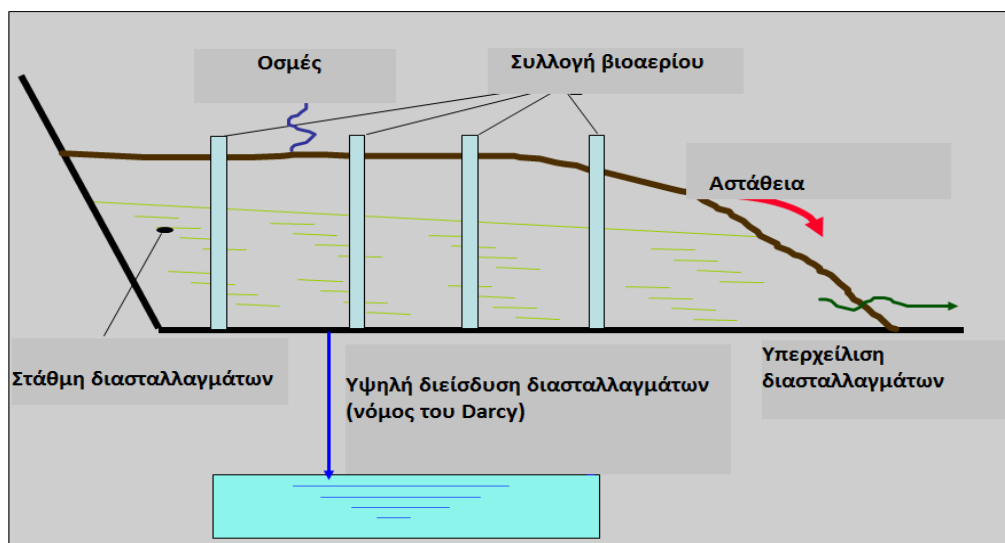
Η τοποθέτηση των σωλήνων συλλογής – απαγωγής εξαρτάται από το μέγεθος του κυττάρου. Ως γενικός κανόνας ισχύει το μέγιστο μήκος ροής σε ένα σωλήνα να μην υπερβαίνει τα 60m. Η Ελληνική νομοθεσία καθορίζει ότι οι αγωγοί συλλογής θα πρέπει να τοποθετούνται στο κατώτερο επίπεδο της στραγγιστικής στρώσης και να έχουν κλίση $\geq 5\%$. Οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών συνήθως δεν υπερβαίνουν τα 40m. Όπως προκύπτει και από το Διάγραμμα 6.11 η αύξηση στην απόσταση των σωλήνων επιφέρει αύξηση της στάθμης των διασταλλαγμάτων.



Διάγραμμα 6.11: Σχέση της στάθμης των στραγγισμάτων και της απόστασης των αγωγών συλλογής για δεδομένες τιμές ρυθμού εισροής στραγγισμάτων (r), υδραυλικής αγωγιμότητας (k) και κλίσης αποστραγγιστικού στρώματος (S) [Qian et al., 2004].

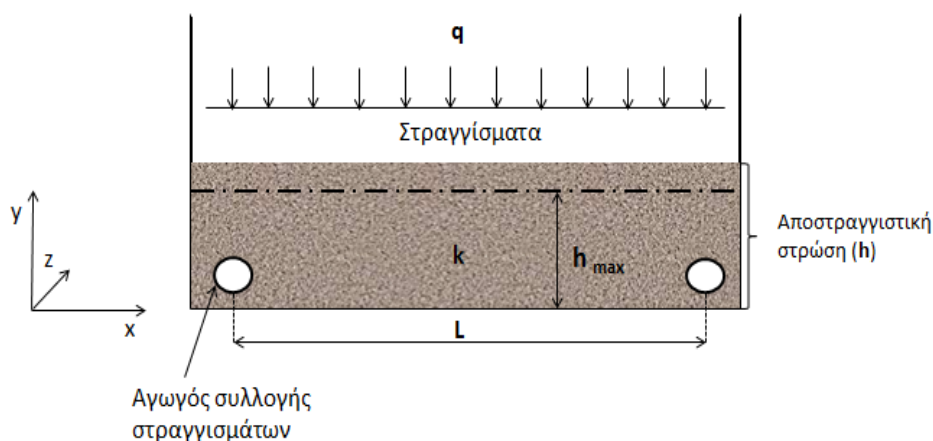
Η αύξηση της στάθμης των διασταλλαγμάτων, από την άλλη, μπορεί να επιφέρει πληθώρα προβλημάτων (Σχήμα 6.8), όπως:

- ☐ Μεγαλύτερη πιθανότητα διείσδυσης των διασταλλαγμάτων στον υπόγειο υδροφόρο.
- ☐ Μηχανική αστάθεια της απορριμματικής μάζας.
- ☐ Εισχώρηση των διασταλλαγμάτων στο σύστημα συλλογής βιοαερίου.
- ☐ Οσμές.



Σχήμα 6.8: Σχηματική απεικόνιση κυττάρου ενός XYT [Cossu, 2010].

Η απλούστερη μέθοδος υπολογισμού της ροής σε ένα σύστημα συλλογής είναι να υποθεθεί ότι δεν υφίσταται κλίση μεταξύ των αγωγών συλλογής διασταλλαγμάτων. Αυτή η απλοποιημένη περίπτωση είναι ανάλογη της μεθόδου που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.9. Η μέθοδος αυτή υποθέτει μια επίπεδη ορθογώνια αποστραγγιστική στρώση πάχους h και ολικού πλάτους L , που υπέρκειται ενός αδιαπέρατου φραγμού και δέχεται διασταλλάγματα με ομοιόμορφη κατείσδυση q . Στα δυο άκρα της αποσταγγιστικής στρώσης υπάρχουν δυο αγωγοί συλλογής. Προς αποφυγή της ρευστοποίησης και της αστάθειας του αποστραγγιστικού στρώματος (και του υπερκείμενου στρώματος των απορριμμάτων) η στάθμη των στραγγισμάτων δεν πρέπει να ξεπερνάει τη μέγιστη τιμή της ($h_{\max}$).



Σχήμα 6.9: Απλουστευμένο οριζόντιο σύστημα συλλογής στραγγισμάτων.

Εάν, με βάση τη διάταξη, που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.9, το ήμισυ των στραγγισμάτων ρέει προς τον ένα σωλήνα και το άλλο ήμισυ προς τον άλλο, η ποσότητα που συλλέγεται σε κάθε σωλήνα είναι:

$$Q = q \cdot \frac{L}{2} \quad (6.14)$$

όπου: Q = ποσότητα στραγγισμάτων που συλλέγεται στον κάθε αγωγό (m^3/s)
 q = ρυθμός ομοιόμορφης κατείσδυσης στραγγισμάτων στο από-
στραγγιστικό στρώμα (m^2/s)
 L = απόσταση μεταξύ των αγωγών συλλογής στραγγισμάτων (m)

Η εφαρμογή του νόμου του DARCY στην αποστραγγιστική ζώνη του Σχήματος 6.9 για επιφάνεια κάθετη προς τη ροή με μοναδιαίο πλάτος (δηλαδή $z = 1$), δίδει:

$$q_1 = k \cdot \frac{h_{max}}{\frac{1}{2} \cdot L} \cdot h_{max}$$

ή

$$q_1 = k \cdot \frac{2 \cdot h_{max}^2}{L} \quad (6.15)$$

όπου: q_1 = μοναδιαία παροχή των στραγγισμάτων [$q_1 = Q/W$, όπου W είναι το πλάτος της αποστραγγιστικής στρώσης] (m^2/s)
 k = υδραυλική αγωγιμότητα του αποστραγγιστικού στρώματος (m/s)
 h_{max} = μέγιστη επιτρεπτή στάθμη των στραγγισμάτων (m)

Συνδυάζοντας τις δυο παραπάνω εξισώσεις (Εξίσωση 6.14 και 6.15) προκύπτει η Εξίσωση 6.16:

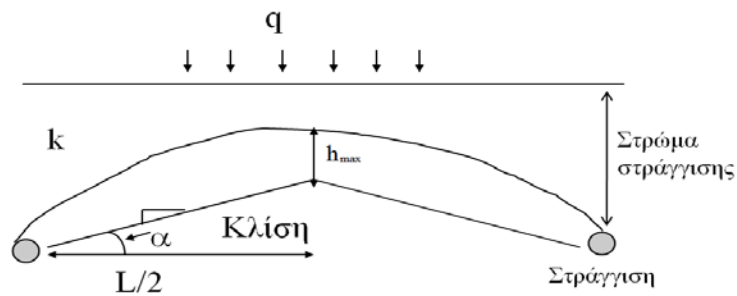
$$L = 2 \cdot h_{max} \cdot \sqrt{\frac{k}{q}} \quad (6.16)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η απόσταση δύο αγωγών συλλογής, ώστε να διατηρηθεί μέγιστο ύψος διασταλλαγμάτων $h_{\max}$.

Η πτυχωτή βάση ενός XYT διεκολύνει τη ροή των διασταλλαγμάτων προς τους σωλήνες συλλογής (Σχήμα 6.10). Η διαμόρφωση αυτή είναι πιο αποτελεσματική και συνηθέστερη από την οριζόντια. Χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση με αυτήν του οριζόντιου φραγμού η απόσταση μεταξύ των αγωγών συλλογής καθορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L = \frac{2 \cdot h_{\max}}{\sqrt{c \left[\frac{\tan^2 \alpha}{c} + 1 - \frac{\tan \alpha}{c} (\tan^2 \alpha + c)^{\frac{1}{2}} \right]}} \quad (6.17)$$

- όπου: L = απόσταση μεταξύ των αγωγών (m)
 $h_{\max}$ = μέγιστη στάθμη διασταλλαγμάτων (m)
 α = γωνία κλίσης του πυθμένα ($^\circ$)
 c = q/k (m)
 q = μοναδιαίος ρυθμός διήθησης των στραγγισμάτων (m^2/s)
 k = υδραυλική αγωγιμότητα (συντελεστής διαπερατότητας) της από-στραγγιστικής στρώσης (m/s)



Σχήμα 6.10: Σύστημα συλλογής στραγγισμάτων πτυχωτής βάσεως [Reinhart, 2012].

6.3.5.2 Υδραυλική αγωγιμότητα στραγγιστικής ζώνης

Η υδραυλική αγωγιμότητα της στραγγιστικής ζώνης εξαρτάται από:

- ☐ Τη μέγιστη στάθμη των διασταλλαγμάτων.
- ☐ Την κλίση της βάσης.
- ☐ Τον ρυθμό παραγωγής διασταλλαγμάτων.

Η μέγιστη στάθμη των διασταλλαγμάτων μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση του McENROE:

$$h_{\max} = \frac{L}{2} \cdot \sqrt{\frac{q}{k}} \left[\frac{k \cdot \tan^2 \alpha}{q} + 1 - \frac{k \cdot \tan \alpha}{q} \left(\tan^2 \alpha + \frac{q}{k} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (6.18)$$

- όπου: $h_{\max}$ = μέγιστη στάθμη διασταλλαγμάτων (m)
 L = μήκος αποστράγγισης [απόσταση μεταξύ των σωλήνων] (m)
 α = γωνία κλίσης του πυθμένα ($^{\circ}$)
 q = μοναδιαίος ρυθμός διήθησης των στραγγισμάτων (m^2/s)
 k = συντελεστής διαπερατότητας της αποστραγγιστικής στρώσης (m/s)

6.3.5.3 Επιλογή και χαρακτηριστικά των αγωγών

Η επιλογή των κατάλληλων αγωγών για την συλλογή των διασταλλαγμάτων βασίζεται:

- ☐ Στον τύπο του διασταλλάγματος.
- ☐ Στην παροχή.
- ☐ Στην αντοχή του υλικού στις συνθήκες ΧΥΤ.
- ☐ Στις απαιτήσεις της εγκατάστασης των σωλήνων.
- ☐ Στο κόστος.

Η επιλογή των χαρακτηριστικών των αγωγών αφορά:

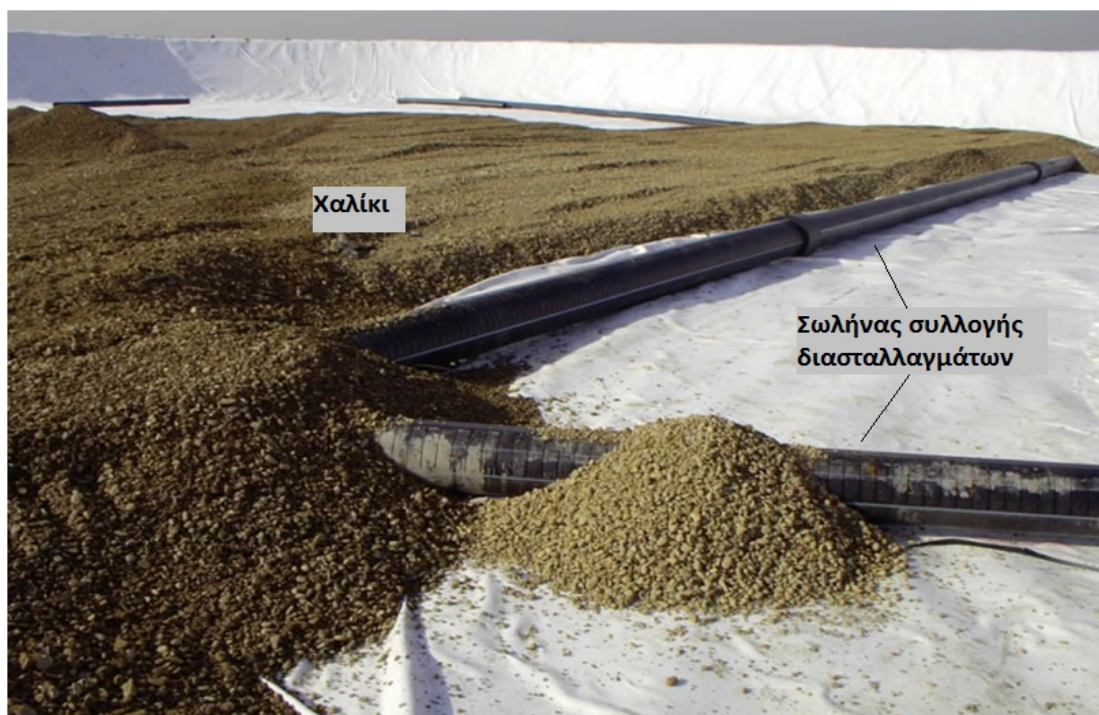
- ☐ Στο υλικό.
- ☐ Στη διάμετρο.
- ☐ Στο πάχος του τοιχώματος.
- ☐ Στη συχνότητα των οπών των σωλήνων.

Κατά κανόνα οι αγωγοί συλλογής των διασταλλαγμάτων κατασκευάζονται από PVC ή HDPE, λόγω σχετικά χαμηλού κόστους και υψηλής αντοχής στις μηχανικές καταπονήσεις και διάβρωση. Η διάμετρος των αγωγών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την παροχή σχεδιασμού και μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση του

Manning (Εξίσωση 6.19). Συνήθως χρησιμοποιούνται σωληνώσεις διαμέτρου $> 200\text{mm}$, αποφεύγοντας έτσι το φράξιμο και προσφέροντας δυνατότητα *in situ* ελέγχου (π.χ. με βιντεοκάμερα). Το μήκος των αγωγών, από την άλλη, δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 150 μέτρα διευκολύνοντας τη συντήρηση και τον καθαρισμό. Επίσης, το πάχος τοιχώματος του αγωγού εξαρτάται από το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων (απορρίμματα, υλικό επικάλυψης κλπ.) και την εφαρμοζόμενη πίεση καθαρισμού.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (6.19)$$

- όπου: Q = παροχή σχεδιασμού (m^3/s)
 n = συντελεστής τραχύτητας
 A = εμβαδό βρεχομένης διατομής (m^2)
 R_h = υδραυλική ακτίνα = A/P (m)
 P = βρεχόμενη περίμετρος (m)
 S = κλίση του αγωγού (m/m)



Εικόνα 6.1: Κάλυψη αγωγών συλλογής στραγγισμάτων [Cossu, 2010].



Εικόνα 6.2: Σύνδεση αγωγού συλλογής με αγωγό μεταφοράς στραγγισμάτων [Cossu, 2010].

6.3.5.4 Φράξιμο και διήθηση

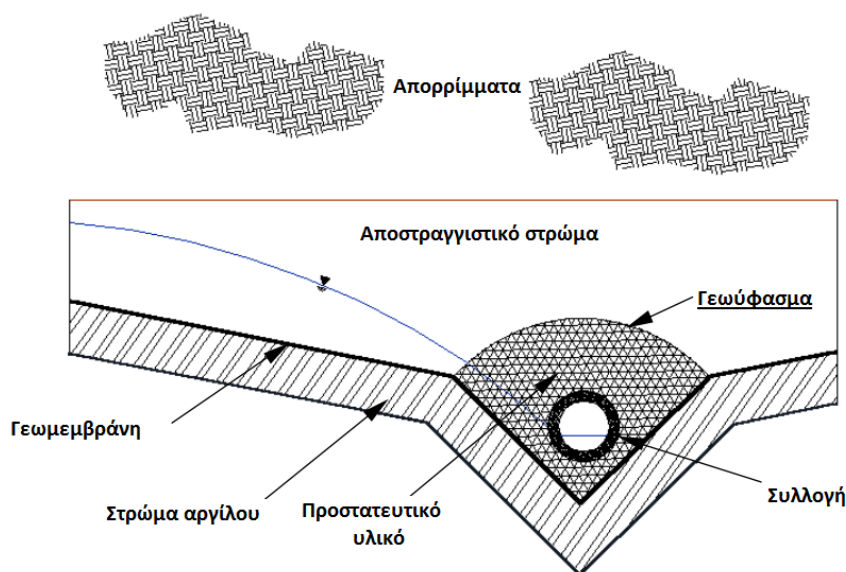
Ένα σύστημα συλλογής – απαγωγής διασταλλαγμάτων ενδέχεται να φράξει από φυσικές, χημικές και βιολογικές αιτίες.

- Το φράξιμο από φυσικές αιτίες οφείλεται στη μεταφορά λεπτόκοκκων υλικών μέσα σε χονδρόκοκκα, με αποτέλεσμα τη μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας.
- Το φράξιμο από χημικές αιτίες οφείλεται στην καταβύθιση χημικών ουσιών, π.χ. ανθρακικό ασβέστιο. Για αυτό το λόγο το αποστραγγιστικό υλικό πρέπει να είναι αδρανές και να μην περιέχει συστατικά, όπως ο ασβεστόλιθος, που αντιδρά με τα διασταλλάγματα.
- Το βιολογικό φράξιμο οφείλεται στην ανάπτυξη βιοφίλμ (ενός λεπτού βλεννογόνου υμένα από βακτήρια, μύκητες και φύκη), λόγω των θρεπτικών που περιέχουν τα διασταλλάγματα.

Ελαγιστοποίηση του φραξίματος

- Από φυσικές αιτίες: χρησιμοποιούνται φίλτρα από έδαφος ή γεωφάσμα. Συνήθως τοποθετείται στρώση στρώματος πάχους 30-60cm επάνω από το αποστραγγιστικό υλικό. Συχνά τοποθετείται φίλτο γεωφάσματος μεταξύ της αποστραγγιστικής ζώνης και του προστατευτικού εδάφους (Σχήμα 6.11).
- Δεν υπάρχει καθιερωμένος τρόπος αποτροπής του χημικού και του βιολογικού φραξίματος. Έχει παρατηρηθεί εξάρτηση του σχηματισμού βιοφίλμ και της ηλικίας του ΧΥΤ, όπως επίσης και της αρχής λειτουργίας του (αναερόβιος, αερόβιος κλπ.).

Οι διάτρητοι αγωγοί δεν πρέπει να τυλίγονται απ'ευθείας με γεωφάσμα, διότι αυτό μπορεί να φράξει και κατ'έκταση να εμποδίσει και τη ροή στους σωλήνες συλλογής.



Σχήμα 6.11: Τομή συστήματος συλλογής στραγγισμάτων [Reinhart et al., 1998].

6.3.5.5 Διαρροές μόνωσης

Αν και μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε όλα τα είδη των ΧΥΤ έχουν ως σκοπό τον περιορισμό της υδάτινης ρύπανσης, που μπορεί να προκληθεί από την κίνηση των στραγγισμάτων, πρέπει να γίνεται αντιληπτό πως κανένα σύστημα (φυσικής ή μηχανικής φύσεως) δεν επιτυγχάνει απόδοση 100%. Οι διαρροές, που

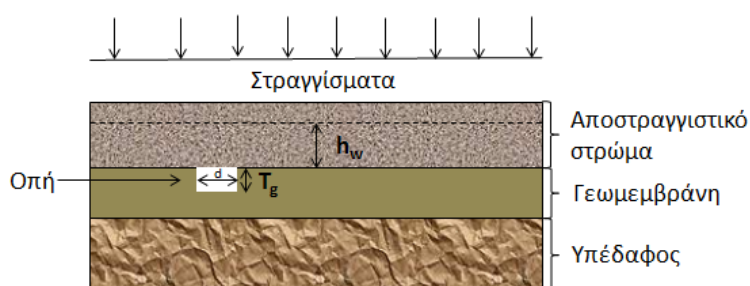
μπορεί να παρουσιαστούν σε ένα (ή περισσότερα) μονωτικό, συνήθως οφείλονται στις αστοχίες κατά την εφαρμογή του υλικού, στην φθορά του υλικού ή στις αστοχίες που προκαλούνται από τις μηχανικές καταπονήσεις του υλικού.

Στη συνέχεια ακολουθούν διάφορες μαθηματικές εξισώσεις που έχουν επικρατήσει ήδη για τον προσδιορισμό των διαρροών μόνωσης.

Η ροή υγρού μέσω των μικρών οπών, δηλαδή όταν το βάθος των παρατηρούμενων οπών είναι μικρότερο από το πάχος της γεωμεμβράνης (Σχήμα 6.12), θεωρείται ανάλογη με τη ροή μέσω σωλήνα και χρησιμοποιείται η εξίσωση POISEUILLE για την περιγραφή της:

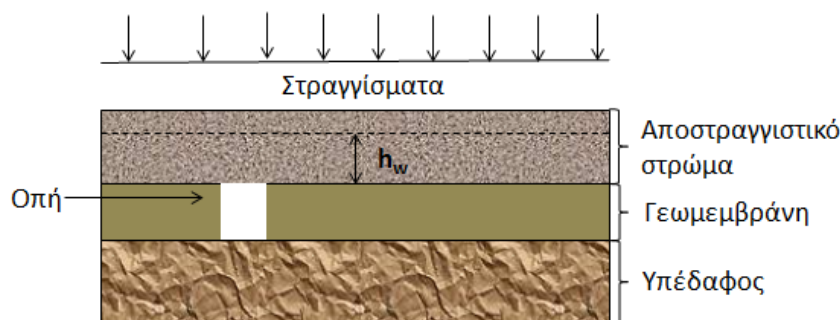
$$Q = \frac{\pi \cdot \rho \cdot g \cdot h_w \cdot d^4}{128 \cdot \mu \cdot T_g} \quad (6.20)$$

- όπου: Q = διαρροή μέσω οπής μικρού μεγέθους (m^3/s)
 ρ = πυκνότητα υγρού (Kg/m^3)
 g = επιτάχυνση βαρύτητας ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$)
 h_w = βάθος υγρού επάνω από τη γεωμεμβράνη (m)
 d = διάμετρος οπής (m)
 μ = δυναμικό ιξώδες υγρού ($\text{Kg}/\text{m s}$)
 T_g = βάθος οπής (m)



Σχήμα 6.12: Διαρροές μόνωσης μέσω μικρών οπών της γεωμεμβράνης.

Η ροή υγρού μέσω μιας οπής μεγάλου μεγέθους, δηλαδή όταν το βάθος των παρατηρούμενων οπών είναι ίσο με το πάχος της γεωμεμβράνης (Σχήμα 6.13), επηρεάζεται από τη διαπερατότητα των υλικών που βρίσκονται σε αμφοτέρω μέρη της γεωμεμβράνης. Εάν υποτεθεί ότι υφίσταται άπειρη διαπερατότητα, ισχύει η εξίσωση του BERNOULLI:



Σχήμα 6.13: Διαρροές μόνωσης μέσω οπών μεγάλου μεγέθους της γεωμεμβράνης.

$$Q = C_B \cdot \sqrt[3]{2 \cdot g \cdot h_w} \quad (6.21)$$

- όπου: Q = διαρροή μέσω οπής μεγάλου μεγέθους (m^3/s)
 C_B = αδιάστατος συντελεστής, που εξαρτάται από το σχήμα του ανοίγματος (για αιχμηρό στόμιο ανοίγματος, $C_B = 0.6$)
 α = επιφάνεια οπής (m^2)
 g = επιτάχυνση βαρύτητας (9.81 m/s^2)
 h_w = βάθος υγρού επάνω από τη γεωμεμβράνη (m)

Σε γενικές γραμμές, σε ελαττώματα γεωμεμβρανών ισχύουν οι κάτωθι παραδοχές [Giround and Bonaparte, 1989]:

- ❑ Συχνότητα μιας οπής ανά δέκα στρέμματα αντιστοιχεί σε καλό έλεγχο ποιότητας και συχνότητα ≥ 10 οπών ανά δέκα στρέμματα αντιστοιχεί σε κακό έλεγχο ποιότητας.
- ❑ Για προβλήματα σχεδιασμού συστημάτων συλλογής και απομάκρυνσης διασταλλαγμάτων και μόνωσης, η διατομή μιας μεγάλης οπής δύναται να θεωρηθεί ως 1 cm^2 .
- ❑ Για τον υπολογισμό διαρροών κάτω από κανονικές συνθήκες πεδίου η διατομή μιας οπής δύναται να θεωρηθεί ως μικρή, δηλαδή 0.03 cm^2 .

Διαρροές μέσω σύνθετης γεωμεμβράνης

Σε μια σύνθετη μόνωση γεωμεμβράνη – αργιλικό φράγμα, το νερό διέρχεται πρώτα από μια οπή της γεωμεμβράνης, κατόπιν ακολουθεί την πορεία στη διεπιφάνεια μεταξύ της μεμβράνης και αργιλικού φραγμού και τελικά κινείται προς τα κάτω μέσω του φραγμού.

Η απολύτως ελάχιστη διαρροή παρατηρείται όταν υφίσταται κατακόρυφη ροή προς τα κάτω μέσω της γεωμεμβράνης και της αργίλου. Αυτό προϋποθέτει τέλεια επαφή αργίλου-μεμβράνης και η ακτίνα ροής ισούται με την ακτίνα της οπής.

Ισχύει η ακόλουθη σχέση:

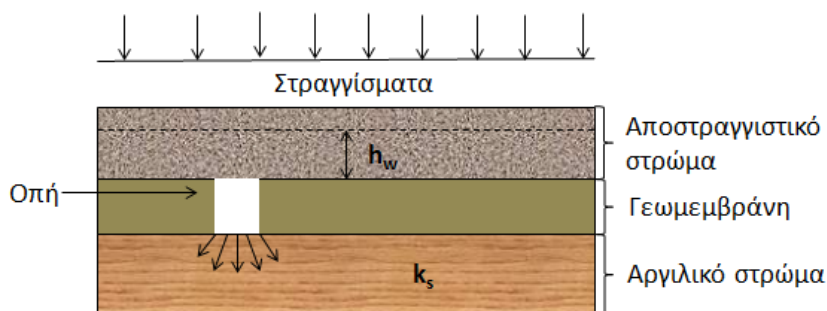
$$Q = \frac{k_s \cdot a \cdot (h_w + h_s)}{h_s} \quad \text{και } R = d/2 \quad (6.22)$$

όπου: Q	= διαρροή (m ³ /s)
R	= ακτίνα της διαβρεχόμενης περιοχής (m)
k _s	= υδραυλική αγωγιμότητα αργίλου (m/s)
a	= διατομή οπής (m)
h _w	= βάθος υγρού επάνω από τη γεωμεμβράνη (m)
d	= διάμετρος οπής (m)
h _s	= πάχος αργιλικής στρώσης (m)

Σε περίπτωση τέλει επαφής μεταξύ γεωμεμβράνης και αργίλου και υποθέτοντας τρισδιάστατη ακτινική ροή (Σχήμα 6.14), το ανώτερο όριο διαρροής υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση:

$$Q = \pi \cdot k_s \cdot h_w \cdot d \quad (6.23)$$

όπου: Q	= διαρροή (m ³ /s)
k _s	= υδραυλική αγωγιμότητα αργίλου (m/s)
h _w	= βάθος υγρού επάνω από τη γεωμεμβράνη (m)
d	= διάμετρος οπής (m)



Σχήμα 6.14: Διαρροές στραγγισμάτων μέσω σύνθετης μόνωσης: Περίπτωση τέλει επαφής γεωμεμβράνης - αργιλικού στρώματος.

Για εξαιρετικά καλή επαφή γεωμεμβράνης αργίλου, κάτι που αντιστοιχεί στις καλύτερες συνθήκες πεδίου, ισχύουν οι εξής εμπειρικές σχέσεις:

$$Q = 0.7 \cdot a^{0.1} \cdot k_s^{0.88} \cdot h_w \quad (6.24)$$

$$R = 0.5 \cdot a^{0.05} \cdot k_s^{0.06} \cdot h_w^{0.5} \quad (6.25)$$

όπου: a = επιφάνεια οπής (m^2)

R = ακτίνα της διαβρεχόμενης περιοχής (m)

Η απολύτως μέγιστη διαρροή προϋποθέτει όμως ελεύθερη ροή μέσω της οπής, που προέρχεται από το μεγάλο κενό μεταξύ μεμβράνης και αργιλίου (Σχήμα 6.15) και ισχύει:

$$Q = C_B \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_w} \quad (6.26)$$

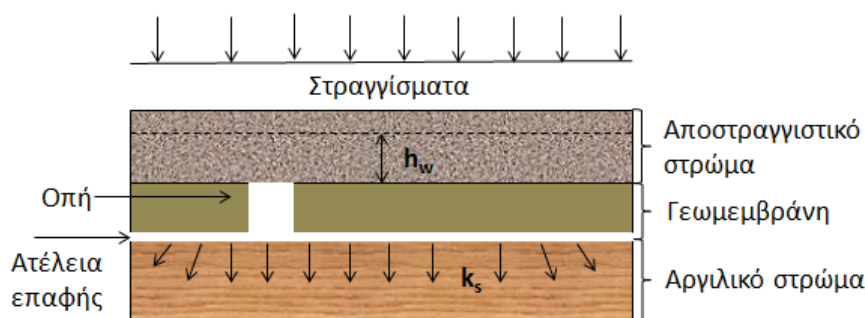
$$R = 0.39 \cdot d \cdot (2 \cdot g \cdot h_w)^{0.25} \cdot k_s^{-0.5} \quad (6.27)$$

όπου: C_B = αδιάστατος συντελεστής, εξαρτάται από το σχήμα του ανοίγματος (για αιχμηρό στόμιο ανοίγματος, $C_B = 0.6$)

a = επιφάνεια οπής (m^2)

R = ακτίνα της διαβρεχόμενης περιοχής (m)

d = διάμετρος οπής (m)



Σχήμα 6.15: Διαρροές στραγγισμάτων μέσω σύνθετης μόνωσης: Περίπτωση ύπαρξης ατελειών στην επαφή γεωμεμβράνης - αργιλικού στρώματος.

Τα συμπεράσματα, που προκύπτουν για τις διαρροές γεωμεμβράνης – αργιλικό στρώμα, είναι τα ακόλουθα:

- ❑ Για όλες τις υδραυλικές στάθμες, αλλά ειδικότερα για στάθμες < 0.3 cm, οι αργιλικοί φραγμοί και οι γεωμεμβράνες χωριστά παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη διαρροή από σύνθετους φραγμούς.
- ❑ Για ακέραιες γεωμεμβράνες, από μόνες τους οι διαρροές μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες για πιέσεις τυπικές σε εφαρμογές ΧΥΤ. Όμως, οι διαρροές μέσω γεωμεμβράνης αποτελούν ένα σημαντικό κλάσμα των ολικών διαρροών μέσω σύνθετης μόνωσης.
- ❑ Για όλες τις υδραυλικές στάθμες, οι γεωμεμβράνες με μεγάλες οπές διαρρέουν περισσότερο από ότι οι αργιλικοί φραγμοί ή οι σύνθετοι φραγμοί.

6.4 Βιοαέριο

6.4.1 Παραγωγή

Το βιοαέριο σχηματίζεται με τρεις διεργασίες: τη μικροβιακή αποδόμηση των απορριμμάτων, την εξάτμιση και τις χημικές αντιδράσεις.

- ❑ Μικροβιακή αποδόμηση. Η μεγαλύτερη ποσότητα του βιοαερίου παράγεται μέσω της μικροβιακής αποδόμησης των απορριμμάτων, που συμβαίνει όταν το οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων αποδομείται από τα αυτόχθονα βακτήρια, που υπάρχουν στα απορρίμματα και στο χώμα με το οποίο

καλύπτονται σε καθημερινή βάση. Το οργανικό κλάσμα περιλαμβάνει τροφές, απορρίμματα κήπου, προϊόντα χαρτιού και ξύλου, υφάσματα και ακαθαρσίες από δρόμους. Τα βακτήρια αποδομούν τα οργανικά απορρίμματα σε πέντε φάσεις και η σύσταση του βιοαερίου αλλάζει κατά τη διάρκεια της κάθε φάσης.

- ❑ Εξάτμιση. Αέρια σε ΧΥΤΑ μπορούν να δημιουργηθούν όταν ορισμένα είδη απορριμμάτων, ιδιαίτερα οργανικές ενώσεις, μετατραπούν από υγρή ή στερεή μορφή σε ατμούς. Η διεργασία αυτή είναι γνωστή ως εξάτμιση. Οι μη μεθανογενείς οργανικές ενώσεις (NMOCs), που συναντώνται στο βιοαέριο, προέρχονται συνήθως από την εξάτμιση ορισμένων χημικών, που περιέχονται στα απορρίμματα.
- ❑ Χημικές αντιδράσεις. Το βιοαέριο, συμπεριλαμβανομένων των NMOCs, μπορεί να σχηματιστεί και μέσω των αντιδράσεων ορισμένων χημικών, που υπάρχουν στα απορρίμματα [Γενειατάκης, 2004].

Ο ρυθμός και ο όγκος του βιοαερίου, που παράγεται σε ένα συγκεκριμένο χώρο ταφής, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των απορριμμάτων (π.χ. σύσταση και ηλικία), και από περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. παρουσία οξυγόνου, υγρασία, θερμοκρασία).

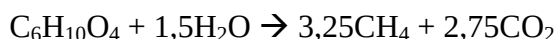
- ❑ Σύσταση των απορριμμάτων. Όσο μεγαλύτερο είναι το οργανικό κλάσμα σε έναν ΧΥΤΑ, τόσο περισσότερο βιοαέριο (CO_2 , CH_4 , N_2 και H_2S) θα παραχθεί μέσω της βακτηριακής αποδόμησης. Ορισμένα είδη οργανικών απορριμμάτων περιέχουν θρεπτικά, όπως νάτριο, ασβέστιο, μαγνήσιο και κάλιο, που βοηθούν τα βακτήρια να τραφούν. Όταν υπάρχουν αυτά τα θρεπτικά αυξάνεται η παραγωγή του βιοαερίου. Αντιθέτως, ορισμένα απορρίμματα περιέχουν ενώσεις, που βλάπτουν τα βακτήρια και έτσι παράγεται λιγότερο βιοαέριο. Για παράδειγμα τα βακτήρια, που παράγουν μεθάνιο, παρεμποδίζονται από την ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων αλάτων στα απορρίμματα. Όσο περισσότερα χημικά εναποτίθενται σε ένα ΧΥΤΑ, τόσο πιθανότερο είναι να παραχθούν NMOC και άλλα αέρια μέσω εξάτμισης ή χημικών αντιδράσεων.

- ❑ Ηλικία των απορριμμάτων. Γενικά, τα πιο πρόσφατα ενταφιασμένα απορρίμματα (λιγότερο από 10 χρόνια) παράγουν περισσότερο βιοαέριο από απορρίμματα ηλικίας άνω των δέκα ετών. Η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου παρατηρείται 5 – 7 χρόνια μετά την ταφή των απορριμμάτων. Σχεδόν όλο το βιοαέριο παράγεται μέσα σε 20 χρόνια από την ταφή των απορριμμάτων, αλλά παρόλα αυτά μικρές ποσότητες βιοαερίου παράγονται ακόμα και 50 ή περισσότερα χρόνια από τη στιγμή απόρριψης των απορριμμάτων.
- ❑ Παρουσία οξυγόνου μέσα στον ΧΥΤΑ. Το CH₄ αρχίζει να παράγεται μόνο όταν εξαλειφθεί το οξυγόνο, που βρίσκεται στο σώμα του ΧΥΤΑ. Όσο περισσότερο οξυγόνο υπάρχει, τόσο μεγαλύτερη διάρκεια θα έχει η αερόβια αποδόμηση των απορριμμάτων στην Φάση Ι. Αν τα απορρίμματα δεν συμπίεζονται ή αναμοχλεύονται συχνά, υπάρχει περισσότερο διαθέσιμο οξυγόνο, με αποτέλεσμα την επιμήκυνση της ζωής των αερόβιων μικροβίων και την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και νερού για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.
- ❑ Υγρασία. Η παρουσία υγρασίας (ακόρεστες συνθήκες) σε έναν ΧΥΤΑ αυξάνει την παραγωγή του βιοαερίου, επειδή προωθεί τη μικροβιακή αποδόμηση των απορριμμάτων. Περιεχόμενο υγρασίας της τάξεως του 40% ή υψηλότερο, βασιζόμενο στο υγρό βάρος των απορριμμάτων, προωθεί τη μέγιστη παραγωγή βιοαερίου (π.χ. σε καλυμμένο ΧΥΤΑ). Η συμπίεση των απορριμμάτων επιβραδύνει την παραγωγή του βιοαερίου επειδή αυξάνεται η πυκνότητα των απορριμμάτων και έτσι μειώνεται ο ρυθμός διήθησης του νερού στα απορρίμματα. Ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου είναι υψηλότερος εάν μέσω δυνατής βροχόπτωσης και / ή διαπερατού καλύμματος, εισαχθεί νερό στον ΧΥΤΑ. Η υγρασία ενδέχεται να προωθήσει και τις χημικές αντιδράσεις, μέσω των οποίων παράγεται βιοαέριο.
- ❑ Θερμοκρασία. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και η μικροβιακή δραστηριότητα, με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής βιοαερίου. Τυπικά η μικροβιακή δραστηριότητα πέφτει δραματικά σε θερμοκρασίες κάτω των 10 °C. Ένας καλυμμένος ΧΥΤΑ συνήθως διατηρεί μια σταθερή θερμοκρασία, που μεγιστοποιεί την παραγωγή του βιοαερίου. Η μικροβιακή δραστηριότητα απελευθερώνει θερμότητα, σταθεροποιώντας την

θερμοκρασία του ΧΥΤΑ ανάμεσα στους 25 – 45 °C, αν και έχουν παρατηρηθεί και θερμοκρασίες των 70°C. Οι αυξημένες θερμοκρασίες αυξάνουν ακόμη τους ρυθμούς εξάτμισης και χημικών αντιδράσεων. Ως γενικός κανόνας, οι εκπομπές των NMOCs διπλασιάζονται με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 7 °C [Γενειατάκης, 2004].

Οι κυριότερες αέριες εκπομπές από έναν χώρο υγειονομικής ταφής είναι το μεθάνιο (CH₄) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), που συμβάλουν αποκλειστικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς και οι μη μεθανογενείς οργανικές ενώσεις NMOC, Non-Methane Organic Compounds που περιέχουν σε ποσοστό 39% πτητικές οργανικές ενώσεις VOC, Volcanic Organic Compounds και οι οποίες είναι υπεύθυνες για το νέφος και τη δημιουργία όζοντος.

Η αναερόβια αποσύνθεση των ΑΣΑ στους ΧΥΤΑ οδηγεί στην παραγωγή μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, σύμφωνα με την ακόλουθη απλουστευμένη αντίδραση:



Στους ΧΥΤΑ με σύστημα συλλογής του βιοαερίου υπολογίζεται ότι μπορεί να συλλεχθεί το 60% του παραγόμενου βιοαερίου. Το βιοαέριο των ΧΥΤΑ περιέχει γενικά περίπου 54% CH₄ και 46% CO₂. Υποθέτοντας ότι το 25% των ΑΣΑ, που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ, είναι βιοδιασπάσιμα (τροφές, φύλλα, απορρίμματα, ΔΞΥΛ) το μέγιστο ποσό του φυσικού αερίου που μπορεί να παραχθεί από τη βιοδιάσπαση έχει υπολογιστεί στα 130Nm³/ton. Η μέγιστη ικανότητα των ΑΣΑ σε ένα ΧΥΤΑ, που παράγουν CH₄, αναφέρεται ότι είναι 62 m³ CH₄/ton. Λόγω του ότι το CH₄ είναι 21 φορές πιο δραστικό από το CO₂ έχει υπολογιστεί ότι οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ από έναν ΧΥΤΑ είναι κατά 1,3 τόνους ανά τόνο ΑΣΑ υψηλότερες από τις εκπομπές από μια εγκατάσταση αποτέφρωσης με ανάκτηση ενέργειας.

Στον Πίνακα 6.11 φαίνεται η τυπική σύνθεση του βιοαερίου, που παράγεται από την ταφή ΑΣΑ και στον οποίο υπάρχουν και οι NMOC, πολλές από τις οποίες είναι καρκινογόνες όπως το βενζένιο, το βινυλοχλωρίδιο, το τετραχλωροεθυλένιο κ.α.

Οι ενώσεις αυτές μπορεί να δημιουργηθούν είτε από την παράνομη απόρριψη επικίνδυνων αποβλήτων, είτε από την αναερόβια αποδόμηση άλλων χημικών που

υπάρχουν στο ΧΥΤΑ, όπως π.χ. γίνεται στο σχηματισμό του βινυλοχλωριδίου από χλωριωμένα οργανικά απόβλητα .

Πίνακας 6.11 : Τυπική σύνθεση βιοαερίου από ΧΥΤΑ.

Χημικό	% Ξηρού όγκου	NMOC	ppmv
Μεθάνιο	45 - 60	Τολουένιο	35
Διοξείδιο του άνθρακα	40 - 55	Διχλωρομεθάνιο	25
Άζωτο	2 - 5	Εθυλβενζένιο	7
Αμμωνία	0,1 – 1,0	Ακετόνη	7
Θείο	0,01 – 1,0	Βινυλακετάτη	6
Οξυγόνο	0,1 – 1,0	Τετραχλωροεθυλένιο	5
Μονοξείδιο του άνθρακα	0 – 0,2	Βινυλοχλωρίδιο	4
Υδρογόνο	0 – 0,2	Μεθυλεθυλική κετόνη	3,1
NMOC	0,01 – 1,0	Ξυλένιο	2,6
		Διχλωροεθυλένιο	2,8
		Τριχλωροεθυλένιο	2,1
		Βενζένιο	2,1

Όταν το βιοαέριο καίγεται ή ακόμα και όταν χρησιμοποιείται για ανάκτηση ενέργειας είναι πιθανό να σχηματιστούν διοξίνες και φουράνια. Είναι γνωστό ότι η ύπαρξη σιδήρου στη φλόγα μπορεί να δράσει καταλυτικά στο σχηματισμό των διοξινών.

Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η επιβάρυνση που δημιουργείται από τα οχήματα μεταφοράς των απορριμμάτων από και προς τους ΧΥΤΑ. Σύμφωνα με υπολογισμούς, αυτή φτάνει στις σωματιδιακές εκπομπές τα 0,37 gr/km, ενώ καθόλου ευκαταφρόνητη δεν μπορεί να θεωρηθεί και η δημιουργία διοξινών από την καύση του πετρελαίου των οχημάτων. Οι εκπομπές αυτών των διοξινών μπορεί να φτάσουν, σύμφωνα με μια Νορβηγική έρευνα, τα 4,9 ng TEQ/ km.

6.4.3 Κίνηση

Μόλις τα αέρια, που συνθέτουν το βιοαέριο, παραχθούν κάτω από την επιφάνεια του ΧΥΤΑ, έχουν την τάση να μετακινηθούν μακριά από αυτόν. Διαστέλλονται,

γεμίζουν τα διαθέσιμα κενά και έτσι κινούνται ή μεταναστεύουν διαμέσω των περιορισμένων κενών των πόρων μέσα στα απορρίμματα και στο έδαφος, που σκεπάζει τον ΧΥΤΑ. Η φυσική τάση των αερίων, που είναι ελαφρύτερα από τον αέρα, όπως το CH_4 , είναι η ανοδική κίνηση, συνήθως διαμέσω της επιφάνειας του ΧΥΤΑ. Η ανοδική κίνηση των αερίων παρεμποδίζεται από την πυκνή συμπίεση των απορριμμάτων ή από το είδος της τελικής κάλυψης του ΧΥΤΑ. Όταν η ανοδική κίνηση παρεμποδίζεται, τότε τα αέρια τείνουν να κινηθούν οριζόντια σε άλλες περιοχές μέσα ή έξω από τον ΧΥΤΑ, όπου η ανοδική κίνηση επιτρέπεται. Βασικά τα αέρια ακολουθούν το μονοπάτι με τη λιγότερη αντίσταση. Μερικά αέρια, όπως το CO_2 , είναι πυκνότερα από τον αέρα και συγκεντρώνονται σε υποεδάφειες περιοχές [Γενειατάκης, 2004].

6.4.3.1 Παράγοντες κίνησης

Η κίνηση των αερίων του ΧΥΤΑ εξαρτάται από τρεις κύριους παράγοντες: τη διάχυση (συγκέντρωση), την πίεση, και τη διαπερατότητα.

Διάχυση (συγκέντρωση). Η διάχυση περιγράφει την φυσική τάση ενός αερίου να φτάσει σε μια ομοιόμορφη συγκέντρωση σε ένα δοσμένο χώρο, είτε είναι ένα δωμάτιο, είτε η ατμόσφαιρα της γης. Τα αέρια σε έναν ΧΥΤΑ κινούνται από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης. Επειδή οι συγκεντρώσεις των αερίων μέσα στον χώρο ταφής είναι μεγαλύτερες από αυτές έξω από αυτόν, τα αέρια διαχέονται έξω από τον ΧΥΤΑ σε περιοχές με μικρότερες συγκεντρώσεις.

Πίεση. Η συσσώρευση αερίων μέσα στον ΧΥΤΑ δημιουργεί περιοχές υψηλής πίεσης, στις οποίες η κίνηση των αερίων περιορίζεται από τα συμπιεσμένα απορρίμματα ή τα καλύμματα εδάφους και περιοχές χαμηλής πίεσης, όπου η κίνηση των αερίων δεν περιορίζεται. Η διακύμανση της πίεσης προκαλεί την κίνηση των αερίων από τις περιοχές με την υψηλή πίεση προς τις περιοχές με την χαμηλότερη πίεση. Η κίνηση των αερίων από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής πίεσης είναι γνωστή ως συμμεταφορά (*convection*). Όσο παράγονται περισσότερα αέρια, η πίεση μέσα στον ΧΥΤΑ αυξάνεται, συνήθως με αποτέλεσμα οι πιέσεις μέσα

στον ΧΥΤΑ να είναι μεγαλύτερες από την ατμοσφαιρική πίεση ή την πίεση εσωτερικών χώρων (π.χ. σπίτια, εγκαταστάσεις). Τότε τα αέρια κινούνται προς τον περιβάλλοντα αέρα ή τον αέρα εσωτερικά.

Διαπερατότητα. Τα αέρια, όπως προαναφέρθηκε, θα κινηθούν από το μονοπάτι της μικρότερης αντίστασης. Η διαπερατότητα είναι ένα μέτρο του πόσο εύκολα αέρια ή υγρά ρέουν διαμέσου συνεχόμενων κενών ή πόρων στα απορρίμματα ή στο έδαφος. Ξηρά, αμμώδη εδάφη είναι πολύ διαπερατά, ενώ οι υγροί άργιλοι τείνουν να είναι πολύ λιγότερο διαπερατοί. Τα αέρια τείνουν να κινούνται διαμέσω περιοχών υψηλής διαπερατότητας (άμμος ή χαλίκι), παρά από περιοχές με χαμηλή διαπερατότητα (άργιλος, ιλύες). Τα τελικά καλύμματα των ΧΥΤΑ συνήθως κατασκευάζονται από εδάφη χαμηλής διαπερατότητας, όπως άργιλος. Τα αέρια σε ένα καλυμμένο ΧΥΤΑ τείνουν να κινούνται οριζόντια, παρά κάθετα [Γενειατάκης, 2004].

6.4.3.2 Συνθήκες που επηρεάζουν την κίνηση

Η κατεύθυνση, η ταχύτητα, και η απόσταση που θα διανύσει το βιοαέριο εξαρτώνται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων, οι κυριότερες των οποίων είναι οι ακόλουθες:

Είδος τελικού καλύμματος. Αν το τελικό κάλυμμα του ΧΥΤΑ αποτελείται από σχετικά διαπερατά υλικά, όπως χαλίκια ή άμμος, το βιοαέριο θα κινηθεί προς τα πάνω, διαμέσου του καλύμματος. Αν όμως το κάλυμμα αποτελείται από άργιλο και ιλύες, δηλαδή είναι λίγο διαπερατό, τα αέρια θα έχουν την τάση να κινηθούν οριζόντια, κάτω από την επιφάνεια του ΧΥΤΑ. Αν πάλι ένα τμήμα του ΧΥΤΑ είναι πιο διαπερατό από το υπόλοιπο, τότε τα αέρια θα μεταναστεύσουν μέσω αυτού.

Φυσικές και ανθρωπογενείς δίοδοι. Τάφροι, χαντάκια, και θαμμένοι διάδρομοι διαφόρων χρήσεων, όπως για παράδειγμα για σωληνώσεις, μπορούν να αποτελέσουν μέσο διακίνησης του βιοαερίου. Ακόμα η φυσική γεωλογία πολλές φορές παρέχει υπόγεια μονοπάτια για την κίνηση των αερίων (π.χ. ρήγματα, πορώδες έδαφος).

Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου. Η φυσική κίνηση του βιοαερίου, αφού εξέλθει από το έδαφος, εξαρτάται από τον άνεμο. Ο άνεμος διαλύει το βιοαέριο με φρέσκο αέρα, καθώς αυτό κινείται πέρα από τον ΧΥΤΑ. Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου καθορίζουν τη συγκέντρωση του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα, η οποία μπορεί να μεταβληθεί πολύ από μέρα σε μέρα, ακόμα και από ώρα σε ώρα. Νωρίς το πρωί για παράδειγμα, οι άνεμοι είναι πιο ήπιοι και παρέχουν την ελάχιστη διάλυση και διασπορά του βιοαερίου σε άλλες περιοχές.

Υγρασία. Όταν επικρατούν συνθήκες υγρής εδαφικής επιφάνειας αποτρέπεται η μετακίνηση του βιοαερίου από την κορυφή του ΧΥΤΑ στην ατμόσφαιρα. Η βροχή και η υγρασία, ακόμη, ενδέχεται να διεισδύσουν στα κενά των πόρων και να πάρουν τη θέση των αερίων στους πόρους.

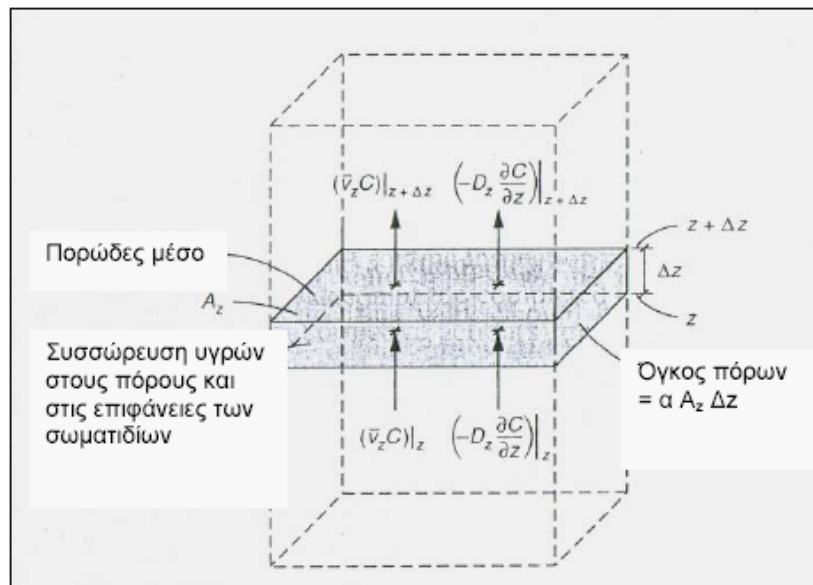
Ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Η κίνηση των αερίων επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις του ύψους του υδροφορέα. Αν το υπόγειο νερό ανέβει σε μια περιοχή, τότε θα εκτοπίσει όλα τα αέρια και θα τα αναγκάσει να ακολουθήσουν ανοδική πορεία.

Θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας ενισχύει την κίνηση των σωματιδίων των αερίων και τείνει να αυξήσει τη διάχυσή τους. Έτσι σε θερμές συνθήκες τα αέρια εξαπλώνονται γρηγορότερα. Αν και οι χώροι ταφής συνήθως διατηρούν μια σταθερή θερμοκρασία, οι κύκλοι ψύξης και θέρμανσης προκαλούν θραύση της επιφάνειας του χώρου, με αποτέλεσμα την οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση των αερίων. Η ύπαρξη παγωμένου εδάφους πάνω από τον ΧΥΤΑ παρέχει ένα φυσικό εμπόδιο στην ανοδική εξάπλωση των αερίων και ευνοεί την οριζόντια κίνησή τους.

Βαρομετρική πίεση και πίεση αερίων στο έδαφος. Η διαφορά μεταξύ στην πίεση των αερίων στο έδαφος και στη βαρομετρική πίεση επιτρέπει στο βιοαέριο να κινηθεί κατακόρυφα ή πλευρικά, ανάλογα με το ποια πίεση είναι μεγαλύτερη. Όταν πέφτει η βαρομετρική πίεση, το βιοαέριο τείνει να μεταναστεύσει έξω από τον ΧΥΤΑ, ενώ όταν ανεβαίνει το βιοαέριο κινείται προσωρινά οριζόντια μέσα στον ΧΥΤΑ [Γενειατάκης, 2004].

6.4.3.3 Εξισώσεις κίνησης

Υπό φυσιολογικές συνθήκες, τα αέρια που παράγονται στους ΧΥΤΑ απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μέσω της μοριακής διάχυσης [Gidarakos et al., 2005]. Στην περίπτωση ενός ενεργού ΧΥΤΑ, η πίεση στο εσωτερικό του είναι συνήθως μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση και το βιοαέριο θα απελευθερωθεί και λόγω συμμεταφοράς (δρώσα δύναμη η διαφορά πίεσης), αλλά και λόγω διάχυσης (δρώσα δύναμη η διαφορά συγκέντρωσης). Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση του βιοαερίου είναι η ρόφησή του στα υγρά ή στερεά συστατικά, και η παραγωγή ή κατανάλωσή του διαμέσου χημικών αντιδράσεων ή βιολογικής δραστηριότητας. Η γενική εξίσωση, που ακολουθεί, συσχετίζει αυτούς τους παράγοντες σε ένα μονοδιάστατο (κάθετο) όγκο ελέγχου (Σχήμα 6.16).



Σχήμα 6.16: Όγκος ελέγχου για την κατακόρυφη κίνηση του βιοαερίου [Tchobanoglous et al., 1993].

Η εξίσωση είναι:

$$\alpha(1 + \beta) \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} = -V_z \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} + G \quad (6.28)$$

όπου:

α = συνολικό πορώδες, $\text{cm}^3 / \text{cm}^3$

β = παράγοντας καθυστέρησης (ρόφηση, αλλαγή φάσης), αδιάστατο

C_A = συγκέντρωση της ένωσης A, g / cm^3

V_z = ταχύτητα, λόγω συµµεταφοράς στην κατακόρυφη διεύθυνση, cm/s

D_z = συντελεστής ενεργούς διάχυσης, cm²/s

G = παράµετρος που αναφέρεται σε όλα τα φαινόµενα παραγωγής, g/ cm³

z = βάθος, cm

Η ταχύτητα λόγω συµµεταφοράς V_z , στην κατακόρυφο, υπολογίζεται µε την χρήση του Νόµου του Darcy

$$V_z = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{dP}{dz} \quad (6.29)$$

όπου:

V_z = ταχύτητα, λόγω συµµεταφοράς στην κατακόρυφη διεύθυνση, m/s

k = διαπερατότητα εδάφους, m²

μ = ιξώδες του αέριου µίγµατος, N s/ m²

P = πίεση, N/ m²

z = βάθος, m

Τυπικές τιμές για την ταχύτητα αυτή των βασικών αερίων των ΧΥΤΑ είναι της τάξεως του 1 έως 15 cm/day. Οι λύσεις της εξίσωσης (6.28) εξάγονται συνήθως µε την χρήση αριθµητικών µεθόδων πεπερασµένων στοιχείων ή διαφορών. Για την εκτίµηση των εκποµπών, χωρίς να απαιτείται η επίλυση πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων, µπορούν να χρησιµοποιηθούν απλοποιηµένες µορφές της εξίσωσης (6.28). Για παράδειγµα, αν αγνοηθούν τα φαινόµενα ρόφησης και παραγωγής, υπό σταθερές συνθήκες (Steady – State), προκύπτει:

$$0 = -V_z \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (6.30)$$

Αν δεν παράγεται πια βιοαέριο σε σηµαντικές ποσότητες, παραµένει µόνο το τµήµα της εξίσωσης (6.30) που αφορά στη διάχυση, το οποίο µπορεί να ολοκληρωθεί για να δώσει την ακόλουθη εξίσωση:

$$N_A = -D_z \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} \quad (6.31)$$

όπου:

N_A = πυκνότητα ροής του βιοαερίου, g/cm² s

Ο συντελεστής της ενεργής διάχυσης είναι μια συνάρτηση τόσο της μοριακής διάχυσης, όσο και του πορώδους του εδάφους. Η ακόλουθη σχέση καθορίστηκε εμπειρικά για την κίνηση ατμών Lindane διαμέσου του εδάφους:

$$D_z = D \cdot \frac{(a_{gas})^{\frac{10}{3}}}{a^2} \quad (6.32)$$

όπου:

D_z = συντελεστής ενεργούς διάχυσης, cm^2/s

D = συντελεστής διάχυσης, cm^2/s

a_{gas} = πορώδες γεμάτο με αέρια, cm^3/cm^3

a = συνολικό πορώδες, cm^3/cm^3

Μια άλλη προσέγγιση, που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του συντελεστή ενεργούς διάχυσης, είναι:

$$D_z = D \cdot a \cdot \tau \quad (6.33)$$

όπου: τ = ο συντελεστής στρεβλότητας (τυπική τιμή = 0,67).

6.4.3.4 Κίνηση των βασικών αερίων που συνθέτουν το βιοαέριο

Αν και η μεγαλύτερη ποσότητα του CH_4 διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, έχουν παρατηρηθεί υψηλές συγκεντρώσεις CH_4 , αλλά και CO_2 (40% κ.ό.) στο έδαφος, σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 100 μέτρων από τα όρια του ΧΥΤΑ. Σε χώρους ταφής, που δεν συλλέγεται το βιοαέριο, η έκταση αυτής της πλευρικής κίνησης διαφέρει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του τελικού καλύμματος και των εδαφών που τους περιβάλλουν. Αν το CH_4 δεν εξαερίζεται με ελεγχόμενο τρόπο, μπορεί να συσσωρευτεί (επειδή η ειδική του βαρύτητα είναι μικρότερη από αυτή του αέρα) κάτω από κτίρια ή άλλους κλειστούς χώρους μέσα ή κοντά στο ΧΥΤΑ. Με σωστή συλλογή, το CH_4 δεν αποτελεί πρόβλημα (εκτός από το ότι είναι αέριο του θερμοκηπίου). Από την άλλη όμως, το CO_2 προκαλεί πολλά προβλήματα λόγω της πυκνότητάς του. Είναι περίπου 1,5 φορές πιο πυκνό από τον αέρα και 2,8 φορές πιο πυκνό από το CH_4 . Έτσι, έχει την τάση να κινείται προς τον πυθμένα του χώρου ταφής, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις στο τμήμα αυτό για αρκετά χρόνια [Γενειατάκης, 2004].

Ανοδική κίνηση βιοαερίου

Το CH₄ και το CO₂ μπορούν να απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα διαμέσου του καλύμματος της κορυφής με συµµεταφορά και διάχυση. Η ροή λόγω της διάχυσης µπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις (6.4) και (6.5) υποθέτοντας ότι η κλίση της συγκέντρωσης είναι γραμμική και το έδαφος είναι ξηρό, δηλαδή $\alpha_{\text{gas}} = \alpha$. Με την παραδοχή του ξηρού εδάφους εισάγεται ένας παράγοντας ασφάλειας, ο οποίος καλύπτει την πιθανή διήθηση µιας ποσότητας νερού μέσα στους πόρους και τη µείωση της πλήρωσής τους µε αέρια. Έτσι προκύπτει η εξίσωση:

$$N_A = - \frac{D \cdot a^{4/3} \cdot (C_{A_{\text{atm}}} - C_{A_{\text{fill}}})}{L} \quad (6.34)$$

όπου:

N_A = πυκνότητα ροής του συστατικού A , g/cm² s

$C_{A_{\text{atm}}}$ = συγκέντρωση του συστατικού A στην επιφάνεια του καλύμματος του ΧΥΤΑ, g/cm³

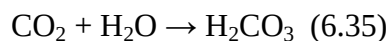
$C_{A_{\text{fill}}}$ = η συγκέντρωση του συστατικού A στο κάτω μέρος του καλύμματος του ΧΥΤΑ, g/cm³

L = πάχος του εδαφικού καλύμματος, cm

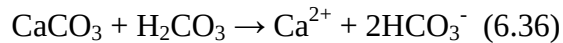
Τυπικές τιμές για τους συντελεστές διάχυσης του CH₄ και του CO₂ είναι 0,20 και 0,13 cm²/s, αντίστοιχα.

Καθοδική κίνηση βιοαερίου

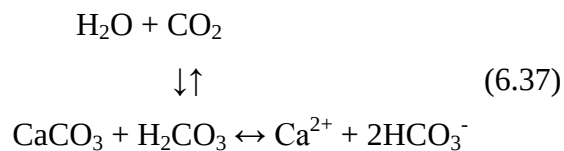
Τελικά, το διοξείδιο του άνθρακα, λόγω της πυκνότητάς του, θα συσσωρευτεί στον πυθμένα του ΧΥΤΑ. Αν έχει τοποθετηθεί γεωµεµβράνη στον πυθμένα του ΧΥΤΑ, το διοξείδιο του άνθρακα θα κινηθεί προς τα κάτω λόγω διάχυσης, διαμέσου της γεωµεµβράνης, και διαμέσου των υποκείμενων σχηματισμών, μέχρι να φτάσει στο υπόγειο νερό (η κίνηση του CO₂ περιορίζεται µε την χρήση συνθετικών µεµβρανών). Το CO₂ διαλύεται εύκολα στο νερό και αντιδρά µε αυτό για το σχηματισμό H₂CO₃, όπως φαίνεται στην αντίδραση που ακολουθεί:



Η αντίδραση αυτή ελαττώνει το pH, με συνέπεια την αύξηση της σκληρότητας και του περιεχόμενου σε μέταλλα υπόγειου νερού, μέσω διαλυτοποίησης. Για παράδειγμα, αν υπάρχει στερεό ανθρακικό ασβέστιο στη δομή του εδάφους, το ανθρακικό οξύ θα αντιδράσει με αυτό και θα σχηματιστεί διανθρακικό ασβέστιο με βάση την παρακάτω αντίδραση:



Για μια δοσμένη αέρια συγκέντρωση του CO_2 , θα συνεχιστεί η αντίδραση που φαίνεται στην εξίσωση (6.35) μέχρι να επιτευχθεί χημική ισορροπία, όπως φαίνεται στην εξίσωση (6.37):



Έτσι, κάθε διεργασία που αυξάνει το ελεύθερο διοξείδιο του άνθρακα, που υπάρχει στο διάλυμα, θα προκαλέσει μεγαλύτερη διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου. Η αυξημένη σκληρότητα, που προκύπτει, είναι η κύρια συνέπεια της παρουσίας του CO_2 στο υπόγειο νερό.

Κίνηση των ιχνοαερίων (Trace gases)

Για τις οριακές συνθήκες, που φαίνονται στο Σχήμα 6.17, η εξίσωση 6.34 μπορεί να τροποποιηθεί για τα αέρια που βρίσκονται ως ίχνη στους ΧΥΤΑ, ως εξής

$$N_i = -\frac{D \cdot a^{4/3} \cdot (C_{iatm} - C_{is} W_i)}{L} \quad (6.35)$$

όπου:

N_i = πυκνότητα ροής του συστατικού i , $\text{g/cm}^2 \text{ s}$

D = συντελεστής διάχυσης, cm^2/s

C_{iatm} = συγκέντρωση του συστατικού i στην επιφάνεια του καλύμματος του ΧΥΤΑ, g/cm^3

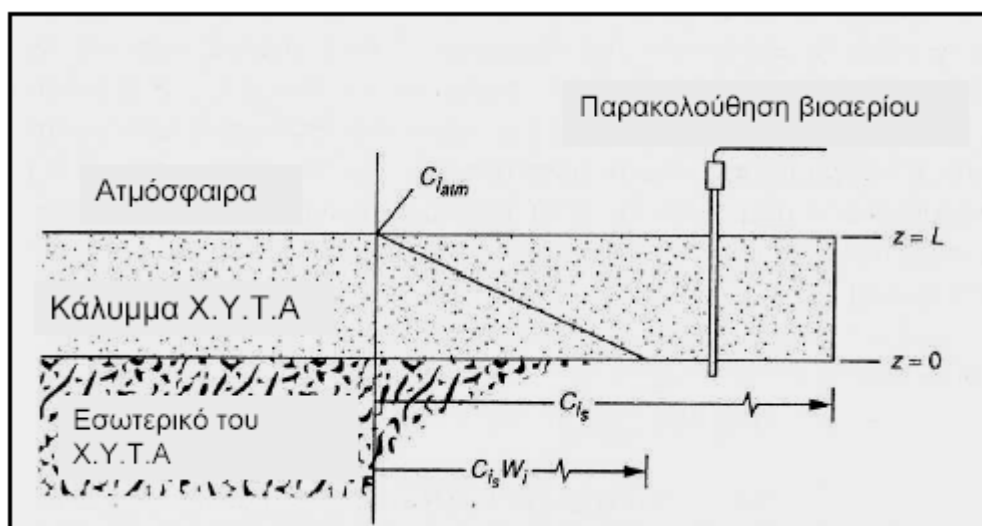
C_{is} = συγκέντρωση κορεσμού ατμών του συστατικού i , g/cm^3

W_i = παράγοντας που δείχνει το πραγματικό κλάσμα του ίχνους i στα απορρίμματα

$C_{is} W_i$ = συγκέντρωση του ίχνους i στο κάτω μέρος του καλύμματος του ΧΥΤΑ, g/cm^3

L = πάχος του εδαφικού καλύμματος, cm

Η εξίσωση 6.35 μπορεί να απλοποιηθεί με την παραδοχή ότι η C_{iatm} είναι μηδενική. Η παραδοχή αυτή είναι λογική επειδή η συγκέντρωση των ιχνών που φτάνουν την επιφάνεια του ΧΥΤΑ σχεδόν μηδενίζεται λόγω διασποράς και διάχυσης στον αέρα.



Σχήμα 6.17: Κίνηση των ιχνοαερίων διαμέσου του τελικού καλύμματος [Tchobanoglous et al., 1993].

Με βάση την παραπάνω παραδοχή, η εκτίμηση για την πυκνότητα ροής μάζας των αερίων είναι συντηρητική. Η αύξηση στην τιμή της C_{iatm} θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας ροής. Η απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης (6.35) είναι η παρακάτω:

$$N_i = -\frac{D \cdot a^{4/3} \cdot (C_{is} W_i)}{L} \quad (6.36)$$

Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις πεδίου, η τιμή του όρου $C_{is} W_i$ μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τη βιβλιογραφία (Πίνακας 6.12) [Tchobanoglous et al., 1993]. Αν κάποιο συστατικό δεν περιλαμβάνεται στη

βιβλιογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή 0,001 ως μια εκτίμηση. Όταν ο όρος $C_{is}W_i$ υπολογίζεται στο πεδίο, οι μετρήσεις πρέπει να ληφθούν με την εισαγωγή ενός δειγματολήπτη αερίου στο κάλυμμα του ΧΥΤΑ και με την ταυτόχρονη καταγραφή της συγκέντρωσης των αερίων και της θερμοκρασίας. Με τη λήψη πραγματικών δεδομένων πεδίου μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ο μέσος ρυθμός εκπομπών [Tchobanoglous et al., 1993].

Πίνακας 6.12: Δεδομένα από μετρήσεις σε 44 ΧΥΤΑ στην Καλιφόρνια [Tchobanoglous et al., 1993].

Compounds	Concentration, mg/m ³		Scaling factor, W_i
	Maximum measured ^a	Saturation value	
Benzene	135.9	319,000	0.0004
Chlorobenzene	6.8	54,000	0.0001
Ethylbenzene	414.5	40,000	0.01
1,1,1-Trichlorethane	86.3	715,900	0.0001
Chloroethene	89.2	8,521,000	0.00001
Tetrachloroethene	1331.7	126,000	0.01
Trichloroethene	85.1	415,000	0.0002
Dichloromethane	871.5	1,702,000	0.0005
Trichloromethane	63.9	1,027,000	0.00001
Toluene	1150.5	110,000	0.01

6.4.4 Παρακολούθηση

Γενικά, η παρακολούθηση των αερίων, που εκπέμπονται από τους ΧΥΤΑ μπορεί να χωριστεί σε πέντε κατηγορίες:

1. Παρακολούθηση των εδαφικών αερίων (Soil gas monitoring).
2. Παρακολούθηση των αερίων κοντά στην επιφάνεια (Near surface monitoring).
3. Παρακολούθηση των εκπομπών (Emissions monitoring).
4. Παρακολούθηση του αέρα του περιβάλλοντος (Ambient air monitoring).
5. Παρακολούθηση του αέρα των εσωτερικών χώρων (Indoor monitoring).

6.4.4.1 Παρακολούθηση εδαφικών αερίων (Soil gas monitoring)

Η αποδόμηση των απορριμμάτων μέσα στους ΧΥΤΑ παράγει αέρια που περιέχουν πολλές χημικές ουσίες, οι οποίες μετακινούνται μέσα στο έδαφος και τελικά θα απελευθερωθούν στην επιφάνεια. Όταν το βιοαέριο βρίσκεται μέσα στο

έδαφος, καλείται “εδαφικό αέριο” – “soil gas”. Έτσι, η παρακολούθηση των εδαφικών αερίων είναι η μέτρηση των συγκεντρώσεων των αερίων στο υπέδαφος.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι που συνιστούν την παρακολούθηση των επιπέδων των ρύπων στα εδαφικά αέρια μέσα ή κοντά σε ΧΥΤΑ. Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους γίνονται αυτές οι μετρήσεις είναι:

Τήρηση των ορίων της νομοθεσίας

Με βάση την ΕΡΑ, στους χώρους υγειονομικής ταφής αστικών απορριμμάτων πρέπει να παρακολουθείται το μεθάνιο. Τα δεδομένα, που συλλέγονται για την εκπλήρωση των κανονισμών, εξυπηρετούν δύο σκοπούς: παρέχουν στοιχεία για την απόδοση των συστημάτων συλλογής του βιοαερίου και δείχνουν σε ποιο βαθμό η συσσώρευση και η κίνηση του βιοαερίου μπορεί να προκαλέσει εκρήξεις. Αν οι συγκεντρώσεις του μεθανίου στο σημείο παρακολούθησης είναι μεγαλύτερες από το κατώτατο ποσοστό κατ’ όγκο του αερίου στον αέρα στο οποίο προκαλείται έκρηξη, LEL, τότε επιβάλλεται να εφαρμοστεί σχέδιο για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού.

Χαρακτηρισμός των off site πυρκαγιών και εκρήξεων

Σε ορισμένους ΧΥΤΑ η παρακολούθηση του μεθανίου μέσα στο έδαφος εκτελείται σε τοποθεσίες off-site, εξαιτίας της κίνησης του βιοαερίου σε μεγάλες αποστάσεις και της πιθανότητας φωτιάς ή έκρηξης.

Ποσοτικοποίηση της off site μετακίνησης χημικών

Επειδή στα αστικά απορρίμματα υπάρχουν πολλές χημικές ενώσεις (ίχνη ΝΜΟCs), οι οποίες πιθανώς να μετακινηθούν προς κατοικημένες περιοχές μέσω των εδαφικών αερίων, κρίνεται απαραίτητη η μέτρηση των συγκεντρώσεων αυτών των ουσιών, μια και οι συγκεντρώσεις τους δεν μπορούν να εξαχθούν άμεσα από τα δεδομένα του μεθανίου. Έτσι, η παρακολούθηση συγκεκριμένων χημικών παρέχει την πιο λεπτομερή πληροφόρηση για τα επίπεδα της ρύπανσης στο βιοαέριο [Γενειατάκης, 2004].

Τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας των εδαφικών αερίων παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τα αέρια ενός ΧΥΤΑ και πώς αυτά κινούνται κάτω από την επιφάνειά του. Με την παρακολούθηση των εδαφικών αερίων μπορεί να χαρακτηριστεί το μεθάνιο και άλλες οργανικές ενώσεις (NMOCs), και να υπολογιστεί η συγκέντρωσή τους μέσα στον χώρο ταφής και στην περίμετρό του.

Σημαντικοί παράγοντες στην ερμηνεία των δεδομένων της δειγματοληψίας είναι ο τρόπος δειγματοληψίας, η θέση δειγματοληψίας, η συχνότητα δειγματοληψίας και η ποιότητα των δεδομένων. Με βάση την θέση των πηγαδιών παρακολούθησης ή των δειγματοληπτών, τα δεδομένα μπορούν να εντοπίσουν *off – site* υπόγεια μονοπάτια ροής και *on – site* ή *off – site* κτίρια που μπορεί να έχουν προβλήματα με τη μετανάστευση των αερίων. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους μηχανικούς στον καθορισμό του αν και τι είδους σύστημα συλλογής εδαφικών αερίων και επεξεργασίας χρειάζεται για την προστασία της ανθρώπινης ασφάλειας και υγείας. Παρόλα αυτά, τα δεδομένα των εδαφικών αερίων δεν παρέχουν πραγματική μέτρηση των αερίων και των συγκεντρώσεών τους, τα οποία οι άνθρωποι που ζουν κοντά στους ΧΥΤΑ αναπνέουν. Τα δείγματα των εδαφικών αερίων συλλέγονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και οι συγκεντρώσεις τους θα αλλάξουν, καθώς τα αέρια θα κινηθούν οριζόντια στο υπέδαφος ή κατακόρυφα προς τον εξωτερικό αέρα.

Είναι σημαντικό να απαντηθούν ορισμένες ερωτήσεις στην ανασκόπηση των αποτελεσμάτων δειγματοληψίας των εδαφικών αερίων για την ακριβή διασφάλιση, ότι τα δεδομένα είναι πλήρως αντιπροσωπευτικά των υπόγειων συνθηκών [Γενειατάκης, 2004]:

→ Αέρια υπό παρακολούθηση

- ☐ Ποια αέρια παρακολουθούνται επί μονίμου βάσεως;
- ☐ Περιλαμβάνονται σε αυτά οι χημικές ουσίες που ενδιαφέρουν την νομοθεσία, την κοινωνία και τα θέματα υγείας;
- ☐ Περιέχουν οι αναφορές ρουτίνας το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα, όταν αναφέρονται τα επίπεδα μεθανίου;

- ☐ Περιέχονται στις χημικές ουσίες που παρακολουθούνται αυτές που αναμένονται να υπάρχουν στη μεγαλύτερη ποσότητα και αυτές που είναι πιο τοξικές;
- ☐ Υπάρχουν κενά δεδομένων στις χημικές ουσίες που παρακολουθούνται;

→ Παρακολούθηση πίεσης

- ☐ Περιέχεται στις αναφορές η βαρομετρική πίεση και η πίεση των δειγματοληπτών / πηγαδιών;
- ☐ Υπάρχουν δειγματολήπτες ή πηγάδια με μόνιμους μετρητές πίεσης;

→ Μέθοδοι δειγματοληψίας

- ☐ Έχουν επιλεγεί μέθοδοι δειγματοληψίας εγκεκριμένες από την EPA? Αν όχι, γιατί;
- ☐ Είναι οι μέθοδοι δειγματοληψίας κατάλληλες για τη μέτρηση των επιλεγμένων αερίων;
- ☐ Μετρίεται το ύψος του νερού μετά από κάθε δειγματοληψία;

→ Εξοπλισμός δειγματοληψίας

- ☐ Είναι ο εξοπλισμός δειγματοληψίας σχεδιασμένος να λειτουργεί κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες;
- ☐ Λήφθηκαν υπόψη οι περιορισμοί του κατασκευαστή για τα περιβάλλοντα στα οποία ο εξοπλισμός θα παρέχει ακριβείς μετρήσεις;

→ Παρακολούθηση κατασκευής πηγαδιών και βάθος οπών άντλησης

- ☐ Πόσο βαθιά είναι ο πυθμένας των γεωτρήσεων για τα πηγάδια και τους δειγματολήπτες;
- ☐ Σε τι βάθος αρχίζει και τελειώνει το τμήμα με τις οπές στα πηγάδια ή στους δειγματολήπτες;
- ☐ Φαίνεται στις περιοδικές ή στις τακτικές μετρήσεις αν ο δειγματολήπτης / πηγάδι είναι ξηρός ή εν μέρει γεμάτος με νερό;
- ☐ Υπάρχει γεωλογική μελέτη που να σχετίζεται με την αναφορά κατασκευής των πηγαδιών;

- ☐ Έχει γίνει γεωλογική ανάλυση για τη διερεύνηση και πρόβλεψη πιθανών υπόγειων διαδρομών ροής;

→ Θέσεις παρακολούθησης

- ☐ Υπάρχει πρόγραμμα παρακολούθησης της περιμέτρου του ΧΥΤΑ με επαρκείς αποστάσεις ανάμεσα στα μόνιμα πηγάδια παρακολούθησης των εδαφικών αερίων;
- ☐ Υπάρχουν πηγάδια παρακολούθησης δίπλα στα κτίρια που βρίσκονται στο πεδίο;
- ☐ Υπάρχουν πηγάδια παρακολούθησης ανάμεσα στα όρια του ΧΥΤΑ και στις γειτονικές ιδιοκτησίες με κατοικημένα κτίρια;
- ☐ Υπάρχουν συστήματα παθητικού εξαερισμού που παρακολουθούνται τακτικά;
- ☐ Έχει γίνει έρευνα στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ με φορητά όργανα για την ανεύρεση κρίσιμων σημείων “Hot Spots”, τα οποία είναι τα ιδανικά σημεία για την τοποθέτηση μόνιμων πηγαδιών παρακολούθησης;

→ Άλλες πηγές

- ☐ Υπάρχουν άλλες πιθανές πηγές ρυπασμένων εδαφικών αερίων, όπως υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης, προϊόντα πετρελαίου, διαρροές από σωληνώσεις φυσικού αερίου;

→ Πρόγραμμα παρακολούθησης

- ☐ Κάθε πότε λαμβάνονται δείγματα από τα πηγάδια παρακολούθησης ή τους δειγματολήπτες (καθημερινά, εβδομαδιαία, μηνιαίως, τριμηνιαίως);
- ☐ Λαμβάνονται δείγματα από τα πηγάδια παρακολούθησης, τα οποία βρίσκονται δίπλα από κατοικημένες περιοχές το λιγότερο μηνιαίως;
- ☐ Πόσο συχνά γίνεται δειγματοληψία από τα συστήματα συλλογής βιοαερίου και εξαερισμού;
- ☐ Έχουν αναφερθεί στο παρελθόν υψηλά ποσοστά NMOCs? Είναι τόσο συχνή η παρακολούθηση ώστε να αξιολογηθούν οι τάσεις του παρελθόντος;

- ❑ Συμπεριλαμβάνονται παροχές στο πρόγραμμα παρακολούθησης για δειγματοληψίες σε περιόδους ακραίως καιρικών συνθηκών (π.χ. όταν η επιφάνεια του ΧΥΤΑ είναι παγωμένη ή κορεσμένη με νερό);

→ Παράμετροι ποιότητας δεδομένων

- ❑ Τι ποσοστό δειγματοληψιών ήταν επιτυχημένες;
- ❑ Πόσο ακριβή ήταν τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας;
- ❑ Πλησιάζουν οι συγκεντρώσεις οξυγόνου στο δείγμα τα ατμοσφαιρικά επίπεδα, γεγονός που δείχνει την ύπαρξη ελαττωματικού εξοπλισμού ή διαρροών;
- ❑ Τι ποσοστό των πηγαδιών παρακολούθησης / δειγματοληπτών είναι κορεσμένα με νερό ή δεν παρέχουν συνεχείς μετρήσεις των επιπέδων του μεθανίου;
- ❑ Υπήρχαν παραλήψεις από την ομάδα δειγματοληψίας με βάση τους κανονισμούς;

6.4.4.2 Παρακολούθηση κοντά στην επιφάνεια (*Near surface monitoring*)

Η παρακολούθηση των αερίων κοντά στην επιφάνεια είναι η μέτρηση (συνήθως με φορητά όργανα) των συγκεντρώσεων των αερίων σε ύψος λίγων εκατοστών (5 – 10 εκατοστά) από την επιφάνεια του ΧΥΤΑ. Πραγματοποιείται για να καθορίσει την ανάγκη ενός συστήματος συλλογής βιοαερίου και το σχεδιασμό του. Ακόμη χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει αν το υπάρχον σύστημα συλλογής του βιοαερίου αποτρέπει σε ικανοποιητικό βαθμό τη διαφυγή του μεθανίου και των άλλων αερίων του ΧΥΤΑ από το τελικό κάλυμμα.

Μια συνήθης μέθοδος για την παρακολούθηση των αερίων κοντά στην επιφάνεια είναι η χρήση ενός φορητού οργάνου όπως ο αναλυτής οργανικών ατμών - ανιχνευτής φλόγας ιονισμού (OVA/FID). Τυπικά, το όργανο βαθμονομείται για το μεθάνιο, αλλά μπορεί να βαθμονομηθεί και για άλλα αέρια που υπάρχουν στους ΧΥΤΑ. Χρησιμοποιώντας μια μέθοδο γνωστή ως “Σάρωση Βιοαερίου” (LFG sweeping), ο τεχνικός δειγματοληψίας προχωρά στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ είτε με τυχαίο τρόπο, είτε με βάση ένα προκαθορισμένο πλέγμα. Η ιδιαιτερότητα σε κάθε μέτρηση είναι η καταγραφή της γεωγραφικής θέσης της μέτρησης, καθώς και των

συνθηκών της επιφάνειας. Ανάλογα με το είδος του οργάνου, οι μετρήσεις μπορούν να καταγραφούν ως ppm, % κ.ο., % LEL.

Άλλη μέθοδος δειγματοληψίας είναι η συλλογή δειγμάτων με ειδική συσκευή που έχει ενσωματωμένη μια σακούλα Tedlar® ή ένα δοχείο SUMMA®. Και στις δύο περιπτώσεις τα δείγματα αναλύονται στο εργαστήριο για τον χαρακτηρισμό ειδικών ενώσεων. Ο συνδυασμός ενός φορητού οργάνου και ενός δειγματολήπτη με σακούλα Tedlar® χρησιμοποιείται μερικές φορές για την παροχή αναλυτικών δεδομένων για τα αέρια που εκπέμπονται από το κάλυμμα των XYTA. Το φορητό όργανο χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των “hot spots”, δηλαδή των σημείων στην επιφάνεια με τις σχετικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μεθανίου.

Από τα σημεία αυτά λαμβάνονται τα δείγματα και αποστέλλονται στο εργαστήριο για ανάλυση. Τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας κοντά στην επιφάνεια πρέπει πάντα να αξιολογούνται με βάση τις μετεωρολογικές συνθήκες την ώρα της δειγματοληψίας και το ύψος από το οποίο λαμβάνονται τα δείγματα. Ακόμα και ένα ελαφρύ αεράκι 5 έως 10 mph θα αραιώσει σημαντικά το δείγμα που λαμβάνεται σε ύψος 10 εκατοστών από την επιφάνεια. Τα δεδομένα της δειγματοληψίας κοντά στην επιφάνεια παρέχουν τις συγκεντρώσεις των αερίων, κυρίως του μεθανίου, που κινούνται διαμέσου του καλύμματος του XYTA, προς την ατμόσφαιρα. Αν χρησιμοποιηθεί εργαστηριακή ανάλυση των δειγμάτων, τα αποτελέσματα μπορούν να βοηθήσουν στον χαρακτηρισμό των NMOCs, που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Υψηλή συγκέντρωση βιοαερίου σε ένα σημείο μπορεί να φανερώνει ρωγμές στο κάλυμμα του XYTA.

6.4.4.3 Παρακολούθηση εκπομπών (Emissions monitoring)

Σε αντίθεση με την παρακολούθηση των εδαφικών αερίων και των αερίων κοντά στην επιφάνεια, που μετράνε τις συγκεντρώσεις των χημικών ουσιών στο βιοαέριο, η παρακολούθηση των εκπομπών μετρά τους ρυθμούς με τους οποίους οι χημικές ουσίες αυτές απελευθερώνονται από τους XYTA. Οι πηγές εκπομπών στους χώρους ταφής είναι η ίδια επιφάνεια του XYTA και οι μονάδες καύσης του βιοαερίου (π.χ. πυρσοί ή άλλες συσκευές καύσης). Οι εκπομπές του βιοαερίου ίσως να παρακολουθούνται για ένα από τους παρακάτω λόγους:

- Ο Την τήρηση της περιβαλλοντικής νομοθεσίας.

- ο Για την τεκμηρίωση της ανάγκης ή της αποτελεσματικότητας ενός συστήματος συλλογής του βιοαερίου.
- ο Για τον καθορισμό της γενικής σύστασης και του όγκου της αέριας ρύπανσης, που αναδύεται από τους ΧΥΤΑ.

Η εκτίμηση ή η μέτρηση του ρυθμού εκπομπής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαπιστωθεί αν είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτό να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί το βιοαέριο για την παραγωγή ενέργειας.

Οι εκπομπές μετρούνται με την χρήση πολλών συνδυασμών τεχνικών δειγματοληψίας στο πεδίο και εργαστηριακών αναλυτικών τεχνικών (αν είναι αναγκαίο). Οι τεχνικές που επιλέγονται για μια ορισμένη δειγματοληψία εξαρτώνται από τον τύπο της πηγής που αξιολογείται. Ορισμένα παραδείγματα τεχνικών δειγματοληψίας είναι:

- ❑ Στις μετρήσεις εκπομπών από την επιφάνεια του ΧΥΤΑ., συνήθως χρησιμοποιούνται θάλαμοι πυκνότητας ροής “flux chambers”, στους οποίους συλλέγεται το βιοαέριο παθητικά. Η ανάλυση μπορεί να γίνει είτε στο πεδίο, είτε στο εργαστήριο.
- ❑ Οι επιφανειακές εκπομπές μετρούνται ακόμα με φασματοσκοπία υπεριώδους ακτινοβολίας (UVS) ή με Fourier- transformed φασματοσκοπία υπέρυθρης ακτινοβολίας (FTIR). Οι μέθοδοι UVS και FTIR είναι φασματοσκοπικές τεχνικές δειγματοληψίας, που ανιχνεύουν και χαρακτηρίζουν ρύπους στον αέρα κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής. Οι μετρήσεις δίνονται σε συγκέντρωση όγκου ανά μονάδα απόστασης (ppm), μάζα ανά επιφάνεια της ακτινοβολίας ($\mu\text{g}/\text{m}^2$), μάζα ανά όγκο δείγματος ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), παρά ως ρυθμοί εκπομπής.
- ❑ Σε μετρήσεις εκπομπών από συστήματα παθητικού εξαερισμού, συνήθως συλλέγεται ένα δείγμα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και σε μια ορισμένη συσκευή αποθήκευσης, όπως μια σακούλα Tedlar® ή ένα δοχείο SUMMA® από ανοξείδωτο ατσάλι.
- ❑ Σε μετρήσεις εκπομπών από μια καμινάδα με υψηλό ρυθμό ροής (π.χ. εκροή από ένα αποτεφρωτήρα βιοαερίου) συνήθως εισάγεται ένας δειγματολήπτης απευθείας μέσα στην καμινάδα. Ανάλογα με τις ενώσεις που μετρούνται

μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες αναλυτικές μέθοδοι (EPA Method 25C για NMOCs, EPA Method 18 για τη μέτρηση εκπομπών με χρωματογραφία μάζας). Αν και τα δεδομένα παρακολούθησης των εκπομπών είναι χρήσιμα για τον χαρακτηρισμό των σχετικών ποσοτήτων των εκπεμπόμενων ρύπων, έχουν τρεις τουλάχιστον περιορισμούς όσον αφορά στην αξιοποίησή τους για θέματα υγείας:

1. Όπως και στις μετρήσεις εδαφικών αερίων, η παρακολούθηση των εκπομπών στους ΧΥΤΑ χαρακτηρίζει τις περιβαλλοντικές συνθήκες *on site*, συνήθως μακριά από περιοχές, όπου οι κάτοικοι μπορεί να εκτίθενται στους ρύπους.
2. Τα δεδομένα εκπομπών τυπικά παρέχουν μια στιγμιαία κατάσταση στον ΧΥΤΑ. Και επειδή οι εκπομπές παρουσιάζουν σημαντικές εποχιακές διακυμάνσεις, οι μετρούμενοι ρυθμοί από μια μελέτη ίσως να μην είναι αντιπροσωπευτικοί για μεγάλο χρονικό διάστημα.
3. Οι μελέτες παρακολούθησης των εκπομπών σε ΧΥΤΑ συνήθως λαμβάνουν υπόψη μια ή μερικές από τις πηγές ρύπανσης που υπάρχουν. Επειδή ορισμένοι ΧΥΤΑ έχουν πολλές διεργασίες (π.χ. μεταφορά απορριμμάτων, επεξεργασία αποβλήτων κ.ά.) και κάθε μια από αυτές εκπέμπει ορισμένους ρύπους στην ατμόσφαιρα, τα περισσότερα δεδομένα παρακολούθησης των εκπομπών δεν χαρακτηρίζουν τις συνολικές εκπομπές ενός χώρου ταφής [Γενειατάκης, 2004].

6.4.4.4 Παρακολούθηση αέρα περιβάλλοντος (*Ambient air monitoring*)

Σε αντίθεση με τα περισσότερα δεδομένα παρακολούθησης των εδαφικών αερίων και των εκπομπών, τα οποία δεν χαρακτηρίζουν τα επίπεδα της ρύπανσης στον αέρα που οι άνθρωποι εισπνέουν, τα δεδομένα παρακολούθησης του αέρα του περιβάλλοντος παρέχουν ένα καλύτερο χαρακτηρισμό των αερίων στην ζώνη αναπνοής. Τα δεδομένα αυτά, μαζί με τα δεδομένα παρακολούθησης του αέρα εσωτερικών χώρων (όπου είναι διαθέσιμα), είναι χρησιμότερα στην αξιολόγηση των μονοπατιών έκθεσης της αναπνοής σε ρύπους στους ΧΥΤΑ.

Η παρακολούθηση του αέρα περιβάλλοντος αποτελεί τη μέτρηση των επιπέδων ρύπανσης του εξωτερικού αέρα ή του αέρα που οι άνθρωποι εισπνέουν. Τα επίπεδα ρύπανσης, που μετρούνται στον αέρα του περιβάλλοντος αντανακλούν τη συνδυασμένη επίδραση των διαφόρων γειτονικών πηγών ή και πηγών που βρίσκονται και πιο μακριά. Ο κύριος λόγος για τον οποίο παρακολουθείται ο αέρας του περιβάλλοντος μέσα στους ΧΥΤΑ ή κοντά σε αυτούς, σχετίζεται με την εκτίμηση της απελευθέρωσης τοξικών ουσιών στον αέρα. Παρόλα αυτά, επειδή η νομοθεσία δεν απαιτεί την παρακολούθηση του αέρα περιβάλλοντος, στις περιοχές όπου υπάρχουν ΧΥΤΑ, δεν υπάρχουν και τα ανάλογα διαθέσιμα δεδομένα για τους περισσότερους ΧΥΤΑ. Ο τρόπος μέτρησης των συγκεντρώσεων του αέρα περιβάλλοντος διαφέρει από μελέτη σε μελέτη, αλλά όλες οι μελέτες αναφέρονται στα παρακάτω καίρια στοιχεία παρακολούθησης του αέρα:

- ❑ Επιλογή των ρύπων για παρακολούθηση. Μια από τις πρώτες αποφάσεις που καλούνται οι μελετητές να πάρουν όταν αναπτύσσουν ένα σχέδιο παρακολούθησης του αέρα περιβάλλοντος είναι η επιλογή των ρύπων που θα παρακολουθούνται. Η απόφαση αυτή επηρεάζεται κυρίως από το σκοπό της παρακολούθησης. Για παράδειγμα σε περιοχές όπου ενδιαφέρει η έκθεση στο βιοαέριο, η παρακολούθηση συνήθως εστιάζει σε NMOCs, παρά σε μέταλλα ή σε σωματιδιακή ύλη. Σε περιοχές όπου υπάρχει πρόβλημα με τη σκόνη που μεταφέρεται από τον αέρα, η παρακολούθηση θα περιλαμβάνει και τη σωματιδιακή ύλη. Από πρακτικής άποψης, η επιλογή των ρύπων, που θα μετρούνται, καθορίζεται μετά τη στάθμιση διαφόρων παραγόντων, όπως το κόστος, την τοξικότητα των χημικών και τη διαθεσιμότητα των τεχνικών δειγματοληψίας, που μπορούν αξιόπιστα να μετρήσουν τις συγκεντρώσεις ενός συγκεκριμένου ρύπου στον αέρα.
- ❑ Μέθοδοι δειγματοληψίας. Μετά από μακροχρόνιες έρευνες η ΕΡΑ έχει εγκρίνει πολλούς διαφορετικούς τύπους δειγματοληψίας και αναλυτικών μεθόδων για μια μεγάλη λίστα συνηθισμένων αέριων ρύπων.
- ❑ Τοποθεσίες παρακολούθησης του αέρα περιβάλλοντος. Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία του σχεδιασμού ενός προγράμματος παρακολούθησης του αέρα είναι η επιλογή των σημείων παρακολούθησης. Γενικά, οι

τοποθεσίες παρακολούθησης επιλέγονται με βάση τον σκοπό του προγράμματος δειγματοληψίας.

- ❑ Πρόγραμμα παρακολούθησης. Τα σχέδια παρακολούθησης του αέρα περιβάλλοντος θα πρέπει να καθορίζουν και τη συχνότητα και τη διάρκεια της προτεινόμενης δειγματοληψίας. Αυτοί οι παράγοντες είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη, στην φάση ερμηνείας των δεδομένων. Η συχνότητα της παρακολούθησης συνήθως καθορίζεται από τις διαθέσιμες μεθόδους δειγματοληψίας. Οι συνεχείς μέθοδοι παρέχουν μια διαρκή εικόνα της ποιότητας του αέρα, αλλά συνήθως μετρούν τα επίπεδα ενός μόνο ρύπου. Η περιοδική παρακολούθηση εκτελείται συνήθως με τη συλλογή δειγμάτων σε 24 ώρες, ανά 12 ή 6 μέρες. Επειδή οι εκπομπές από τους ΧΥΤΑ παρουσιάζουν σημαντικές εποχιακές διακυμάνσεις, η παρακολούθηση πρέπει να διαρκεί ένα χρόνο ή περισσότερο για την ακριβή εκτίμηση των μακροπρόθεσμων μέσων συγκεντρώσεων των ρύπων.
- ❑ Παράμετροι ποιότητας δεδομένων. Γενικά, στα προγράμματα παρακολούθησης του αέρα του περιβάλλοντος, τα δείγματα θα πρέπει να συλλέγονται και να αναλύονται με βάση τις προδιαγραφές της ποιότητας των δεδομένων των μεθόδων. Αν και οι προδιαγραφές διαφέρουν από μέθοδο σε μέθοδο, ακρίβεια > 50 % είναι συνήθως εφικτή. Η πληρότητα της δειγματοληψίας, που ορίζεται ως το ποσοστό των επιτυχημένων δειγματοληψιών, είναι επιθυμητό να είναι > 90% [Γενειατάκης, 2004].

6.4.4.5 Παρακολούθηση αέρα εσωτερικών χώρων (Indoor monitoring)

Η παρακολούθηση του αέρα των εσωτερικών χώρων αφορά στη μέτρηση των συγκεντρώσεων των ρύπων στον αέρα στο εσωτερικό κτιρίων ή κλειστών τοποθεσιών. Οι θέσεις δειγματοληψίας του αέρα των εσωτερικών χώρων περιλαμβάνουν υπόγεια κτιρίων (κατοικιών, βιομηχανικών, εμπορικών), εγκαταστάσεις στους ΧΥΤΑ κ.ά. Κοντά σε ΧΥΤΑ, πολλοί ιδιοκτήτες εκφράζουν την ανησυχία τους για τη ρύπανση του αέρα των εσωτερικών χώρων, κυρίως επειδή οι ρύποι, που περιέχονται στο βιοαέριο, μπορούν να εισχωρήσουν απευθείας σε κατασκευές που βρίσκονται σε περιοχές όπου υπάρχει ρύπανση του αέρα του

εδάφους. Έτσι, οι λόγοι για την παρακολούθηση του αέρα των εσωτερικών χώρων είναι οι ίδιοι με αυτούς για την παρακολούθηση των εδαφικών αερίων.

Με βάση τους κανονισμούς της EPA, η συγκέντρωση του μεθανίου στα δείγματα αέρα που συλλέγονται μέσα στις εγκαταστάσεις του ΧΥΤΑ δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 25 % του LEL μεθανίου (1,25 % κατ' όγκο). Και αυτό γιατί το μεθάνιο είναι εκρηκτικό σε συγκεντρώσεις 5 -15 % στον αέρα. Το παράδοξο είναι όμως ότι οι μετρήσεις αυτές δεν απαιτούνται από τη νομοθεσία. Αν και η EPA έχει εκπονήσει πολλές έρευνες για τις τεχνολογίες παρακολούθησης του αέρα σε εσωτερικούς χώρους, δεν έχει εκδώσει λίστες προτεινόμενων ή εγκεκριμένων μεθόδων για τέτοια προγράμματα παρακολούθησης. Θεωρητικά, οι μέθοδοι δειγματοληψίας και οι αναλυτικές μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται στην παρακολούθηση του αέρα περιβάλλοντος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παρακολούθηση του αέρα εσωτερικών χώρων.

Μοντελοποίηση του αέρα (Air modeling)

Εδώ και χρόνια, έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός μαθηματικών μοντέλων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του τρόπου με τον οποίο οι εκπομπές των χημικών ενώσεων διασπείρονται στον αέρα. Διαφορετικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να απαντηθούν διαφορετικές ερωτήσεις, όπως με ποιο τρόπο διασπείρονται οι ρύποι από μια πηγή ή ποια είναι η συνεισφορά μιας πηγής στη συνολική ρύπανση μιας περιοχής. Τα μοντέλα μπορεί να είναι αναγνωριστικά, δηλαδή με περιορισμένες πληροφορίες να παρέχουν συντηρητικές εκτιμήσεις ή εξειδικευμένα, δηλαδή να απαιτούν λεπτομερείς πληροφορίες, αλλά να παρέχουν ακριβείς εκτιμήσεις. Το επίπεδο της αβεβαιότητας διαφέρει από μοντέλο σε μοντέλο, παρόλα αυτά η αβεβαιότητα είναι υπαρκτή σε κάθε μοντέλο.

Ένας τύπος μοντέλου είναι το μοντέλο εκτίμησης εκπομπών. Αν τα δεδομένα παρακολούθησης των εκπομπών δεν είναι διαθέσιμα για έναν ΧΥΤΑ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα για τον υπολογισμό των εκπομπών. Το μοντέλο εκπομπών βιοαερίου της EPA, “Landfill Gas Emissions Model (LandGem)”, είναι ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται συνήθως για την εκτίμηση των ετήσιων ρυθμών εκπομπής του βιοαερίου (σε Mg / year), κατά τη διάρκεια λειτουργίας, αλλά και μετά το κλείσιμο ενός ΧΥΤΑ. Μπορεί να υπολογίσει το μεθάνιο, NMOCs και

μεμονωμένους οργανικούς ρύπους, συμπεριλαμβανομένων και πολλών επικίνδυνων αέριων ρύπων. Το μοντέλο απαιτεί βασικές πληροφορίες, όπως τις ημερομηνίες έναρξης και κλεισίματος του ΧΥΤΑ, την ποσότητα των απορριμμάτων που έχουν ταφεί, τον ετήσιο ρυθμό υποδοχής απορριμμάτων και το αν ο ΧΥΤΑ βρίσκεται σε ξηρό κλίμα ή όχι. Ορισμένα δεδομένα, όπως η σταθερά του ρυθμού παραγωγής μεθανίου ή το δυναμικό παραγωγής μεθανίου, μπορούν να εισαχθούν από τον χρήστη ή να χρησιμοποιηθούν οι τιμές που προτείνει το μοντέλο με βάση τη νομοθεσία. Τα αποτελέσματα από αυτό ή από άλλα μοντέλα εκπομπών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα διασποράς του αέρα για την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων έκθεσης στον αέρα του περιβάλλοντος [Gidarakos & Geneiatakis, 2005].

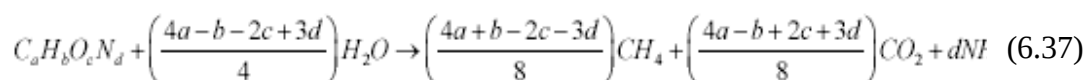
6.4.4 Συστήματα συλλογής και ελέγχου

Η συλλογή και ο έλεγχος του παραγόμενου βιοαερίου σε έναν χώρο ταφής απορριμμάτων είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες, ειδικότερα στα πρώτα χρόνια μετά το κλείσιμο του ΧΥΤ (~10 με 15 χρόνια).

Ο σχεδιασμός της συλλογής και της διαχείρισης των αερίων σε ένα ΧΥΤ έχει ως σκοπό τα εξής:

- ☐ Τον έλεγχο της κίνησης των αερίων (μέσα και έξω από το ΧΥΤ).
- ☐ Την ελαχιστοποίηση των ατμοσφαιρικών εκπομπών.
- ☐ Τον έλεγχο των οσμών.
- ☐ Την μεγιστοποίηση της ανακτόμενης ενέργειας.
- ☐ Τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς.

Γνωρίζοντας τον ακριβή χημικό τύπο των απορριμμάτων είναι δυνατή η εκτίμηση της ποσότητας του παραγόμενου βιοαερίου από τον παρακάτω τύπο:



Ωστόσο, η μέγιστη ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά γνωρίζοντας την περιεκτικότητα των απορριμμάτων σε οργανικό άνθρακα. Χωρίς να υπολογίζεται η απώλεια του άνθρακα για την παραγωγή της

βιομάζας (σύνθεση κυττάρων), 1 mol του οργανικού άνθρακα παράγει 1 mol του βιοαερίου ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$).

$$1 \text{ mol C οργ.} = 1 \text{ mol } (\text{CH}_4 + \text{CO}_2) \quad (6.38)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία των ιδανικών αερίων ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$1 \text{ mol C οργ.} = 1 \text{ mol } (\text{CH}_4 + \text{CO}_2) = 22.4 \text{ l } (\text{CH}_4 + \text{CO}_2) \quad (6.39)$$

Αντιακθιστώντας το ατομικό βάρος του άνθρακα (12), προκύπτει:

$$1 \text{ g C οργ.} = 1.87 \text{ l } (\text{CH}_4 + \text{CO}_2) \quad (6.40)$$

Άρα, υποθέτοντας ότι η περιεκτικότητα του μεθανίου στο βιοαέριο κυμαίνεται μεταξύ 50 και 60%, η μέγιστη θεωρητική ποσότητα μεθανίου, που παράγεται από ένα γραμμάριο οργανικού άνθρακα, είναι:

$$\text{CH}_4 = 0.94 - 1.12 \text{ l} \quad (6.41)$$

Με βάση τα παραπάνω και γνωρίζοντας την περιεκτικότητα των απορριμμάτων σε βιοαποικοδομήσιμο οργανικό άνθρακα, μπορεί να εκτιμηθεί η αναμενόμενη παραγωγή του βιοαερίου. Η περιεκτικότητα των απορριμμάτων σε οργανικό άνθρακα μπορεί επίσης να εκτιμηθεί με τον παρακάτω τύπο:

$$(\text{OC}_b)_i = \text{OC}_i(f_b)_i * (1 - u_i) * p_i \quad (6.42)$$

όπου:

- $(\text{OC}_b)_i$ = βιοαποικοδομήσιμος οργανικός άνθρακας του συστατικού i (kg βιοαποικοδομήσιμου οργ. άνθρακα/ kg υγρής μάζας ΑΣΑ)
- OC_i = περιεκτικότητα, επί ξηρού, σε οργ. άνθρακα του συστατικού i (kg άνθρακα/kg ξηρής μάζας συστατικού i)
- $(f_b)_i$ = βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα του OC_i (kg βιοαποικοδομήσιμου οργ. άνθρακα/ kg οργ. άνθρακα)
- u_i = περιεκτικότητα σε υγρασία του συστατικού i (kg νερού/kg υγρής μάζας συστατικού i)
- p_i = υγρή μάζα του συστατικού i (kg συστατικού i/kg ΑΣΑ)

Τυπικές τιμές των μεταβλητών της παραπάνω εξίσωσης παραθέτονται στον Πίνακα 6.13.

Πίνακας 6.13: Τυπικές τιμές βασικών μεταβλητών προσδιορισμού βιοαποικοδομήσιμου άνθρακα [Cossu, 2010].

Συστατικά των ΑΣΑ	u_i	OC_i	$(f_b)_i$
Τρόφιμα	0.6	0.48	0.8
Απόβλητα κήπου	0.5	0.48	0.7
Χαρτί και χαρτόνι	0.08	0.44	0.5
Πλαστικά και λάστιχο	0.02	0.7	0.0
Ύφασμα	0.1	0.55	0.2
Ξύλο	0.2	0.5	0.5
Γυαλί	0.03	0.0	0.0
Μέταλλα	0.03	0.0	0.0

Το ποσοστό του βιοαποικοδομήσιμου άνθρακα μπορεί επίσης να υπολογιστεί ως συνάρτηση της θερμοκρασίας της απορριμματικής μάζας με την παρακάτω εξίσωση:

$$(OC_b)_i = OC_i (0.014T + 0.28) \quad (6.43)$$

Άρα, συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτει η ακόλουθη βασική εξίσωση:

$$Y_{LFG} = 1.87 * OC_i(f_b)_i * (1-u_i) * p_i \quad (6.44)$$

όπου: Y_{LFG} = ποσότητα παραγόμενου βιοαερίου (L/ γραμμάριο ΑΣΑ)

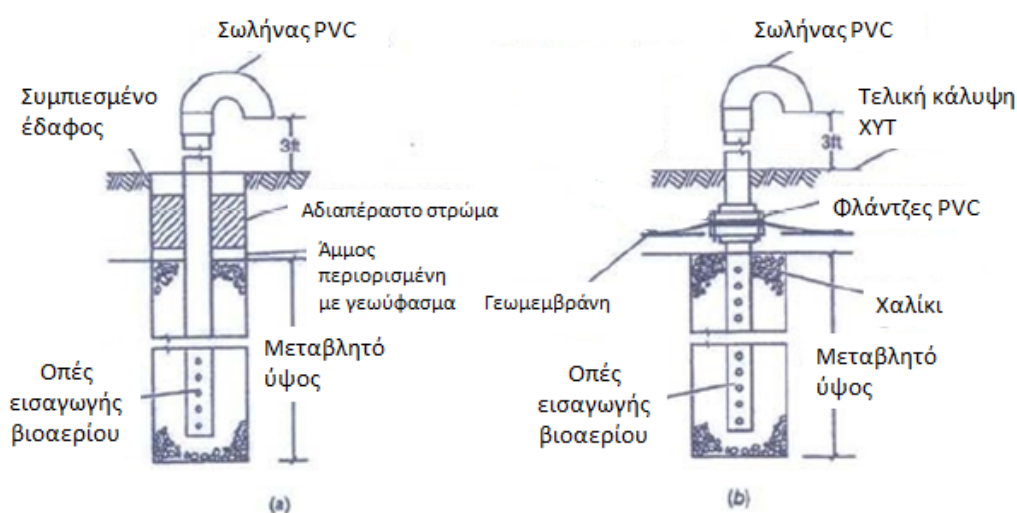
Αυτή η θεωρητική έκφραση χρησιμοποιείται ευρέως στα μοντέλα εκτίμησης παραγωγής του βιοαερίου.

Τα συστήματα συλλογής και ελέγχου βιοαερίου (ΣΣΕΒ) διακρίνονται σε:

- ❑ **Παθητικά:** είναι τα συστήματα που βασίζονται στην φυσική κίνηση του βιοαερίου, ως αποτέλεσμα της διαφοράς της πίεσης και/ή της συγκέντρωσης του παραγόμενου βιοαερίου. Η συλλογή μπορεί να γίνει με σύστημα κατακόρυφων πηγαδιών και/ή με τάφρο με χαλίκια.
- ❑ **Ενεργητικά:** είναι τα συστήματα που βασίζονται στην αναρρόφηση του βιοαερίου ως αποτέλεσμα δημιουργίας κενού από μια κινητήρια δύναμη (π.χ. ηλεκτροκινητήρας). Η συλλογή μπορεί να γίνει με σύστημα κατακόρυφων πηγαδιών ή οριζόντιων αγωγών.

6.4.4.1 Παθητικός έλεγχος βιοαερίου

Ο βασικός σκοπός του παθητικού ελέγχου των αερίων είναι η ελάττωση της πίεσης του βιοαερίου μέσα στο σώμα του ΧΥΤ, περιορίζοντας μ' αυτόν τον τρόπο τους κινδύνους έκρηξης. Τις περισσότερες φορές ο έλεγχος αυτός επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ανοιγμάτων μέσω του τελικού καλύμματος, που εκτείνονται μέσα στη μάζα των αποβλήτων. Στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζεται ένα τυπικό σύστημα παθητικού ελέγχου των αερίων ΧΥΤ. Στα αριστερά (α) φαίνεται το σύστημα για ΧΥΤ με κάλυμμα αλλά χωρίς τοποθέτηση γεωμεμβράνης, ενώ στα δεξιά (b) παρουσιάζεται το σύστημα για ΧΥΤ με κάλυμμα και γεωμεμβράνη.

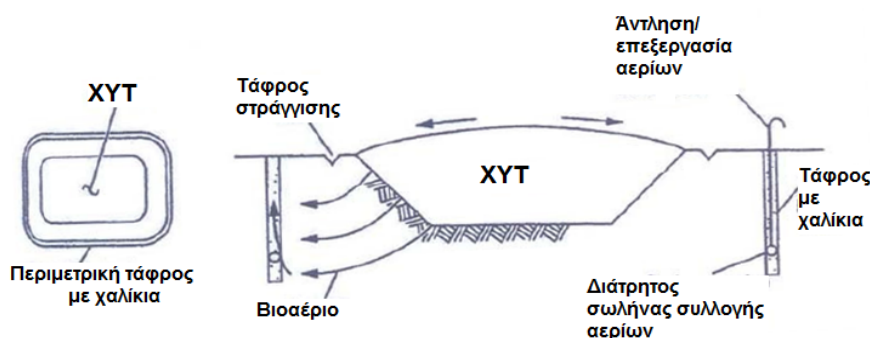


Σχήμα 6.18: Τυπικό σύστημα αερισμού (vents) για παθητικό έλεγχο αερίων ΧΥΤ

[Tchobanoglous et al., 1993].

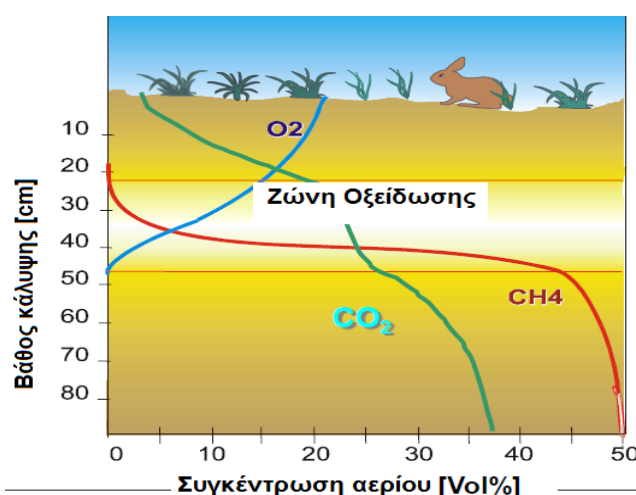
Στην περίπτωση που η συγκέντρωση του μεθανίου (CH_4) στο παραγόμενο βιοαέριο είναι σημαντική, πολλά κατακόρυφα ανοίγματα μπορούν να συνδεθούν με έναν πυρσό αερίου.

Για τον περιορισμό της διαφυγής του βιοαερίου από τις πλευρές του ΧΥΤ πολλές φορές κατασκευάζεται μια περιμετρική τάφρος με χαλίκια γύρω από τον χώρο ταφής, εντός της οποίας τοποθετείται οριζόντιος διάτρητος σωλήνας PVC (Σχήμα 6.19). Ο σωλήνας συνδέεται με κατακόρυφους σωλήνες και τα συλλεγόμενα αέρια, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, είτε εκλύονται στην ατμόσφαιρα, είτε προωθούνται σε έναν πυρσό αερίου.



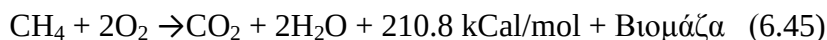
Σχήμα 6.19: Παράδειγμα περιμετρικής τάφρου με χαλίκια και διάτρητους σωλήνες [Tchobanoglous et al., 1993].

Στον παθητικό εξαερισμό μέσω της επιφάνειας, το βιοαέριο εξέρχεται από το εσωτερικό του ΧΥΤ μέσα από τμήματα («παράθυρα») της επιφανειακής κάλυψης, τα οποία έχουν διαστρωθεί με οργανικό εδαφικό υλικό (βιοφίλτρα). Η χρήση των βιοφίλτρων, από διαφορετικά υλικά (π.χ. κόμποστ), για τον περιορισμό των οσμών ή την απομάκρυνση των ιχνοαερίων, είναι μια συνηθισμένη πρακτική σε πολλά ΧΥΤ του κόσμου. Τελευταία έχει αποδειχθεί και η δυνατότητα βιοοξειδωσης του μεθανίου από συγκεκριμένα υλικά βιολογικής προέλευσης, εάν αυτά χρησιμοποιηθούν ως τελικό κάλυμμα του ΧΥΤ (σε ολόκληρη την έκταση ή σε μορφή «παραθύρων»). Όπως προκύπτει και από το Σχήμα 6.20, το μεθάνιο που παράγεται στο σώμα του ΧΥΤ ανεβαίνει προς τα ανώτερα στρώματα του υλικού κάλυψης, όπου παρουσία του ατμοσφαιρικού οξυγόνου, που διαχέεται, οξειδώνεται, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και νερό.



Σχήμα 6.20: Οξείδωση μεθανίου στο βιοφίλτρο [Cossu, 2010].

Η οξείδωση του μεθανίου περιγράφεται από την παρακάτω χημική αντίδραση:



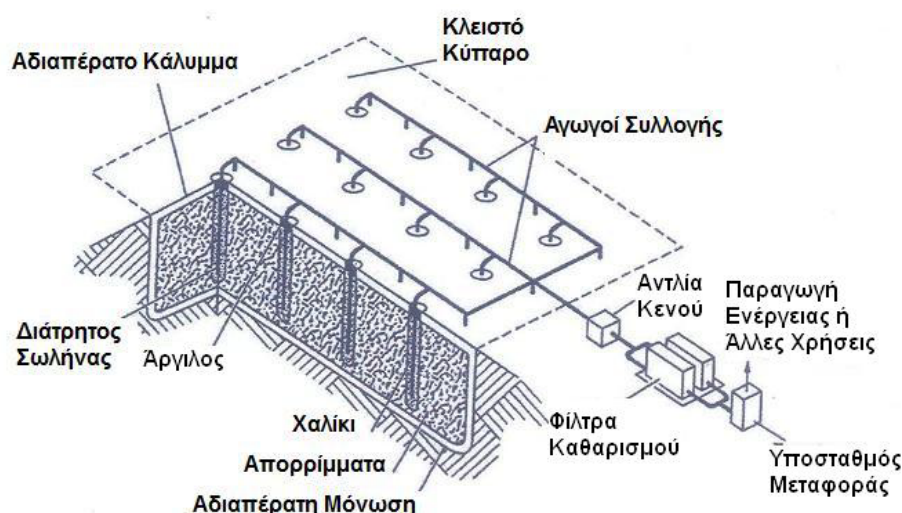
6.4.4.2 Ενεργητικός έλεγχος βιοαερίου

Η ικανοποιητική συλλογή του βιοαερίου πραγματοποιείται μόνο με την ενεργό απαέρωση του ΧΥΤ, οπότε το παραγόμενο αέριο αναρροφάται με εφαρμογή υποπίεσης, μέσω κατάλληλου συστήματος συλλογής και μεταφοράς, που κατασκευάζεται μέσα και πάνω από το στρώμα της απορριμματικής μάζας.

Κατακόρυφο σύστημα συλλογής βιοαερίου

Τα πηγάδια ανάκτησης βιοαερίου σχεδιάζονται να διαπερνούν μέχρι το 80% του βάθους των ΑΣΑ, διότι έτσι η ακτίνα επιρροής τους φθάνει μέχρι τη βάση του ΧΥΤ. Τυπικά, η υποπίεση, που εφαρμόζεται στο κάθε πηγάδι άντλησης, ανέρχεται σε 25 cm H₂O. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 6.21, πολλαπλά πηγάδια συλλογής συνδέονται στους κεντρικούς αγωγούς συλλογής και μεταφοράς, οι οποίοι με τη βοήθεια μιας αντλίας κενού μεταφέρουν το βιοαέριο προς το σύστημα φιλτραρίσματος και διαχωρισμού. Στη συνέχεια το βιοαέριο προωθείται στη μονάδα διαχείρισής του.

Η χωροθέτηση των κάθετων φρεατίων συλλογής βιοαερίου γίνεται βασισμένη σε διάταξη ισόπλευρου τριγώνου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.22.

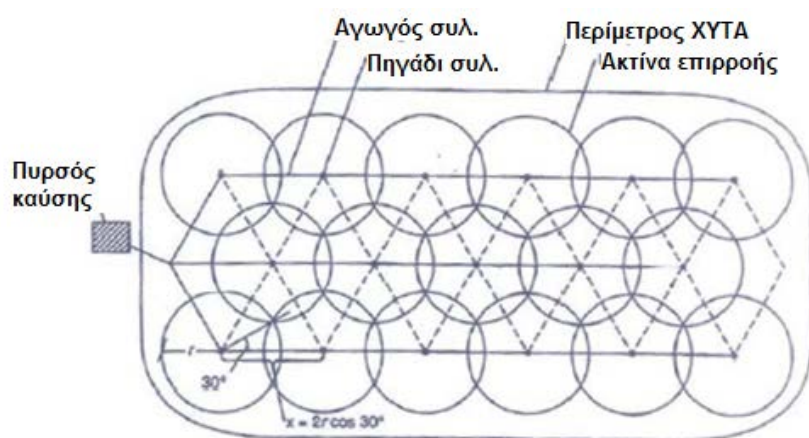


Σχήμα 6.21: Κατακόρυφο σύστημα συλλογής βιοαερίου [Tchobanoglous et al., 1993].



Εικόνα 6.3: Η κεφαλή του φρεατίου άντλησης βιοαερίου σε έναν ΧΥΤ [Cossu, 2010].

Η άντληση από κάθε πηγάδι πρέπει να δημιουργεί τέτοια υποπίεση ώστε η ακτίνα επιρροής (R) του κάθε πηγαδιού να έχει αλληλοεπικάλυψη περίπου 30-40% με την ακτίνα επιρροής του γειτονικού πηγαδιού. Δηλαδή, δυο πηγάδια δεν θα απέχουν μεταξύ τους απόσταση $2R$ (0% αλληλοεπικάλυψη), αλλά μικρότερη απόσταση, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή αλληλοεπικάλυψη και να μεγιστοποιείται η ανάκτηση βιοαερίου. Στην αντίθετη περίπτωση, λόγω ανομοιογένειας των απορριμμάτων είναι πιθανή η εμφάνιση «τυφλών» σημείων (blind spots) στην απορριμματική μάζα, που να μην εξυπηρετούνται από κανένα από τα πηγάδια.



Σχήμα 6.22: Χωροθέτηση κατακόρυφων πηγαδίων συλλογής βιοαερίου [Γιδαράκος, 2010].

Η απόσταση L μεταξύ δύο γειτονικών πηγαδιών δίνεται από τη σχέση:

$$L = (2 - O_{VL}/100) * R \quad (6.46)$$

όπου: O_{VL} = επιθυμητή αλληλοεπικάλυψη των ακτίνων επιρροής (%)

R = ακτίνα επιρροής του πηγαδιού (m)

Η απόσταση μεταξύ των πηγαδιών εξαρτάται και από το είδος του καλύμματος του ΧΥΤ. Στην περίπτωση του συνθετικού καλύμματος που περιέχει γεωμεμβράνη, οι αποστάσεις μεταξύ των πηγαδιών συνήθως ανέρχονται σε 50-65 μέτρα, ενώ στην περίπτωση μόνο του εδαφικού καλύμματος, οι αποστάσεις ελατώνονται (35-40 μέτρα) για την αποφυγή ατμοσφαιρικού αέρα στο σύστημα ανάκτησης.

Η παροχή άντλησης βιοαερίου από ένα μόνο πηγάδι, δίνεται από τη σχέση:

$$Q_w = \pi \cdot R^2 \cdot t \cdot D \cdot F_g \quad (6.47)$$

όπου: Q_w = παροχή άντλησης ανά πηγάδι, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακτίνα επιρροής του συγκεκριμένου πηγαδιού (m^3/s)

R = ακτίνα επιρροής του πηγαδιού (m)

t = βάθος απορριμμάτων (που διαπερνά το συγκεκριμένο πηγάδι) (m)

D = πυκνότητα συμπιεσμένων απορριμμάτων εντός του ΧΥΤ (Kg/m^3)

F_g = ρυθμός παραγωγής βιοαερίου εντός του ΧΥΤ ($m^3/Kg/s$)

Το τελευταίο, αν και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ζωής του ΧΥΤ, λαμβάνεται ως σταθερά για απλοποίηση των υπολογισμών.

Αξιίζει να σημειωθεί πως η περιοχή άντλησης μπορεί να υφίσταται υψηλές απώλειες και το ποσοστό ανάκτησης μπορεί να είναι χαμηλότερο ως και 30% της πραγματικής παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου. Το t της παραπάνω εξίσωσης αντιπροσωπεύει το βάθος των απορριμμάτων στο σημείο που γίνεται η γεώτρηση, διαπερνώντας δηλαδή όλα τα απορρίμματα ώστε να φτάνει περίπου στον πυθμένα του ΧΥΤ. Η τιμή της πυκνότητας των απορριμμάτων (D) ποικίλει σημαντικά, λόγω

της σύστασής τους και της ηλικίας του ΧΥΤ. Στα προβλήματα σχεδιασμού συνήθως επιλέγεται μια τιμή που κυμαίνεται από 600 και 800 kg/m³.

Αν και στην αρχή του κεφαλαίου παρουσιάστηκαν οι τρόποι εκτίμησης της ποσότητας του παραγόμενου βιοαερίου στα προβλήματα σχεδιασμού, για λόγους απλοποίησης, ο εμπειρικός ρυθμός Fg δέχεται τις ακόλουθες διακυμάνσεις:

- Ελάχιστη τιμή: Εναποτιθέμενοι τόνοι απορριμμάτων x 0.007 (m³/d)
- Μέση τιμή: Εναποτιθέμενοι τόνοι απορριμμάτων x 0.014 (m³/d)
- Μέγιστη τιμή: Εναποτιθέμενοι τόνοι απορριμμάτων x 0.028 (m³/d)

Η πτώση πίεσης σε συγκεκριμένο πηγάδι υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta p = \frac{\mu \cdot F_g \cdot D}{2 \cdot K_s} \left[R^2 \cdot \ln \left(\frac{R}{r_w} \right) + \frac{r_w^2}{2} - \frac{R^2}{2} \right] \quad (6.48)$$

- όπου: μ = κινηματικό ιξώδες του αερίου (Ns/m²)
 F_g = ρυθμός ανάκτησης βιοαερίου (m³/Kg/s)
 D = πυκνότητα συμπιεσμένων απορριμμάτων εντός του ΧΥΤ (Kg/m³)
 K_s = εσωτερική διαπερατότητα απορριμμάτων (m²)
 R = ακτίνα επιρροής πηγαδιού (m)
 r_w = ακτίνα πηγαδιού ανάκτησης (~0.15 m) (m)
 Δp = πτώση πίεσης σε συγκεκριμένο πηγάδι που έχει ακτίνα επιρροής R (N/m² ή Pa)

Με βάση την παραπάνω εξίσωση προσδιορίζεται η πτώση πίεσης του συγκεκριμένου πηγαδιού και για να υπολογιστεί η συνολική πτώση πίεσης του συστήματος αθροίζονται οι επιμέρους πτώσεις. Στον τελικό υπολογισμό θα πρέπει να λάβει χώρα και μια προσαύξηση της συνολικής πτώσης πίεσης κατά 10-20%, για να καλυφθούν οι απώλειες λόγω τριβών στον κεντρικό σωλήνα συλλογής και οι πτώσεις πίεσης στις γωνίες και καμπύλες των αγωγών.

Ένα από τα σημαντικότερα μέρη του συστήματος ενεργητικής άντλησης και συλλογής βιοαερίου αποτελεί η αεραντλία κενού. Οι αεραντλίες επιλέγονται προσεκτικά στην φάση σχεδιασμού και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

- Η παροχή άντλησης της αντλίας βιοαερίου (L/min)

- ☐ Η μέγιστη απαιτούμενη πτώση πίεσης της αντλίας βιοαερίου (psi, bar, mm Hg).
- ☐ Η ισχύς της αεραντλίας (kW), όπως προκύπτει από το γινόμενο της παροχής άντλησης με την συνολική πτώση πίεσης.

Οριζόντιο σύστημα συλλογής βιοαερίου

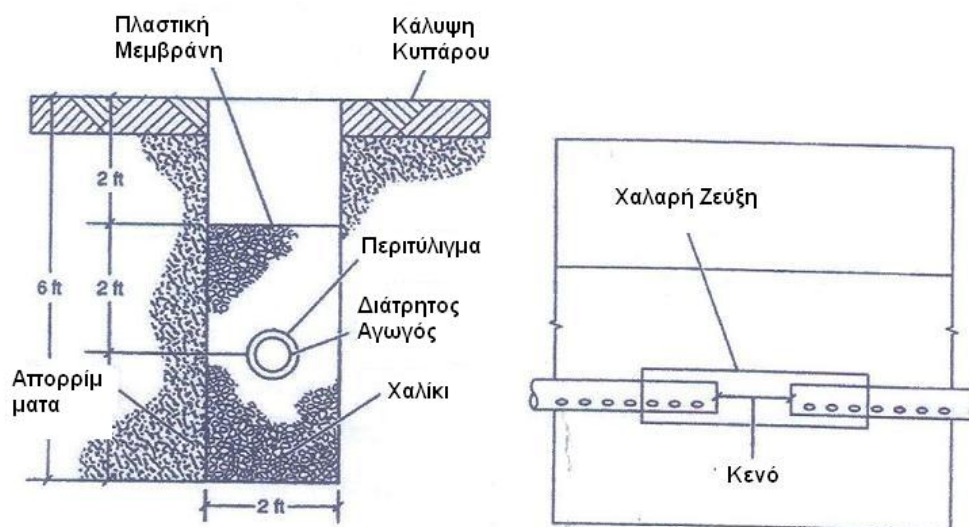
Τα πλεονεκτήματα άντλησης βιοαερίου με οριζόντιο δίκτυο περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- ☐ Ικανοποιεί την απαίτηση για άμεση λειτουργία ενεργητικής άντλησης του βιοαερίου, ακόμα και από εν λειτουργία κύτταρο. Τα οριζόντια πηγάρια τοποθετούνται αφού έχει συμπληρωθεί η κατασκευή δύο ή περισσότερων στρώσεων.
- ☐ Αποτρέπει τη συνεχή έκλυση βιοαερίου των κατακόρυφων φρεατίων στο σημείο του καθημερινού μετώπου ταφής (δραστική μείωση δυσοσμίας, όπως επίσης και αυξημένα επίπεδα ασφάλειας και υγείας).
- ☐ Αποτρέπει την αντιοικονομική έως επικίνδυνη (για έκρηξη) αναρρόφηση οξυγόνου.
- ☐ Αποτρέπει τη δυσκολία ελιγμών στο μέτωπο ταφής.
- ☐ Επιτρέπει τη δυνατότητα επιλογής από ποια περιοχή θα πραγματοποιηθεί η αναρρόφηση.

Τα οριζόντια φρεάτια αποτελούνται από διάτρητους αγωγούς (συνήθως HDPE) εγκαθιστούμενους σε πορώδες υλικό, που τοποθετούνται σε τάφρους παράλληλες με τα επίπεδα ανάπτυξης των ταμπανιών, σε συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους και σε καθορισμένα ύψη. Οι άκρες των αγωγών συνδέονται με το δίκτυο άντλησης, με κεφαλές αντίστοιχες με αυτές των κάθετων φρεατίων και αδιάτρητους αγωγούς.

Δύο τρόποι κατασκευής οριζόντιων φρεατίων έχουν επικρατήσει. Ο πρώτος τρόπος (Σχήμα 6.23 και Εικόνα 6.4) αφορά στην εκσκαφή τάφρου περίπου 1,2- 1,5 μέτρων βάθους και 0,6-0,8 πλάτους, όταν τελειώσει το ταμπάνι, στο πάνω μέρος αυτού, έτσι ώστε ο αγωγός να τοποθετείται πάνω σε στρώση χαλικιού 20-30 εκατοστών. Στη συνέχεια τοποθετείται μία παρόμοια στρώση πάνω από τον αγωγό του βιοαερίου και το κενό ως την επιφάνεια του ταμπανιού γεμίζει με απορρίμματα.

Ο δεύτερος τρόπος αφορά στην τοπική αφαίρεση του υλικού επικάλυψης στο τελειωμένο ταμπάνι και μάλιστα με τέτοιο τρόπο ώστε να γεμίζει το κενό με χαλίκι ή άλλο πορώδες μέσο, να στρώνεται ο αγωγός, να καλύπτεται με χαλίκι και στη συνέχεια να διαμορφώνεται το επόμενο ταμπάνι πάνω από τον αγωγό.



Σχήμα 6.23: Κάτοψη και τομή οριζόντιου αγωγού συλλογής βιοαερίου [Tchobanoglous et al., 1993].



Εικόνα 6.4: Τοποθέτηση οριζόντιων αγωγών συλλογής βιοαερίου [CRA, 2010].

6.4.4.3 Συμπυκνώματα

Το αέριο μόλις εξέρχεται του ΧΥΤ από τα φρεάτια απαγωγής είναι κορεσμένο από υδρατμούς. Για το λόγο αυτό απαιτείται σύστημα αφύγρανσης για την

κατακράτηση των συμπτυκνωμάτων. Τα συμπτυκνώματα έχουν έντονα διαβρωτικές ιδιότητες και η μη αφαίρεσή τους δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στις συσκευές και τα όργανα του δικτύου. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος μπλοκαρίσματος των σωληνώσεων από τα συμπτυκνώματα, χρησιμοποιείται η τεχνική «reverse blowing», όπου το αέριο οδηγείται κατά διαστήματα προς την αντίθετη κατεύθυνση του δικτύου. Λόγω της υψηλής πίεσης και της μεγάλης διαθέσιμης ποσότητας βιοαερίου, το αέριο κινείται τόσο γρήγορα ώστε συμπαρασύρει τα συμπτυκνώματα προς τα σημεία απομάκρυνσης συμπτυκνωμάτων.

Ο υπολογισμός της αναμενόμενης ποσότητας συμπτυκνωμάτων γίνεται με την χρήση της καταστατικής εξίσωσης των αερίων :

$$PV = nRT \quad (6.49)$$

και της εξίσωσης

$$P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2 \quad (6.50)$$

όπου: P_1, V_1, T_1 = παράμετροι βιοαερίου στην απορριμματική μάζα

P_2, V_2, T_2 = παράμετροι βιοαερίου στην επιφάνεια

Αρχικά υπολογίζεται η παροχή στις κεφαλές των φρεατίων. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ποσότητα υδρατμών στο βιοαέριο, όταν αυτό βρίσκεται στις κεφαλές των φρεατίων, με τη βοήθεια διαγραμμάτων τάσης ατμών. Αφού υπολογιστεί η ποσότητα υδρατμών, που περιέχεται στους κλάδους απαγωγής του αερίου στον φυσητήρα, υπολογίζεται η διαφορά, η οποία αντιστοιχεί στα συμπτυκνώματα που απομακρύνονται στους συλλέκτες [Σουνά, 2010].

6.4.4.4 Διαχείριση βιοαερίου

Μονάδα άντλησης και καύσης

Στην περίπτωση που η περιεκτικότητα του συλλεγόμενου βιοαερίου σε μεθάνιο είναι υψηλή, το αέριο χρήζει επεξεργασίας πριν την έκλυσή του στην ατμόσφαιρα. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος επεξεργασίας του βιοαερίου είναι η καύση.

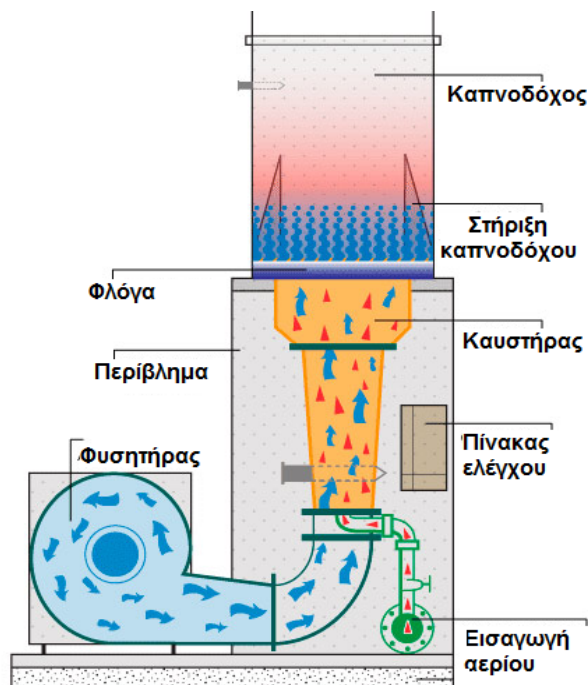
Ο σχεδιασμός της μονάδας καύσης πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- ☐ Η μονάδα να εγκαθίσταται σε σταθερό έδαφος.
- ☐ Ο ηλεκτρικός κινητήρας να είναι αντiekρηκτικού τύπου.
- ☐ Όλες οι σωληνώσεις να είναι γαλβανισμένες.
- ☐ Η ελάχιστη θερμοκρασία του πυρσού καύσης να είναι 850°C.
- ☐ Να υφίσταται μια διάταξη συνεχούς ανάλυσης του βιοαερίου.
- ☐ Να υπάρχουν διατάξεις ασφαλείας (αντιανέμιο, βαλβίδες αυτόματης διακοπής κλπ.)

Στον βασικό εξοπλισμό της μονάδας περιλαμβάνονται συνοπτικά τα ακόλουθα [Σουνά, 2010]:

1. **Δοχείο κατακράτησης συμπτυκνωμάτων** στην είσοδο του φυσητήρα, με φίλτρο αφύγρανσης. Η μονάδα φιλτράρει το ρεύμα του αερίου πριν την είσοδο στην φλογοπαγίδα.
2. **Ηλεκτροκινητήρας** αντiekρηκτικής κατασκευής σε άμεση ρύθμιση με τον φυσητήρα, ικανός να παραδίνει το απαιτούμενο αέριο με εύρος λειτουργίας 1:10.
3. **Μανόμετρο** στην έξοδο του φυσητήρα.
4. **Κινητήρας** εφοδιασμένος με εκκινητή star – delta.
5. **Βαλβίδα** για τη ρύθμιση της παροχής και τροφοδοσίας του πυρσού καύσης.
6. **Φλογοπαγίδα** από ανοξείδωτο χάλυβα στην είσοδο και την έξοδο του φυσητήρα.
7. **Πυρσός καύσης** από ανοξείδωτο χάλυβα με έλεγχο της θερμοκρασίας καύσης, που επιτρέπει τη ρύθμιση στην απαιτούμενη θερμοκρασία.
8. **Αισθητήρας UV** για την ανίχνευση φλόγας.
9. **Ηλεκτρική ανάφλεξη**, μόλις η μονάδα τεθεί σε λειτουργία. Η διαδικασία της καύσης ελέγχεται από το PLC, ενώ περιλαμβάνονται ακίδες ανάφλεξης, UV αισθητήρας και είσοδος δευτερογενούς αέρα.
10. **Σημείο δειγματοληψίας** στην έξοδο του φυσητήρα.
11. **Επιλογέας** για συνεχή λειτουργία καύσης του αερίου, σταμάτημα του πυρσού ή/και δυνατότητα απαερίωσης (gas vent).
12. **Πίνακας ελέγχου** με προστασία από τις καιρικές συνθήκες (IP55) και ενδείξεις α) παροχή αερίου (m^3/h), β) περιεχόμενο μεθάνιο (%), γ) χρόνο λειτουργίας (hrs), δ) περιεχόμενο οξυγόνο (%).

Η σχηματική απεικόνιση τυπικής μονάδας καύσης βιοαερίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.24.



Σχήμα 6.24: Τυπικός πυρσός καύσης βιοαερίου [CRA, 2010].

Ενεργειακή αξιοποίηση

Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο, η οικονομική αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου μπορεί να αποτελέσει μια αξιοσημείωτη επιλογή διαχείρισής του. Ευνόητο είναι ότι η ανάλυση των δεδομένων και η βιωσιμότητα αξιοποίησης αυτής της δυνατότητας, αποτελεί αντικείμενο εξειδικευμένης μελέτης. Χοντρικά, η επιλογή της ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαερίου εξαρτάται από την ποιότητα και την ποσότητά του. Βιοαέριο με περιεκτικότητα σε μεθάνιο κάτω από 45% σπάνια αξιοποιείται λόγω χαμηλής απόδοσης της διεργασίας και των πιθανών προσμίξεων του βιοαερίου (π.χ. H_2S).

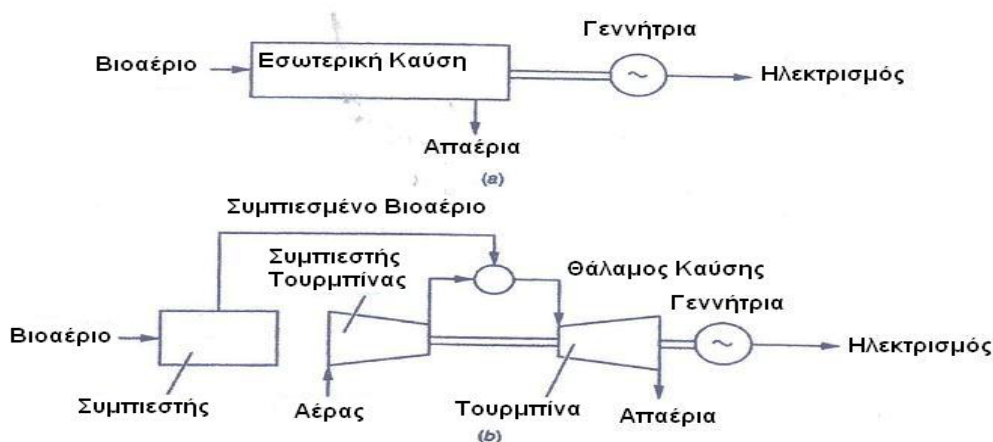
Αν το βιοαέριο περιέχει H_2S , η θερμοκρασία της καύσης απαιτεί αυστηρό έλεγχο, λόγω προβλημάτων διάβρωσης, εναλλακτικά το H_2S πρέπει να απομακρυνθεί από το βιοαέριο (scrubber) πριν την καύση του.

Πολλές φορές για να αυξηθεί η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο χρησιμοποιούνται τεχνικές διαχωρισμού (ημιπερατές μεμβράνες, φυσική ή χημική προσρόφηση κλπ.) για την απομάκρυνση των CO_2 , H_2O και H_2S από το μείγμα.

Όπως αναφέρθηκε και πριν, η ποσότητα του παραγόμενου βιοαερίου παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της μεθόδου κατάλληλης διαχείρισής του. Ενδεικτικά, στην περίπτωση του σχεδιασμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω συσχέτιση της παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου και των μεθόδων διαχείρισής του:

- $<150 \text{ m}^3/\text{h}$ – βιοφίλτρα
- $>150 < 1200 \text{ m}^3/\text{h}$ – πυρσός καύσης
- $>1200 \text{ m}^3/\text{h}$ – ενεργειακή αξιοποίηση

Για την καύση του βιοαερίου σε μικρές εγκαταστάσεις ($<5 \text{ MW}$) χρησιμοποιούνται συνήθως μηχανές εσωτερικής καύσης διπλού εμβόλου (Σχήμα 6.25 (a)), ενώ σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις συνήθως γίνεται χρήση τουρμπίνων ατμού (Σχήμα 6.25 (b)).



Σχήμα 6.25: Διατάξεις ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου [Γιδαράκος, 2010].

Στο Σχήμα 6.26 παρουσιάζεται αναλυτικά μια τυπική μονάδα καύσης βιοαερίου.

288

6.5 Περίοδος μεταφροντίδας ενός ΧΥΤΑ

Σύμφωνα με την ΚΥΑ 29407/3508 (ΦΕΚ 1572Β', 16-12-2002) «*Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων*», ορίζεται ότι μετά την οριστική παύση λειτουργίας ενός χώρου υγειονομικής ταφής, ο φορέας διαχείρισης / λειτουργίας είναι υπεύθυνος για τη συντήρηση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο (monitoring) του χώρου κατά την φάση της μετέπειτα φροντίδας. Η μεταφροντίδα του χώρου μπορεί να διαρκέσει για όσο χρονικό διάστημα ο χώρος μπορεί να ενέχει κινδύνους [Γενειατάκης, 2004].

Στην περίοδο μεταφροντίδας διενεργείται μια εκτίμηση επικινδυνότητας, η οποία περιλαμβάνει:

- Στοιχεία παραλαβής και διάθεσης των αποβλήτων.
- Αξιολόγηση της ασφάλειας συστημάτων στεγάνωσης σε μακροπρόθεσμη βάση.
- Καταγραφή των υδρογεωλογικών δεδομένων σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των ελέγχων και των υπαρχόντων σχεδιασμών.

Για τους σκοπούς αυτούς ελέγχονται και λαμβάνονται τα ακόλουθα μέτρα:

- Σύστημα τελικής επικάλυψης.
- Τυχόν παραμορφώσεις της τελικής επικάλυψης.
- Απορροή των βροχοπτώσεων.
- Έλεγχος τυχόν ρωγματώσεις.
- Έλεγχος του αποστραγγιστικού συστήματος της τελικής επικάλυψης.

Τα στοιχεία, που πρέπει να συγκεντρώνονται, φαίνονται στον Πίνακα 6.14.

Σημειώνεται, ότι οι συχνότητες ελέγχου που αναφέρονται στον προηγούμενο πίνακα, ενδέχεται να αλλάξουν ανάλογα με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του ΧΥΤΑ, τα οποία όμως καθορίζονται από την άδεια εγκατάστασης και λειτουργίας. Επίσης, η αποτελεσματικότητα του συστήματος απαγωγής αερίων πρέπει να ελέγχεται τακτικά. Σχετικά με την ποιότητα των υπογείων νερών, προτείνονται παράμετροι ποιότητας, οι οποίες μπορεί να είναι: το pH, ο TOC, οι φαινόλες, τα βαρέα μέταλλα, το φθόριο, το αρσενικό και οι υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο).

Πίνακας 6.14: Παράμετροι ελέγχου κατά τη μεταφροντίδα ΧΥΤΑ [Γενειατάκης, 2004].

	Παράμετρος	Συχνότητα ελέγχου
<i>Μετεωρολογικά στοιχεία</i>	Ύψος ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων	Καθημερινά επιπλέον των μηνιαίων τιμών
	Θερμοκρασία (κατώτατη, ανώτατη)	Μηνιαίος μέσος όρος
	Εξάτμιση	Καθημερινά επιπλέον των μηνιαίων τιμών
	Ατμοσφαιρική υγρασία	Μηνιαίος μέσος όρος
<i>Στραγγίσματα Αέρια Επιφανειακή απορροή</i>	Όγκος στραγγισμάτων	Ανά εξάμηνο
	Σύνθεση στραγγισμάτων	
	Όγκος και σύνθεση επιφανειακών υδάτων	
	Δυναμικές εκπομπές αερίων και ατμοσφαιρική πίεση (CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, O ₂ , H ₂ , κ.λ.π.)	
<i>Υπόγεια νερά</i>	Στάθμη υπογείων υδάτων	Ανά εξάμηνο
	Σύνθεση υπογείων υδάτων	
<i>Τοπογραφία του χώρου</i>	Καθίζηση του φορτίου αποβλήτων του ΧΥΤΑ	Ετήσια ανάγνωση

Για όλες τις παραμέτρους ποιότητας κατά την περίοδο μεταφροντίδας ενός ΧΥΤΑ, καθορίζονται επίπεδα συναγερμού τα οποία, αν είναι δυνατόν, αναγράφονται στην αδειοδότηση. Όταν κάποια τιμή φθάσει στο επίπεδο συναγερμού, επιβεβαιώνεται με δεύτερη δειγματοληψία και ακολουθεί η εφαρμογή σχεδίου έκτακτης ανάγκης. Το σχέδιο αυτό πρέπει να προσδιορίζεται στην αδειοδότηση. Ακόμη, η μεταφροντίδα περιλαμβάνει την προστασία του χώρου έναντι ανεπιθύμητων ανθρωπογενών παρεμβάσεων όπως: απόρριψη απορριμμάτων, παράνομο κυνήγι, καταπάτηση έκτασης και ανάπτυξη παράνομων επιχειρηματικών δράσεων.

6.6 Αποκατάσταση ενός ΧΥΤΑ

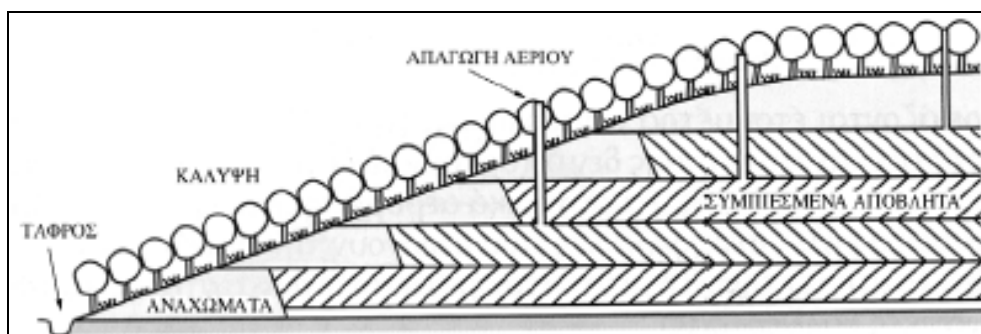
Μετά το τέλος της λειτουργίας ενός ΧΥΤΑ απαιτείται μια σειρά εργασιών και επεμβάσεων, ώστε οι επιπτώσεις στο τοπίο να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Οι επεμβάσεις αυτές ελαχιστοποιούνται, αν κατά τη φάση σχεδιασμού του ΧΥΤΑ λήφθηκαν υπόψη χωροταξικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Η αποκατάσταση επιτυγχάνεται με τεχνικές παρεμβάσεις, τεχνικά απλές, οικονομικά εφικτές και κυρίως περιβαλλοντικά αποτελεσματικές. Οι τεχνικές αυτές παρεμβάσεις αναλύονται και αναπτύσσονται ως εξής:

- Εξομάλυνση και σταθεροποίηση του υπάρχοντος απορριμματικού ανάγλυφου:
Έλεγχος απορρίψεων, περίφραξη, χωματουργικές εργασίες.

- Διαχείριση στραγγισμάτων: Εντοπισμός πλευροδιηθημάτων, διαμόρφωση σημειακών (λάκκοι) ή γραμμικών (χαντάκια) στοιχείων συλλογής και κατείσδυσης των πλευροδιηθημάτων στο απορριμματικό ανάγλυφο.
- Κατασκευή επιφανειακής στρώσης στεγάνωσης.
- Απορροή ομβρίων: Συνδυασμός αναχωμάτων και τάφρων για έλεγχο εισροών. Κατασκευή συστήματος αυλακιών πάνω στη στεγανωτική στρώση για περιορισμό των διαβρώσεων και των κατεισχύσεων.
- Στρώση ανάπτυξης πρασίνου: Τοποθέτηση στρώσης φυτικού εδάφους πάνω στη στεγανωτική στρώση.
- Διαχείριση βιοαερίου: Σε αποκατάσταση ανεξέλεγκτων χώρων διάθεσης απορριμμάτων αποφεύγεται η κατασκευή έργων σύλληψης και απαγωγής του βιοαερίου, επειδή αυτά ενδέχεται να λειτουργήσουν ως συστήματα οξυγόνωσης και αναζωπύρωσης λανθανουσών εστιών καύσης. Σε περίπτωση που δεν παρατηρούνται συμπτώματα αυτανάφλεξης ή σε περίπτωση που αυτή εκτιμάται ως ελεγχόμενη και περιορισμένη, προτείνεται η απαγωγή του βιοαερίου να γίνεται με περιορισμένο αριθμό «γεωτρήσεων» ή «παραθύρων», που θα διανοιχτούν στη μάζα των απορριμμάτων των τελευταίων στρωμάτων. Το βιοαέριο θα εξέρχεται με φυσικό ελκυσμό και θα καίγεται.
- Μεταφροντίδα - monitoring: Όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Στο Σχήμα 6.27 φαίνεται η αποκατάσταση ενός ΧΥΤΑ με δεντροφύτευση της επιφάνειας.



Σχήμα 6.27: Αποκατάσταση ΧΥΤΑ [Γιδαράκος, 2006].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο

Σχεδιαστικά Θέματα Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ)

7.1 Χωροθέτηση

Η επιλογή της τοποθεσίας ενός χώρου υγειονομικής ταφής είναι κρίσιμη για την ελαχιστοποίηση των πιθανών συνεπειών αυτού στο περιβάλλον. Η προσεκτική επιλογή του χώρου μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των επιπτώσεων της υγειονομικής ταφής απορριμμάτων στο περιβάλλον, καθώς επίσης και του κόστους της λειτουργίας και της αποκατάστασης αυτού.

Τα ζητήματα προς εξέταση κατά το στάδιο του σχεδιασμού είναι:

- ☐ Το μέγεθος και οι διαστάσεις του χώρου, που απαιτούνται για την κάλυψη των τωρινών και των μελλοντικών αναγκών.
- ☐ Η αξιοποίηση όλων των πιθανών επιλογών διαχείρισης των αποβλήτων, όπως:
 - Μείωση
 - Επαναχρησιμοποίηση
 - Ανακύκλωση
 - Κομποστοποίηση
 - Αποτέφρωση
- ☐ Το σχέδιο διαχείρισης των αποβλήτων της περιοχής, στην οποία θα βρίσκεται ο ΧΥΤ.
- ☐ Το σχέδιο διαχείρισης των αποβλήτων των περιοχών, τις οποίες θα εξυπηρετεί ο ΧΥΤ.
- ☐ Οι περιφερειακές πολιτικές διαχείρισης των αποβλήτων.
- ☐ Η απόσταση του ΧΥΤ από τις εξυπηρετούμενες περιοχές.

- ☐ Η εποχιακή πρόσβαση για τα οχήματα, μηχανήματα και εξοπλισμό.
- ☐ Οι περιβαλλοντικές παράμετροι του ΧΥΤ και η καταλληλότητα της τοποθεσίας του (επιφανειακά ύδατα, είδη εδάφους, βλάστηση, κλπ.).

7.1.2 Βασικά βήματα / στάδια

Η επιλογή της τοποθεσίας του χώρου υγειονομικής ταφής απαιτεί προσεκτική εξέταση και αξιολόγηση όλων των στοιχείων της κατασκευής και της λειτουργίας του ΧΥΤ, που θα μπορούσαν, ενδεχομένως, να οδηγήσουν σε δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας είναι πρωταρχικής σημασίας στη διαδικασία σχεδιασμού ενός χώρου υγειονομικής ταφής, η οποία μειώνει την πιθανότητα αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον με βάση έγκυρες επιστημονικές και τεχνικές αρχές.

Η απόφαση της επιλογής της τοποθεσίας θα πρέπει να γίνεται συνυπολογίζοντας τα σχετικά ζητήματα της τοπικής κοινότητας, συμπεριλαμβανομένων των αναγκών, των προσδοκιών και των διαθέσιμων πόρων. Ενώ η επιλογή της τοποθεσίας θα πρέπει να βασίζεται κυρίως σε τεχνικούς παράγοντες, η αντίληψη της κοινότητας και οι αξίες της μπορεί να είναι κρίσιμες για την αποδοχή ενός χώρου υγειονομικής ταφής. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητος ο συνυπολογισμός της άποψης της τοπικής κοινότητας, ακόμα και στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού.

Η διαδικασία επιλογής της θέσης του ΧΥΤ συνήθως περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα/στάδια:

- ☐ Αρχική προμελέτη.
- ☐ Έρευνες στο πεδίο.
- ☐ Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) και μοντελοποίηση της πιθανής ρύπανσης.
- ☐ Οικονομική αξιολόγηση (να επαναληφθεί σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας).
- ☐ Κοινοτική διαβούλευση (που θα διεξαχθεί σε διάφορα στάδια της διαδικασίας).
- ☐ Αξιολόγηση τρόπων εξυγίανσης και αποκατάστασης του χώρου.

7.1.2.1 Αρχική προμελέτη

Χρησιμοποιώντας τα ακόλουθα γενικά κριτήρια, διάφορες πιθανές θέσεις θα πρέπει να εντοπιστούν και να αξιολογηθεί η καταλληλότητά τους:

- ☐ Γεωλογία (συμπεριλαμβανομένων των προφίλ του εδάφους).
- ☐ Υδρογεωλογία.
- ☐ Υδρολογία επιφανειακών υδάτων.
- ☐ Περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές.
- ☐ Τύποι βλάστησης.
- ☐ Σταθερότητα.
- ☐ Τοπογραφία.
- ☐ Καταλληλότητα χρήσης γης.
- ☐ Συμβατότητα με χρήση γης της περιοχής.

Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να συγκεντρωθούν από διάφορες πηγές, μεταξύ των οποίων:

- ☐ Γεωλογικοί χάρτες.
- ☐ Τοπογραφικοί χάρτες.
- ☐ Μετεωρολογικοί χάρτες βροχοπτώσεων.
- ☐ Υπουργείο Περιβάλλοντος.
- ☐ Περιφερειακά σχέδια.
- ☐ Ερωτηματολόγια τοπικής κοινότητας.

7.1.2.2 Έρευνες στο πεδίο

Οι επιτόπιες έρευνες θα πρέπει να ακολουθήσουν μια σταδιακή προσέγγιση, που αποτελείται από την προκαταρκτική έρευνα, την αρχική τεχνική έρευνα, τη μη-τεχνική έρευνα και τη λεπτομερή τεχνική έρευνα.

Προκαταρκτική έρευνα

Μια έρευνα πεδίου θα πρέπει να λάβει χώρα σε περιοχές που έχουν προσδιοριστεί από την αρχική προμελέτη. Η κάθε τοποθεσία θα πρέπει να αξιολογηθεί με βάση τα κριτήρια που αναφέρονται παραπάνω. Μετά την έρευνα, οι

περιοχές θα πρέπει να ταξινομηθούν σε έναν κατάλογο με βάση την καταλληλότητά τους. Πρέπει να δίδεται προσοχή κατά την κατάταξη της κάθε τοποθεσίας, διότι ο σχεδιασμός και οι λειτουργικές τεχνικές μπορούν να συμβάλουν, είτε αρνητικά, είτε θετικά, στην αρχική κατάσταση και τα ζητήματα της κοινότητας μπορούν να επηρεάσουν την τελική κατάταξη των τοποθεσιών.

Αρχική τεχνική έρευνα

Ο σκοπός των αρχικών τεχνικών ερευνών στον κατάλογο τοποθεσιών, που έχει μειωθεί από το προηγούμενο βήμα, είναι να εντοπιστούν τα σημαντικά, από τεχνικής πλευράς, λάθη, να μειωθεί περαιτέρω ο κατάλογος των περιοχών και να ακολουθήσει μια πιο λεπτομερής τεχνική έρευνα.

Οι αρχικές έρευνες πρέπει να περιλαμβάνουν:

- ☐ Λεπτομερή χαρτογράφηση της γεωλογίας της περιοχής.
- ☐ Γεωτεχνολογική έρευνα για την αξιολόγηση των εδαφών για τη συγκράτηση, τη σταθερότητα, το σεισμικό κίνδυνο και την καταλληλότητα του υλικού για τη μόνωση και την κάλυψη.
- ☐ Προσδιορισμό των πηγαδιών υδροληψίας της περιοχής και των χρηστών τους.
- ☐ Αναθεώρηση του ιστορικού σχετικά με το επίπεδο των υπόγειων υδάτων και την ποιότητά τους.
- ☐ Γεωτρήσεις υπογείων υδάτων για την αξιολόγηση της υδρογεωλογίας (στην ιδανική περίπτωση, αυτές οι γεωτρήσεις πρέπει να βρίσκονται στα σημεία που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση κατά τη λειτουργία και μετά το κλείσιμο του ΧΥΤ, εάν επιλεγεί η συγκεκριμένη τοποθεσία).
- ☐ Δειγματοληψίες των επιφανειακών και των υπογείων υδάτων και προσδιορισμό των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους.
- ☐ Εκτίμηση ευαισθησίας της χλωρίδας και της πανίδας της περιοχής και των κατάντη περιοχών.

Μη-τεχνική έρευνα

Μη τεχνικά ζητήματα, όπως κοινωνικά, πολιτιστικά και περιοχές αναψυχής, μπορεί να έχουν μεγάλη σημασία στην αποδοχή του έργου από την τοπική κοινωνία.

Οι ακόλουθοι παράγοντες θα πρέπει να αξιολογούνται πριν από τη λεπτομερή τεχνική έρευνα, που θα πραγματοποιηθεί σε μια τοποθεσία:

- ❑ Θέση των γειτονικών περιοχών (απόσταση από οικισμούς και κεντρικές αυτοκινητιστικές και σιδηροδρομικές αρτηρίες >500 m, απόσταση από αεροδρόμια >3000 m, κλπ.).
- ❑ Θέση των περιοχών κοινωνικό-πολιτιστικής σημασίας, όπως ποτάμια, ρέματα, περιοχές αναψυχής, νεκροταφεία, κλπ. (ελάχιστη απόσταση 500 m, ενδεικτική τιμή).
- ❑ Πιθανότητες για οχλήσεις, που συνδέονται με τις οσμές, τρωκτικά, πουλιά και μύγες, θόρυβο, σκόνη και την οπτική όχληση.
- ❑ Πρόσβαση στον χώρο και πιθανές επιπτώσεις από την κυκλοφορία των οχημάτων.
- ❑ Θέση των χώρων ιστορικής και αρχαιολογικής σημασίας.

Λεπτομερής τεχνική έρευνα

Οι πρώτες τεχνικές και μη έρευνες, σε συνδυασμό με την προκαταρκτική οικονομική αξιολόγηση, θα πρέπει να οδηγήσουν σε έναν περιορισμένο κατάλογο των πιθανών τοποθεσιών και εν συνεχεία στην περαιτέρω λεπτομερή τεχνική έρευνα.

Μετά από τη λεπτομερή έρευνα, την οικονομική αξιολόγηση και τις διαβουλεύσεις με την τοπική κοινότητα, θα πρέπει να είναι δυνατό να προσδιοριστεί η πλέον κατάλληλη θέση για την οποία θα ακολουθήσει η διαδικασία της έγκρισης.

7.1.2.3 Οικονομική αξιολόγηση

Μια προκαταρκτική οικονομική αξιολόγηση θα πρέπει να λάβει χώρα για μερικές από τις πιθανές τοποθεσίες του καταλόγου, έτσι ώστε να μπορεί να συγκριθεί το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του XYT σε διαφορετικές τοποθεσίες.

Η αξιολόγηση αυτή θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με πλήρη διαδικασία κοστολόγησης, στην οποία να προσδιορίζονται και να παραθέτονται όλα τα πραγματικά, προσδιορίσιμα και μετρήσιμα κόστη, που πληρώνονται από τον χειριστή του XYT.

Τα είδη των εξόδων, που πρέπει να εντοπιστούν και να αναλυθούν λεπτομερώς, περιλαμβάνουν τα εξής:

- ☐ Κόστος διαχείρισης, διοίκησης και οργάνωσης του έργου.
- ☐ Κόστος μελέτης και υλικών.
- ☐ Κόστος γης.
- ☐ Κόστος ανάπτυξης του έργου, συμπεριλαμβανομένων των ερευνών, του σχεδιασμού και της κατασκευής.
- ☐ Λειτουργικά έξοδα.
- ☐ Κόστος παρακολούθησης.
- ☐ Κόστος για κλείσιμο, αποκατάσταση και μετέπειτα παρακολούθηση του χώρου.
- ☐ Δυνητικό κόστος μετριασμού.

Το κόστος της μεταφοράς των απορριμμάτων σε διαφορετικούς χώρους υγειονομικής ταφής θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση των τοποθεσιών. Οι οικονομικές αξιολογήσεις θα πρέπει να επαναλαμβάνονται στην πορεία, όσο μειώνεται ο αριθμός των πιθανών τοποθεσιών και αυξάνονται οι πληροφορίες, σχετικά με τις συνθήκες και μηχανικές απαιτήσεις του χώρου.

7.1.2.4 Κοινοτική διαβούλευση

Κάθε πιθανός νέος χώρος υγειονομικής ταφής ή οποιαδήποτε επέκταση των υφιστάμενων εγκαταστάσεων υγειονομικής ταφής θα πρέπει να διαβουλεύονται με την τοπική κοινότητα. Η δημιουργία ενός νέου χώρου υγειονομικής ταφής ή η επέκταση σε υφιστάμενο χώρο υγειονομικής ταφής μπορεί να προκαλέσει καπνό, θόρυβο, οσμές και σκόνες, που μπορεί να επηρεάσουν την τοπική κοινότητα και το τοπικό περιβάλλον. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι σημαντικό να συμμετάσχουν τα μέλη της τοπικής κοινότητας στην επιλογή της τοποθεσίας πριν από την κατασκευή του καινούργιου ή την επέκταση του ήδη υπάρχοντος χώρου υγειονομικής ταφής. Αυτό θα επιτρέψει την ανταλλαγή πληροφοριών και τον έγκαιρο εντοπισμό θεμάτων, σημαντικών για την κοινότητα και το τοπικό περιβάλλον.

Η κοινότητα θα πρέπει να παρέχεται με επαρκή πληροφόρηση και ανάλογη ευκαιρία για σχολιασμό. Η λεπτομέρεια της πληροφορίας, που θα παρέχεται στην εκάστοτε κοινότητα, θα ποικίλλει ανάλογα με την φύση και την κλίμακα της προτεινόμενης υγειονομικής ταφής, αλλά θα πρέπει να περιλαμβάνει κατ'ελάχιστο μια αξιολόγηση των επιπτώσεων της πρότασης στην τοπική κοινότητα (π.χ. ευκαιρίες απασχόλησης, αύξηση κυκλοφορίας οχημάτων, θόρυβος, σκόνη και οσμές, κλπ.). Επιπλέον, η διαβούλευση με την τοπική κοινότητα μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις ανάγκες διαχείρισης των αποβλήτων της κοινότητας και τις απαιτήσεις ανάλογης εγκατάστασης. Η συμμετοχή της τοπικής κοινωνίας στις κρίσιμες αποφάσεις για τον εντοπισμό της κατάλληλης θέσης για έναν XYT μπορούν να περιορίσουν την εμφάνιση του συνδρόμου NIMB (Not In My Back Yard ή Όχι Στην Πίσω Αυλή Μου).

Όλες οι διαβουλεύσεις, που γίνονται με πρόσωπα, που ενδιαφέρονται ή επηρεάζονται από την πρόταση, θα πρέπει να καταγράφονται επισήμως.

7.1.3 Κριτήρια

Η αναγνώριση της καταλληλότητας της πιθανής τοποθεσίας του χώρου υγειονομικής ταφής, καθώς και των αλλαγών σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις, απαιτεί μια συνολική αξιολόγηση συνθηκών του χώρου και των πιθανών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Αυτό περιλαμβάνει την εξέταση της τοπογραφίας, των επιφανειακών υδάτων, της αποστράγγισης, της υδρογεωλογίας (υπόγεια ύδατα), της γεωλογίας, του κλίματος (συμπεριλαμβανομένης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και της μοντελοποίησης της μεταφοράς των οσμών), της χλωρίδας και πανίδας, της πρόσβασης και της απόστασης από την κοινότητα που θα εξυπηρετεί ο XYT.

Είναι απίθανο η πλειοψηφία των περιοχών να πληροί όλα τα αναγκαία κριτήρια, οπότε η αξιολόγηση της καταλληλότητας του χώρου πρέπει να εξετάσει και να δικαιολογήσει την απόρριψη ενός χώρου, που δεν πληροί όλα τα απαραίτητα κριτήρια.

Κατά τη διαδικασία επιλογής, βάση θα πρέπει να δοθεί στα ακόλουθα:

- ☐ Σύγκριση των χαρακτηριστικών του χώρου με τις εναλλακτικές προτάσεις.

- ☐ Δυνατότητα των μηχανικών συστημάτων να καλύψουν τις ελλείψεις του χώρου.
- ☐ Τρόποι λειτουργίας που προτείνονται για τον συγκεκριμένο XYT.
- ☐ Κοινωνικά και πολιτιστικά θέματα που σχετίζονται με το χώρο.

7.1.3.1 Γεωλογία

Η ύπαρξη κατάλληλου γεωλογικού προφίλ είναι σημαντική για την εξασφάλιση της συγκράτησης των παραγόμενων στραγγισμάτων σε μακροπρόθεσμη βάση ή σε περίπτωση αστοχίας των μονωτικών στρωμάτων. Η γεωλογία του χώρου θα πρέπει να αξιολογείται με αναφορά στην κίνηση των στραγγισμάτων και του βιοαερίου, που θα παράγονται στο XYT.

Η προτίμηση δίνεται σε περιοχές με χαμηλή διαπερατότητα εδάφους ($1 \cdot 10^{-9}$ m/s). Τα πρόσθετα στρώματα μονωτικού υλικού, που θα τοποθετηθούν (γεωμεμβράνη και γεωύφασμα), έχουν μια δεδομένη διάρκεια ζωής. Η ικανότητα των υποκείμενων στρωμάτων για περιορισμό της κίνησης των στραγγισμάτων έξω από το XYT στην περίπτωση της φυσικής φθοράς, των ατελειών κατά την εφαρμογή ή της αστοχίας των υλικών, πρέπει να εξεταστεί με μεγάλη προσοχή. Λόγω κινδύνου μεταφοράς των στραγγισμάτων και του βιοαερίου έξω από το σώμα του XYT, η τοποθεσία που θα επιλεγεί δεν πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- ☐ Εδάφη υψηλής διαπερατότητας, άμμος, χαλίκια, κλπ.
- ☐ Περιοχές υψηλής διαπερατότητας ή ρωγμές.
- ☐ Καρστικά πετρώματα.

Η αξιολόγηση της γεωλογίας και των εδαφών του χώρου θα πρέπει να περιλαμβάνει:

- ☐ Τη διαθεσιμότητα των υλικών για τη μόνωση, ημερήσια και τελική κάλυψη των απορριμμάτων. Προτιμούνται τα εδάφη με υψηλό ποσοστό των σωματιδίων αργίλου.
- ☐ Την καταλληλότητα των διαθέσιμων υλικών για την κατασκευή των φραγμάτων και των συστημάτων αποστράγγισης.

- ☐ Τα πιθανά προβλήματα διαχείρισης των ιζημάτων στην περίπτωση εδαφών με μεγάλη διάβρωση.
- ☐ Την υπάρχουσα ρύπανση της περιοχής και τις πηγές της.
- ☐ Την καταλληλότητα της περιοχής για επιφανειακή ή υπόγεια απόρριψη των απορριμμάτων (άρδευση).
- ☐ Τις πιθανές επιπτώσεις της αστοχίας του συστήματος συλλογής και διαχείρισης των στραγγισμάτων.

7.1.3.2 Σταθερότητα

Η σταθερότητα του χώρου θα πρέπει να εκτιμηθεί με βάση την υπάρχουσα και τη μελλοντική κατάσταση, περιλαμβανομένης και της μελλοντικής καθίζησης. Οι χώροι υγειονομικής ταφής δεν θα πρέπει να χωροθετούνται στις ακόλουθες περιοχές:

- ☐ Περιοχές που υπόκεινται σε αστάθεια, εκτός εάν η αστάθεια είναι επιφανειακή και μπορεί να ξεπεραστεί με χρήση μηχανικών μέσων.
- ☐ Περιοχές επιρρεπείς στις κινήσεις του εδάφους, διότι η κίνηση αυτή μπορεί να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στη μόνωση, στα συστήματα συλλογής στραγγισμάτων και βιοαερίου και στην τελική κάλυψη του XYT.
- ☐ Περιοχές σε απόσταση μικρότερη από 1 km από ρήγματα πρώτου βαθμού, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σεισμική δραστηριότητα.
- ☐ Περιοχές με γεωθερμική δραστηριότητα.
- ☐ Καρστικά πετρώματα.

Γενικά, προς αποφυγή μηχανικής αστάθειας του XYT, οι περιοχές με μεγάλες κλίσεις (π.χ. >30%) αποκλείονται από τον κατάλογο των πιθανών θέσεων.

7.1.3.3 Υδρογεωλογία

Η μελέτη της υδρογεωλογίας της περιοχής είναι σημαντική για την προστασία των υπόγειων υδάτινων πόρων και την εκτίμηση της τύχης και του ρυθμού απόρριψης των ρύπων, που ενδέχεται να εισέλθουν στα υπόγεια ύδατα. Οι χώροι υγειονομικής ταφής δεν πρέπει να χωροθετούνται στις ακόλουθες περιοχές:

- ☐ Περιοχές πάνω από υδροφορείς, που χρησιμοποιούνται για λήψη πόσιμου νερού.
- ☐ Περιοχές όπου, αφού ληφθούν υπόψη οι συγκεκριμένες προτάσεις για το σχεδιασμό, θα μπορούσε να επέλθει κίνδυνος υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων υδάτων της περιοχής.

Όλες οι νέες εγκαταστάσεις XYT απαιτούν την υδρογεωλογική αξιολόγηση. Οι υφιστάμενοι χώροι υγειονομικής ταφής απαιτούν την υδρογεωλογική αξιολόγηση μόνο στην περίπτωση που δεν υφίσταται πρόγραμμα παρακολούθησης ή το τρέχον πρόγραμμα παρακολούθησης δεν είναι σε θέση να προσδιορίσει όλες τις επιπτώσεις του χώρου στο περιβάλλον. Ο σκοπός μιας υδρογεωλογικής αξιολόγησης είναι να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ του χώρου υγειονομικής ταφής και της υδρογεωλογίας της γύρω περιοχής, προκειμένου να αξιολογηθεί ο πιθανός κίνδυνος για το περιβάλλον. Κατά την αξιολόγηση της καταλληλότητας του χώρου σε σχέση με την υδρογεωλογία, θα πρέπει να εξεταστούν τα ακόλουθα:

- ☐ Βάθος του υδροφόρου ορίζοντα και εποχιακές διακυμάνσεις του (η απόσταση πυθμένα του XYT από την υψηλότερη στάθμη του υπόγειου υδροφορέα δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 1 m).
- ☐ Θέσεις και είδη σημείων εμπλουτισμού του υδροφορέα.
- ☐ Απόσταση από τους χρήστες του νερού.
- ☐ Ευαισθησία των χρηστών του νερού.
- ☐ Χαρακτηριστικά διασποράς των υδροφόρων στρωμάτων.
- ☐ Διακυμάνσεις της στάθμης των υπόγειων υδάτων.
- ☐ Ρυθμός και κατεύθυνση της υπόγειας ροής.
- ☐ Ύπαρξη διαχωρισμού του υπόγειου υδροφορέα (π.χ. με αδιαπέρατο στρώμα).
- ☐ Αρχική ποιότητα νερού.
- ☐ Πιθανές επιπτώσεις αστοχίας του συστήματος συλλογής και επεξεργασίας των στραγγισμάτων.

Είναι σημαντικό να είναι γνωστές οι εποχιακές διακυμάνσεις της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα, διότι η προτεινόμενη ελάχιστη απόσταση μεταξύ του XYT και του υδροφορέα, η οποία μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη μόνωση που

χρησιμοποιείται, μετριέται στην ανώτερη στάθμη του. Η παρακολούθηση του υπόγειου υδροφορέα ξεκινάει στην φάση κατασκευής του έργου και συνεχίζεται και μετά το κλείσιμό του.

7.1.3.4 Υδρολογία

Η πιθανή ρύπανση των επιφανειακών υδάτων από τα στραγγίσματα του XYT είναι ένα από τα κυριότερα ζητήματα κατά την επιλογή της τοποθεσίας του. Στην περίπτωση που ο XYT βρίσκεται πλησίον υδάτινων επιφανειακών αποδεκτών, ο κίνδυνος ρύπανσης μπορεί να αυξηθεί σημαντικά.. Οι ενδεχόμενες επιπτώσεις της ρύπανσης του νερού είναι μεγαλύτερες σε αποδέκτες, που χρησιμοποιούνται για πόσιμο νερό ή υδατοκαλλιέργειες.

Είναι γενικά ανεπιθύμητο η χωροθέτηση του XYT να γίνεται στις ακόλουθες περιοχές:

- ☐ Κοίτες πλημμυρών - είναι οι περιοχές που θα μπορούσαν να πληγούν από μια μεγάλη (1 στα 100 χρόνια) πλημμύρα.
- ☐ Λεκάνες απορροής, που τροφοδοτούν τους αποδέκτες κοινωνικού χαρακτήρα.
- ☐ Ρωγμές με σημαντική διείσδυση νερού, εκτός εάν αυτό μπορεί να ελεγχθεί με μηχανικό τρόπο, χωρίς κινδύνους για την ακεραιότητα του χώρου υγειονομικής ταφής.
- ☐ Εκβολές ποταμών, λίμνες και υγρότοποι.

Κατά την αξιολόγηση της καταλληλότητας της τοποθεσίας για χώρο υγειονομικής ταφής, η τοπική υδρολογία πρέπει να εξετάζεται σε σχέση με την ευαισθησία του περιβάλλοντος υποδοχής, συμπεριλαμβάνοντας τα εξής:

- ☐ Απόσταση από τους υδάτινους αποδέκτες και τους υγροτόπους (ελάχιστη απόσταση 500 m).
- ☐ Κινδύνους ρύπανσης των υδατικών συστημάτων, που χρησιμοποιούνται για πόσιμο νερό ή υδατοκαλλιέργεια.
- ☐ Ευαισθησία των υδατικών οικοσυστημάτων.
- ☐ Πιθανότητα εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων (πλημμύρες, κυκλώνες, τσουνάμι, κλπ).

7.1.3.5 Τοπογραφία

Προσεκτική εξέταση θα πρέπει να δοθεί στη γεωμορφολογία της περιοχής του χώρου διάθεσης, η οποία μπορεί να επηρεάσει:

- ☐ Τον τρόπο διάθεσης, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.
- ☐ Την καταλληλότητα του χώρου για την κατασκευή των εγκαταστάσεων παροχής υπηρεσιών.
- ☐ Τη διαχείριση των επιφανειακών υδάτων.
- ☐ Την κατάσταση των υπόγειων υδάτων.
- ☐ Τον κίνδυνο διάβρωσης του εδάφους.
- ☐ Την πρόσβαση στο χώρο.
- ☐ Τη δυνατότητα περιορισμού της οπτικής όχλησης από τον χώρο.
- ☐ Την επίδραση των ανέμων στον χώρο.

Στην ιδανική περίπτωση η κλίση του εδάφους του χώρου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 5% (1 κάθετη προς 20 οριζόντια). Μικρότερες κλίσεις (μέχρι 5%) συμβάλουν στη διευκόλυνση του ελέγχου των ομβρίων υδάτων και των στραγγισμάτων, όπως επίσης και στη μηχανική σταθερότητα του χώρου και τη διευκόλυνση της χωροθέτησης των λειτουργικών εγκαταστάσεων. Κατά την εξέταση των πιθανών χώρων για XYT πρέπει να αξιολογείται και η δυνατότητα ελαχιστοποίησης των επιπτώσεων στο περιβάλλον μέσω εκμετάλλευσης των τοπογραφικών χαρακτηριστικών.

7.1.3.6 Περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές

Οι παραπάνω περιοχές οριοθετούνται από τον Κοινοτικό Κατάλογο Οικοτόπων CORINE, ο οποίος αποτελεί τη βάση της νέας οδηγίας της ΕΕ «περί πανίδας, χλωρίδας και οικοτόπων». Τα κριτήρια αξιολόγησης του οικολογικού πλούτου που εφαρμόζει το CORINE βασίζονται στην Κοινοτική Οδηγία 79-409 για την άγρια ορνιθοπανίδα και σε Διεθνείς Συμβάσεις κυρίως Σύμβαση της Βέρνης (1979), τις οποίες υποχρεούται να εφαρμόζει η Ελλάδα. Το παραπάνω κριτήριο οριοθετεί απαγορευμένες περιοχές για την χωροθέτηση ενός XYT.

7.2 Διαστασιολόγηση

Στα απλοποιημένα προβλήματα σχεδιασμού, η διαστασιολόγηση ενός XYT μπορεί να γίνει με χρήση του όγκου των παραγόμενων απορριμμάτων, όπως περιγράφεται από την παρακάτω εμπειρική εξίσωση:

$$V_{\text{απορρ.}} = \frac{E_a + E_b}{2} \cdot L_1 + \frac{E_b + E_c}{2} \cdot L_2 \quad (7.1)$$

όπου: E_a , E_b , E_c είναι εμβαδά τομών και L_1 , L_2 τα ανάλογα μήκη μετώπου.

Στην χρήση των εμπειρικών σχέσεων (όπως η παραπάνω) δεν είναι γνωστό το βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και το ύψος άνω της επιφάνειας του εδάφους.

Στην περίπτωση που πέρα του όγκου του XYT είναι απαραίτητη και η γνώση κάποιων από τις διαστάσεις του, γίνεται η υπόθεση των βασικών μεγεθών και ο προσδιορισμός της συνολικής (μέσης) επιφάνειας του XYT. Η αρχή αυτή περιγράφεται με την παρακάτω διαδικασία:

Γίνεται η υπόθεση ότι:

- Μέσο βάθος : ~8m
- Μέσο ύψος : ~10m
- Ύψος απορριμμάτων : ~ 8+10 = 18m
- Συνολικός όγκος απορριμμάτων: 500.000 m³ για 20 έτη

Άρα, η μέση επιφάνεια του υπό εξέταση XYT θα είναι :

$$500.000 \text{ m}^3 / 18 \text{ m} = 27.800 \text{ m}^2 \text{ ή } 28 \text{ στρέμματα}$$

Στην περίπτωση που οι παραπάνω προσεγγίσεις δεν αρκούν για την εκτίμηση των διαστάσεων ενός XYT, χρησιμοποιείται η αναλυτική διαδικασία διαστασιολόγησης, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια, ακολουθώντας τα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογισμός αναλυτικά (με χρήση π.χ. του Excel) ενός ορισμένου όγκου απορριμμάτων που θα οδηγηθούν στο XYT:

$$V_{\text{απορρ.}} (\text{m}^3)$$

(ΠΡΟΣΟΧΗ: ο όγκος αυτός θα μειωθεί κατά κάποιο ποσοστό (10-20%), εφόσον κατά τη διάρκεια της ζωής του XYT είναι σύνηθες να λάβει χώρα η καθίζηση των απορριμμάτων, λόγω βιοαποικοδόμησης).

Καθορισμός στη συνέχεια της πυκνότητας των απορριμμάτων, π.χ.:

$$\rho_{\text{απορρ.}} = 650 (\text{kg/m}^3)$$

και του χρόνου ζωής ενός XYT, π.χ.:

$$t_{\text{XYT}} = 20 (\text{χρόνια})$$

2. Η συνολική χωματοκάλυψη (ημερήσια ενδιάμεση και τελική) αποτελεί περίπου το 20 με 25% του συνολικού όγκου του χώρου.
3. Ο συνολικός όγκος του XYT (υπόγειος και υπέργειος) θα είναι:

$$V_{\text{συνολ.}} = V_{\text{απορρ.}} \cdot 75\% \quad (7.2)$$

4. Ο όγκος του απαιτούμενου χώματος θα είναι:

$$V_{\text{χώμα}} = V_{\text{συνολ.}} \cdot 25\% \quad (7.3)$$

5. Η συνολική έκταση εκσκαφής μπορεί αρχικώς να υπολογιστεί από τον όγκο του απαιτούμενου χώματος και από το μέγιστο βάθος εκσκαφής D. Το D θα πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του ύψους των κελιών, π.χ. εάν ένα κελί έχει ύψος ~2.5m (μαζί με τη χωματοκάλυψη), τότε το D θα πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των παραπάνω τιμών (7,5m, 10m, 15m, κλπ.).

(ΠΡΟΣΟΧΗ: στον υπολογισμό του μέγιστου βάθους εκσκαφής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ανάλογη ευρωπαϊκή νομοθεσία, σύμφωνα με την οποία ο πυθμένας του XYT πρέπει να απέχει τουλάχιστον 1m από τον υδροφόρο ορίζοντα).

6. Υπολογισμός της κλίσης των υπογείων πρανών SL. Οι προτεινόμενες κλίσεις των πρανών κάτω και πάνω από το έδαφος είναι 4:1 (με ελάχιστη κλίση 3:1).

7. Υπολογισμός της διάταξης του XYT. Σε περίπτωση τετράγωνης διάταξης, η έκταση μεταξύ των πρανών θα είναι:

$$A_1 = L^2 \quad (7.4)$$

8. Ο υπόγειος ωφέλιμος όγκος – χωρίς των υπολογισμό των γωνιών – που εναποτίθενται τα απορρίμματα και το χώμα, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{\text{υπογ.χπ.}} = A_1 \cdot D + (SL \cdot D^2 / 2) \cdot L \cdot 4 \quad (7.5)$$

9. Συμπεριλαμβάνοντας τις γωνίες, η κάθε γωνία καταλαμβάνει $\frac{1}{4}$ του όγκου μιας πυραμίδας με βάθος D, και κατά συνέπεια ο συνολικός όγκος των υπογείων γωνιών είναι:

$$V_{\text{υπογ.π.}} = (2 \cdot SL \cdot D)^2 \cdot D \cdot 1/3 \quad (7.6)$$

Επομένως, και ο συνολικός υπόγειος όγκος υπολογίζεται ως:

$$V_{\text{υπογ.}} = V_{\text{υπογ.χπ.}} + V_{\text{υπογ.π.}} \quad (7.7)$$

(ΠΡΟΣΟΧΗ: θα πρέπει να ισχύει $V_{\text{υπογ.}} \geq V_{\text{χώμα}}$)

10. Το μήκος της κάθε πλευράς υπολογίζεται ως κάτωθι:

$$\Pi = L + (SL \cdot D) \cdot 2 \quad (7.8)$$

Σε μια τετράγωνη διάταξη, η αντίστοιχη επιφάνεια του χώρου είναι:

$$A_{\text{XYT}} = \Pi^2 \quad (7.9)$$

11. Οι διαστάσεις των πλευρών θα είναι:

- Η ανώτερη πλευρά Z υπολογίζεται ως εξής:

$$Z = \Pi - (SL \cdot H) \cdot 2 \quad (7.10)$$

- Αντίστοιχα, η άνω επιφάνεια θα είναι:

$$A_3 = Z^2 \quad (7.11)$$

12. Υπολογισμός των επιμέρους όγκων του XYT:

- Ο όγκος της άνω επιφάνειας:

$$V_{\text{άνω}} = A_3 \cdot H \quad (7.12)$$

- Ο όγκος στα πλευρικά μέρη:

$$V_{\text{πλευρ.}} = [(H \cdot 4H)/2] \cdot Z \cdot 4 \quad (7.13)$$

- Θεωρώντας πυραμιδική την δομή του XYT, ο συνολικός όγκος των 4 υπέργειων γωνιών υπολογίζεται ως:

$$V_{\text{γων.}} = (2 \cdot SL \cdot H)^2 \cdot H \cdot 1/3 \quad (7.14)$$

$$V_{\text{υπεργ.}} = V_{\text{άνω}} + V_{\text{πλευρ.}} + V_{\text{γων.}}$$

ή

$$V_{\text{υπεργ.}} = V_{\text{συνολ.}} - V_{\text{υπογ.}} \quad 7.15$$

7.3 Χωματοκάλυψη

7.3.1 Τεχνική Noble

Η ημερήσια χωματοκάλυψη των απορριμμάτων αποτελούσε το πρώτο βήμα στην εξέλιξη της ταφής από χωματερές σε υγειονομική ταφή. Η τεχνική αυτή περιορίζει το διασκορπισμό των απορριμμάτων και την εμφάνιση οσμών, εντόμων και τρωκτικών. Ο υπολογισμός της ημερήσιας χωματοκάλυψης συνήθως γίνεται με την χρήση της τεχνικής του NOBLE (1976), σύμφωνα με την οποία οι απαιτήσεις για την τελική χωματοκάλυψη υπολογίζονται:

- ❑ Βάσει μιας οριζόντιας επιφάνειας του χώρου.
- ❑ Λαμβάνοντας υπόψη ένα ανάλογο ύψος ίσο με ~60 cm.

Από την άλλη και οι ενδιάμεσες χωματοκαλύψεις (όχι ημερήσιες) απαιτούν ομοίως 0,6 m πάχος χωματοκάλυψης ή 0,6 m³ εδάφους/ m² επιφάνειας. Σύμφωνα με την τεχνική του NOBLE, βάσει της ημερήσιας χωματοκάλυψης των 15 cm και της τελικής χωματοκάλυψης των 60 cm, οι συνολικές απαιτήσεις ενός XYT σε έδαφος κυμαίνονται μεταξύ 20 και 25% του συνολικού όγκου του χώρου.

Πίνακας 7.1: Πίνακας υπολογισμού ημερήσιας χωματοκάλυψης βάσει της μεθόδου του NOBLE [Κομίλης, 2010].

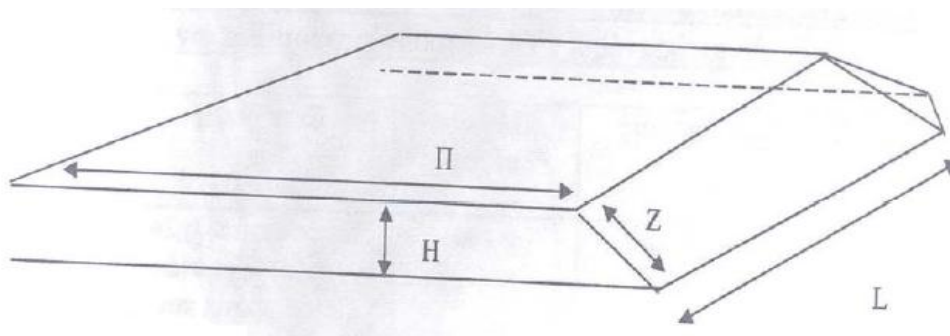
Ημερήσια είσοδος απορριμμάτων (tonnes)	Ημερήσια ποσότητα συμπιεσμένων απορριμμάτων ($\rho = 593 \text{ kg/m}^3$)	Ημερήσιες απαιτήσεις εδαφικού υλικού (m^3) Βάθος κελλιού 1.8 m	Ημερήσιες απαιτήσεις εδαφικού υλικού (m^3) Βάθος κελλιού 2.4 m	Ημερήσιες απαιτήσεις εδαφικού υλικού (m^3) Βάθος κελλιού 3.0 m	m^3 εδάφους ανά tonne εισερχόμενου υλικού			m^3 εδάφους/ m^3 ημερήσιων συμπιεσμένων απορριμμάτων		
25	43	4	3	2	0.16	0.12	0.08	9%	7%	5%
51	86	7	5	5	0.14	0.10	0.10	8%	6%	6%
102	171	15	11	8	0.15	0.11	0.08	9%	6%	5%
203	343	28	21	17	0.14	0.10	0.08	8%	6%	5%
508	857	72	54	43	0.14	0.11	0.08	8%	6%	5%
762	1285	107	80	64	0.14	0.10	0.08	8%	6%	5%
1016	1713	143	107	86	0.14	0.11	0.08	8%	6%	5%

7.3.2 Τεχνική διαστασιολόγησης

Αντί για τη μέθοδο του NOBLE για τον υπολογισμό της ημερήσιας χωματοκάλυψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνική της διαστασιολόγησης. Η τεχνική αυτή βασίζεται στη βασική διαστασιολόγηση ενός ημερήσιου κελιού απορριμμάτων, όπως αυτό παρουσιάζεται και στο Σχήμα 7.1.

Το μήκος μετώπου κελιού (L) συνδέεται με την ημερήσια παροχή των απορριμμάτων βάσει των τιμών του πίνακα NOBLE, και οι ενδεικτικές τιμές του L αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα:

Εισροή Απορριμμάτων (τόνο/ημέρα)	Μήκος Μετώπου L (m)
20 – 50	8
50 – 130	10
130 – 250	12
250 – 500	15



Σχήμα 7.1: Σχηματική απεικόνιση ημερήσιου κελιού απορριμμάτων σε ένα XYT. H – πάχος κελιού, Π – πλάτος κελιού, L – μήκος μετώπου κελιού [Κομίλης, 2010].

Με βάση τον υπολογισμό του εμβαδού της επιφάνειας και του πρानούς (από την εμπρόσθια όψη, από την επιφάνεια και από την πλάγια πλευρά), υπολογίζονται τα παρακάτω:

Εισροή Απορριμμάτων (τόνο/ημέρα)	% όγκου χώματος ανά τόνο απορριμμ.	% όγκου χώματος ανά m³ απορριμμ.
50	20	12
100	18	11
500	14	8

Συνεπώς, βάσει των αποτελεσμάτων που παραπάνω πίνακα, για κάθε ένα τόνο εισερχόμενης ποσότητας απορριμμάτων ανα ημέρα απαιτούνται περίπου 0,14 – 0,20 m³ ημερήσιας χωματοκάλυψης (αντιστοιχεί περίπου στο 8 - 12% του εισερχόμενου ημερήσιου συμπιεσμένου όγκου απορριμμάτων, δηλ. 0,08 – 0,12 m³ εδάφους/ m³ συμπιεσμένων απορριμμάτων ημερησίως). Σε περίπτωση αύξησης της κλίμακας, δηλ. για μεγαλύτερους XYT και μεγαλύτερες ποσότητες απορριμμάτων, τα παραπάνω ποσοστά γίνονται μικρότερα.

7.3.3 Μέθοδος ισοϋψών

Εναλλακτικά, για τον υπολογισμό του όγκου των εκσκαφών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η προσεγγιστική μέθοδος των ισοϋψών. Η μέθοδος των ισοϋψών στηρίζεται στα τοπογραφικά δεδομένα της περιοχής και μπορεί να προσδιορίσει τον συνολικό όγκο απαιτούμενων εκσκαφών με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{tot} = \sum_{i=z}^n \frac{\text{Εμβαδό μεταξύ παλαιάς και νέας ισοψύς } i + \text{Εμβαδό μεταξύ παλαιάς και νέας ισοψύς } i + z}{2} \cdot z \quad (7.16)$$

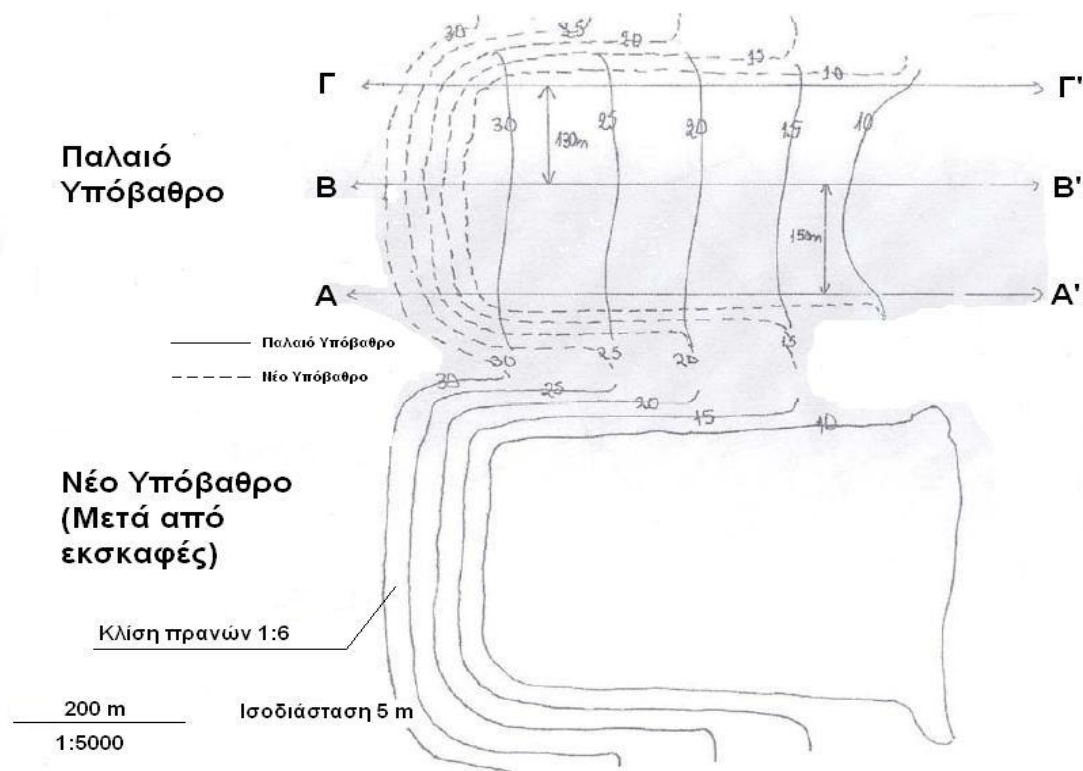
όπου: z = η ισοδιάσταση (m)

α = η αρχική ισοϋψής του τοπογραφικού αναγλύφου (m)

n = η τελική ισοϋψής του τοπογραφικού αναγλύφου (m)

Βάσει του Σχήματος 7.2 ο υπολογισμός πχ. του ολικού όγκου εκσκαφών γίνεται ως εξής:

$$V_{tot} = \frac{\text{Εμβαδό}_{10\pi \rightarrow 10\nu} + \text{Εμβαδό}_{15\pi \rightarrow 15\nu}}{2} \cdot 5m + \frac{\text{Εμβαδό}_{15\pi \rightarrow 15\nu} + \text{Εμβαδό}_{20\pi \rightarrow 20\nu}}{2} \cdot 5m + \dots$$



Σχήμα 7.2: Υπολογισμός εκσκαφών με τη μέθοδο ισοψών [Κομίλης, 2010].

7.3.4 Μέθοδος τομών

Μια άλλη περίπτωση υπολογισμού των απαιτούμενων εκσκαφών σε ένα ΧΥΤ, αποτελεί η χρήση των διαδοχικών τομών. Απαιτούνται τουλάχιστον 3 τομές (παράλληλες), οι οποίες δεν χρειάζεται να απέχουν μεταξύ τους την ίδια απόσταση,

αλλά να καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής. Σε αυτήν την περίπτωση, ο συνολικός όγκος των εκσκαφών θα προσδιοριστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

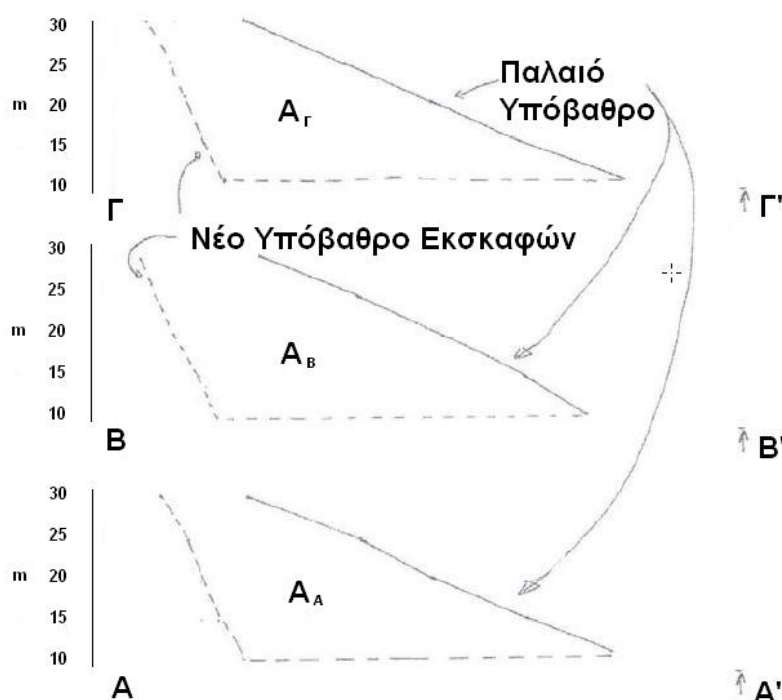
$$V_{tot} = \frac{A_1 + A_2}{2} \cdot x_{1 \rightarrow 2} + \frac{A_2 + A_3}{2} \cdot x_{2 \rightarrow 3} + \dots \quad (7.17)$$

όπου: A_i = το εμβαδό της κάθε (i) τομής (m)

$x_{i \rightarrow n}$ = η απόσταση της τομής (n) από τη τομή (i) (m)

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζονται τρεις διαδοχικές τομές, στο δε Σχήμα 7.3 τα ανάλογα υπόβαθρα των εκσκαφών. Ο όγκος των εκσκαφών στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{tot} = \frac{A_{AA'} + A_{BB'}}{2} \cdot 150m + \frac{A_{BB'} + A_{\Gamma\Gamma'}}{2} \cdot 130m \quad (7.18)$$

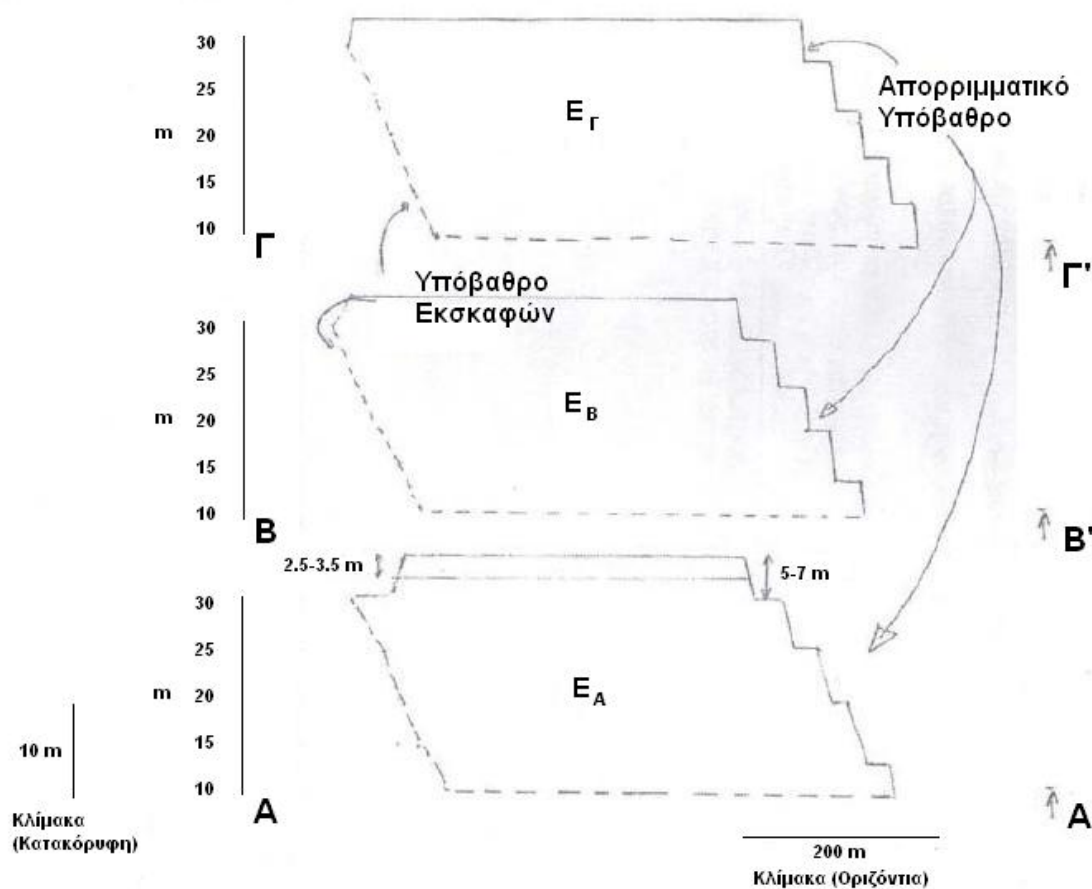


Σχήμα 7.3: Υπολογισμός εκσκαφών με τη μέθοδο τομών, τομές μετά από εκσκαφές [Κομίλης, 2010].

Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να προσδιοριστεί ο όγκος εκσκαφών στην περίπτωση που ο ΧΥΤΑ θα είναι χαμηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους (υπόγειος). Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται ο ανάλογος όγκος σε μια περιοχή που έχει εκσκαφθεί και γεμίσει με απορρίμματα και με την ίδια ακριβώς μεθοδολογία, όπως παραπάνω,

υπολογίζεται ο όγκος απορριμμάτων και της ανάλογης ποσότητας χώματος, που θα εισέρθουν στο ΧΥΤ. Ο όγκος των απορριμμάτων στο παράδειγμα που δίδεται (Σχήμα 7.3) μπορεί κατά συνέπεια να υπολογιστεί ως εξής:

$$V_{\text{Απορρ.}} = \frac{E_A + E_B}{2} \cdot 150\text{m} + \frac{E_B + E_\Gamma}{2} \cdot 130\text{m} \quad (7.19)$$



Σχήμα 7.3: Υπολογισμός εκσκαφών με τη μέθοδο τομών (τομές μετά από εναπόθεση απορριμμάτων) [Κομίλης, 2010].

7.4. Τελική Κάλυψη

Η τελική κάλυψη χρησιμοποιείται σε ένα ΧΥΤ για τους εξής λόγους:

- Ελαχιστοποίηση της κατεΐσδυσης ομβρίων μετά το πέρας λειτουργίας του ενεργού ΧΥΤ.

- ☐ Περιορισμός ανεξέλεγκτων εκπομπών αερίων.
- ☐ Περιορισμός εμφάνισης εντόμων, τρωκτικών και οσμών.
- ☐ Περιορισμός εμφάνισης πυρκαγιών.
- ☐ Διάθεση κατάλληλου υλικού για φύτευση.

Η τελική κάλυψη του ΧΥΤ αποτελεί σταθερό φράγμα για την ελαχιστοποίηση των μακροχρόνιων επιπτώσεων των υδάτινων (υπόγειων και μη) αποδεκτών της περιοχής. Ο σχεδιασμός της τελικής κάλυψης θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να ρυθμιστεί η διείσδυση του νερού στο σώμα του ΧΥΤ και η στάθμη των παραγόμενων στραγγισμάτων να μη ξεπεράσει τα μέγιστα αποδεκτά όρια. Ο σχεδιασμός της τελικής κάλυψης πρέπει να συνεκτιμά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ΧΥΤ, τα ειδικότερα περιβαλλοντικά δεδομένα, τις προβλεπόμενες νέες χρήσεις και τεχνικοοικονομικά στοιχεία, ώστε να εφαρμοστεί η βέλτιστη λύση.

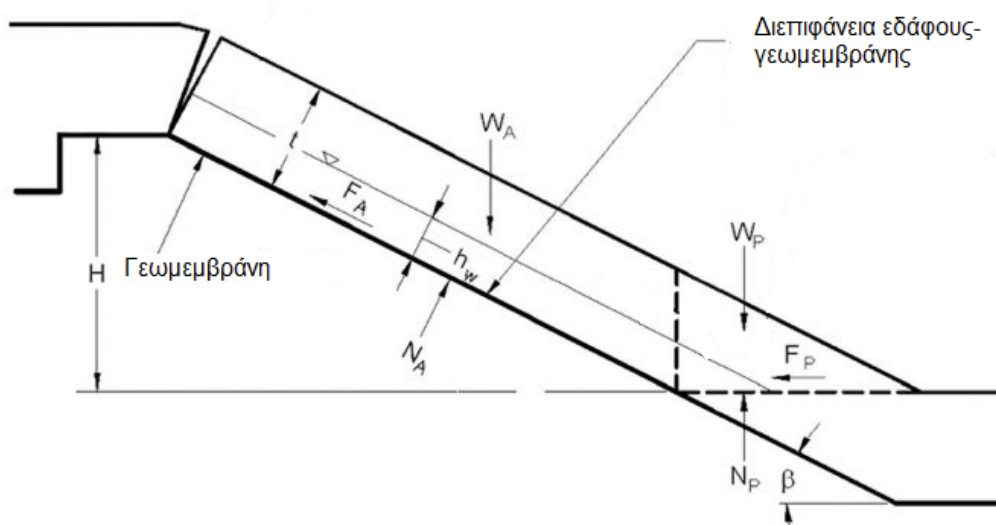
Το Σχήμα 7.4 απεικονίζει την τελική κάλυψη ενός ΧΥΤ. Το ανώτερο στρώμα του καλύμματος περιέχει εδαφικό υλικό κατάλληλο για την ανάπτυξη της προβλεπόμενης βλάστησης του χώρου. Το πάχος του εδαφικού στρώματος πρέπει να είναι αρκετό ώστε να επιτρέπει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών, χωρίς αυτό να εισχωρεί στα στρώματα της κάλυψης που ακολουθούν.

Η αποστραγγιστική ζώνη κάτω από το εδαφικό κάλυμμα έχει ως σκοπό την απομάκρυνση της περίσσειας του νερού που διεισδύει μέσω του εδαφικού υλικού και δεν μπορεί να απομακρυνθεί μέσω της φυσικής εξατμισοδιαπνοής. Η ύπαρξη της ζώνης αποστράγγισης δεν πρέπει να προκαλεί ξήρανση του εδαφικού καλύμματος, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες για τη βλάστηση και το αδιαπερατό υλικό (αργιλώδες στρώμα). Η ζώνη αποστράγγισης μπορεί να περιέχει άμμο ή ακόμα και χαλίκια και θα οδηγεί το νερό προς σημεία συλλογής και απομάκρυνσης. Αστοχίες σχεδιασμού της αποστραγγιστικής ζώνης μπορεί να προκαλέσουν συσσώρευση του νερού και μηχανικές αστοχίες του τελικού καλύμματος.



Σχήμα 7.4: Σχηματική απεικόνιση τελικής κάλυψης ενός XYT [Κομίλης, 2010].

Πολλές φορές ανάμεσα από το αποστραγγιστικό και το αργιλώδες στρώμα κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση της γεωμεμβράνης. Η γεωμεμβράνη, ως αδιαπέρατο υλικό, παρέχει σημαντική βελτίωση στη μόνωση του XYT, περιορίζοντας σε μεγάλο βαθμό την παραγωγή στραγγισμάτων και βιοαερίου. Ωστόσο, ο χρόνος ζωής της γεωμεμβράνης δεν ξεπερνάει τα 30 χρόνια και μελλοντικά μπορεί να παρουσιαστεί μια σημαντική ρύπανση του περιβάλλοντος. Για αυτό το λόγο, η χρήση της γεωμεμβράνης στην τελική κάλυψη του XYT παραμένει ένα αμφιλεγόμενο θέμα.



Σχήμα 7.5: Σχηματική απεικόνιση της τελικής κάλυψης του XYT [Thiel, 2008].

Για την επιλογή της γεωμεμβράνης με κατάλληλα χαρακτηριστικά είναι απαραίτητο είναι γνωστές οι δυνάμεις που θα εφαρμοστούν σε αυτό το υλικό και οι αντοχές της εκάστοτε γεωμεμβράνης. Με βάση το Σχήμα 7.5, η μέγιστη εφελκυστική δύναμη, που εφαρμόζεται στη γεωμεμβράνη, μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$T = W_a * \sin\beta - F_a \quad (7.20)$$

όπου: T = μέγιστη εφελκυστική δύναμη (kPa)
 W_a = δύναμη λόγω βάρους του στρώματος εδάφους (kPa)
 β = γωνία που σχηματίζει το κάλυμμα με το οριζόντιο επίπεδο
 F_a = δύναμη τριβής στη διεπιφάνεια γεωμεμβράνη-έδαφος (kPa)

Η τελευταία παράμετρος, δύναμη τριβής F_a , μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$F_a = \frac{W * \cos\beta * \tan\delta}{FS} \quad (7.21)$$

όπου: δ = γωνία τριβής της διεπιφάνειας έδαφος-γεωμεμβράνη

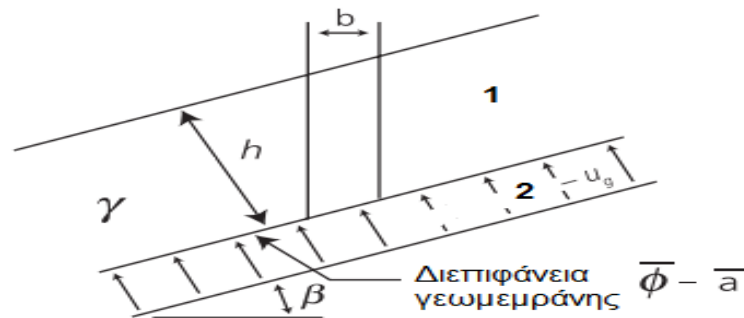
Για την εκτίμηση της σταθερότητας του τελικού καλύμματος, προσδιορίζεται ο λεγόμενος συντελεστής (ή παράγοντας) ασφαλείας (Factor of Safety - FS), σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$FS = \frac{\bar{a} + h * \gamma_b * \cos^2\beta * \tan\bar{\varphi}}{h * \gamma_t * \sin\beta * \cos\beta} \quad (7.22)$$

όπου: $\bar{a}$ και $\bar{\varphi}$ = παράμετροι ανθεκτικότητας του υλικού κάλυψης
 γ_t = συνολικό ειδικό βάρος του υλικού κάλυψης (kN/m³)
 γ_b = ξηρό ειδικό βάρος του υλικού κάλυψης (kN/m³)
 h = πάχος του εδαφικού στρώματος (m)
 β = γωνία που σχηματίζει το κάλυμμα με το οριζόντιο επίπεδο

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.6, το βιοαέριο, που παράγεται σε ένα XYT, έχει την τάση να συσσωρεύεται κάτω από τη γεωμεμβράνη και να την ωθεί προς τα πάνω, εάν δεν μεσολαβήσει η έγκαιρη συλλογή του. Η συσσώρευση του βιοαερίου,

πέρα του κινδύνου έκρηξης, μπορεί να παραμορφώσει τη γεωμεμβράνη και να μειώσει τη μηχανική σταθερότητα του τελικού καλύμματος.



Σχήμα 7.6: Σχηματική απεικόνιση της τελικής κάλυψης του ΧΥΤ, 1- εδαφικό υλικό, 2- πίεση του βιοαερίου [Thiel and Narejo, 2005].

Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας (FS) προσδιορίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$FS = \frac{\bar{a} + (h \cdot \gamma \cdot \cos \beta - u_g) \cdot \tan \bar{\phi}}{h \cdot \gamma \cdot \sin \beta} \quad (7.23)$$

όπου: $\bar{a}$ και $\bar{\phi}$ = παράμετροι ανθεκτικότητας του υλικού κάλυψης

β = γωνία που σχηματίζει το κάλυμμα με το οριζόντιο επίπεδο

h = πάχος του εδαφικού στρώματος (m)

γ = πυκνότητα του εδαφικού στρώματος (kN/m³)

u_g = πίεση βιοαερίου (kPa)

Ο λόγος ύπαρξης του στρώματος συλλογής βιοαερίου (Σχήμα 7.4) είναι η απομάκρυνση του βιοαερίου, ώστε η πίεση που δημιουργείται (u_g) να μην ξεπεράσει τα αποδεκτά όρια. Η κύρια παράμετρος σχεδιασμού του συγκεκριμένου στρώματος είναι ο ρυθμός απαγωγής του βιοαερίου, ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί με βάση τη μέγιστη επιτρεπτή πίεση (u_{max}), η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$u_{max} = \gamma \cdot h \cdot \cos \beta - \frac{(FS \cdot \gamma \cdot h \cdot \sin \beta)}{\tan \delta} \quad (7.24)$$

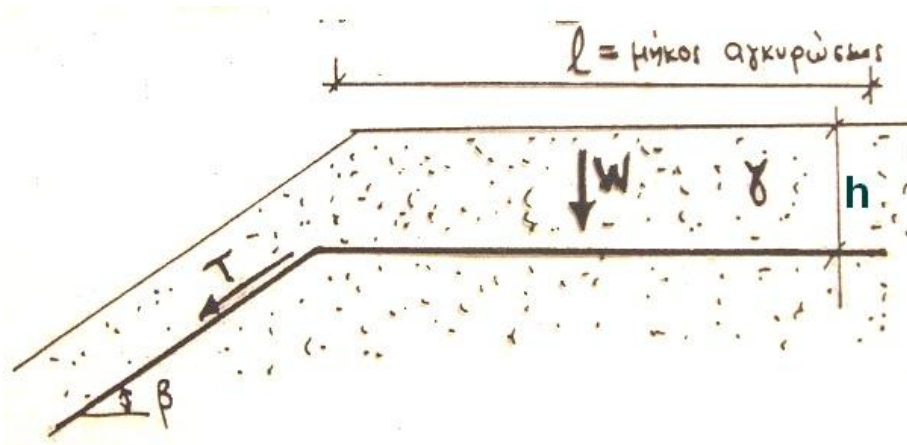
όπου: u_{max} = επιτρεπτή πίεση του βιοαερίου (kPa)

γ = πυκνότητα του εδαφικού στρώματος (kN/m³)

h = πάχος του εδαφικού στρώματος (m)

- FS = παράγοντας ασφαλείας
 δ = γωνία τριβής της διεπιφάνειας έδαφος-γεωμεμβράνη
 β = γωνία που σχηματίζει το κάλυμμα με το οριζόντιο επίπεδο

Για να αποφευχθούν οι ολισθήσεις της τελικής κάλυψης του XYT, είναι αναγκαία η αγκύρωση της γεωμεμβράνης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7.



Σχήμα 7.7: Αγκύρωση της γεωμεμβράνης στο τελικό κάλυμμα XYT [Γιδαράκος, 2010].

Το μήκος αγκύρωσης (l) μπορεί να προσδιοριστεί με βάση την παρακάτω σχέση:

$$l = \left(\frac{FS}{\tan \delta} - \tan \beta \right) * \frac{T * \cos \beta}{\gamma * h} \quad (7.25)$$

όπου: T = μέγιστη εφελκυστική δύναμη (kPa)

- δ = γωνία τριβής της διεπιφάνειας έδαφος-γεωμεμβράνη
 β = γωνία που σχηματίζει το κάλυμμα με το οριζόντιο επίπεδο
 γ = πυκνότητα του εδαφικού στρώματος (kN/m^3)
 h = πάχος του εδαφικού στρώματος (m)
FS = διαθέσιμος συντελεστής ασφαλείας

Ο συντελεστής ασφαλείας FS στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$FS = \frac{T_u}{T_0} \quad (7.26)$$

όπου: T_u = αντοχή τριβής (kPa)

$$T_u = (W + T * \sin\beta) * \tan\delta \quad (7.27)$$

T_0 = δύναμη εξόλκευσης (kPa)

$$T_0 = T * \cos\beta \quad (7.28)$$

W = βάρος του υπερκείμενου εδάφους (kPa)

$$W = \gamma * h * l \quad (7.29)$$

7.5 Αποκατάσταση

Μετά το κλείσιμο του χώρου υγειονομικής ταφής υλοποιείται συγκεκριμένο σχέδιο αποκατάστασης που έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την επαναφορά – αποκατάσταση του χώρου στις παλαιότερες ή και σε νέες χρήσεις.

Η προστασία του ΧΥΤ μετά το κλείσιμό του μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση της τελικής κάλυψης, όπως περιγράφεται στις παραπάνω παραγράφους. Μετά την τοποθέτηση της τελικής κάλυψης, η παραγωγή των στραγγισμάτων θα περιοριστεί σημαντικά (ή θα σταματήσει τελείως) και θα λαμβάνει χώρα η συλλογή και η επεξεργασία του παραγόμενου βιοαερίου. Η στρατηγική αυτή, η οποία αντικατοπτρίζεται και από την ισχύουσα Ελληνική και Ευρωπαϊκή νομοθεσία, έχει ως αποτέλεσμα την ‘συντήρηση’ των απορριμμάτων και η πιθανότητα για ενδεχόμενη ρύπανση του περιβάλλοντος παραμένει σε υψηλά επίπεδα. Με άλλα λόγια, η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι αναπόφευκτη στην περίπτωση της αστοχίας των υλικών μόνωσης, είτε λόγω της κακής εφαρμογής και μηχανικής αστοχίας τους, είτε λόγω της φθοράς τους.

Για να περιοριστεί ή/και να αποφευχθεί η μελλοντική ρύπανση του περιβάλλοντος από ένα ΧΥΤ μετά το πέρας της λειτουργίας του, προτείνεται η ελαχιστοποίηση του δυναμικού εκπομπής των πιθανών ρύπων πριν την τοποθέτηση της τελικής κάλυψης. Σε αυτό το σημείο αντί της αδιαπέραστης τελικής κάλυψης θα πρέπει να τοποθετείται φυσική κάλυψη (π.χ. χώμα) με σημαντική υδατοϊκανότητα. Το χαμηλό δυναμικό εκπομπής ενός ΧΥΤ εκτός των άλλων αποτελεί και βασική προϋπόθεση για τη σωστή ολοκλήρωση της περιόδου μεταφροντίδας του.

Σύμφωνα με πολυάριθμες έρευνες, η μείωση του δυναμικού εκπομπής μπορεί να επιτευχθεί με δυο βασικούς τρόπους:

- ☐ Με ελεγχόμενη παροχή νερού.
- ☐ Με in situ αερισμό.

7.5.1 Ελεγχόμενη παροχή νερού

Οι δοκιμές σε εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα έδειξαν ότι μετά την κάλυψη των απορριμμάτων με χώμα χαμηλής διαπερατότητας ή αδιαπέραστες μεμβράνες, η παραγωγή του βιοαερίου μειώνεται σημαντικά υποδηλώνοντας τον περιορισμό της βιοαποικοδόμησης. Όταν στο σώμα του XYT υπάρχει σημαντικό ποσοστό βιοαποδομήσιμων απορριμμάτων και ο XYT διαθέτει λειτουργικό σύστημα συλλογής και επεξεργασίας των παραγόμενων στραγγισμάτων, η προσθήκη νερού (π.χ. επεξεργασμένων στραγγισμάτων) μπορεί να επιταχύνει τη βιοαποικοδόμηση των απορριμμάτων και να συμβάλει στη σταθεροποίηση του XYT.

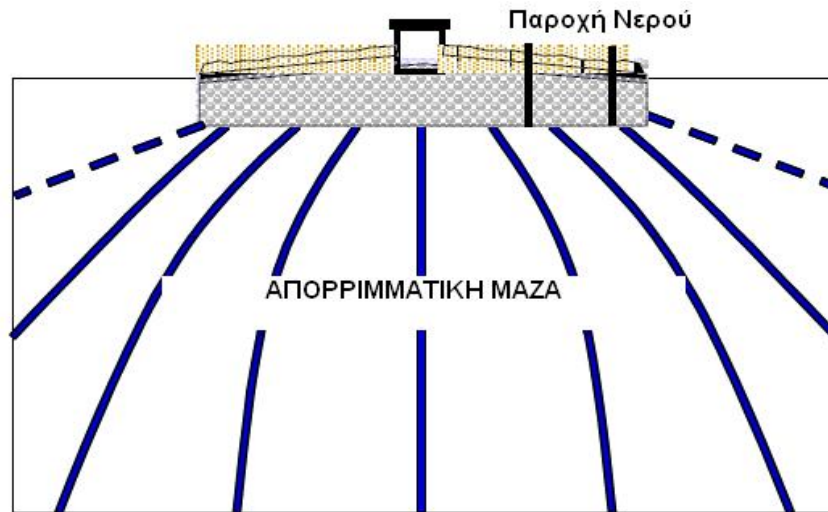
Οι έρευνες που έγιναν με σκοπό τη διερεύνηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων από ένα χώρο υγειονομικής ταφής έδειξαν τη σημαντική επίδραση του λόγου υγρού προς στερεό, δηλ. της ποσότητας του νερού που έχει διαπεράσει το συνολικό όγκο των απορριμμάτων, στο δυναμικό εκπομπής των απορριμμάτων. Πειράματα σε XYT μικρού μεγέθους έδειξαν την ύπαρξη συσχέτισης του λόγου υγρού προς στερεό και του δυναμικού εκπομπής, ορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τον λόγο υγρό/στερεό ως ένα δείκτη σταθεροποίησης του XYT.

Σε γενικές γραμμές η προσθήκη νερού στο σώμα των απορριμμάτων συνεπάγεται δυο βασικά πλεονεκτήματα:

- ☐ Ενισχύει τις διεργασίες βιολογικής αποικοδόμησης των απορριμμάτων, λόγω αύξησης της υγρασίας τους.
- ☐ Ενισχύει τη διαλυτοποίηση και απομάκρυνση των ενώσεων από τα απορρίμματα.

Ο βαθμός επίδρασης της διαλυτοποίησης στην κινητοποίηση και απομάκρυνση των οργανικών και ανόργανων ενώσεων των απορριμμάτων εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα νερού, που διαπερνάει την απορριμματική μάζα. Η παροχή νερού σε

ένα ΧΥΤ μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους, όπως π.χ. με ειδικά διαμορφωμένους τάφρους διείσδυσης (Σχήμα 7.8) ή απευθείας με σχηματισμό μικρών λιμνών.



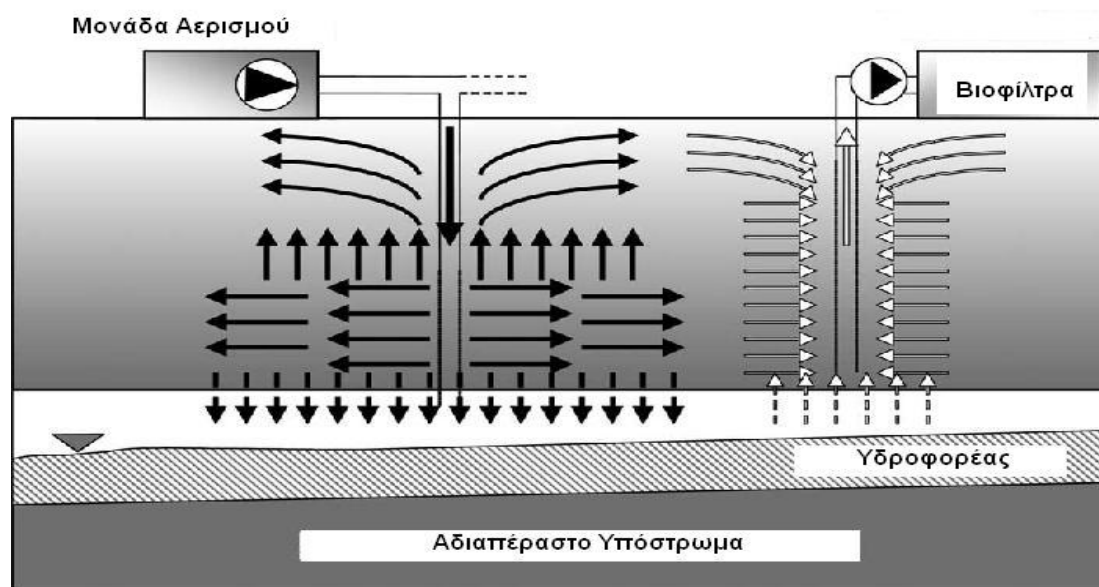
Σχήμα 7.8: Παροχή υγρασίας στους ΧΥΤ [Heyer et al., 2005].

7.5.2 In situ αερισμός

Η επιτόπια (in situ) προσθήκη αέρα στην απορριμματική μάζα επιταχύνει τις βιοχημικές διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα και συμβάλει με αυτόν τον τρόπο στην ταχύτερη σταθεροποίηση του ΧΥΤ. Συγκριτικά με τους αναερόβιους ΧΥΤ, οι ΧΥΤ με αερισμό παρουσιάζουν χαμηλότερα φορτία (οργανικά και ανόργανα) των στραγγισμάτων και περιορισμένη εκπομπή βιοαερίου, επιτυγχάνοντας τη μερική (ή ακόμα και ολική) σταθεροποίηση σε 3 με 6 χρόνια αντί των δεκαετιών στους συμβατικούς ΧΥΤ [Heyer et al., 2005]. Αυτή η επιτάχυνση στη σταθεροποίηση είναι αποτέλεσμα της ευκολότερης αποδόμησης των περισσότερων από τις οργανικές ενώσεις κάτω από αερόβιες συνθήκες. Το τελευταίο ισχύει και για πολλές επικίνδυνες ενώσεις που εισέρχονται στους ΧΥΤ μαζί με τα αστικά απορρίμματα [Ritzkowski, 2005].

Η βασική αρχή του αερισμού και της συλλογής των παραγόμενων απαερίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.9. Ο ατμοσφαιρικός αέρας παρέχεται με μικρή πίεση στην απορριμματική μάζα μέσω των φρεατίων αερισμού με τη βοήθεια ενός υπερσυμπιεστή. Στη συνέχεια ο αέρας και ως επακόλουθο το οξυγόνο, διεισδύει στο σώμα του ΧΥΤ, μέσω της διασποράς και της διάχυσης. Με αυτόν τον μηχανισμό

λαμβάνει χώρα αερισμός σχεδόν ολόκληρου του όγκου των απορριμμάτων, εξαρτημένος βέβαια από το ρυθμό και τη διάρκεια του αερισμού και επιτυγχάνεται έτσι η ταχύτερη αποδόμηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων. Από την άλλη, τα παραγόμενα αερία (κυρίως CO₂) συλλέγονται από τα αντίστοιχα φρεάτια εξαερισμού και επεξεργάζονται με βιολογικές, φυσικές ή θερμικές μεθόδους πριν την απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 7.9: Αποκατάσταση ΧΥΤ με αερισμό [Heyer et al., 2005].

7.6. Μεταφροντίδα

Η περίοδος της μεταφροντίδας του ΧΥΤ σχεδιάζεται με σκοπό την ολοκλήρωση του στόχου της ήπιας αποκατάστασης, με την φυσική επανένταξη του χώρου διάθεσης των απορριμμάτων και την προετοιμασία για μελλοντικές χρήσεις του. Για αρκετά χρόνια μετά το κλείσιμό του ο χώρος πρέπει να παρακολουθείται συστηματικά. Ένα μεγάλο κομμάτι της περιόδου μεταφροντίδας αφιερώνεται στη διαμόρφωση, αποκατάσταση και ανάπτυξη του στρώματος εδάφους της τελικής κάλυψης. Αποκλειστικό σκοπό αυτής της περιόδου αποτελεί η βελτίωση της φυσικής και της χημικής κατάστασης των εδαφών.

Η επιτυχή μεταφροντίδα ενός ΧΥΤ είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, οι σπουδαιότεροι εκ των οποίων είναι οι εξής:

- ❑ Προετοιμασία σχεδίου μεταφροντίδας, βασισμένου στις συνθήκες και ανάγκες του κάθε ΧΥΤ.
- ❑ Συνεχή παρακολούθηση των υγρών και αέριων εκπομπών του ΧΥΤ και του περιβάλλοντος χώρου (βιοαέριο, στραγγίσματα, σκόνες, οσμές, επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, καθίζηση, σταθερότητα του ΧΥΤ, χλωρίδα και πανίδα της περιοχής).
- ❑ Συντήρηση των συστημάτων αποστράγγισης, συλλογής και επεξεργασίας των στραγγισμάτων και του βιοαερίου.
- ❑ Διαμόρφωση του αναγλείφου του ΧΥΤ με βάση την τοπογραφία της περιοχής και τη μελλοντική χρήση του χώρου.
- ❑ Προσεκτική επιλογή των ειδών για την φύτευση και διαμόρφωση του χώρου.
- ❑ Περιοδικός έλεγχος της κατάστασης των εδαφών για εντοπισμό περιοχών με υπερβολική συμπίεση, εμφάνιση κοιλοτήτων και λιμνάζουσων περιοχών.
- ❑ Ετήσια συνάντηση των υπεύθυνων του χώρου και της μεταφροντίδας του με την ενδιαφερόμενη πλευρά (π.χ. τοπική κοινότητα, γεωργοί, οικολογικές οργανώσεις κλπ.).

Από τα στοιχεία του πίνακα που ακολουθεί είναι εμφανής η ανάγκη για μεταφροντίδα και παρακολούθηση (monitoring) ενός χώρου υγειονομικής ταφής, διότι οι εκπομπές του πολλές φορές μπορούν να παραμένουν σε υψηλά επίπεδα ακόμα και 30 χρόνια μετά από το κλείσιμό του.

Πίνακας 7.10: Ενδεικτική διάρκεια ζωής τεχνητών φραγμών XYT [www.dedisa.gr].

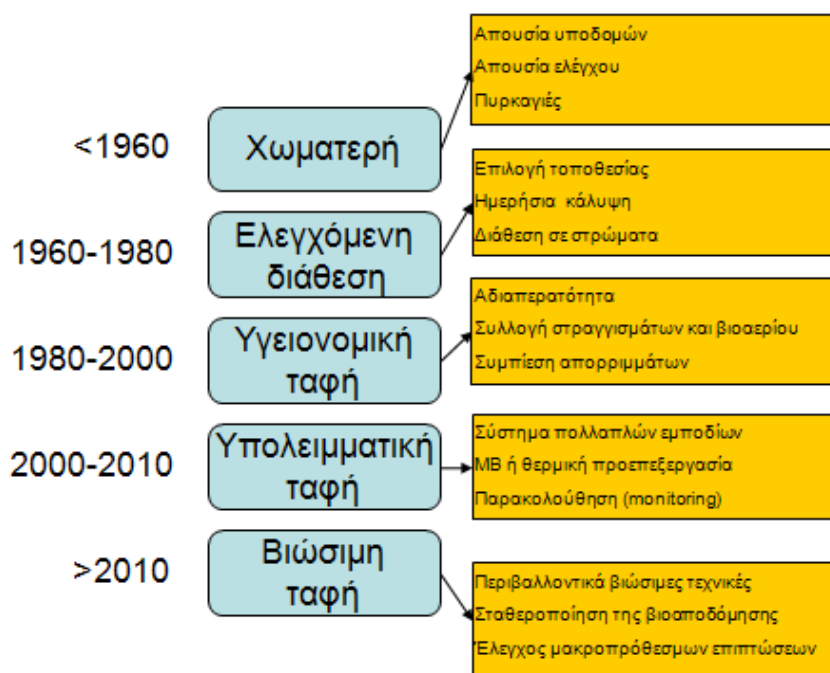
ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΦΡΑΓΜΟΙ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ (έτη)		ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	10-20	20-30	
Γεωμεμβράνη	✓	✓	Η εγγύηση καλύπτει το πολύ 15-20 έτη.
Στρώση αποστράγγισης και σύστημα συλλογής στραγγισμάτων	✓		Συνήθως μετά τη δεκαετία έχουμε εμφράξεις (clogging)
Μονάδα επεξεργασίας Στραγγισμάτων	✓		Συνήθως μετά τη δεκαετία απαιτούνται σημαντικές παρεμβάσεις για να εξασφαλισθεί η απαιτούμενη ποιότητα εκροής.
Δίκτυο συλλογής και μονάδα καύσης βιοαερίου	✓		Συνήθως μετά τη δεκαετία απαιτούνται σημαντικές παρεμβάσεις για να εξασφαλισθεί η λειτουργικότητα του δικτύου και του πυρσού.
Τελική κάλυψη	✓	✓	Οι φθορές λόγω έντονων βροχοπτώσεων και διαφορικών καθιζήσεων είναι αναπόφευκτες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

Βιώσιμη Ταφή

8.1 Εξέλιξη εδαφικής διάθεσης απορριμμάτων

Η βιώσιμη ταφή αντιπροσωπεύει το πιο εξελιγμένο στάδιο στην εδαφική διάθεση απορριμμάτων [Butti και Cossu, 2010]. Στο Σχήμα 8.1 αναπαριστάνεται η χρονική εξέλιξη της εδαφικής διάθεσης απορριμμάτων, όπως επίσης και οι αντίστοιχες τεχνικές που εφαρμόζονται για περιορισμό των εκπομπών (στραγγίσματα και βιοαέριο) και σταθεροποίηση και έλεγχο των αποβλήτων.



Σχήμα 8.1: Χρονική εξέλιξη της εδαφικής διάθεσης απορριμμάτων [Butti και Cossu, 2010].

Οι παλαιότερες μορφές διάθεσης, όπως “χωματερή” και “ελεγχόμενη ταφή”, αντικαταστάθηκαν από “υγειονομική ταφή” στις αρχές της δεκαετίας του ‘80. Η υγειονομική ταφή επέφερε σημαντικές εξελίξεις, όπως αδιαπέραστες μεμβράνες και

ολοκληρωμένο σύστημα στράγγισης, χάρη στις οποίες μια αποτελεσματική συλλογή και επεξεργασία των υγρών και των αερίων εκπομπών έγινε δυνατή.

Η υγειονομική ταφή εξελίχθηκε σε “υπολειμματική ταφή” σε μια προσπάθεια της Ευρωπαϊκής Κοινότητας να μειώσει τις ποσότητες των απορριμμάτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Με βάση τις τελευταίες νομοθετικές μεταρρυθμίσεις, τα απορρίμματα χωρίς την κατάλληλη προεπεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση/ανακύκλωση δεν μπορούν πλέον να σταλούν για εδαφική διάθεση.

Αν και η υπολειμματική ταφή προϋποθέτει την παρακολούθηση και τον έλεγχο των παραγόμενων εκπομπών, ακόμα και μετά το κλείσιμο του χώρου ταφής, δεν θέτονται ποιοτικά όρια για τον προσδιορισμό του σημείου στο οποίο μπορούμε πλέον να ισχυριστούμε πως η ταφή έφτασε σε ισορροπία με το περιβάλλον.

Έχοντας ως σημείο αναφοράς τις παλαιότερες μεθόδους ταφής και με βάση τις πρόσφατες μελέτες που έχουν γίνει, εισάγεται η έννοια της “βιώσιμης ταφής”. Η βιώσιμη ταφή περιλαμβάνει καινούργια εργαλεία για το βιώσιμο έλεγχο των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων ενός χώρου διάθεσης αποβλήτων. Ο στόχος της βιώσιμης ταφής είναι η μείωση των επιπτώσεων στην ατμόσφαιρα, το έδαφος και τα ύδατα από έναν χώρο ταφής, έτσι ώστε η επίδραση στο περιβάλλον να είναι ελάχιστη και οι σχετικοί κίνδυνοι αμελητέοι. Όλα αυτά θα πρέπει να επιτευχθούν στο χρονικό περιθώριο μίας ανθρώπινης γενιάς (30-35 χρόνια).

8.2 Από XYTA σε XYTY

Τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα παρατηρείται μία μεγάλη ανάπτυξη των δραστηριοτήτων, που σχετίζονται με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Παρόλα αυτά, δε, υπάρχουν ουσιαστικές εξελίξεις σε ότι αφορά στην ολοκληρωμένη διαχείριση των αποβλήτων, δηλαδή στην εισαγωγή μεθόδων επεξεργασίας πριν από την ταφή για την ανάκτηση χρήσιμων υλικών και ενέργειας στο υπάρχον σύστημα διαχείρισης.

Η εφαρμογή ολοκληρωμένων σχεδίων διαχείρισης των στερεών αποβλήτων έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση νέων προσεγγίσεων στα συστήματα διαχείρισης, τα οποία πλέον δεν είναι δυνατό να βασίζονται στην αξιολόγηση μίας μεμονωμένης

τεχνολογίας, αλλά στο συνδυασμό διαφόρων τεχνολογιών, λαμβάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής των στερεών αποβλήτων. Ακόμη όμως και στα ολοκληρωμένα συστήματα διαχείρισης, ο ρόλος των χώρων υγειονομικής ταφής (XYT) παραμένει σημαντικός, καθότι συνεχίζει να αποτελεί το καταληκτικό σημείο της διαχείρισης, αλλά πλέον όχι ως Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (XYTA), αλλά ως Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων (XYTY).

Επιπλέον, η αναγκαιότητα, που ωθεί στην αντιμετώπιση ενός XYT ως XYTY, γίνεται ορατή, αν και μόνο εξεταστούν οι τεχνητοί φραγμοί, από τους οποίους αποτελείται ένας XYT και γίνει αντιληπτό ότι στην καλύτερη των περιπτώσεων έχουν διάρκεια ζωής από 20 έως 30 έτη. Όπως όμως είναι γνωστό:

- α) Η διάρκεια της αποδόμησης των στερεών αποβλήτων εντός του χώρου ταφής αγγίζει ή και ξεπερνάει τα 100 έτη.
- β) Ο XYT θα έχει έσοδα μόνο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.
- γ) Ο XYT θα πρέπει να παρακολουθείται για τουλάχιστον 30 έτη μετά την παύση λειτουργίας του.

Επομένως, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Μετά το τέλος και της περιόδου μεταφροντίδας του XYT, πιθανότατα να μην έχει ολοκληρωθεί η παραγωγή στραγγισμάτων και βιοαερίου, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανάγκη περαιτέρω διαχείρισης αυτών, χωρίς όμως ο διαχειριστής να υποχρεώνεται από τη νομοθεσία να την αναλάβει. Η ευθύνη διαχείρισης του προβλήματος κληροδοτείται, κατ' αυτόν τον τρόπο, στις επόμενες γενιές.
- Ο εξοπλισμός και τα υλικά, που απαρτίζουν ένα XYT, μετά το τέλος και της περιόδου μεταφροντίδας του, θα έχουν ελάχιστη χρησιμότητα, οπότε πέρα από το περιβαλλοντικό κόστος, οι επόμενες γενιές επιβαρύνονται και το οικονομικό κόστος του προβλήματος.

Μια τέτοια κατάσταση δεν μπορεί να είναι αποδεκτή, γι' αυτό ακριβώς επιβάλλεται μια άλλη αντιμετώπιση του θέματος, που είναι γνωστή ως «αειφορική ταφή»:

- Το περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος διαχείρισης ενός XYT θα πρέπει να

καλύπτεται από τους χρήστες του και δεν πρέπει να μεταβιβάζεται στις επόμενες γενιές.

- Οι βασικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του XYT θα πρέπει να ολοκληρώνονται εντός της διάρκειας ζωής των υλικών, από τα οποία είναι κατασκευασμένος.
- Με το πέρας της χρονικής διάρκειας της μεταφροντίδας η απόθεση θα πρέπει να είναι σε τέτοια κατάσταση, που να συνιστά αμελητέο ρίσκο για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία.

Για να υπάρξει αειφορική διαχείριση του XYT, το βάρος θα πρέπει να δοθεί στις διεργασίες, που συντελούνται εντός αυτού και στο συστηματικό έλεγχο, με στόχο την ολοκλήρωσή τους μέχρι το τέλος της περιόδου μεταφροντίδας.

Η ΚΥΑ 29407/3508/2002 για την υγειονομική ταφή θέτει ένα νέο πλαίσιο για το σχεδιασμό των XYTA και με την εφαρμογή της αναμένεται να αλλάξει σημαντικά η σύσταση των αποβλήτων, που τελικά θα καταλήγουν για ταφή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διαφοροποιείται πλέον η συμπεριφορά των XYT, σε σχέση με αυτή που ήταν γνωστή μέχρι σήμερα και αυτομάτως οδηγεί στην αναζήτηση νέων κριτηρίων για το σχεδιασμό και τη λειτουργία τους, σε σχέση με αυτά που ισχύουν σήμερα.

Η επεξεργασία των αποβλήτων ουσιαστικά οδηγεί σε χώρους υγειονομικής ταφής υπολειμμάτων - XYTY - διότι η σύσταση των επεξεργασμένων πλέον αποβλήτων, που εισέρχονται στο χώρο, μεταβάλλει τις συνθήκες σε έναν XYTA, τις διαδικασίες βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων και τον τρόπο διαχείρισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του έργου.

Οι εκπομπές των ρύπων από έναν XYT, καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, στις οποίες έγινε αναφορά στα προηγούμενα κεφάλαια, που προκαλούνται, σχετίζονται άμεσα με το είδος των απορριμμάτων, που εισέρχονται στο χώρο και τα συστήματα, που έχουν σχεδιαστεί για να τις αντιμετωπίσουν. Πολλές έρευνες μέχρι σήμερα έχουν αποδείξει ότι η επεξεργασία των απορριμμάτων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από XYT.

Η κατασκευή έργων για την επεξεργασία και αξιοποίηση των αποβλήτων

επιβάλλεται και από:

- Τους στόχους, που τίθενται για την επεξεργασία του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των απορριμμάτων, βάσει της ΚΥΑ Η.Π. 29407/3508/2002.
- Τις απαιτήσεις της ΚΥΑ Η.Π. 29407/3508/2002: τόσο οι υφιστάμενοι, όσο και οι νέοι ΧΥΤΑ, που προγραμματίζονται, θα πρέπει να δέχονται μόνο επεξεργασμένα στερεά απόβλητα.
- Την εμπειρία από τις δυσκολίες που συναντώνται στη χωροθέτηση των ΧΥΤΑ, η οποία ενισχύει την ανάγκη για μεγάλη διάρκεια ζωής των έργων αυτών.
- Τα αποτελέσματα από τη δραστηριοποίηση των Συστημάτων Εναλλακτικής Διαχείρισης, που δεν είναι ακόμη ορατά.
- Τις απαιτήσεις του Ταμείου Συνοχής (Τ.Σ.), σχετικά με την προεπεξεργασία, την ανακύκλωση και τη μείωση του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των αποβλήτων πριν την υγειονομική ταφή. Η πρώτη προκαταβολή χρημάτων από το Τ.Σ. για ένα έργο καταβάλλεται μετά την υποβολή λεπτομερούς σχεδίου δράσης σχετικά με τα ζητήματα αυτά.

Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους διάφορες τεχνικές προεπεξεργασίας, αλλά και πρακτικές των ΧΥΤ, επιδρούν στην ποιότητα των εισερχόμενων αποβλήτων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ΧΥΤ, οι οποίες συσχετίζονται άμεσα με το οργανικό του φορτίο. Οι σταυροί (+) δείχνουν αύξηση της παραμέτρου και οι παύλες (-) δείχνουν μείωση, ενώ τα σκιασμένα κελιά δείχνουν ότι δεν υπάρχει συσχέτιση ή γενικός κανόνας.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα από αυτό τον πίνακα είναι ότι μια αποδεκτή ποιότητα απόθεσης, υπό την έννοια του αμελητέου ρίσκου για το περιβάλλον στο πέρας της μεταφροντίδας, είναι εφικτή μόνο με την χρήση Μηχανικής - Βιολογικής ή / και Θερμικής Επεξεργασίας. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις η κατάσταση της απόθεσης δεν μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή και θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για να έχει αμελητέο περιβαλλοντικό ρίσκο.

Η μηχανική & βιολογική επεξεργασία (ΜΒΕ) των απορριμμάτων (mechanical-biological pretreatment- MBP), καθώς και η αποτέφρωση με ενεργειακή αξιοποίηση, είναι δύο τεχνικές, οι οποίες, εφαρμόζονται ευρέως σήμερα, είτε μεμονωμένα, είτε σε συνδυασμό, ανάλογα με το σχέδιο διαχείρισης που υπάρχει.

Τρεις βασικές επιλογές υπάρχουν σύμφωνα με τα παραπάνω:

- Η MBE μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεμονωμένη μέθοδος πριν τη διάθεση των απορριμμάτων σε XYT, προκειμένου να μειωθεί το οργανικό κλάσμα στο εισερχόμενο φορτίο του XYT.
- Η MBE μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το πρώτο βήμα πριν την θερμική επεξεργασία, με στόχο την παραγωγή ενέργειας και την αισθητή μείωση των απορριμμάτων, που τελικά θα θάβονται.
- Η τρίτη επιλογή προβλέπει τον συνδυασμό MBE και θερμικής επεξεργασίας και απαιτεί το διαχωρισμό των απορριμμάτων σε κλάσμα με υψηλή θερμογόνο αξία για τη θερμική επεξεργασία και σε οργανικό κλάσμα για την βιολογική επεξεργασία πριν την υγειονομική ταφή.

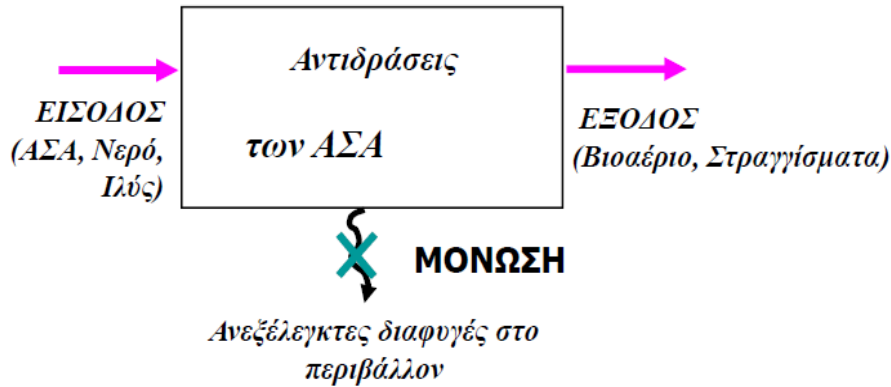
Πίνακας 8.1: Τεχνικές προεπεξεργασίας και πρακτικές των XYT και περιβαλλοντικές επιπτώσεις [I.T.A., 2007].

	Διάρκεια αποδόμησης	Όγκος XYTA	Οργανικό Φορτίο Εισόδου	Οργανικό Φορτίο Στραγγισμάτων	Οργανικό Φορτίο Βιοαερίου	Ποιότητα απόθεσης μετά από 40 χρόνια
MBE	-	-	-	+	+	Μάλλον αποδεκτή
ΘΕ	---	---	---	---	---	Μάλλον αποδεκτή
Τεμαχισμός	--	-		+	+	Μη Αποδεκτή
Δεματοποίηση	+	-		--	--	Αποδεκτή
Επανακυκλοφορία				+	+	
Αναερόβιος XYTA		-		+	++	Μη αποδεκτή

8.3 Ισοζύγιο μάζας

Ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσέγγιση της έννοιας της βιώσιμης ταφής είναι το ισοζύγιο μάζας. Με αυτήν την προσέγγιση είναι δυνατόν να εκτιμηθεί η επίδραση διαφόρων τεχνικών στη διαχείριση χώρων εδαφικής διάθεσης απορριμμάτων [Cossu et al., 2004].

Στην προσέγγιση με ισοζύγιο μάζας ένας χώρος ταφής περιγράφεται απλοποιημένα ως ένας αντιδραστήρας ροής πλήρους ανάμιξης (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR). Ένα πολύπλοκο σύστημα μπορεί να περιγραφεί και με πολλαπλούς CSTR αντιδραστήρες.



Σχήμα 8.2: Σχεδιάγραμμα ισοζυγίου μάζας σε έναν χώρο ταφής απορριμμάτων [Cossu et al., 2004].

Η αρχική υπόθεση για έναν CSTR αντιδραστήρα είναι η ομογενοποίησή του, δηλαδή πως η συγκέντρωση για μια συγκεκριμένη ουσία είναι σταθερή σε όλον τον όγκο του αντιδραστήρα. Θεωρώντας τον χώρο ταφής ως αντιδραστήρα (Σχήμα 8.2) προκύπτει το παρακάτω ισοζύγιο μάζας:

$$\text{συσσώρευση} = \text{είσοδος} - \text{έξοδος} \pm \text{αντίδραση} \quad (8.1)$$

Είσοδος στην εξίσωση (8.1) αντιπροσωπεύει την μάζα απορριμμάτων που προστίθεται στον χώρο ταφής από διάφορες πηγές. Υποθέτοντας n ρεύματα με i συστατικά με παροχή Q_i (t/y), το καθένα με διαφορετική συγκέντρωση επί των στερεών (x_{Si} σε mg/kg απορριμμάτων), η μαθηματική έκφραση της εισόδου θα είναι η ακόλουθη:

$$\text{Είσοδος} = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot x_{Si} \quad (8.2)$$

Έξοδος στην εξίσωση (8.1) αντιπροσωπεύει την μάζα που διαφεύγει από τον χώρο ταφής μέσω του βιοαερίου (q_G , m³/y) και των στραγγισμάτων (q_L , l/y). Εάν οι

συγκεντρώσεις των ρύπων στο βιοαέριο και στα στραγγίσματα είναι x_G (mg/m³) και x_L (mg/l) αντίστοιχα, η μαθηματική έκφραση της εξόδου θα είναι η ακόλουθη:

$$Εξοδος = x_L \cdot q_L + x_G \cdot q_G \quad (8.3)$$

Για να διαχωριστούν τα κλάσματα του βιοαερίου και των στραγγισμάτων που συλλέγονται (q_{Gr} και q_{Lr}) από αυτά που διαφεύγουν ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον (q_{Gd} και q_{Ld}) ισχύουν τα παρακάτω:

$$q_L = q_{Lr} + q_{Ld} \quad q_G = q_{Gr} + q_{Gd} \quad (8.4)$$

Ο όρος συσσώρευση της εξίσωσης (8.1) αντιπροσωπεύει την αύξηση μάζας (m) των απορριμμάτων κατά τη δοσμένη χρονική περίοδο (t):

$$\text{Συσσώρευση} = dm/dt \quad (8.5)$$

Η συσσώρευση της μάζας μπορεί να κινητοποιηθεί μέσω των φυσικό-χημικών μετασχηματισμών και να μεταφερθεί στην υγρή φάση (στράγγιση, m_{mob}) ή να μετασχηματιστεί σε σταθεροποιημένη μορφή (m_{fix}) και να παραμείνει στο σώμα του χώρου ταφής.

Ο όρος αντίδραση στην εξίσωση (8.1) αντιπροσωπεύει τον μετασχηματισμό της μάζας των απορριμμάτων. Ο πιο απλός τρόπος αναπαράστασης αυτού του μηχανισμού είναι με κινητική μηδενικής και πρώτης τάξης (r σε mg/m³y):

$$\text{Αντίδραση} = rV \quad (8.6)$$

Με βάση τους όρους, που περιγράφονται παραπάνω, προκύπτει το ακόλουθο αναλυτικό ισοζύγιο μάζας:

$$dm/dt = \sum Q_i x_{Si} - (x_L q_L + x_G q_G) - rV \quad (8.7)$$

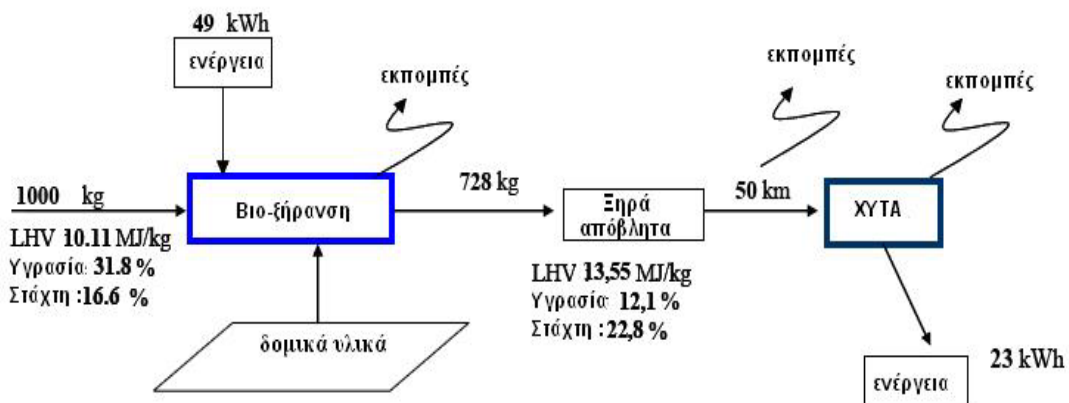
Φέρνοντας στο πρώτο μέρος της εξίσωσης τους όρους που αντιπροσωπεύουν το ανεξέλεγκτο κομμάτι των στραγγισμάτων και του βιοαερίου γίνεται κατανοητό, από μαθηματικής πλευράς, πως η βιώσιμη ταφή μπορεί να επιτευχθεί με την ελαχιστοποίηση του πρώτου μέρους της εξίσωσης (ελαχιστοποιώντας τους θετικούς όρους του δευτέρου μέρους της εξίσωσης και μεγιστοποιώντας τους αρνητικούς).

$$x_L q_{Ld} + x_G q_{Gd} = \sum Q_i x_{Si} - x_L q_{Lr} - x_G q_{Gr} - dm/dt_{mob} - dm/dt_{fix} - rV \quad (8.8)$$

Με βάση τα προηγούμενα απαιτείται να γίνει η ελαχιστοποίηση της εισερχόμενης μάζας ($\sum Q_i x_{Si}$), είτε ελέγχοντας την παροχή (Q_i), είτε ελέγχοντας την ποιότητα (x_{Si}) ή μεγιστοποίηση των συλλεγομένων προϊόντων ($x_{GQ_{Gr}}$ και $x_{LQ_{Lr}}$), πάλι με έλεγχο είτε της ποσότητας, είτε της ποιότητας. Οι όροι της συσσώρευσης (dm/dt_{mob} και dm/dt_{fix}) μεγιστοποιούνται στους μεγαλύτερους ρυθμούς αποδόμησης (π.χ. εφαρμόζοντας αερόβιες τεχνικές).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως με βάση το ισοζύγιο μάζας και σε αντίθεση με την υπάρχουσα νομοθεσία, που έχει ως σκοπό τη μείωση των παραγόμενων προϊόντων (στραγγισμάτων και βιοαερίου), είναι απαραίτητη η παρουσία αρκετών ποσοτήτων νερού στο σώμα του χώρου ταφής, είτε για αύξηση των ρυθμών αποδόμησης, είτε σαν μέσο για μεταφορά μάζας [Pivnenko, 2010].

Στο Σχήμα 8.3 δίνεται το ισοζύγιο μάζας για την διάθεση των απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ μετά την ξήρανσή τους. Παρατηρείται ότι στον ΧΥΤΑ καταλήγει το 78,2% της αρχικής μάζας των απορριμμάτων, ενώ η ενέργεια που παράγεται είναι μόλις 23 KWh /Mg αποβλήτων.



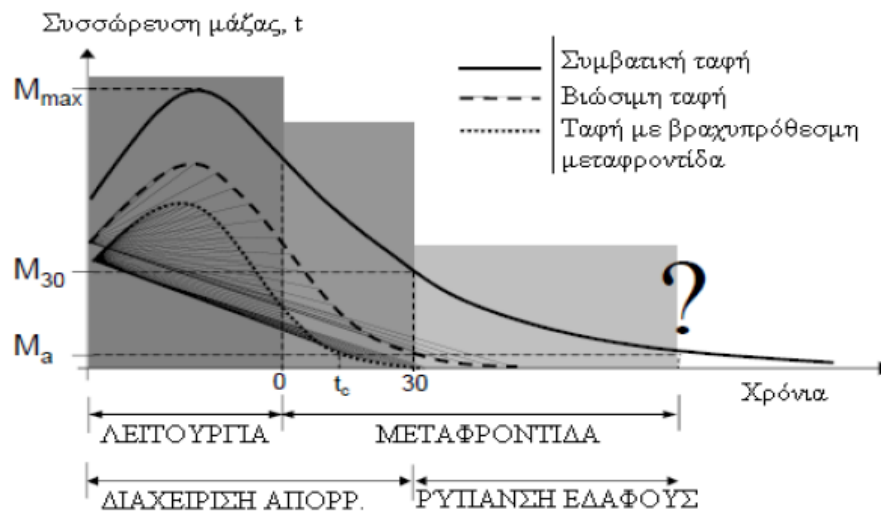
Σχήμα 8.3 : Κατανομή ενέργειας κατά την απόθεση σε ΧΥΤΑ [προσαρμογή από Consonni et al., 2006].

Σε έναν ΧΥΤΑ, με βάση την εμπειρία και τα βιβλιογραφικά δεδομένα, η παραγωγή βιοαερίου κυμαίνεται μεταξύ 160-240 m³/ton απορριμμάτων, σε μια χρονική περίοδο 10-15 ετών. Κατά τη σταθεροποίηση του χώρου ταφής, το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από CH₄ (σε ποσοστό από 55-60 %) και CO₂ (σε ποσοστό από

40-45%). Τα ποσοστά και η παρουσία άλλων συστατικών εξαρτώνται άμεσα από το είδος των προς διάθεση αποβλήτων και τις συνθήκες ταφής. Η δε θερμογόνος δύναμη του παραγόμενου βιοαερίου κυμαίνεται από 5.000Kcal/m^3 (κατώτερη) έως 9.300Kcal/m^3 (ανώτερη). Ο ρυθμός παραγωγής και η σύσταση του βιοαερίου εκτιμάται ότι σταθεροποιούνται με την πάροδο 2-3 ετών από την έναρξη λειτουργίας του χώρου.

8.4 Μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ΧΥΤΑ

Μελέτες που έχουν γίνει υποδεικνύουν πως οι επιπτώσεις από έναν συμβατικό χώρο ταφής μπορεί να έχουν μεγάλη χρονική διάρκεια ακόμα και μετά το κλείσιμό του, ιδιαίτερα όσον αφορά στο αμμωνιακό άζωτο [Price et al., 2003]. Με βάση τα προηγούμενα, το Σχήμα 8.3 παρουσιάζει την συσσώρευση της μάζας (άνθρακας ή άζωτο) σε έναν χώρο ταφής συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 8.4: Ποιοτική τάση συσσώρευσης της μάζας του άνθρακα ή του αζώτου σε διαφορετικές φάσεις λειτουργίας διαφόρων ειδών ταφής [Cossu, 2005].

Το μέγιστο της συσσώρευσης παρουσιάζεται κατά την φάση της λειτουργίας και μειώνεται σταδιακά κατά τη μεταφροντίδα. Η αρχική φάση (ενεργή) της μεταφροντίδας αναλαμβάνεται από το διαχειριστή του έργου με τα συναπτόμενα κόστη και τους κινδύνους. Στην δεύτερη φάση (παθητική) της μεταφροντίδας, που

ορίζεται από την υπεύθυνη αρχή, με απουσία των ελέγχων και παρακολούθησης, η ισορροπία των απορριμμάτων και του περιβάλλοντος επιτυγχάνεται ασυμπτωτικά.

Με την εφαρμογή των συμβατικών τεχνικών στην ταφή απορριμμάτων παρατηρείται (Σχήμα 8.4) πως ακόμα και μετά από χρονική περίοδο 30 ετών η συσσωρευμένη μάζα του άνθρακα και του αζώτου (M30) είναι σε πολύ υψηλότερα επίπεδα από τα περιβαλλοντικά αποδεκτά όρια (Ma). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την θεώρηση του χώρου ταφής ως ρυπασμένη περιοχή, με επακόλουθες δαπάνες και κινδύνους.

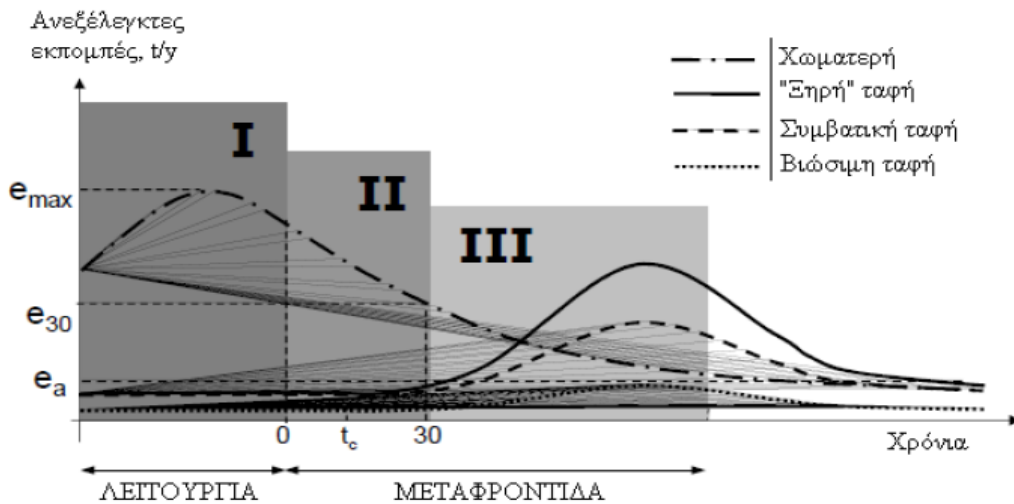
Η βιώσιμη ταφή, από την άλλη, θα πρέπει να επιτύχει την ισορροπία του χώρου με το περιβάλλον μέσα στην πρώτη φάση της μεταφροντίδας (30 έτη). Παρουσία κάποιων οικονομικών κινήτρων μπορεί να μειώσει περεταίρω τη διάρκεια της πρώτης φάσης μεταφροντίδας.

Τα προαναφερόμενα φαίνονται ακόμα πιο κρίσιμα λαμβάνοντας υπόψη τις ανεξέλεγκτες εκπομπές από διάφορα είδη ταφής (Σχήμα 8.5). Αξίζει να σημειωθεί πως η συμβατική ταφή (contained landfill), ενώ μπορεί να παρουσιάζει χαμηλά επίπεδα ρύπανσης στην αρχική φάση λειτουργίας, μπορεί να επιφέρει εκτεταμένη ρύπανση στην μη ελεγχόμενη φάση μεταφροντίδας. Σε περίπτωση αστοχίας των μεμβρανών, η ρύπανση που θα προκληθεί θα πρέπει να είναι κάτω από τα περιβαλλοντικά αποδεκτά όρια (e_a) για να αποφευχθούν πιθανά μελλοντικά προβλήματα.

8.5 Στρατηγικές επίτευξης βιώσιμης ταφής απορριμμάτων

Η βιώσιμη ταφή απορριμμάτων θα πρέπει να είναι σε θέση να εγγυηθεί ότι οι εκπομπές των παραγόμενων ρύπων μετά το κλείσιμο του χώρου διάθεσης (e_{30}) θα είναι χαμηλότερες από τις περιβαλλοντικά αποδεκτές (e_a), με άλλα λόγια η ισορροπία με το περιβάλλον θα πρέπει να επιτευχθεί μέσα σε 30 χρόνια (ανθρώπινη γενιά).

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, το πρώτο βήμα θα πρέπει να περιλαμβάνει τη μείωση της ποσότητας απορριμμάτων για εδαφική διάθεση (μείωση, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση). Το δεύτερο βήμα, σημαντικό για την ποιότητα απορριμμάτων προς διάθεση, είναι η προεπεξεργασία των απορριμμάτων και η μείωση της διαθέσιμης οργανικής ύλης.



Σχήμα 8.5: Ανεξέλεγκτες εκπομπές των στραγγισμάτων και του βιοαερίου όπως παρουσιάζονται από εδαφικές διαθέσεις διαφόρων ειδών [Cossu, 2005].

Εάν τα παραπάνω βήματα κριθούν ανεπαρκή για την επίτευξη της ισορροπίας με το περιβάλλον στα χρονικά περιθώρια που αναθέτονται, *in situ* τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν πριν και κατά την διάρκεια της περιόδου μεταφροντίδας.

Το Σχήμα 8.6 απεικονίζει μερικές ολοκληρωμένες λύσεις για την επίτευξη του στόχου της βιώσιμης ταφής.

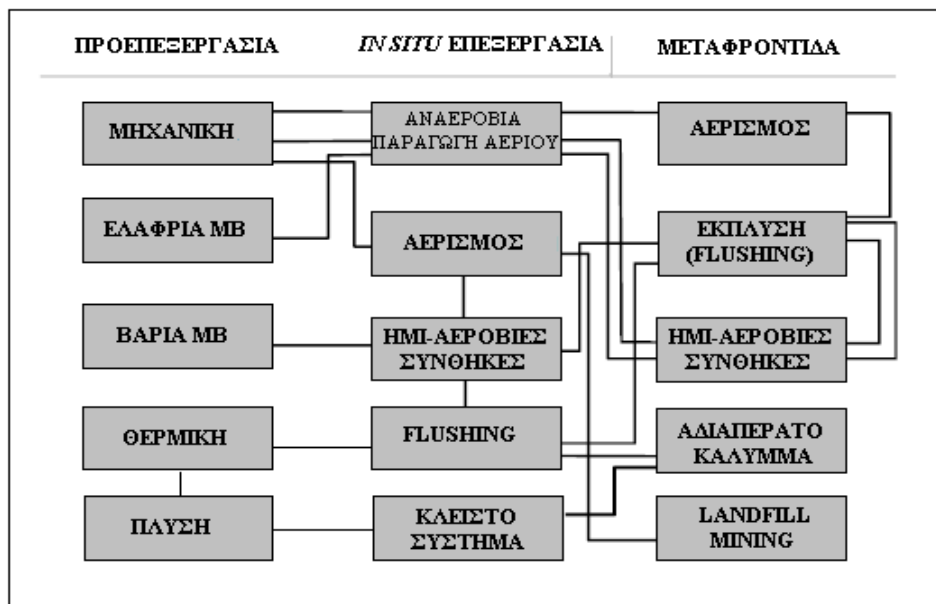
Οι *in situ* τεχνικές επεξεργασίας έχουν ως σκοπό την αύξηση του ρυθμού αποδόμησης των απορριμμάτων. Θεωρούνται ως εναλλακτικές λύσεις για τη συμβατική αναερόβια ταφή, που αποσκοπούν στην επίτευξη της βιώσιμης ταφής απορριμμάτων.

Οι πιο διαδεδομένες *in situ* τεχνικές είναι οι εξής:

- ☐ Καταναγκαστικός αερισμός.
- ☐ Φυσικός αερισμός (ημι-αερόβια ταφή).

Κατακόρυφη έκπλυση (flushing).

Ένα δίκτυο αγωγών (κατακόρυφων και οριζόντιων) μαζί με ένα συμπιεστή αέρα αποτελούν μια διάταξη που χρησιμοποιείται για καταναγκαστικό αερισμό. Ως αποτέλεσμα του αερισμού, οι οργανικές ενώσεις αεριοποιούνται και διαφεύγουν από τον χώρο ταφής ως διοξείδιο του άνθρακα, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το φορτίο των στραγγισμάτων.



Σχήμα 8.6: Πιθανοί συνδυασμοί τεχνικών βελτίωσης της αποτελεσματικότητας της ταφής [Cossu, 2005].

Ο φυσικός αερισμός έχει ως αρχή τη διαφορά θερμοκρασίας που δημιουργείται μεταξύ του χώρου ταφής και του περιβάλλοντος ως αποτέλεσμα της μικροβιακής δραστηριότητας. Κατά κανόνα σωλήνες συλλογής στραγγισμάτων χρησιμοποιούνται για την φυσική ροή αέρα στον χώρο ταφής. Έλλειψη ολοκληρωμένου δικτύου αγωγών και απουσία αέρα υπό πίεση δημιουργούν ασυνέχειες στο σώμα του χώρου ταφής (ημι-αερόβιες συνθήκες).

Η έκπλυση (flushing) είναι μια τεχνική εφαρμογής μεγάλων όγκων νερού στο σώμα των απορριμμάτων με σκοπό την απομάκρυνση του διαλυτού κλάσματος και αύξηση των ρυθμών αποδόμησης, αυξάνοντας έτσι τα επίπεδα υγρασίας, τα οποία είναι απαραίτητα για τον μεταβολισμό των μικροοργανισμών. Ο Walker et al., (1997) εκτιμά ότι 5 με 7.5 κυβικά μέτρα νερού ανά τόνο απορριμμάτων μπορούν να απομακρύνουν το μεγαλύτερο μέρος των διαλυτών συστατικών των αποβλήτων.

Οι επιδράσεις των διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας απορριμμάτων στις μεταβλητές του ισοζυγίου μάζας αναφέρονται στον Πίνακα 8.2.

Πίνακας 8.2: Τεχνικές επεξεργασίας και μεταβλητές ισοζυγίου μάζας [Cossu, 2005].

ΤΕΧΝΙΚΕΣ	X_{si}	Q_i	x_L	q_{Lr}	x_G	q_{Gr}	dm/dt fix	dm/dt mob	rV
Μηχανική προεπεξεργασία			+		+		+		+
Βιολογική προεπεξεργασία	+								
Θερμική προεπεξεργασία	++	++							
Μείωση απορριμμάτων		+							
Ανακυκλοφορία στραγγ.			+						+
Flushing				++					+
<i>In situ</i> αερισμός						+	++		++
Αναερόβια ταφή			+		+		+		+

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΗ

- Alibardi L. and Cossu R. (2006):** Energy from Wastes and Biomasses: Opportunities and State of the Art, Proceedings Venice 2006: Biomass and Waste to Energy Symposium, Organized by International Waste Working Group (IWWG) and Environmental Sanitary Engineering Center (ESEC).
- Archer E., Baddeley A., Klein A., Schwager J., Whiting K. (2005):** Mechanical-Biological Treatment: a guide for decision makers – processes policies and markets. Annex A: Process Fundamentals. Technical report by Juniper Consultancy Services Ltd. funded by SITA Environmental Trust and ASSURRE.
- Barth J., Amlinger F., Favoino E., Siebert S., Kehres B., Gottschall R., Bieker M., Lobig A., Bidlingmaier W. (2008):** Compost production and use in the EU. Final report, ORBIT association.
- Bilitewski B. (2006):** Pyrolysis, Gasification and Plasma Technologies, Proceedings Venice 2006: Biomass and Waste to Energy Symposium, Organized by (IWWG) and Environmental Sanitary Engineering Center (ESEC).
- Bilitewski B., Brunner G., Marek K. (2000):** Abfallwirtschaft, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Butti L., Cossu R. (2010):** La discarica sostenibile. CISA publisher. (In press).
- Chalvatzaki E., Kopanakis I., Kontaksakis M., Glytsos T., Kalogerakis N., Lazaridis M. (2010):** Measurements of particulate matter concentrations at a landfill site (Crete, Greece). Waste Management 30, 2058-2064.
- Christman A. (1995):** Abfallwirtschaft I-Siedlungsabfaelle, Universitaet Hannover Hannover.
- Consonni S., Giugliano M., Grosso M., Rigamonti L. (2006):** Energy and Environmental Balances of Energy Recovery from Municipal Solid Waste with and without RDF Production, Proceedings Venice 2006: Biomass and Waste to Energy Symposium, Organized by (IWWG) and Environmental Sanitary Engineering Center (ESEC).

- Cossu R. (2010):** Municipal Solid Waste Management – Undergraduate Course Notes. IMAGE, University of Padova.
- Cossu R. (2005):** The sustainable landfill concept. Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium. CISA, Cagliari.
- Cossu R., Pivato A., Raga R. (2004):** The mass balance: a supporting tool for sustainable landfill management. Proceedings of the third Asian pacific landfill symposium in Kytakiushu, Japan.
- CRA (2010):** Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines. British Columbia, Ministry of Environment.
- DEFRA (2005):** Advanced Biological Treatment of Municipal Solid Waste. Prepared by Enviro Consulting Ltd as part of the New Technologies Supporter Programme, DEFRA, UK,
- DS-Documents, Edition 3:** Treatment of Municipal Waste in Germany, Thermal and Mechanical-Biological Treatment, Published by Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland Aktiengesellschaft, 5/2003.
- EA (2002):** Waste pre-treatment: a review. R&D Technical Report P1-344/TR, AEA Technology Environment, Environment Agency, Bristol, ISBN: 1 857 05842 9.
- EC (2008):** Waste generated and treated in Europe, Data 1995-2008. European Commission. Eurostat, Theme Environment and Energy, Luxembourg.
- EC (2005):** Waste generated and treated in Europe, Data 1995-2003. European Commission. Eurostat, Theme Environment and Energy, Luxembourg.
- EEA (2006, 2010):** European Topic Centre on Resource and Waste Management.
- Eurostat (2010):** Environmental statistics and accounts in Europe. Eurostat, 2010 edition.
- Gidarakos E., Geneiatakis M. (2005):** In Situ Landfill Gas Measurements and Estimation of CH₄ Uncontrolled Emissions from the Solid Waste Disposal Site at Pera Galinous, Proceedings Sardinia 2005, 10th International Waste Management and Landfill Symposium.
- Gidarakos E., Tzamilis P., Havas G. (2005):** Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete, Waste Management 26 (2005) 668-679.
- Giround J.P., Bonaparte R. (1989):** Leakage liners constructed with geomembranes. Geomembrane liners: Geotextiles and Geomembranes 8 (1,2).

- Hang R.T. (1993):** The Practical Handbook of Compost Engineering, Lewis Publishers, USA.
- Heyer K.U., Hupe K., Stegmann R., (2005):** Landfill aftercare – scope for actions, duration, costs and quantitative criteria for the completion, Proceedings Sardinia 2005, 10th International Waste Management and Landfill Symposium.
- Kost T. (1999):** Thermische Abfallbehandlung, Dresden.
- Last S. (2006):** Joining forces: combining composting and anaerobic digestion into a single plant, CIWM, August 2006 issue, 46-47.
- Mast et al. (1996):** Einfluss der Zusammensetzung auf Schadstoffgehalt und –menge der Verbrennungsrückstände, UBA – 103 10 903.
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development (2010):** OECD Factbook 2010. Economic, Environmental and Social Statistics. Paris, France.
- Qian X., Gray D., Koerner R. (2004):** Estimation of Maximum Liquid Head over Landfill Barriers. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 488-497.
- Price A., Barlaz M., Hater G. (2003):** Nitrogen management in bioreactor landfills. Waste Management 23 (7), 675-688.
- Reimann, D. (2006):** Determination, optimization and evaluation of usable energy potential by thermal waste treatment. CEWEP, ISWA Proceedings, Copenhagen 2006.
- Reinhart D. (2012):** Leachate Collection Systems. Presentation at MSW Learning Tool, University of Central Florida.
- Reinhart D., McCreanor P., Townsend T., Craven W. (1998):** Assessment of Leachate Collection System Clogging at Florida Municipal Solid Waste Landfills. Report of Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management.
- Ritzkowski M., Heyer K.U., Stegmann R., (2005):** Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills, Waste Management 26, 356 – 372.
- Stegmann R. (2005):** Mechanical Biological pre-treatment of municipal solid waste. Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium. CISA, Cagliari.

- Tchobanoglous G., Theissen H., and Vigil S. (1993):** Integrated Solid Waste Management, McGraw Hill International.
- Thiel R. (2008):** Slope stability sensitivities of final covers. Geosynthetics, IFAI.
- Thiel R., Narejo D. (2005):** Update on designing with geocomposite drainage layers in landfills. GFR, Designer's forum.
- Tsagas F., Markidis I., Petalas A., Dermatas D., (2010):** Comparison of MSW composition in south and north EU countries: Implications for sustainable MSW management systems in Greece, In PROTECTION 2010
- Walker A.N., Beaver R.P., Powrie W. (1997):** Overcoming problems in the development of high rate flushing bioreactor landfills. Proceedings Sardinia 1997, Sixth International Waste Management and Landfill Symposium. CISA, Cagliari.
- Zucconi, De Bertoldi (1987a,b):** Thermische Abfallbehandlung, Dresden.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

- Ανδρεαδάκης Α. (2001):** Θερμική Επεξεργασία Αστικών Στερεών Απορριμμάτων (Α.Σ.Α.) και Ιλύων, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. ΕΜΠ.
- Γαβριλάκης Κ. (2002):** Απορρίμματα: Προβλήματα και η Αντιμετώπισή τους, [Οδηγός Εκπαιδευτικών], Υπουργείο Εθνικής Παιδείας Και Θρησκευμάτων Διεύθυνση Σπουδών Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης, Υπόέργο ΕΠΕΑΕΚ, Ανάπτυξη Εκπαιδευτικού Υλικού για την Περιβαλλοντικά Εκπαίδευση, Αθήνα.
- Γενειατάκης Μ. (2004):** In Situ μετρήσεις βιοαερίου και εκτίμηση ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ στο χώρο διάθεσης απορριμμάτων (ΧΔΑ) Πέρα Γαλήνων Ηρακλείου, Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Γιδαράκος Ε. (2004):** Διάθεση και Επεξεργασία Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων & Διαχείριση Αστικών Απορριμμάτων και Τοξικών Αποβλήτων – Πανεπιστημιακές Παραδόσεις. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης.

- Γιδαράκος Ε. (2005):** Διάθεση και Επεξεργασία Τοξικών και Επικινδύνων Αποβλήτων - Πανεπιστημιακές Παραδόσεις. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα: Έλεγχος Ποιότητας και Διαχείριση Περιβάλλοντος, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Γιδαράκος Ε. (2006):** Επικίνδυνα Απόβλητα, Εκδόσεις Ζυγός. Θεσσαλονίκη.
- Γιδαράκος Ε. (2010):** Σχεδιασμός Σταθμών Μεταφόρτωσης & Χώρων Υγειονομικής Ταφής, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Γιδαράκος Ε., Αϊβαλιώτη Μ. (2005):** Τεχνολογίες Αποκατάστασης Εδαφών και Υπογείων Υδάτων από Επικίνδυνους Ρύπους. Εκδόσεις Ζυγός. Θεσσαλονίκη.
- Γιδαράκος Ε., Διαμαντόπουλος Ε., Χάβας Γ., Νταμίλης Π. (2004):** Ποιοτική και Ποσοτική Ανάλυση Απορριμμάτων Περιφέρειας Κρήτης – Τελική Έκθεση Αποτελεσμάτων. Χανιά.
- Γκούσκος Ζ. (2005):** Διαχείριση Διασταλλαγμάτων από ΧΥΤΑ, Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- ΕΟΠ (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος). Σήματα ΕΟΠ (2004):** Ενημέρωση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος σχετικά με επιλεγμένα θέματα. Λουξεμβούργο.
- Κατσίρη Α. (2000):** Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων και Ιλύος. Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Ε.Μ.Π.
- ΚΥΑ 114218 ΦΕΚ Β' 1016/17.11.97** Κατάρτιση πλαισίου Προδιαγραφών και γενικών προγραμμάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων.
- ΚΥΑ 29407/3508, ΦΕΚ 1572Β', 16-12-2002** Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων.
- ΚΥΑ Η.Π. 50910/2727/2003 (2003):** Μέτρα και όροι για τη διάθεση στερεών αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός διαχείρισης. ΦΕΚ 1909/Β/22.12.2003.
- Λαζαρίδη Κ., Κουλουμπής Π., Σκουλάξινου Σ., Κανακόπουλος Δ., Λώλος Γ. (2002):** Προδιαγραφές ποιότητας και διάθεση κομπόστ: η ελληνική και διεθνής εμπειρία. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο «Βιώσιμη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων», ΕΕΔΣΑ.

- Ι.Τ.Α.** - Ινστιτούτο Τοπικής Αυτοδιοίκησης (2007) Λάλας Δ., Γεωργοπούλου Ε., Γιδαράκος Ε., Γκέκας Ρ., Λαζαρίδη Α., Α. Μαυρόπουλος, Σ. Μοιρασγεντής, Ν. Σελλάς «Εκτίμηση των Γενικευμένων Επιπτώσεων και Κόστους Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων».
- Μουσιόπουλος Ν. & Καραγιαννίδης Α. (2002):** Διαχείριση Απορριμμάτων Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ.
- Μπουρτσάλας Α., Θεμελής Ν., Καλογήρου Ε., (2011):** Περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης διαχείρισης Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Α.Σ.Α.) για τις Περιφέρειες της Ελλάδος (Συμβούλιο Ενεργειακής Αξιοποίησης Αποβλήτων - 2011)
- Ντζαμίλης Π. & Χάβας Γ. (2004):** Ποιοτική και Ποσοτική Ανάλυση αστικών Απορριμμάτων της Περιφέρειας Κρήτης, Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Οδηγία 2000/76/ΕΚ** του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 4ης Δεκεμβρίου 2000 για την αποτέφρωση των αποβλήτων, 2000L0076 — EL — 28.12.2000.
- Παναγιωτακόπουλος Α. (2002):** Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων. Εκδόσεις Ζυγός. Θεσσαλονίκη.
- Pivnenko K. (2010):** Πλύση απορριμμάτων πριν την ταφή τους, Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Σουνά Α. (2010):** Αρχές σχεδιασμού και λειτουργία Χ.Υ.Τ.Α, Διπλωματική Εργασία. Τμήμα Τεχνολογιών Αντιρρύπανσης, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας.
- ΤΕΕ – Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (2006):** Διαχείρισης Απορριμμάτων και Αστικό Περιβάλλον, Αβραάμ Καραγιαννίδης, Άννα Ξηρογιαννοπούλου, Παναγιώτα Αδηλενίδου, Θεσσαλονίκη.
- Τσιλέμου Κ., Παναγιωτακόπουλος Α. (2005):** Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Συστημάτων Διαχείρισης Αστικών Αποβλήτων. Εγχειρίδιο για την πρόγνωση των αστικών αποβλήτων και την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των συστημάτων διαχείρισής των. LCA-IWM & Εργαστήριο Οργάνωσης και Προγραμματισμού Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. Ξάνθη.
- ΥΠΕΧΩΔΕ (2003):** Ολοκληρωμένη Διαχείριση Αστικών Απορριμμάτων. Ενημερωτικό Έντυπο.

Φάττα Α. (2006): Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Χιονίδης Θ. (2007): Ενέργεια από Απόβλητα: Διαχείριση Απορριμμάτων Περιφέρειας Κρήτης με Θερμική και/ή Μηχανική – Βιολογική Επεξεργασία, Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

- [Eurostat <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/extraction/evalight>]
- [EEA <http://www.waste.eionet.europa.eu/wastebase/quantities>]
- [www.biomaster.nl]
- [www.canadacomposting.com]
- [www.citec.fi]
- [www.dedisa.gr]
- [www.excel-uae.com]
- [www.kompogas.ch]
- [www.ows.be]
- [www.pdngineers.com]