



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

“ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**IN SITU ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΩΝ
ΕΚΠΟΜΠΩΝ CH₄ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ (ΧΔΑ)
ΠΕΡΑ ΓΑΛΗΝΩΝ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ**

Επιβλέπων Καθηγητής

Γιδαράκος Ευάγγελος

ΓΕΝΕΙΑΤΑΚΗΣ ΜΑΝΟΛΗΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΞΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

ΧΑΝΙΑ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΗΣ 2004

Πίνακας περιεχομένων

Εξώφυλλο.....	i
Πίνακας Περιεχομένων.....	ii
Λίστα εικόνων.....	viii
Λίστα γραφημάτων.....	x
Λίστα πινάκων.....	xi
Περίληψη.....	xiii
1.ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	1
1.1 Αναγκαιότητα της διαχείρισης των αστικών απορριμμάτων	1
1.2 Παραγωγή αστικών απορριμμάτων	2
1.2.1 Το Πλαίσιο της διαχείρισης των αστικών απορριμμάτων	3
1.2.2 Η εξέλιξη της παραγωγής αστικών απορριμμάτων	4
1.2.3 Η κατά κεφαλή παραγωγή αστικών απορριμμάτων	5
1.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή των αστικών απορριμμάτων	6
1.3 Περιγραφή των αστικών απορριμμάτων	8
1.3.1 Ο ρόλος της σύστασης των απορριμμάτων στην επιλογή των συστημάτων διαχείρισης.....	8
1.3.2 Η σύσταση των αστικών απορριμμάτων	9
1.4 Ποσοστιαία συμμετοχή μεθόδων διάθεσης απορριμμάτων.....	12
2.ΤΕΛΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	14
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	14
2.2 Τρόποι εδαφικής διάθεσης.....	14
2.3 Επιπτώσεις ανεξέλεγκτης και ημιελεγχόμενης διάθεσης	15
2.4 Τελική διάθεση απορριμμάτων στην Ελλάδα	17
3.Η ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΤΑΦΗ ΤΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ	18
3.1 Γενικά στοιχεία	18
3.2 Δομή ενός συμβατικού ΧΥΤΑ.....	18

3.3 Μικροβιακή δραστηριότητα και φάσεις αποδόμησης του οργανικού κλάσματος.....	20
3.3.1 Γενικά στοιχεία	20
3.3.2 Φάσεις αποδόμησης οργανικού κλάσματος.....	20
3.3.3 Παραγωγή στραγγισμάτων από την αποδόμηση των απορριμμάτων.....	27
3.3.3.1 Γενικά στοιχεία	27
3.3.3.2 Σύσταση διασταλλαζόντων υγρών	28
3.3.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση των διασταλλαζόντων.....	29
4.ΒΙΟΑΕΡΙΟ	32
4.1 Η παραγωγή του βιοαερίου.....	32
4.1.1 Συνθήκες που επηρεάζουν την παραγωγή του βιοαερίου	32
4.1.2 Μοντελοποίηση της παραγωγής του βιοαερίου	35
4.1.2.1 Γενικά στοιχεία	35
4.1.2.2 Υπολογισμός του όγκου του παραγόμενου βιοαερίου.....	36
4.2 Τα χαρακτηριστικά του βιοαερίου.....	41
4.2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά.....	41
4.2.2 Χημικά χαρακτηριστικά	43
4.3 Κίνηση του βιοαερίου	44
4.3.1 Παράγοντες κίνησης του βιοαερίου	44
4.3.2 Συνθήκες που επηρεάζουν την κίνηση του βιοαερίου	45
4.3.3 Εξισώσεις κίνησης του βιοαερίου	47
4.3.4 Κίνηση των βασικών αερίων που συνθέτουν το βιοαέριο	50
4.3.4.1 Ανοδική κίνηση του βιοαερίου	50
4.3.4.2 Καθοδική κίνηση του βιοαερίου	51
4.3.4.3 Κίνηση των ιχνοαερίων (Trace gases).....	52
5.ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	55
5.1 Παρακολούθηση των εδαφικών αερίων (Soil gas monitoring).....	55
5.1.1 Παρακολούθηση των εδαφικών αερίων σε ΧΥΤΑ και ΧΔΑ	55
5.1.2 Σημασία των δεδομένων παρακολούθησης των εδαφικών αερίων.....	56
5.1.3 Ερωτήσεις για τα δεδομένα δειγματοληψίας.....	57

5.2 Παρακολούθηση των αερίων κοντά στην επιφάνεια (Near surface monitoring)	60
5.3 Παρακολούθηση των εκπομπών (Emissions monitoring)	61
5.4 Παρακολούθηση του αέρα του περιβάλλοντος (Ambient air monitoring)	63
5.5 Παρακολούθηση του αέρα των εσωτερικών χώρων (Indoor monitoring)	65
6. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΑΕΡΙΩΝ.....	68
6.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	68
6.2 Εφαρμογή της δειγματοληψίας των εδαφικών αερίων	69
6.2.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες των υδρογονανθράκων.....	69
6.2.2 Γεωλογικοί παράγοντες.....	70
6.2.3 Βιοαπικοδόμηση.....	72
6.3 Επιλογή μεθόδου δειγματοληψίας.....	72
6.3.1 Μέθοδοι ενεργής δειγματοληψίας εδαφικών αερίων	73
6.3.1.1 Προκαταρκτικές μετρήσεις για την ενεργή δειγματοληψία	74
6.3.1.2 Αρχική δειγματοληψία	75
6.3.1.3 Βάθος δειγματοληψίας	76
6.3.1.4 Απόσταση σημείων δειγματοληψίας.....	76
6.3.1.5 Περιέκτες δειγμάτων	76
6.3.1.6 Διαδικασίες διασφάλισης και ελέγχου ποιότητας (QA/QC)	77
6.3.1.7 Ερμηνεία των δεδομένων της ενεργής δειγματοληψίας εδαφικών αερίων	78
6.3.1.8 Κόστος της ενεργής επισκόπησης των εδαφικών αερίων.....	79
6.3.1.9 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ενεργής επισκόπησης των	80
6.3.2 Παθητικές μέθοδοι δειγματοληψίας	80
6.3.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της παθητικής επισκόπησης των εδαφικών αερίων.	81
6.3.3 Σύγκριση των μεθόδων της δειγματοληψίας των εδαφικών αερίων.....	82
6.4 Μετρήσεις εδαφικών αερίων σε ΧΥΤΑ και ΧΔΑ	83

7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	87
7.1 Μέθοδοι ανάλυσης.....	87
7.2 Σημαντικά στοιχεία της ανάλυσης του βιοαερίου.....	88
7.3 Ερμηνεία των δεδομένων.....	89
7.3.1 Βήματα για την ερμηνεία των δεδομένων του βιοαερίου.....	89
8.ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ	94
8.1 Επιδράσεις από την ανεξέλεγκτη εκπομπή του βιοαερίου	94
8.2 Εκπομπές CH ₄ από την τελική διάθεση των αστικών	98
απορριμμάτων	98
8.2.1 Εισαγωγή	98
8.2.2 Μέθοδοι μέτρησης των εκπομπών του CH ₄	99
8.2.3 Μέθοδοι εκτίμησης εκπομπών του CH ₄	100
8.2.3.1 Η εξ' ορισμού μέθοδος του IPCC (default IPCC method).....	101
8.2.3.2 Θεωρητικές μεθοδολογίες αποσύνθεσης πρώτης τάξης	102
8.2.4 Σύγκριση των μεθόδων υπολογισμού των εκπομπών.....	105
8.2.5 Βελτίωση του μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης	106
8.2.6 Επιλογή συντελεστών εκπομπής για όλες τις μεθόδους.....	107
8.2.6.1 Συντελεστές εκπομπής στην εξ ' ορισμού μέθοδο του IPCC (ισοζύγιο μάζας)	107
8.2.6.2 Συντελεστές εκπομπής που σχετίζονται με τη μέθοδο κινητικής πρώτης τάξης.....	112
8.2.6.3 Συντελεστές εκπομπής που συνδέονται με το τροποποιημένο μοντέλο κινητικής πρώτης τάξης.	113
8.3 Υφιστάμενη κατάσταση εκπομπών CH ₄ στην Ελλάδα και στην υπόλοιπη Ευρώπη	113
9. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΧΔΑ ΣΤΟ ΦΟΔΕΛΕ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	116
9.1 Γεωγραφική θέση – Έναρξη λειτουργίας.....	116
9.2 Μορφολογία – Υψόμετρα απόθεσης	116
9.3 Εξυπηρετούμενοι ΟΤΑ – Ποσότητες απορριμμάτων.....	117
9.4 Τρόπος λειτουργίας του χώρου - έργα υποδομής.....	119
10. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CH₄	122
10.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	122

10.2 Περιγραφή συσκευών δειγματοληψίας και ανάλυσης του βιοαερίου	122
10.2.1 Γενική περιγραφή του αναλυτή BE – DGA 3.....	122
10.2.2 Η τεχνική της μέτρησης των αερίων	123
10.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του αναλυτή	124
10.2.4 Όψεις του αναλυτή	124
10.2.5 Μέτρηση της συγκέντρωσης του βιοαερίου μέσα στο ΧΔΑ.....	126
10.3 Εκπόνηση μετρήσεων βιοαερίου στο ΧΔΑ στο Φόδελε Ηρακλείου	127
10.4 Το μοντέλου εκτίμησης εκπομπών LandGem	130
10.4.1 Περιγραφή του μοντέλου	130
10.4.2 Εφαρμογή του μοντέλου στο ΧΔΑ στο Φόδελε Ηρακλείου.....	133
10.5 Το μοντέλου εκτίμησης εκπομπών GasSim	140
10.5.1 Εισαγωγή	140
10.5.2 Γενικές παραδοχές του μοντέλου GasSim Lite	140
10.5.3 Περιγραφή του μοντέλου GasSim Lite	141
10.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων.....	158
11. ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CH₄ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΟΔΗΓΙΑ 99/31/EU ..	161
11.1 Γενικά στοιχεία	161
11.2 Σενάρια μείωσης ζυμώσιμων	162
11.2.1 Σενάριο 1 ^ο – Μείωση των ζυμώσιμων κατά 25 %	162
11.2.2 Σενάριο 2 ^ο – Μείωση των ζυμώσιμων κατά 50 %	163
11.2.3 Σενάριο 3 ^ο – Μείωση των ζυμώσιμων κατά 65 %	164
11.3 Σύγκριση των εκπομπών CH ₄ πριν και μετά τη μείωση των ζυμώσιμων	166
11.4 Μείωση της ποσότητας του χαρτιού που καταλήγει σε ΧΥΤΑ	169
11.4.1 Σενάριο 4ο – Μείωση των ζυμώσιμων κατά 65 % και του χαρτιού κατά 30%.....	170
11.4.2 Σενάριο 5ο – Μείωση των ζυμώσιμων κατά 65 % και του χαρτιού κατά 65%.....	171
12. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ.....	176
12.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	176
12.2 Μέθοδοι συλλογής του βιοαερίου.....	176
12.2.1 Παθητικά συστήματα συλλογής βιοαερίου.....	177
12.2.2 Ενεργά συστήματα συλλογής βιοαερίου.	178

12.3 Μέθοδοι επεξεργασίας του βιοαερίου μετά τη συλλογή του	180
12.3.1 Τεχνολογίες καύσης	181
12.3.2 Τεχνολογίες μη καύσης	184
12.3.3 Τεχνολογίες ελέγχου των οσμών	185
12.4 Βιωσιμότητα ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας	185
12.4.1 Γενικά στοιχεία	185
12.4.2 Σημαντικοί παράγοντες στην ανάκτηση ενέργειας από το	188
βιοαέριο	188
12.5 Οδηγίες διαχείρισης του βιοαερίου από την ΕΡΑ	189
12.6 Ανάκτηση ενέργειας από το ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους Ηρακλείου	191
12.7 Τελική κάλυψη του ΧΔΑ – Αποκατάσταση	196
12.8 Βιοαποκατάσταση του ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους.....	199
12.8.1 Γενικά στοιχεία	199
12.8.2 Λεπτομέρειες των αερόβιων συστημάτων	201
12.8.3 Αερόβια βιοεξυγίανση σε συνδυασμό με εξαγωγή ατμών (Bioventing και SVE)	208
12.8.3.1 Γενική περιγραφή της τεχνολογίας SVE	208
12.8.3.2 Η μέθοδος BIORUSTER.....	209
12.8.4 Εφαρμογή αερόβιας βιοαποκατάστασης στο ΧΔΑ Πέρα Γαλήνων.....	212
13. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	213
14. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	215
14. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	214
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.....	216

Λίστα εικόνων

Εικόνα 3-1	Η δομή ενός συμβατικού ΧΥΤΑ.....	19
Εικόνα 3-2	Τυπική παραγωγή βιοαερίου σε ένα ΧΥΤΑ.....	24
Εικόνα 3-3	Οι φάσεις αποδόμησης του οργανικού κλάσματος και τα διάφορα προϊό- ντα τους.....	26
Εικόνα 3-4	Δημιουργία και κίνηση των στραγγισμάτων σε ένα ΧΥΤΑ	27
Εικόνα 4-1	Όγκος ελέγχου για την κατακόρυφη κίνηση του βιοαερίου.....	47
Εικόνα 4-2	Κίνηση των ιχνοαερίων διαμέσου του τελικού καλύμματος.....	53
Εικόνα 6-1	Ένας παθητικός δειγματολήπτης.....	81
Εικόνα 6-2	Αρχή της εισαγωγής ενός δειγματολήπτη στο έδαφος.....	84
Εικόνα 6-3	Σχεδιαστική πρόταση για ένα σταθερό σημείο δειγματοληψίας.....	85
Εικόνα 8-1	Τα διάφορα επίπεδα επίδρασης του βιοαερίου στο περιβάλλον	94
Εικόνα 8-2	Χρήση ιχνηθέτη (SF ₆) για τη μέτρηση των εκπομπών CH ₄	100
Εικόνα 9-1	Η είσοδος του ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους.....	121
Εικόνα 10-1	Ο αναλυτής αερίων BE – DGA 3.....	123
Εικόνα 10-2	Η κάτοψη του αναλυτή BE – DGA3.....	125
Εικόνα 10-3	Η πλάγια όψη του αναλυτή BE – DGA3.....	126
Εικόνα 10-4	Η διάταξη μέτρησης των εδαφικών αερίων.....	126
Εικόνα 10-5	Οι θέσεις των μετρήσεων στο ΧΔΑ.....	128
Εικόνα 10-6	Μέτρηση στη θέση 3.....	129
Εικόνα 10-7	Μέτρηση στη θέση 5.....	129
Εικόνα 10-8	Υπολογισμός του k.....	132
Εικόνα 10-9	Το γενικό παράθυρο του Landgem.....	134
Εικόνα 10-10	Καθορισμός του k.....	137
Εικόνα 10-11	Καθορισμός του Lo.....	137
Εικόνα 10-12	Έτος παύσης λειτουργίας του ΧΔΑ.....	137
Εικόνα 10-13	Σύσταση βιοαερίου και συγκέντρωση NMOCs.....	138
Εικόνα 10-14	Το παράθυρο ‘Project Details’.....	148
Εικόνα 10-15	Το κύριο μενού του GasSim Lite.....	148
Εικόνα 10-16	Εισαγωγή της διήθησης.....	150
Εικόνα 10-17	Τα χαρακτηριστικά του ΧΥΤΑ.....	151
Εικόνα 10-18	Το παράθυρο εισαγωγής των δεδομένων της πηγής, ‘Source’.....	154
Εικόνα 10-19	Το παράθυρο ‘Waste Breakdown’.....	155

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εικόνα 10-20	Το παράθυρο 'Waste Composition'.....	156
Εικόνα 10-21	Το παράθυρο 'Waste Moisture Content'.....	157
Εικόνα 12-1	Παθητικό σύστημα συλλογής βιοαερίου	177
Εικόνα 12-2	Ενεργό σύστημα συλλογής βιοαερίου	179
Εικόνα 12-3	Βασικά μέρη ενός συστήματος καύσης.....	182
Εικόνα 12-4	Πυρσοί καύσης (α) Ανοικτός (β) Κλειστός	183
Εικόνα 12-5	Σύστημα ανάκτησης βιοαερίου.....	187
Εικόνα 12-6	Δομή ενός συστήματος τελικής κάλυψης	197
Εικόνα 12-7	Η τελική κάλυψη ενός ΧΔΑ ή ΧΥΤΑ.....	198
Εικόνα 12-8	Αερόβια αποκατάσταση ΧΥΤΑ.....	206
Εικόνα 12-9	Το σύστημα BIOPUSTER	211

Λίστα γραφημάτων

Γράφημα 1-1 Παραγωγή αστικών απορριμμάτων στην Ελλάδα	4
Γράφημα 1-2 Κατά κεφαλή παραγωγή αστικών απορριμμάτων.....	5
Γράφημα 1-3 Μέση ποιοτική σύσταση των οικιακών απορριμμάτων το 1997.....	11
Γράφημα 1-4 Ποσοστιαία συμμετοχή μεθόδων διάθεσης απορριμμάτων.....	12
Γράφημα 8-1 Εκπομπές CH ₄ με τις μεθόδους Α και Β σε περίπτωση αύξησης και μετά μείωσης της ποσότητας των αποτιθέμενων απορριμμάτων.....	105
Γράφημα 8-2 Εκπομπές CH ₄ με τις μεθόδους Α και Β σε περίπτωση αύξησης της ποσότητας των αποτιθέμενων απορριμμάτων.....	106
Γράφημα 10-1 Εκπομπές CH ₄ σε συνάρτηση με το χρόνο.....	139
Γράφημα 10-2 Ο ετήσιος ρυθμός παραγωγής – εκπομπής βιοαερίου (m ³ / h).....	158
Γράφημα 10-3 Σύγκριση των μοντέλων.....	160
Γράφημα 11-1 Οι εκπομπές του CH ₄ με βάση τα τρία σενάρια.....	168
Γράφημα 11-2 Συσχέτιση μείωσης ζυμώσιμων με μείωση εκπομπών.....	169
Γράφημα 11-3 Οι εκπομπές του CH ₄	174

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1-1 Ποσότητα MSW σε kg ανά κάτοικο ανά έτος που παράγονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τη Βόρεια Αμερική.....	7
Πίνακας 1-2 Ποσότητες MSW σε kg ανά κάτοικο ανά έτος αλλά και η συνολική ποσότητα που παράγεται στη Ελλάδα (μέσος όρος) και σε άλλες περιοχές της χώρας μέχρι το 1997	8
Πίνακας 3-1 Ενδεικτική σύσταση βιοαερίου	20
Πίνακας 4-1 Συστατικά του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων.....	37
Πίνακας 4-2 Ποσοστά του βιοαποικοδομήσιμου άνθρακα.....	39
Πίνακας 4-3 Δεδομένα από μετρήσεις σε 44 ΧΥΤΑ στην Καλιφόρνια.....	54
Πίνακας 6-1 Περίληψη των γενικών κριτηρίων για την ενεργή δειγματοληψία εδαφικών αερίων	73
Πίνακας 6-2 Εφαρμογές της ενεργής και παθητικής δειγματοληψίας	83
Πίνακας 7-1 Κύριες αναλυτικές μέθοδοι για τη μέτρηση διαφόρων ρυπαντών του βιοαερίου	87
Πίνακας 7-2 Σημαντικοί παράμετροι κατά την ανάλυση του βιοαερίου.....	92
Πίνακας 8-1 Τιμές του DOC στα κύρια κλάσματα των απορριμμάτων.....	109
Πίνακας 8-2 Δεδομένα παραγωγής, σύστασης και ταφής απορριμμάτων για διάφορες χώρες.....	110
Πίνακας 8-3 Εκπομπές CH ₄ από ΧΥΤΑ και Χώρους Διάθεσης Απορριμμάτων...114	
Πίνακας 8-4 Εκπομπές CH ₄ από διάφορους τομείς επεξεργασίας αποβλήτων...115	
Πίνακας 9-1 Εισερχόμενα φορτία στο ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους το 2002	118
Πίνακας 9-2 Ετήσια φορτία στο ΧΔΑ	119
Πίνακας 10-1 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του βιοαερίου.....	130
Πίνακας 10-2 Οι ετήσιες ποσότητες απορριμμάτων που καταλήγουν στο ΧΔΑ (τόνοι).....	136
Πίνακας 10-3 Η σύσταση του βιοαερίου.....	136
Πίνακας 10-4 Κατάταξη κλασμάτων ανάλογα με το ρυθμό αποδόμησης.....	144
Πίνακας 10-5 Η σύσταση των απορριμμάτων	149
Πίνακας 10-6 Σύγκριση των εκπομπών του CH ₄	159
Πίνακας 11-1 Ποσότητες απορριμμάτων που κατέληξαν στο ΧΔΑ	161
Πίνακας 11-2 Ποσότητες απορριμμάτων κατά το 1 ^ο Σενάριο.....	162
Πίνακας 11-3 Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων.....	163

Πίνακας 11-4 Ποσότητες απορριμμάτων κατά το 2 ^ο Σενάριο.....	163
Πίνακας 11-5 Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων.....	164
Πίνακας 11-6 Ποσότητες απορριμμάτων κατά το 3 ^ο Σενάριο.....	165
Πίνακας 11-7 Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων	165
Πίνακας 11-8 Οι εκπομπές του CH ₄ και η ποσοστιαία μείωση τους.....	166
Πίνακας 11-9 Τιμές του DOC στα κύρια κλάσματα των απορριμμάτων.....	170
Πίνακας 11-10 Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων.....	170
Πίνακας 11-11: Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων.....	171
Πίνακας 11-11 Οι εκπομπές του CH ₄ και η ποσοστιαία μείωση τους.....	172
Πίνακας 12-1 Οι παραγόμενες ποσότητες CH ₄	192
Πίνακας 12-2 Οι συλλεγόμενες ποσότητες του CH ₄	192
Πίνακας 12-3 Η θερμική αξία του CH ₄	193
Πίνακας 12-4 Παραγόμενη ισχύς.....	193
Πίνακας 12-5 Η ενέργεια που παράγεται ετησίως.....	194
Πίνακας 12-6 Η αξία της παραγόμενης ενέργειας.....	194
Πίνακας 12-7 Μέσο κόστος επένδυσης ανά εγκατεστημένο kW	195

Περίληψη

Οι εκτιμώμενες παγκόσμιες ετήσιες εκπομπές CH₄ από Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) και Χώρους Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΔΑ) κυμαίνονται από 20 - 40 εκατομμύρια τόνους, και το μεγαλύτερο ποσοστό τους προέρχεται από τις βιομηχανοποιημένες χώρες. Εκτιμάται ότι αυτές οι εκπομπές του CH₄ αποτελούν το 5 - 20 % των ετήσιων παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών CH₄, που ισούται με το 1 - 4 % των συνολικών ετήσιων ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Οι εκπομπές CH₄ στην Ελλάδα είναι αρκετά υψηλές λόγω του τρόπου διαχείρισης των αστικών απορριμμάτων. Περισσότερο από το 90% των απορριμμάτων διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) (51%) και χώρους ανεξέλεγκτης εναπόθεσης (40%), ενώ 8% οδηγείται σε μερική ανακύκλωση μέσω της μονάδας μηχανικού διαχωρισμού των Λιοσίων και μικρή ποσότητα (κάτω του 1%) οδηγείται σε λιπασματοποίηση.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η *in – situ* μέτρηση των εδαφικών αερίων σε ΧΔΑ και ΧΥΤΑ, η εκτίμηση των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ από την επιφάνεια του εδάφους με τη χρήση των μοντέλων LandGem και GasSim, η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μοντέλων, και η εύρεση τρόπων μείωσής τους.

Αρχικά θα εξεταστεί η μείωση των εκπομπών CH₄ με την εφαρμογή της Οδηγίας 99/31/EC (ΚΥΑ 29407/3508/2002) της οποίας στόχος είναι ο περιορισμός, μέχρι το 2020, των βιοαποικοδομήσιμων απορριμμάτων που διατίθενται σε χώρους ταφής σε 35% σε σχέση με τα επίπεδα του 1995. Στη συνέχεια θα εξεταστεί η βιωσιμότητα ενός προγράμματος ανάκτησης ενέργειας και η εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών βιοαποκατάστασης ΧΔΑ και ΧΥΤΑ.

Ως χώρος μελέτης επιλέχθηκε ο ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους Ηρακλείου Κρήτης, ο οποίος είναι ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα των εκατοντάδων χώρων ανεξέλεγκτης ή ημιελεγχόμενης ταφής που υπάρχουν στην Ελλάδα, και αντικατοπτρίζει τον τρόπο διαχείρισης των απορριμμάτων σήμερα στη χώρα μας

1.ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

1.1 Αναγκαιότητα της διαχείρισης των αστικών απορριμμάτων

Αντίθετα με το γενικό πιστεύω, το πρόβλημα της διαχείρισης των απορριμμάτων δεν είναι κάτι καινούργιο για το ανθρώπινο είδος. Από τη στιγμή που οι άνθρωποι άρχιζαν να δημιουργούν οργανωμένες κοινωνίες το πρόβλημα της διάθεσης των απορριμμάτων υπήρχε και απασχολούσε τις πρώτες αυτές αστικές δομές. Καθώς όμως η πλειονότητα των απορριμμάτων ήταν οργανικής φύσεως η επαναφορά τους στη γη, κυρίως σε μικρού αριθμού κατοίκων αγροτικές κοινωνίες, ήταν κάτι σχετικά απλό. Τα πράγματα έγιναν πιο πολύπλοκα από τη στιγμή που άρχισαν να δημιουργούνται πιο σύνθετες κοινωνίες στις οποίες μεγάλος αριθμός ανθρώπων κατοικούσε σε μικρή σχετικά έκταση. Τότε έγινε επιτακτική η ανάγκη διαχείρισης των απορριμμάτων.

Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους θα πρέπει να υπάρχει διαχείριση των απορριμμάτων είναι οι εξής [1] :

1. Προβλήματα για τη δημόσια υγεία από τη συσσώρευση απορριμμάτων που αποτελούν πηγή μεταδιδόμενων ασθενειών
2. Μείωση της επίδρασης στο περιβάλλον από την ανεξέλεγκτη απόρριψή τους στη φύση και πιο συγκεκριμένα:
 - Προστασία της αισθητικής της φύσης από την ανεξέλεγκτη απόρριψη.
 - Προστασία φύσης και ανθρώπου από τυχόν τοξικές ουσίες που υπάρχουν σε μεγάλη ποικιλία απορριμμάτων.
 - Προστασία του υπόγειου υδροφορέα από τα εκχυλίσματα που παράγονται από την αποδόμηση του οργανικού κλάσματος.
 - Προστασία του επιφανειακού υδροφορέα (ποτάμια, λίμνες και θάλασσες) από τα ίδια εκχυλίσματα.
 - Προστασία της ατμόσφαιρας από την εκπομπή αερίων με μεγάλη υπαιτιότητα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου όπως το CH₄.
 - Προστασία των έμβιων όντων (φυτά, ζώα και άνθρωποι)

από τις τοξικές ουσίες που απελευθερώνονται από την αυτανάφλεξη των απορριμμάτων, όταν αυτά συσσωρεύονται χωρίς έλεγχο.

3. Επανάκτηση υλικών και ενέργειας που αρχικά είχαν δεσμευτεί στα απορρίμματα κατά την κατασκευή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση φυσικών πόρων σε παγκόσμια κλίμακα και τη μείωση των ενεργειακών αναγκών που αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την αντιμετώπιση του φαινομένου της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη.
4. Επαναφορά στη φύση και κυρίως στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις εκείνων των οργανικών συστατικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή απορριμμάτων με απώτερο στόχο τη μείωση της ανάγκης σε χημικά συνθετικά λιπάσματα.

1.2 Παραγωγή αστικών απορριμμάτων

Η παραγωγή αστικών απορριμμάτων αντανakλά με τον πλέον εμφανή τρόπο το σύγχρονο - μη αειφόρο - μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης. Μεγάλες ποσότητες υλικών κατευθύνονται στην παραγωγή και από εκεί στην κατανάλωση για να απορριφθούν στη συνέχεια με τρόπο που δεν επιτρέπει την επιστροφή τους στο παραγωγικό κύκλωμα και επιβαρύνει πολλαπλώς το φυσικό περιβάλλον. Έτσι, τα υλικά αυτά αποστερούνται από τις επόμενες γενιές ενώ ταυτόχρονα παραβιάζονται σοβαρά οι αντοχές των φυσικών αποδεκτών τους με συνέπειες για την ισορροπία των οικοσυστημάτων και τη δημόσια υγεία. Η συγκέντρωση του πληθυσμού στα αστικά κέντρα και οι τοπικές εποχιακές διακυμάνσεις στην πυκνότητα του πληθυσμού λόγω της αύξουσας τουριστικής κίνησης συντελούν στη μεγέθυνση και άνιση γεωγραφική κατανομή των επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον.

Η ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος των στερεών απορριμμάτων προϋποθέτει τη διαχείριση τόσο της ποσοτικής, όσο και της ποιοτικής τους διάστασης. Η ποσοτική διάσταση αφορά στη μείωση των παραγόμενων απορριμμάτων και στη μεγιστοποίηση της ποσότητας που είναι δυνατό να αξιοποιηθεί εκ νέου στην παραγωγή και κατανάλωση. Η ποιοτική διάσταση συνδέεται με τη σύνθεση των απορριμμάτων και την εφαρμογή των ασφαλέ-

στερων και αποδοτικότερων μεθόδων διάθεσης. Στο γενικό αυτό πλαίσιο, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε δύο ρεύματα απορριμμάτων: Στα τοξικά και επικίνδυνα απορρίμματα και στα υλικά συσκευασίας.

1.2.1 Το Πλαίσιο της διαχείρισης των αστικών απορριμμάτων [2]

Η διεθνής κοινότητα, αναγνωρίζοντας τη σημασία του προβλήματος έχει θέσει στην Agenda 21 ένα πλαίσιο ολοκληρωμένης διαχείρισης των απορριμμάτων στη βάση του τρίπτυχου Αποφυγή- Επαναχρησιμοποίηση- Ανακύκλωση με μέριμνα για την ασφαλή τελική τους διάθεση.

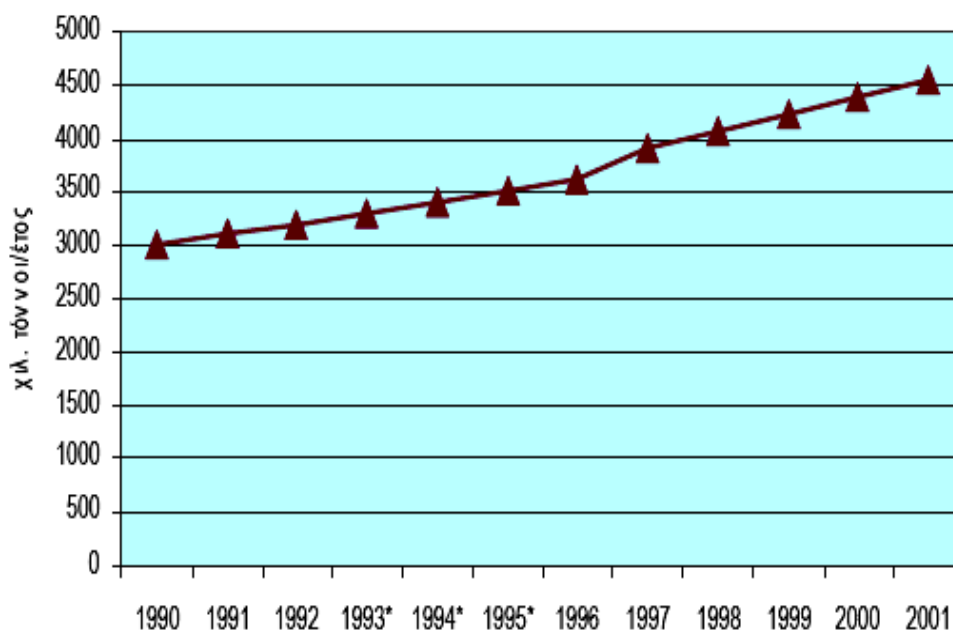
Η Ευρωπαϊκή Ένωση, ήδη στο 5ο Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον υιοθετεί τη φιλοσοφία της ολοκληρωμένης διαχείρισης των απορριμμάτων, ενώ στο 6ο Πρόγραμμα θέτει ως στόχο τη μείωση της συνολικής ποσότητας των απορριμμάτων προς διάθεση κατά 20% μέχρι το 2010 και κατά 50% μέχρι το 2050, σε σχέση με τα επίπεδα του 2000. Παράλληλα, θεσμοθετεί ένα σύνολο Οδηγιών με σκοπό την αποτελεσματική αντιμετώπιση των κρίσιμων πλευρών του προβλήματος. Στις αρχές της δεκαετίας του '90 εκδίδεται η Οδηγία για τα Επικίνδυνα Απορρίμματα (91/689/EEC), ενώ η Οδηγία για τα Υλικά Συσκευασίας (94/62/EC) θέτει ως στόχο την ανάκτηση (συμπεριλαμβανομένης της λιπασματοποίησης και ενεργειακής αξιοποίησης) τουλάχιστον του 50% του βάρους των ΥΣ, με ελάχιστο ποσοστό ανακύκλωσης 25% (στόχος που σήμερα έχει μετατοπισθεί στο 55%). Τέλος, με την Οδηγία 99/31/EC τίθεται ως στόχος για το 2020 ο περιορισμός των βιο-αποικοδομήσιμων απορριμμάτων που διατίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) σε 35% σε σχέση με τα επίπεδα του 1995 και τίθενται αυστηρές προδιαγραφές για τις μεγάλες μονάδες ΧΥΤΑ.

Η Ελλάδα, προωθεί με εντατικούς ρυθμούς την επέκταση και οργάνωση των υποδομών, ενώ έχει πρόσφατα διαμορφώσει τον Εθνικό Σχεδιασμό Ολοκληρωμένης και Εναλλακτικής Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων με βάση τις αρχές και κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής πολιτικής. Παράλληλα, προβλέπει την ανάληψη του σχεδιασμού και της διαχείρισης των αποβλήτων από τις Νομαρχιακές Αυτοδιοικήσεις και τις αρχές των Περιφερειών, κάτι που αναμφισβήτητα διευκολύνει την ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος. Η πολιτική αυτή της Ελλάδας, φαίνεται στις Υπουργικές Αποφάσεις και στους Νό-

μους που έχουν ψηφιστεί για την εναρμόνιση με την ευρωπαϊκή νομοθεσία και τον καθορισμό του σχεδίου δράσης. Ο Νόμος 2939/2001 για τις συσκευασίες και την ανακύκλωση ψηφίστηκε για την εναρμόνιση με την Οδηγία 94/62/EC με θέμα ‘Συσκευασίες και απορρίμματα συσκευασίας’, και η ΚΥΑ 113944/97 “Εθνικός σχεδιασμός διαχείρισης στερεών αποβλήτων” ψηφίστηκε για την εναρμόνιση με την Οδηγία 91/156/ΕΟΚ (έχει καταργηθεί). Ακόμα σημαντική είναι η ΚΥΑ 29407/3508/2002 “Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή αποβλήτων” για τον εναρμονισμό με την Οδηγία 99/31/EC και η ΚΥΑ 50910/2727/2003 “Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων. Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός” .

1.2.2 Η εξέλιξη της παραγωγής αστικών απορριμμάτων

Στο Γράφημα 1-1 φαίνεται η εξέλιξη της παραγωγής των απορριμμάτων στην Ελλάδα από τις αρχές της δεκαετίας του 90 μέχρι και το 2001.



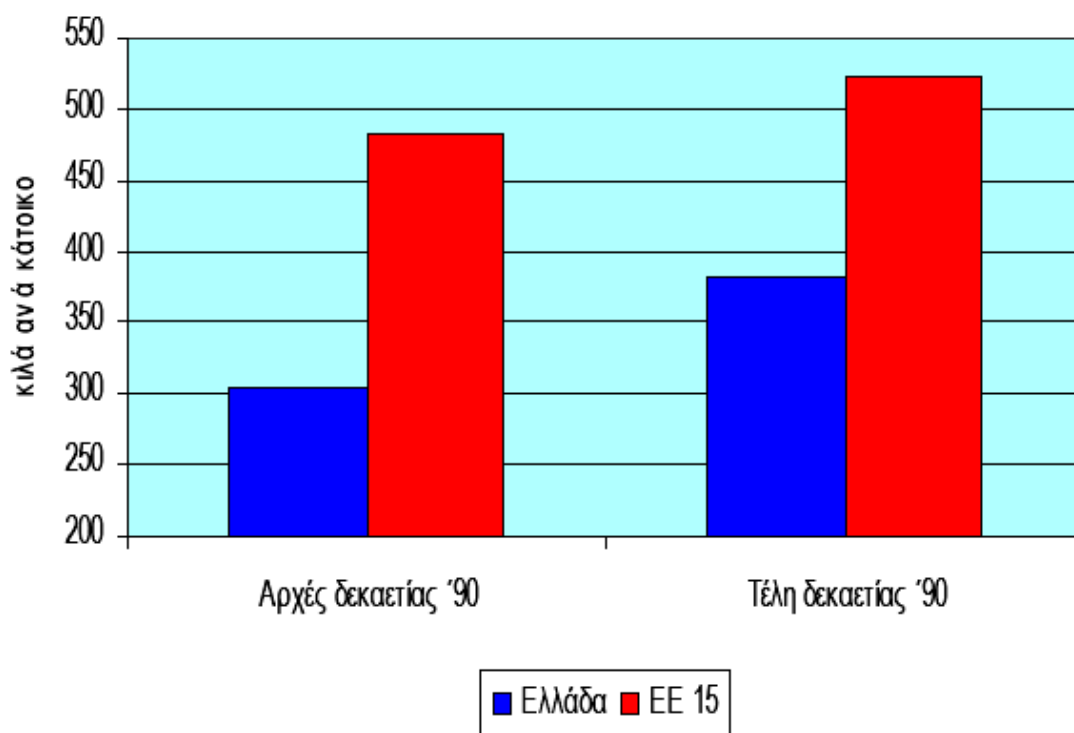
Γράφημα 1-1 : Παραγωγή αστικών απορριμμάτων στην Ελλάδα [2]

Η ποσότητα των αστικών απορριμμάτων έφτασε το 2001 στους 4.5 εκ. τόνους ετησίως έχοντας αυξηθεί κατά 50% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, ποσοστό διπλάσιο περίπου της αύξησης του ΑΕΠ την ίδια περίοδο. Αυτό είναι λογικό αφού η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και η αλλαγή των καταναλωτι-

κών προτύπων κατανάλωσης οδηγεί στην παραγωγή όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων αστικών απορριμμάτων .

1.2.3 Η κατά κεφαλή παραγωγή αστικών απορριμμάτων

Ο λόγος της παραγόμενης ποσότητας αστικών απορριμμάτων προς τον πληθυσμό της χώρας σε μία δεδομένη χρονική στιγμή παρέχει ένα μέτρο της μέσης απορριπτόμενης ποσότητας που είναι άμεσα συγκρίσιμο με δεδομένα άλλων χωρών. Από τη σύγκριση της εξέλιξης των ποσοτήτων των απορριμμάτων μεταξύ Ελλάδας και ΕΕ, γίνεται εφικτή η αξιολόγηση της σχετικής σοβαρότητας του προβλήματος στη χώρα μας και η εκτίμηση της αναμενόμενης τάσης μεταβολής τους στο μέλλον (Γράφημα 1-2). Οι χρονικές στιγμές υπολογισμού των ποσοτήτων διαφοροποιούνται κατά 1-2 έτη, καθώς δεν υπάρχουν διαθέσιμες πλήρεις χρονοσειρές για την Ελλάδα και το σύνολο της ΕΕ.



Γράφημα 1-2: Κατά κεφαλή παραγωγή αστικών απορριμμάτων [2]

Παρά την ταχύτητα αύξησης της ποσότητας των απορριμμάτων στην Ελλάδα, διατηρείται μία σημαντική διαφορά σε σχέση με το μέσο όρο της ΕΕ,

αντανακλώντας διαφορές βιοτικού επιπέδου και προτύπων κατανάλωσης. Ειδικότερα, στα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας η μέση παραγωγή απορριμμάτων στη χώρα μας ήταν κατά 27% χαμηλότερη από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο. Έτσι είναι αναγκαία η αποσύνδεση της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου από την παραγωγή αστικών απορριμμάτων, έτσι ώστε να ανακοπεί η τάση εξίσωσης με τον κοινοτικό μέσο όρο.

1.2.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή των αστικών απορριμμάτων

Η ποσότητα των αστικών απορριμμάτων που παράγονται ανά κάτοικο μιας χώρας όσο και οι ποσότητες που τελικά διαχειρίζονται οι διάφοροι δήμοι και κοινότητες εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων όπως [1]:

- Την οικονομική ανάπτυξη της χώρας με μια τάση αύξησης της ποσότητας των απορριμμάτων παράλληλα με την αύξηση του ακαθάριστου εθνικού κεφαλαίου.
- Την περιβαλλοντική συνείδηση και παιδεία των πολιτών μιας χώρας παίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στην ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται όσο και στη σύνθεσή τους. Η μείωση παραγωγής απορριμμάτων, η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση των υλικών αποτελούν την κορυφαία μορφή περιβαλλοντικής δραστηριοποίησης. Πολύ συχνά αυτό οδηγεί στη μείωση της ποσότητας που διαχειρίζεται η δημοτική αρχή (αλλαγή σύνθεσης) και όχι κατά ανάγκη μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που παράγονται ανά κάτοικο.
- Το σύστημα διαχείρισης των απορριμμάτων καθώς τη συλλογή των γενικών απορριμμάτων χωρίς αυτά να έχουν επεξεργαστεί πρώτα στο σπίτι (διαλογή στην πηγή). Αυτά δημιουργούν τάση αδιαφορίας και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ποσότητας των απορριμμάτων που παράγονται όσο και αυτών που στο τέλος θα πρέπει να διαχειριστούν. Σε αυτό παίζουν ρόλο και τα δημοτικά τέλη καθώς μικρά τέλη ή τέλη που είναι ανεξάρτητα από την παραγόμενη ποσότητα των απορριμμάτων ενισχύουν την α-

διαφορία των κατοίκων για τις ποσότητες των απορριμμάτων που παράγουν.

- Την πυκνότητα των πληθυσμών και οι μορφές των κατοικιών. Η ύπαρξη μονοκατοικιών ευνοεί τη διαχείριση του οργανικού τουλάχιστον κλάσματος στον κήπο με τη μέθοδο του home composting και μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που καταλήγουν στους δημοτικού κάδους. Από την άλλη αυξάνεται κατά πολύ το κλάσμα των υπολειμμάτων κήπων (green waste) στα αστικά απορρίμματα.

Στον Πίνακα 1-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ποσότητες των αστικών απορριμμάτων που παράγονται στις διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και στις Η. Π. Α. ανά κάτοικο ανά έτος. Ο Πίνακας 1-2 παρουσιάζει τα στοιχεία αυτά ανά κάτοικο και συνολικά για την Ελλάδα και σε διάφορες περιοχές σε αυτήν. Οι τιμές που δίδονται αναφέρονται σε μετρήσεις μετά το 1997.

ΧΩΡΑ	1985	1990
Αυστρία	228	620
Δανία	475	-
Φιλανδία	510	624
Γαλλία	294	360
Γερμανία	317	333
Ιταλία	265	348
Ολλανδία	435	497
Πορτογαλία	247	257
Ισπανία	260	322
Σουηδία	317	374
Ην.βασίλειο	341	348
ΗΠΑ	704	705

Πίνακας 1-1: Ποσότητα MSW σε kg ανά κάτοικο ανά έτος που παράγονται στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τη Βόρεια Αμερική

	Ποσότητα ανά κάτοικο ανά έτος σε kg	Συνολική ποσότητα σε χιλιάδες τό-
Ελλάδα	354	3.800
Νομός Αττικής	414	1.477
Νομός Θεσ/νίκης	373	353
Νομός Αχαΐας	346	104
Νομός Ηράκλειου	323	110
Νομός Χανίων	320	53

Πίνακας 1-2 : Ποσότητες MSW σε kg ανά κάτοικο ανά έτος αλλά και η συνολική ποσότητα που παράγεται στη Ελλάδα (μέσος όρος) και σε άλλες περιοχές της χώρας μέχρι το 1997 [1].

1.3 Περιγραφή των αστικών απορριμμάτων

1.3.1 Ο ρόλος της σύστασης των απορριμμάτων στην επιλογή των συστημάτων διαχείρισης

Πέρα από τη συνολική ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται σε κάθε χώρα ιδιαίτερη σημασία έχει και η σύνθεση των MSW. Η επιλογή της καταλληλότερης μεθοδολογίας διαχείρισης των απορριμμάτων εξαρτάται κατά πολύ από τη σύνθεση των απορριμμάτων. Για παράδειγμα θα ήταν μάλλον λανθασμένη η επιλογή ενός συστήματος καύσης των απορριμμάτων με υψηλή συγκέντρωση υπολειμμάτων τροφίμων που περιέχουν υψηλό ποσοστό υγρασίας. Αλλά και στο καθαυτό σχεδιασμό των συστημάτων επεξεργασίας η σύνθεση των απορριμμάτων λαμβάνεται σημαντικά υπόψη, όπως για παράδειγμα:

- Στο σχεδιασμό **χώρων υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ)** η σύνθεση των απορριμμάτων παίζει σημαντικό ρόλο σε θέματα όπως [1]:
 1. Τον υπολογισμό της ποσότητας του βιοαερίου που θα παράγεται μια και αυτή εξαρτάται από το μέγεθος του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων.
 2. Την τοξικότητα των εκχυλισμάτων που θα παράγονται.

3. Τη διάρκεια ζωής της χωματερής και κυρίως το χρόνο που θα χρειαστεί έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η καθίζηση της χωματερής μετά το κλείσιμό της.
- Στην περίπτωση της **καύσης** η σύνθεση παίζει σημαντικό ρόλο στα παρακάτω:
1. Στον υπολογισμό της ενεργειακής περιεκτικότητας των απορριμμάτων.
 2. Στον υπολογισμό της τοξικότητας των αερίων ρύπων που θα παράγονται καθώς και της τέφρας.
 3. Στη διαδικασία και τα χαρακτηριστικά της μεθόδου προεπεξεργασίας των απορριμμάτων.
 4. Στην ακριβή μέθοδο της καύσης.
- Στην περίπτωση της **ανακύκλωσης** σε συνδυασμό με το σύστημα διαλογής στην πηγή και **κομποστοποίηση**, η σύνθεση των απορριμμάτων χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς όπως:
1. Στον αριθμό και στο μέγεθος των δοχείων συλλογής του κάθε κλάσματος.
 2. Στη συχνότητα συλλογής των απορριμμάτων κάθε κλάσματος.
 3. Στις ανάγκες σε εξοπλισμό και έκταση της μονάδας κομποστοποίησης.
 4. Στο σχεδιασμό των χώρων συλλογής, μεταφόρτωσης και επεξεργασίας των διαφόρων προϊόντων της ανακύκλωσης,
 5. Στη βιωσιμότητα της μονάδας από την πώληση των διαφόρων προϊόντων που συλλέγονται.

1.3.2 Η σύσταση των αστικών απορριμμάτων

Τα αστικά απορρίμματα (MSW) περιλαμβάνουν τα οικιακά απορρίμματα και παρεμφερή απορρίμματα προερχόμενα από εμπορικές ζώνες. Τα οικιακά απορρίμματα αποτελούν ένα ιδιαίτερος ανομοιογενές συνονθύλευμα υλικών. Η ποιοτική ανάλυση των οικιακών απορριμμάτων αποσκοπεί στο να προσδιορίσει βασικές ποσοστιαίες κατηγορίες υλικών σε αυτά, προκειμένου να προσ-

διορισθούν οι απαραίτητες πληροφορίες για την κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης, επεξεργασίας και αξιοποίησης τους (ανακύκλωση, ανάκτηση ενέργειας, κ.λ.π.).

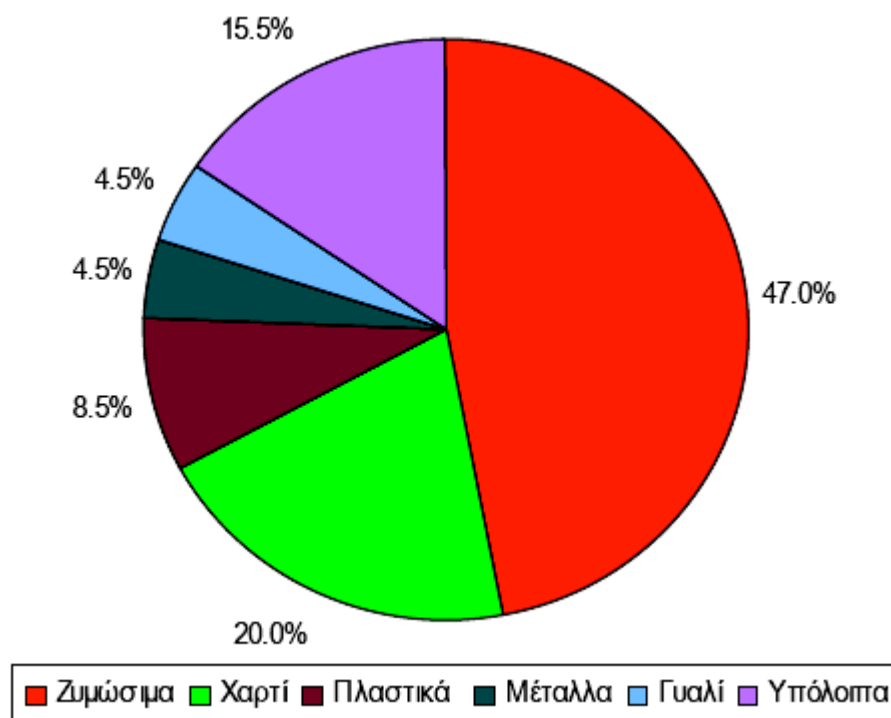
Εκτός από τη διαφοροποίηση της ποσότητας των απορριμμάτων μεταξύ Ελλάδας και ΕΕ, σημαντικές διαφορές καταγράφονται και ως προς την ποιοτική τους σύσταση. Το σημαντικότερο διαφοροποιό στοιχείο είναι η πολύ υψηλή περιεκτικότητα των απορριμμάτων της χώρας σε ζυμώσιμα υλικά, επομένως και υγρασίας. Επίσης, σχετικά χαμηλό είναι το ποσοστό των υλικών συσκευασίας. Το υψηλό ποσοστό ζυμώσιμων υλικών δυσχεραίνει την εφαρμογή μεθόδων καύσης και μηχανικού διαχωρισμού, ενώ η αποικοδόμησή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής συνδέεται με την παραγωγή CH_4 το οποίο είναι γνωστό αέριο του θερμοκηπίου.

Η πιο δόκιμη κατηγοριοποίηση των απορριμμάτων, όπως προκύπτει από σειρά δειγματοληψιών και αναλύσεων, περιλαμβάνει τις εξής ομάδες (κλάσματα) υλικών [3] :

1. **Ζυμώσιμα.** Περιλαμβάνονται τα υπολείμματα κουζίνας και κήπου.
2. **Χαρτί.** Περιλαμβάνονται τα πάσης φύσεως χαρτιά και χαρτόνια που προέρχονται κυρίως από έντυπο υλικό και συσκευασίες προϊόντων.
3. **Μέταλλα.** Περιλαμβάνεται το σύνολο των μεταλλικών υλικών που απαντώνται στα απορρίμματα. Είναι δόκιμος 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. Σε ορισμένες αναλύσεις έχουν εξετασθεί ως ξεχωριστή υποκατηγορία και οι μπαταρίες λόγω της σχετικά υψηλότερης επικινδυνότητας τους.
4. **Γυαλί.** Η διαχείριση αποβλήτου γυαλιού στη χώρα μας πάσχει κυρίως από την έλλειψη υαλουργιών, κυρίως σε περιοχές μακριά από την Αττική. Είναι δόκιμος ο διαχωρισμός σε λευκό, καφέ και πράσινο γυαλί, όσον αφορά την ανακύκλωση, καθώς η παραγωγή καφέ και λευκού γυαλιού απαιτεί υαλότριμμα μόνο του ίδιου χρώματος.

5. **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.λπ.). Χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι η έντονη ανομοιογένειά της, λόγω των πολλών χρησιμοποιούμενων πολυμερών (π.χ. PVC, PET).
6. **Δέρμα-Ξύλο-Λάστιχο-Ύφασμα.** Χαρακτηρίζονται ως λοιπά καύσιμα (ΔΞΥΛ).
7. **Αδρανή.** Εδώ περιλαμβάνονται χημικά ανενεργά υλικά που καταλήγουν στα οικιακά απορρίμματα (π.χ. χώματα, πέτρες, κ.λπ.).
8. **Λοιπά.** Στο κλάσμα αυτό καταλήγουν τα υλικά εκείνα που δε μπορούν να κατανεμηθούν σε καμία από τις άλλες κατηγορίες.

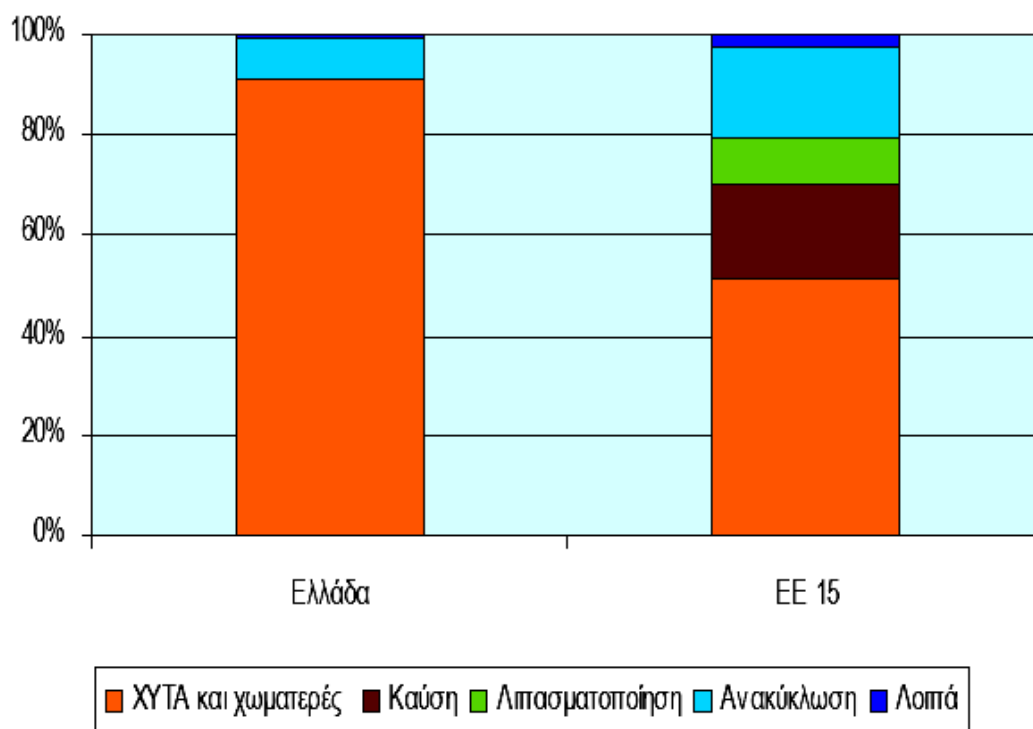
Στο Γράφημα 1-3 παρουσιάζεται η μέση ποσοστιαία σύσταση των απορριμμάτων στην Ελλάδα το 1997 [3].



Γράφημα 1-3 : Μέση ποιοτική σύσταση των οικιακών απορριμμάτων το 1997 [3]

1.4 Ποσοστιαία συμμετοχή μεθόδων διάθεσης απορριμμάτων

Σημαντικό είναι τώρα να εξετάσουμε την ποσοστιαία συμμετοχή των μεθόδων διάθεσης των απορριμμάτων στην Ελλάδα και στην Ευρώπη [2]. Το Γράφημα 1-4 παρέχει την ποσοστιαία κατά βάρος συμμετοχή των βασικών μεθόδων διάθεσης των αστικών απορριμμάτων και πληροφορεί για το βαθμό κατά τον οποίο μέρος των χρήσιμων υλικών που εισάγονται ως μίγμα στο ρεύμα των απορριμμάτων, επιστρέφει στο παραγωγικό κύκλωμα ως πρώτη ύλη ή αξιοποιείται ενεργειακά. Σημειώνεται πάντως ότι σε πολλές περιπτώσεις η καύση που εφαρμόζεται σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες δεν αποσκοπεί στην ενεργειακή αξιοποίηση των απορριμμάτων αλλά μόνο στην έλλειψη χώρων υγειονομικής ταφής. Τα ποσοστά αυτά υπολογίζονται για την Ελλάδα το 1997 και για την ΕΕ για τα τέλη της 10ετίας του 90.



Γράφημα 1- 4: Ποσοστιαία συμμετοχή μεθόδων διάθεσης απορριμμάτων [2]

Περισσότερο από 90% των αστικών απορριμμάτων στην Ελλάδα διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) (51%) και χώρους ανεξέλεγκτης εναπόθεσης (ΧΔΑ) (40%), ενώ 8% οδηγείται σε μερική ανακύκλωση μέσω της μονάδας μηχανικού διαχωρισμού των Λιοσίων και μικρή ποσότητα (κάτω του 1%) οδηγείται σε λιπασματοποίηση. Άρα είναι επιτακτική η εξάλειψη της ανε-

ξέλεγκτης εναπόθεσης και η αύξηση της συμμετοχής των ΧΥΤΑ και των άλλων μεθόδων αξιοποίησης των απορριμμάτων.

Αντίθετα, στην ΕΕ η συμμετοχή των ΧΥΤΑ περιορίζεται περίπου στο 50%, και οι μέθοδοι μερικής αξιοποίησης εμφανίζουν πολύ υψηλότερα μερίδια.

Επειδή ο όρος διαχείριση των απορριμμάτων στην Ελλάδα είναι ταυτόσημος με τον όρο ταφή, θα ασχοληθούμε ιδιαίτερα με την τελική διάθεση των απορριμμάτων.

2.ΤΕΛΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Είναι γεγονός ότι ανέκαθεν ο τελικός αποδέκτης των υπολειμμάτων της κατανάλωσης και των καταλοίπων της παραγωγικής διαδικασίας υπήρξε το περιβάλλον. Στις παλιότερες κοινωνίες τα υπολείμματα της παραγωγής και της κατανάλωσης αγαθών ήταν ένα μέρος του βιολογικού κύκλου της φύσης. Η ανεξέλεγκτη διάθεση των απορριμμάτων ήταν μία ιδανική λύση αφού η φύση είχε τη δυνατότητα να τα ανακυκλώνει. Αντίθετα στις σημερινές κοινωνίες η κατάσταση έχει μεταβληθεί δραματικά. Όπως συμβαίνει συνήθως, οι σύγχρονες κοινωνίες, βρίσκοντας βολική τη μέθοδο της ανεξέλεγκτης διάθεσης των απορριμμάτων, παραγνώρισαν το γεγονός ότι οι ποσότητες των απορριμμάτων αλλά και η ποιότητά τους σύσταση, έχουν ξεπεράσει τις ικανότητες της φύσης για αυτοκαθαρισμό, με αποτέλεσμα την ανατροπή της επικρατούσας οικολογικής ισορροπίας. Στα πλαίσια αυτά, η εδαφική τελική διάθεση αποτελεί τον παραδοσιακότερο τρόπο διαχείρισης των αστικών απορριμμάτων.

2.2 Τρόποι εδαφικής διάθεσης

Η εδαφική διάθεση των απορριμμάτων έχει τρεις μορφές [3]:

1. Ανεξέλεγκτη διάθεση-απόρριψη

Η ανεξέλεγκτη απόρριψη των απορριμμάτων χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Διάθεση απορριμμάτων από μικρούς δήμους και κοινότητες σε συγκεκριμένους χώρους, χωρίς να λαμβάνεται κανένα μέτρο υγειονομικής ταφής.
- Ανεξέλεγκτη καύση, χωρίς να λαμβάνεται κανένα μέτρο για τη μόλυνση του περιβάλλοντος και τους κινδύνους πυρκαγιών.
- Απόρριψη απορριμμάτων από ιδιώτες κοντά σε χώρους υγειονομικής ταφής.
- Απόρριψη βιομηχανικών αποβλήτων σε ανεξέλεγκτους χώρους.

- Εγκατάλειψη απορριμμάτων από εκδρομείς.

2. Ημιελεγχόμενη διάθεση:

Η ημιελεγχόμενη διάθεση των απορριμμάτων χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Βρίσκεται ποιοτικά μεταξύ ανεξέλεγκτης και ελεγχόμενης.
- Περιλαμβάνει τη δημιουργία κάποιου συγκεκριμένου χώρου διάθεσης, στον οποίο γίνεται μία επικάλυψη των απορριμμάτων και τηρούνται κάποια στοιχειώδη μέτρα ελέγχου.
- Τα προβλήματα και οι κίνδυνοι που υπάρχουν στην ανεξέλεγκτη διάθεση εμφανίζονται και εδώ αλλά με μικρότερη οξύτητα.
- Συνήθως υπάρχει καλή πρόθεση εκ μέρους των αρμοδίων, η οποία όμως δεν είναι αρκετή για να λύσει το πρόβλημα.
- Χαρακτηρίζονται ως «νόμιμοι» χώροι διάθεσης γιατί συνήθως λειτουργούν υπό την εποπτεία της τοπικής αυτοδιοίκησης.

3. Υγειονομική ταφή (ελεγχόμενη διάθεση):

Η υγειονομική ταφή είναι η πλέον ικανοποιητική και εγκεκριμένη λύση διάθεσης των απορριμμάτων στη φύση, σύμφωνα με τις παγκόσμιες προδιαγραφές προστασίας ανθρώπινης υγείας και περιβάλλοντος καθώς και με τη διεθνή νομοθεσία. Ταυτόχρονα αποτελεί μία οικονομική λύση διάθεσης των απορριμμάτων. Η υγειονομική ταφή απορριμμάτων συντελείται στους ΧΥΤΑ.

Στη βιβλιογραφία και στην καθημερινότητα οι ανεξέλεγκτοι και ημιελεγχόμενοι χώροι διάθεσης απορριμμάτων ονομάζονται κοινώς χωματερές ή σκουπιδότοποι.

2.3 Επιπτώσεις ανεξέλεγκτης και ημιελεγχόμενης διάθεσης

Η διατάραξη της ισορροπίας του οικοσυστήματος είναι αναπόφευκτη σε μια περιοχή που «φιλοξενεί» ένα χώρο διάθεσης απορριμμάτων και μάλιστα η διαταραχή αυτή επεκτείνεται σε μεγάλη έκταση γύρω από αυτόν.

Η διατάραξη της ισορροπίας καθορίζεται από τους εξής παράγοντες:

- Μεταβολή του ανάγλυφου της περιοχής.
- Κάλυψη και απόκρυψη των φυσικών χαρακτηριστικών, όπως η βλάστηση και η διατάραξη του φυσικού αποστραγγιστικού δικτύου.
- Αισθητική υποβάθμιση του τοπίου.

Η ανεξέλεγκτη απόρριψη πρέπει να αντιμετωπίζεται σαν πρόβλημα: (α) δημόσιας υγείας και επιδημιολογίας, (β) προστασίας του περιβάλλοντος και (γ) διαπαιδαγώγησης μιας υπεύθυνης συμπεριφοράς του κοινού στο περιβάλλον και την προστασία της φύσης.

Οι πιο σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις της διάθεσης των απορριμμάτων σε χωματερές είναι οι παρακάτω:

- Μολύνονται οι επιφανειακοί και υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες, καθώς τα υγρά που προκύπτουν από τη διήθηση των αποβλήτων που βρίσκονται υπό αποσύνθεση καταλήγουν σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους και απειλούν τα μελλοντικά αποθέματα νερού.
- Ρυπαίνονται τεράστιες περιοχές, ακτές και θάλασσες.
- Ρύπανση ατμόσφαιρας από τυχόν καύση και δυσοσμίες των απορριμμάτων.
- Ανεξέλεγκτη δημιουργία και απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα νοσηρών αερίων τα οποία συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.
- Τίθεται σε κίνδυνο η δημόσια υγεία (μετάδοση ασθενειών).
- Κινδυνεύει άμεσα η χερσαία και η θαλάσσια πανίδα πολλών περιοχών.
- Υποβαθμίζεται αισθητικά το τοπίο.
- Υφίσταται αρνητικές επιδράσεις ο τουρισμός.
- Κίνδυνοι εκρήξεων.
- Πρόκληση πυρκαγιών (συχνά μέσα ή κοντά σε δασικές εκτάσεις) σε ποσοστό 10% περίπου.
- Οι χωματερές καταλαμβάνουν μεγάλων εκτάσεων πολύτιμο χώρο που είναι αναγκαίος για τις κοινότητες.

2.4 Τελική διάθεση απορριμμάτων στην Ελλάδα

Ο τρόπος διάθεσης των απορριμμάτων σήμερα στην Ελλάδα, προκαλεί σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον ενώ μπορεί να αποτελέσει και κίνδυνο για τη δημόσια υγεία. Η κύρια πρακτική διάθεσης που εφαρμοζόταν μέχρι πρόσφατα, και σε ένα βαθμό εξακολουθεί να εφαρμόζεται είναι η εξής: Σε χιλιάδες χωριά και πόλεις γίνεται ανεξέλεγκτη ή ημιελεγχόμενη απόρριψη απορριμμάτων σε ανοικτούς χώρους, χαράδρες και ρέματα, με βασικό, αν όχι μοναδικό, κριτήριο την πραγματοποίηση αυτής της απόρριψης μακριά από κατοικημένες περιοχές. Το φαινόμενο της βόσκησης ζώων σε τέτοιους χώρους είναι δυστυχώς πολύ συνηθισμένο.

Επίσης υπάρχουν ακόμη εκατοντάδες εγκεκριμένοι χώροι οι οποίοι στο μεγαλύτερο ποσοστό τους δεν πληρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας.

Το πρόβλημα με τη διάθεση των απορριμμάτων δεν αφορά μόνο τις παράνομες - ανεξέλεγκτες χωματερές, αλλά ακόμα και τους οργανωμένους ΧΥΤΑ, αφού σε μεγάλο ποσοστό οι ΧΥΤΑ λειτουργούν ανεπαρκώς, κυρίως λόγω ελλιπούς τεχνικής κατάρτισης του προσωπικού, αλλά και σκόπιμης παραβίασης των κανόνων λειτουργίας τους. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σημαντική στροφή στη νομοθεσία, τις κατευθύνσεις και την πρακτική διαχείρισης των απορριμμάτων. Η ορθολογική διαχείριση των αποβλήτων έχει αναδειχθεί σε μία από τις βασικές προτεραιότητες της εθνικής περιβαλλοντικής πολιτικής, η οποία έχει υιοθετήσει τις βασικές αρχές της αειφόρου διαχείρισης: μείωση, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και ασφαλής διάθεση.

Έχει ξεκινήσει λοιπόν μια μεγάλη προσπάθεια κλεισίματος και αποκατάστασης των παλαιών χωματερών και δημιουργίας νέων ΧΥΤΑ, οι οποίοι θα πληρούν τις πιο σύγχρονες προδιαγραφές. Για αυτό το λόγο κρίνεται σημαντική η περιγραφή της υγειονομικής ταφής των απορριμμάτων αλλά και των ΧΥΤΑ.

3. Η ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΤΑΦΗ ΤΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

3.1 Γενικά στοιχεία

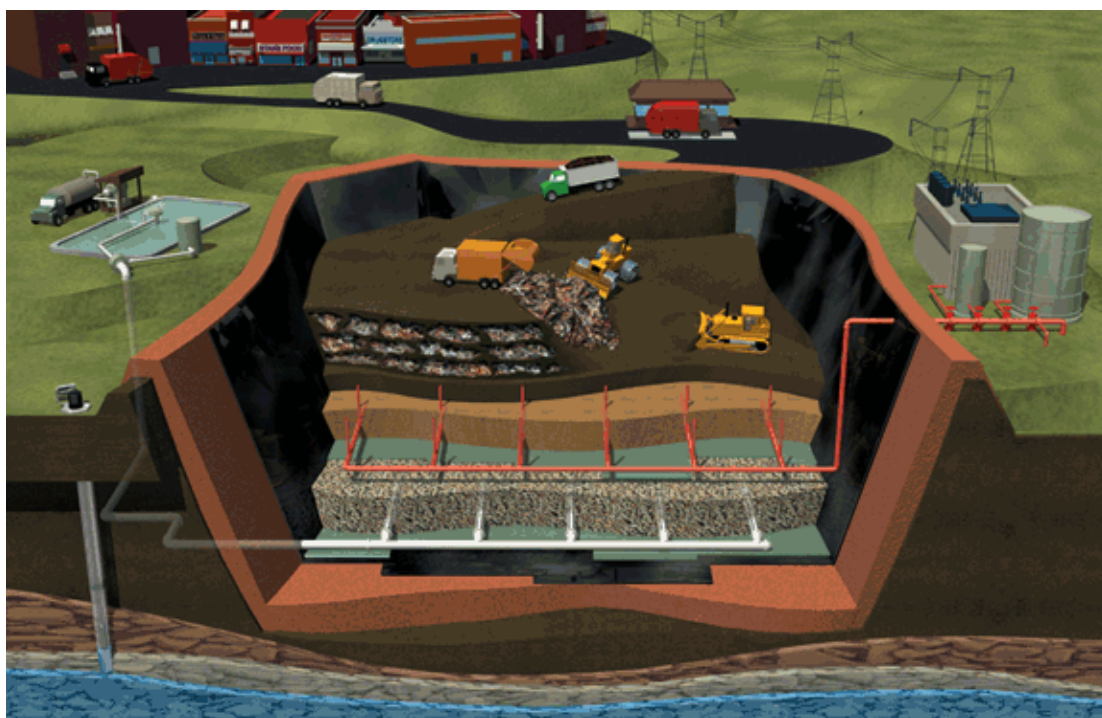
Η Υγειονομική Ταφή των απορριμμάτων, ή ελεγχόμενη διάθεση ή πλήρωση του εδάφους (sanitary landfilling ή landfilling) αποτελεί παλαιά μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για λόγους υγιεινής και προστασίας του περιβάλλοντος. Είναι ακόμη επίκαιρος ο ορισμός του Αμερικάνικου Συλλόγου Πολιτικών Μηχανικών του 1959, σύμφωνα με τον οποίο: " Η Υγειονομική Ταφή είναι η μέθοδος της διάθεσης των απορριμμάτων στο έδαφος, χωρίς να δημιουργείται ενόχληση ή κίνδυνος στη δημόσια υγεία και ασφάλεια, με τη χρησιμοποίηση των αρχών της μηχανικής για τη συγκέντρωση των απορριμμάτων στη μικρότερη δυνατή έκταση, τη μείωση στο μικρότερο δυνατό όγκο και την κάλυψη τους με ένα στρώμα εδάφους στο τέλος κάθε ημέρας ή σε όσο συχνά διαστήματα κι αν είναι απαραίτητο" [3].

3.2 Δομή ενός συμβατικού ΧΥΤΑ

Η δομή ενός συμβατικού ΧΥΤΑ αποτελείται συνήθως από μια εσκαμμένη έκταση η οποία έχει στεγανοποιηθεί με μεμβράνες και στρώματα αργίλου, για την αποφυγή της διαρροής των στραγγισμάτων στα περιβάλλοντα γεωλογικά υλικά και στον υδροφορέα. Ακόμα περιλαμβάνει ένα συμβατικό σύστημα συλλογής των στραγγισμάτων, το οποίο συλλέγει τα στραγγίσματα τα οποία έχουν φτάσει στον πυθμένα του ΧΥΤΑ, και ένα σύστημα συλλογής του βιοαερίου που παράγεται από τις διεργασίες που πραγματοποιούνται στη μάζα των απορριμμάτων (Εικόνα 3-1). Τυπικά, τα απορρίμματα εναποτίθενται στον ΧΥΤΑ σε καθημερινή βάση [4].

Ο όρος κύτταρα (cells) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον όγκο του υλικού που τοποθετείται σε μια χωματερή κατά τη διάρκεια μιας περιόδου λειτουργίας που τις περισσότερες φορές είναι μια μέρα. Ένα κύτταρο περιέχει όλη την ποσότητα των απορριμμάτων που απορρίφθηκε συν το υλικό που χρησιμοποιείται ως το καθημερινό κάλυμμα του κάθε κυττάρου. Το κάλυμμα αυτό έχει πάχος 10 με 30 εκατοστά και αποτελείται συνήθως από χώμα ή άλλο αντίστοιχο υλικό. Το κάλυμμα αυτό τοποθετείται για να αποτρέψει τη μεταφορά-

των απορριμμάτων από τον αέρα αλλά και τον έλεγχο της ανάπτυξη μυγών και ποντικών στις χωματερές [1].



Εικόνα 3-1: Η δομή ενός συμβατικού ΧΥΤΑ

Τα επίπεδα απόθεσης ή ταμπάνια (lifts) είναι ένα πλήρες στρώμα από κύτταρα πάνω από την ενεργή επιφάνεια της χωματελής. Συνήθως οι χωματερές αποτελούνται από μια σειρά από επίπεδα διάθεσης.

Τα επίπεδα ή τα κελιά που περιέχουν τα αστικά απορρίμματα καλύπτονται περιοδικά με ένα στρώμα χώματος, συνήθως καθημερινά. Όταν ο χώρος έχει δεχθεί μια προκαθορισμένη ποσότητα απορριμμάτων, καλύπτεται με ένα κατάλληλο υλικό κάλυψης, όπως χώμα, το οποίο όμως τυπικά έχει υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο. Εναλλακτικά, το κάλυμμα μπορεί να αποτελείται και από μεμβράνη παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται για τη στεγάνωση του πυθμένα.

3.3 Μικροβιακή δραστηριότητα και φάσεις αποδόμησης του οργανικού κλάσματος

3.3.1 Γενικά στοιχεία

Κατά την αποσύνθεση των οργανικών υλικών στο χώρο ταφής, απουσία οξυγόνου, εκλύονται διάφορα αέρια που χαρακτηρίζονται συνολικά ως **βιοαέριο**. Το βιοαέριο αποτελείται κυρίως από CO₂ και CH₄ σε ίσες περίπου αναλογίες, ενώ σε μικρές ποσότητες περιλαμβάνει NH₃, CO, H₂, H₂S, N₂ και O₂ (Πίνακας 3-1).

Συστατικά	Περιεκτικότητα [% κ.ό.]
CH ₄	45-60
CO ₂	40-60
N ₂	2-5
O ₂	0,1-1
H ₂	0-0,2
NH ₃	0,1-1
CO	0-0,2
H ₂ S	0-0,1

Πίνακας 3-1: Ενδεικτική σύσταση βιοαερίου [3]

Συγκεκριμένα η παραγωγή του βιοαερίου πραγματοποιείται σε 5 φάσεις. Τη φάση I της αερόβιας αποδόμησης, τη φάση II της όξινης ζύμωσης (αναερόβια αποδόμηση), τη φάση III της παραγωγής CH₄ (ασταθής), τη φάση IV της παραγωγής CH₄ (σταθερή) και την φάση V της μειωμένης παραγωγής του βιοαερίου [1]. Η συνολική διάρκεια των φάσεων αποδόμησης κυμαίνεται από 10 έως 90 χρόνια. Οι φάσεις αυτές είναι οι ίδιες είτε μελετάμε ένα Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), είτε ένα Χώρο Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΔΑ).

3.3.2 Φάσεις αποδόμησης οργανικού κλάσματος

Στάδιο I - φάση προσαρμογής : Στη διάρκεια του σταδίου αυτού το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των MSW θα υποστεί την επίδραση των μικροοργανισμών που ουσιαστικά έχει ξεκινήσει πριν καν την απόθεση των απορριμμάτων.

ριμμάτων στην χωματερή και συνεχίζεται αμέσως μετά. Η αποδόμηση αυτή λαμβάνει χώρα υπό αερόβιες συνθήκες μια και κάποια ποσότητα αέρα έχει εγκλωβιστεί μέσα στη χωματερή. Αποτέλεσμα της αερόβια αυτής αποδόμησης, που είναι εξώθερμη, είναι η αύξηση της θερμοκρασίας που μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει τους 70 °C. Το CO₂ που παράγεται απορροφάται από το νερό προκαλώντας το σχηματισμό οξέων που δίδουν στα διασταλλάζοντα υγρά μια αυξημένη οξύτητα.

Οι μικροοργανισμοί που θα δράσουν κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής συνήθως προέρχονται από το υλικό (χώμα) που χρησιμοποιείται για να καλύψει το κάθε κύτταρο ή από την ιλύ βιολογικών καθαρισμών που πολύ συχνά εναποτίθεται στις χωματερές. Η διάρκεια του σταδίου αυτού όπως και κάθε άλλου σταδίου είναι σχετική έχει να κάνει με αρκετούς παράγοντες όπως τη σύνθεση των απορριμμάτων, την ποιότητα της συμπίεσης αυτών και φυσικά την ποσότητα του εγκλωβισμένου O₂. Γενικά πάντως η διάρκεια του σταδίου αυτού είναι μερικές μέρες ή το πολύ εβδομάδες.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα αέρια της χωματερής έχουν την εξής σύνθεση κατά όγκο:

- **N₂**: 80 % αρχικά και φθαίνει στο 75 %
- **O₂**: 20 % αρχικά και φθάνει σε τιμές λίγο πάνω από το 15 %
- **CO₂**: ξεκινάει από επίπεδα ατμοσφαιρικά και φθάνει μέχρι και το 10 %.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα διασταλλάζοντα υγρά της χωματερής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH ξεκινάει από ουδέτερες τιμές και πέφτει ελαφριά
- Αύξηση της τιμής του COD από μηδενικές τιμές σε ελάχιστα πιο ψηλές
- Ελαφριά αύξηση της ποσότητας των πτητικών λιπαρών οξέων

Στάδιο II - ενδιάμεση φάση: Κατά τη διάρκεια του σταδίου αυτού (1 έως 6 μήνες) η ποσότητα του O₂ μειώνεται δραματικά και αναερόβιες συνθήκες αρχίζουν να επικρατούν στο εσωτερικό της χωματερής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει δραματικά ο χαρακτήρας των μικροοργανισμών που επικρατούν στη φάση αυτή και οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί να γίνονται

κυρίαρχοι. Υδρογονάνθρακες, πρωτεΐνες και λίπη υδρολύονται σε σάκχαρα που στη συνέχεια αποδομούνται ακόμα περισσότερο σε CO_2 , H_2 , NH_3 και οργανικά οξέα. Για αυτό και η φάση αυτή λέγεται φάση υδρόλυσης και είναι η πρώτη από τις τρεις φάσεις που συνθέτουν τη συνολική διαδικασία σύνθεσης του CH_4 . Η αυξημένη και πάλι παρουσία του διοξειδίου και των οργανικών οξέων, προκαλεί ακόμα μεγαλύτερη σύνθεση οξέων που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του pH. Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής η θερμοκρασία πέφτει μεταξύ των 30 με 50 °C.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα αέρια της χλωματερής έχουν την εξής σύνθεση κατά όγκο:

- **N₂**: κατακόρυφη πτώση της συγκέντρωσης σε επίπεδα χαμηλότερα του 20 %
- **O₂**: φθίνει ακόμα περισσότερο μέχρι ουσιαστικά να εκλείπει
- **CO₂**: από το 10 % φτάνει στο τέλος της φάσης αυτής σε τιμές πάνω από 50 %
- **H₂**: στο τέλος της φάσης αυτή φτάνει λίγο κάτω από το 20 %

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα διασταλλάζοντα υγρά της χλωματερής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH πέφτει δραματικά σε τιμές κοντά στο πέντε
- Περαιτέρω αύξηση της τιμής του COD
- Περαιτέρω αύξηση της ποσότητας των πτητικών λιπαρών οξέων
- Εμφάνιση κάποιων βαρέων μετάλλων

Στάδιο III - όξινη φάση: Η μικροβιακή διαδικασία που ξεκίνησε στην προηγούμενη φάση επιταχύνεται με την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων οργανικών οξέων και μικρότερων ποσοτήτων H_2 . Η παραγωγή των οξέων αυτών που είναι κυρίως CH_3COOH και παράγωγα αυτού, φουλβικού οξέως και άλλων πιο σύνθετων οργανικών οξέων καθώς και η υψηλή συγκέντρωση CO_2 προκαλεί ακόμα μεγαλύτερη πτώση στο pH με αποτέλεσμα την εκ-

χύλιση από τα απορρίμματα βαρέων μετάλλων και μεγάλης ποσότητας θρεπτικών στοιχείων. Οι μικροοργανισμοί που επικρατούν σε αυτή τη φάση χαρακτηρίζονται ως μη - μεθανογενείς μικροοργανισμοί. Καθώς όμως η ποσότητα του H_2 που παράγεται μειώνεται στη διάρκεια του σταδίου αυτού ανοίγει ο δρόμος για την κυριαρχία και ανάπτυξη μεθανογενών μικροοργανισμών. Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής (3 μήνες έως 3 χρόνια) τα αέρια της χλωματερής έχουν την εξής σύνθεση κατά όγκο:

- **N_2** : πτώση της συγκέντρωσης μέχρι μηδενισμού
- **CO_2** : το κυρίαρχο αέριο αυτής της φάσης που φτάνει και σε τιμές πάνω από το 90 %
- **H_2** : στη φάση αυτή φτάνει τη μέγιστη τιμή του (20 %) αλλά κατά τη διάρκεια της ίδιας φάσης εξαφανίζεται ανοίγοντας το δρόμο σε μεθανογενείς μικροοργανισμούς
- **CH_4** : για πρώτη φορά αρχίζει να εμφανίζεται σε αυτή τη φάση.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα διασταλλάζοντα υγρά της χλωματερής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH πέφτει σε τιμές κοντά στο τέσσερα
- Περαιτέρω αύξηση της τιμής του COD που στη φάση αυτή φτάνει τη μέγιστη τιμή του
- Περαιτέρω αύξηση της ποσότητας των πτητικών λιπαρών οξέων που και αυτά παρουσιάζουν μέγιστη τιμή στη φάση αυτή
- Αύξηση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων και κάποιων άλλων θρεπτικών στοιχείων

Στάδιο IV - φάση μεθανογένεσης : Η φάση αυτή αποτελεί την κύρια χρονικά φάση της διαδικασίας αποδόμησης του οργανικού κλάσματος των χλωματερών αν και μερικές φορές ξεκινάει μέχρι και έξη μήνες μετά την τοποθέτηση των απορριμμάτων και φτάνει σε διάρκεια αρκετά χρόνια. Στη διάρκεια της φάσης αυτής (5 έως 50 χρόνια) τα οργανικά οξέα που είχαν σχηματισθεί και το H_2 θα μετασχηματισθούν σε CH_4 και CO_2 .

Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι αποκλειστικά αναερόβιοι και καλούνται μεθανογενείς μικροοργανισμοί. Σημαντικές ποσότητες CH_4 παράγονται

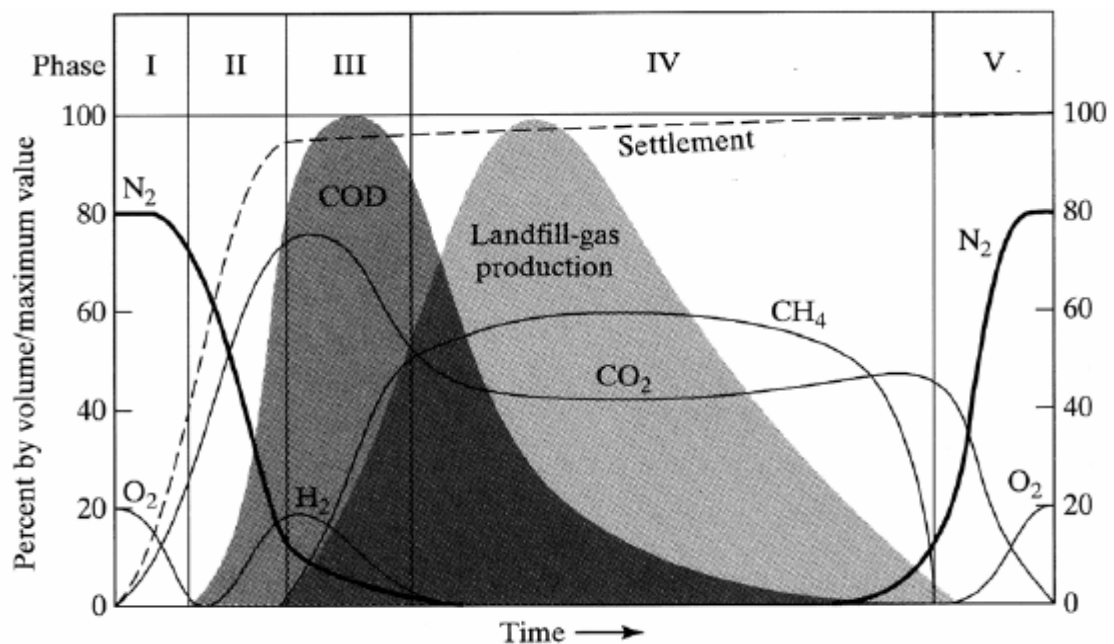
3 με 12 μήνες μετά την έναρξη της φάσης αλλά η παραγωγή του αερίου αυτού μπορεί να φτάσει και 30 χρόνια μετά το κλείσιμο της χωματερής. Οι μικροοργανισμοί αυτοί είναι είτε μεσοφιλικόι και η βέλτιστη θερμοκρασία για αυτούς είναι 30 με 35 °C ή θερμοφιλικόι με βέλτιστη θερμοκρασία ανάπτυξης 45 με 65 °C. Η διάσπαση των οξέων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του pH των διασταλλαζόντων υγρών.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα αέρια της χωματερής έχουν την εξής σύνθεση κατά όγκο:

- **CO₂**: μειώνεται σε τιμές γύρω στο 40 % και παραμένει σταθερό σε αυτά τα επίπεδα μέχρι και το τέλος της φάσης αυτής
- **CH₄**: αποτελεί το κυρίαρχο αέριο της φάσης αυτής μια και αποτελεί το 60 %

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα διασταλλάζοντα υγρά της χωματερής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH αυξάνεται ξανά σε ουδέτερες τιμές
- Μείωση της τιμής του COD
- Μείωση της ποσότητας των πτητικών λιπαρών οξέων
- Μείωση της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων και άλλων θρεπτικών στοιχείων



Εικόνα 3-2: Τυπική παραγωγή βιοαερίου σε ένα ΧΥΤΑ

Στάδιο V - φάση ωρίμανσης: Όταν ολοκληρωθεί η αποδόμηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων και η μετατροπή όλων των προϊόντων της σε CH_4 τότε ουσιαστικά η φάση της μεθανογένεσης έχει ολοκληρωθεί και ξεκινάει το τελευταίο στάδιο στη ζωή μιας χωματερής, αυτό της ωρίμανσης ή οξείδωσης όπως αλλιώς λέγεται. Το στάδιο αυτό διαρκεί από 1 έως και 40 χρόνια. Παρόλα αυτά καθώς η υγρασία που υπάρχει στη χωματερή συνεχίζει να κινείται προς τα κάτω, αποκαλύπτονται νέες ποσότητες οργανικών απορριμμάτων συνεχίζοντας την παραγωγή CH_4 και CO_2 αλλά σε σημαντικά χαμηλότερες ποσότητες από πριν. Το O_2 και το N_2 αρχίζουν να επανεμφανίζονται στα αέρια της χωματερής καθώς νέοι αερόβιοι μικροοργανισμοί αντικαθιστούν τους αναερόβιους που κυριαρχούσαν στο προηγούμενο στάδιο.

Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα αέρια της χωματερής έχουν την εξής σύνθεση κατά όγκο:

- **CO_2 :** μειώνεται δραματικά φτάνοντας σε τιμές γύρω στις ατμοσφαιρικές.
- **CH_4 :** παράλληλη πορεία με αυτή του διοξειδίου,
- **N_2 :** αύξηση της συγκέντρωσης του σε επίπεδα ατμοσφαιρικά (~80 %)
- **O_2 :** αύξηση της συγκέντρωσης του σε επίπεδα ατμοσφαιρικά (~20 %)

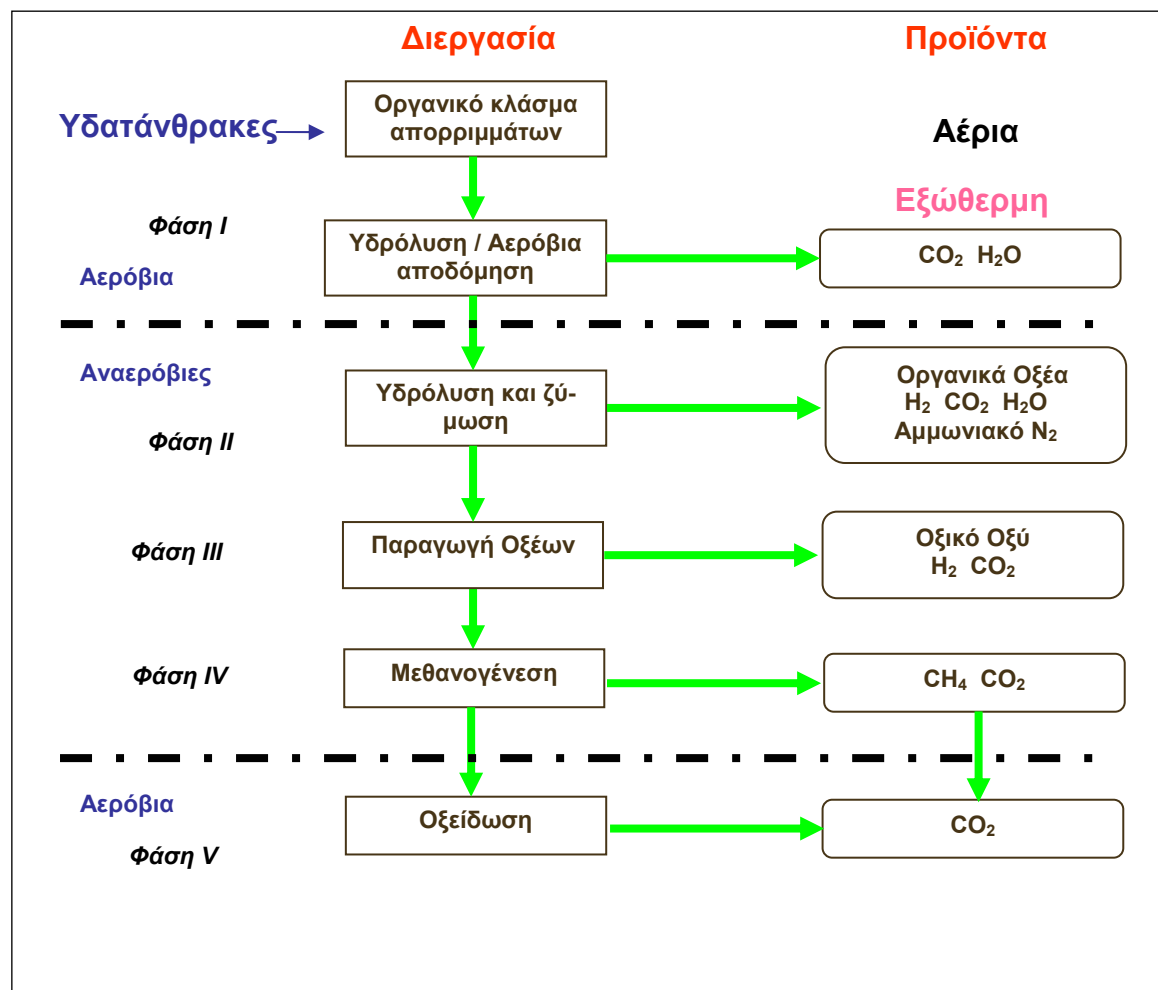
Κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής τα διασταλλάζοντα υγρά της χωματερής έχουν τα παρακάτω χημικά χαρακτηριστικά:

- Το pH παραμένει σε ουδέτερες τιμές
- Χουμικά και φουλβικά οξέα παρουσιάζονται σε σημαντικές ποσότητες. Η διαχείριση των μορίων αυτών βιολογικά είναι αρκετά δύσκολη.

Γενικά, η παραγωγή του βιοαερίου σε ένα ΧΥΤΑ μπορεί να χρειαστεί από 80 έως 500 ημέρες, μέχρι να σταθεροποιηθεί, και στη συνέχεια ακολουθεί

μια περίοδος διάρκειας 10 έως 20 χρόνων κατά την οποία η παραγωγή του βιοαερίου σταδιακά μειώνεται καθώς τα πιο αποδομήσιμα υλικά έχουν αποδομηθεί. Μετά από αυτή την περίοδο οι εκπομπές του βιοαερίου θα μειώνονται για 100 χρόνια μέχρι μηδενισθούν. Τότε το 99 % του CH₄ που έχει παραχθεί, έχει απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα.

Στην Εικόνα 3-3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι φάσεις αποδόμησης του οργανικού κλάσματος καθώς και τα προϊόντα της κάθε φάσης.



Εικόνα 3- 3 : Οι φάσεις αποδόμησης του οργανικού κλάσματος και τα διάφορα προϊόντα τους

Οι βέλτιστες συνθήκες μεθανογένεσης είναι:

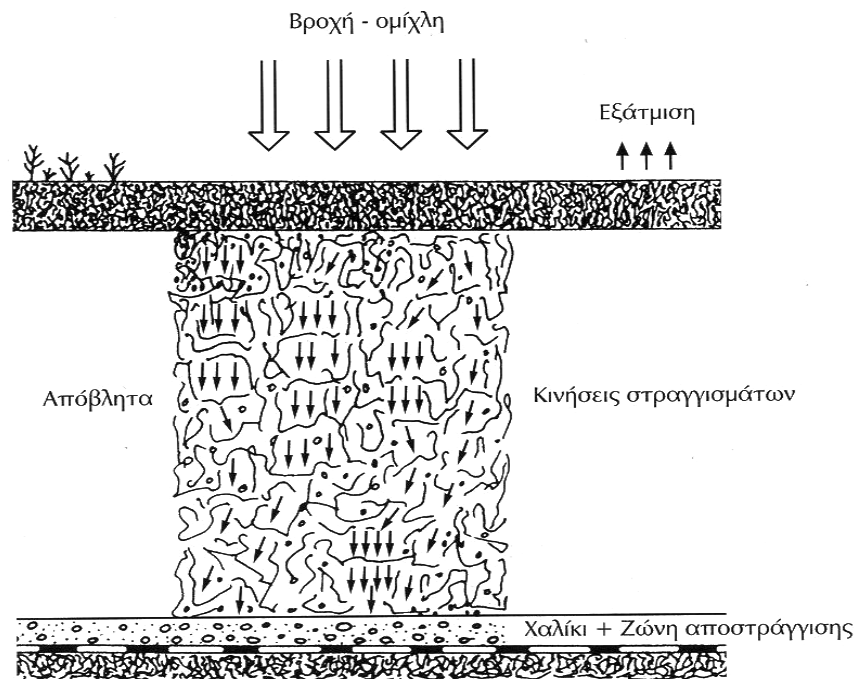
- Σχετικά ουδέτερο pH, (6.7 – 7.2)
- Απουσία οξυγόνου και τοξικών ουσιών
- Εσωτερική θερμοκρασία από 30 – 55 °C
- Ύπαρξη αρκετής υγρασίας

- Ύπαρξη θρεπτικών
- Η αλκαλικότητα ως ανθρακικό ασβέστιο να είναι μεγαλύτερη από 2000 mg/l
- Τα πτητικά οξέα ως οξικό οξύ να είναι λιγότερα από 3000 mg/l.

3.3.3 Παραγωγή στραγγισμάτων από την αποδόμηση των απορριμμάτων

3.3.3.1 Γενικά στοιχεία

Τα διασταλλάζοντα (ή στραγγίσματα ή διηθήματα) είναι υγρά που σχηματίζονται αφενός από την εφαρμογή πίεσης στη διάσθρωση των απορριμμάτων, αφετέρου από τη διέλευση νερού διαμέσου αυτών, το οποίο κατά την πορεία του ρυπαίνεται από ποικίλες οργανικές και ανόργανες ενώσεις (κατείσδυση). Η παραγωγή και η διαχείριση των διασταλλαζόντων υγρών, αναγνωρίζεται σήμερα ως ένα μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα που σχετίζεται με τους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, επειδή προκαλούν σημαντικά προβλήματα ρύπανσης, όταν έρθουν σε επαφή με το έδαφος, τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα, αν δεν έχουν παρθεί τα κατάλληλα μέτρα.



Εικόνα 3- 4: Δημιουργία και κίνηση των στραγγισμάτων σε ένα ΧΥΤΑ [5]

Αρχικά διαλύονται στο νερό που κατεισδύει στα απορρίμματα τα ευδιάλυτα άλατα και οι ευδιάλυτες οργανικές ενώσεις. Οι οργανικές ενώσεις προσδίδουν ένα σκούρο καφέ χρώμα στα διασταλλάζοντα και παρότι έχουν σχετικά μικρή διαλυτότητα, με τη δράση των ενζύμων βιοδιασπώνται σε πιο ευδιάλυτες. Πολλές αντιδράσεις μπορούν να προχωρήσουν περαιτέρω δίδοντας αέρια προϊόντα (CH_4 , CO_2). Ένας ΧΥΤΑ λειτουργεί σαν αναερόβιος αντιδραστήρας στον οποίο μπορεί να δημιουργηθεί αναγωγικό περιβάλλον.

Οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην παραγωγή διασταλλαζόντων είναι οι βροχοπτώσεις, η ύπαρξη υπογείων νερών, η πιθανή συνδιάθεση ιλύος, η ενδεχόμενη ανακύκλωση διασταλλαζόντων, ο συντελεστής κατείσδυσης της τελικής χωματοκάλυψης, το περιεχόμενο των απορριμμάτων σε υγρασία, το είδος της τελικής χωματοκάλυψης, η ενδεχόμενη τοποθέτηση στεγανωτικού στρώματος, η κλίση του εδάφους και άλλα τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Επειδή τα διασταλλάζοντα είναι ιδιαίτερα επιβαρημένα σε οργανικό υλικό, η είσοδος τους σε έναν φυσικό αποδέκτη μπορεί να θέσει σε κίνδυνο όλη την πανίδα του, εξαιτίας της κατανάλωσης O_2 από τα βακτήρια. Ως εκ τούτου η μέτρηση της απαίτησης σε O_2 (BOD/COD) είναι απαραίτητη, γιατί μπορεί να δώσει το δυναμικό της ρύπανσης. Εκτός όμως από το υψηλό οργανικό φορτίο, περιέχουν και τοξικές ουσίες όπως μέταλλα

Ένας μεγάλος περιοριστικός παράγοντας για την επιτυχημένη επεξεργασία των στραγγισμάτων είναι η δυσκολία στην αναγνώριση και την ποσοτικοποίηση των τυπικών τους χαρακτηριστικών. Έτσι αν μια μονάδα επεξεργασίας στραγγισμάτων είναι σχεδιασμένη να χειρίζεται στραγγίσματα με μια μέση ποιότητα, θα υπάρξουν στιγμές που δε θα μπορεί να ανταποκριθεί στις ανάγκες επεξεργασίας λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων ρύπων στα στραγγίσματα σε ορισμένες περιόδους. Γι αυτό το λόγο οι μονάδες πρέπει να σχεδιάζονται με βάση τη μέγιστη συγκέντρωση των ρυπαντών (worst-case scenario).

3.3.3.2 Σύσταση διασταλλαζόντων υγρών

Τα κυριότερα ρυπαντικά συστατικά των διασταλλαζόντων είναι [3]:

- Ανόργανα κατιόντα όπως ασβέστιο (Ca^{++}), μαγνήσιο (Mg^{++}), νάτριο (Na^+), κάλιο (K^+), αμμώνιο (NH_4^+), σίδηρος (Fe^{++}), μαγγάνιο (Mn^{++})

- Ανόργανα ανιόντα όπως χλωριόντα (Cl^-), θειικά (SO_4^{2-}) και όξινα ανθρακικά (HCO_3^-).
- Βαρέα μέταλλα όπως: κάδμιο (Cd), ψευδάργυρος (Zn), μόλυβδος (Pb), χαλκός (Cu), νικέλιο (Ni) και κοβάλτιο (Co).
- Οργανικά υλικά εκφρασμένα ως BOD και COD.
- Ειδικά οργανικά υλικά (συνήθως περιεκτικότητας μικρότερης της 0,1 mg/l) όπως αρωματικοί υδρογονάνθρακες, φαινόλες και χλωριωμένες αλειφατικές ενώσεις.
- Διάφορα άλλα συστατικά όπως βορικά, θειούχα, αρσενικά και ελαιώδη (δευτερεύουσα σημασία).
- Υδράργυρος και βάριο (δευτερεύουσα σημασία).

3.3.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση των διασταλλαζόντων

Για να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις των διασταλλαζόντων στο περιβάλλον αλλά και να προταθούν τρόποι επεξεργασίας τους είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί και να μελετηθεί η ποιοτική σύστασή τους. Παρακάτω αναφέρονται οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση των διασταλλαζόντων:

- **Ηλικία χώρου διάθεσης.** Αρχικά η αποικοδόμηση των οργανικών ουσιών γίνεται κάτω από αερόβιες συνθήκες (οξυγενής φάση). Οι συνθήκες όμως σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα μεταβάλλονται σε αναερόβιες (μεθανογενής φάση) εξαιτίας της εξάντλησης του οξυγόνου.

Το κύριο μέρος των οργανικών ουσιών αποικοδομείται κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Τα διασταλλαζόντα που παράγονται από ένα νεαρό χώρο διάθεσης (2 ετών) χαρακτηρίζονται από μεγάλες συγκεντρώσεις οργανικών οξέων, αμμωνίας και συνολικών διαλυτών στερεών. Όσο η ηλικία του χώρου διάθεσης μεγαλώνει, το μεγαλύτερο μέρος των οργανικών ουσιών αποικοδομείται και επομένως το οργανικό μέρος των οργανικών ουσιών ελαττώνεται. Εκτός όμως από τα οργανικά συστατικά με το χρόνο μειώνονται και οι συγκεντρώσεις των ανόργανων ουσιών.

Πιο σπουδαίος παράγοντας για την ποιοτική μελέτη των διασταλλαζόντων είναι η μεταβολή της συγκέντρωσης των οργανικών ουσιών (εκφρασμένες ως BOD και ως COD) κατά το πέρασμα από την οξυγενή φάση στη μεθανογενή.

Η οξυγενής φάση χαρακτηρίζεται από υψηλή συγκέντρωση οργανικών ουσιών, με τιμή λόγου BOD_5/COD : 0,4 και χαμηλή τιμή pH, παρουσία μεθανίου και παραγωγή αερίου. Μετά το πέρασμα στη μεθανογενή φάση η συγκέντρωση του μεθανίου και η τιμή του pH είναι υψηλές αλλά το BOD_5 και η τιμή του λόγου το BOD_5/COD ελαττώνεται κάτω από την τιμή 0,1 με αποτέλεσμα ασήμαντη βιοαποικοδόμηση του οργανικού φορτίου. Τα διασταλλάζοντα τότε θεωρούνται σταθεροποιημένα.

- **Ύψος χώρου διάθεσης.** Αύξηση του ύψους του χώρου διάθεσης ή αύξηση της πυκνότητας των απορριμμάτων έχει σαν αποτέλεσμα την καθυστέρηση της βιοαποικοδόμησης γιατί παρεμποδίζεται η διείσδυση του νερού στα απορρίμματα. Τα διασταλλάζοντα έχουν μειωμένο ρυπαντικό φορτίο αλλά παράγονται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αύξηση όμως του ποσοστού υγρασίας των απορριμμάτων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρυπαντικού φορτίου. Με την αύξηση των βροχοπτώσεων επέρχεται μείωση του ρυπαντικού φορτίου λόγω της αραίωσης.
- **Θερμοκρασία.** Αύξηση της θερμοκρασίας επιταχύνει τη βιοαποικοδόμηση και επομένως την αύξηση του ρυπαντικού φορτίου (μεγαλύτερη τιμή BOD).
- **Εκπομπή αερίων από το χώρο διάθεσης.** Τα οργανικά οξέα προέρχονται από την αποικοδόμηση άλλων πιο σύνθετων οξέων. Τα οξέα αυτά εμπλέκονται σε παραπέρα αντιδράσεις παράγοντας αέρια ή αποπλύνονται από το χώρο διάθεσης αυξάνοντας έτσι το BOD_5 των διασταλλαζόντων. Επομένως όσο αυξάνει η εκπομπή αερίων από το χώρο διάθεσης τόσο μειώνεται το οργανικό φορτίο των διασταλλαζόντων.
- **Προεπεξεργασία απορριμμάτων.** Τα διασταλλάζοντα που παράγονται από τεμαχισμένα απορρίμματα έχουν υψηλότερες τιμές BOD_5 και COD από τα διασταλλάζοντα που προέρχονται από τα ακατέργαστα απορρίμματα,

επειδή αυξάνεται η επιφάνεια των απορριμμάτων με αποτέλεσμα τη γρήγορη βιοαποικοδόμηση.

- **Είδος και ηλικία απορριμμάτων.**
- **Κλιματολογικές συνθήκες.**
- **Υδρογεωλογία εδάφους.**
- **Τρόπο διάθεσης των απορριμμάτων.**

Όσον αφορά τη διαχείριση διασταλλαζόντων, πρέπει να δίνεται έμφαση στις ενέργειες που γίνονται για τη μείωση της παραγωγής και για τη συλλογή τους, όπως επίσης και στις ενέργειες που γίνονται για τον καθαρισμό τους και την τελική τους διάθεση. Για τη μείωση της παραγωγής πρέπει να ανοίγονται περιφερειακά κανάλια απαγωγής των ομβρίων, ώστε να ελαχιστοποιείται η παροχή νερού στον όγκο των απορριμμάτων, καθώς και η καλή καθημερινή χωματοκάλυψη με το ενδεικνυόμενο υλικό. Για τη συλλογή τους χρησιμοποιούνται σωλήνες αποστράγγισης, οι οποίοι τοποθετούνται είτε σε ακτινική διάταξη είτε σε διάταξη σπονδυλικής στήλης. Οι σωλήνες αποστράγγισης οδηγούνται σε κεντρικά φρεάτια και από εκεί τα συλλεχθέντα υγρά οδηγούνται σε μονάδα καθαρισμού ή ανακυκλώνονται πίσω στον όγκο των απορριμμάτων.

Έρευνες μετά από την εκταφή απορριμμάτων από παλιούς ΧΥΤΑ, ιδιαίτερα σε αυτούς που είχαν κάλυμμα πολύ μικρής διαπερατότητας, έδειξαν πως ένα μεγάλο κλάσμα της μάζας των απορριμμάτων παρέμεινε ανέπαφο, με λίγα δείγματα βιοαποικοδόμησης, ακόμα και μετά από την παραμονή τους στον ΧΥΤΑ για πολλά χρόνια. Είναι φανερό ότι ο σκοπός της ελαχιστοποίησης της διήθησης νερού ή υγρασίας στη μάζα των απορριμμάτων, και συνεπώς η ξηρή ενταφίαση των απορριμμάτων, επιμηκύνει τη διεργασία της βιοαποδόμησης κατά πολλά χρόνια ή δεκαετίες. Αυτό οφείλεται στη μείωση των ρυθμών υδρόλυσης και συνολικής βιοαποικοδόμησης. Με τα σημερινά δεδομένα οι ΧΥΤΑ θα παράγουν στραγγίσματα και βιοαέριο ακόμα και τριάντα χρόνια μετά από το κλείσιμό τους, λόγω της χαμηλής αλλά σταθερής διήθησης βρόχινου νερού. Το γεγονός αυτό θα προκαλέσει μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην περιοχή, και αυξημένα κόστη συντήρησης και διαχείρισης του βιοαερίου και των στραγγισμάτων.

4. ΒΙΟΑΕΡΙΟ

4.1 Η παραγωγή του βιοαερίου

Το βιοαέριο σχηματίζεται με τρεις διεργασίες : Τη μικροβιακή αποδόμηση των απορριμμάτων, την εξάτμιση, και τις χημικές αντιδράσεις [6].

- **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.

4.1.1 Συνθήκες που επηρεάζουν την παραγωγή του βιοαερίου

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 ένα 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 πάνω από δέκα χρόνια. 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 CH_4 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 συμπιέζονται ή αναμοχλεύονται συχνά, υπάρχει περισσότερο διαθέσιμο οξυγόνο, με αποτέλεσμα την επιμή-

κυνση της ζωής των αερόβιων μικροβίων και την `παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και νερού για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

- **Υγρασία.** Η παρουσία υγρασίας (ακόρεστες συνθήκες) σε ένα 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 50 °F (10 °C). Ένας καλυμμένος ΧΥΤΑ συνήθως διατηρεί μια σταθερή θερμοκρασία, που μεγιστοποιεί την παραγωγή του βιοαερίου. Η μικροβιακή δραστηριότητα απελευθερώνει θερμότητα σταθεροποιώντας τη θερμοκρασία του ΧΥΤΑ ανάμεσα στους 77 – 113 °F (25 – 45 °C), αν και έχουν παρατηρηθεί και θερμοκρασίες των 158 °F (70 °C).Οι αυξημένες θερμοκρασίες αυξάνουν ακόμα τους ρυθμούς εξάτμισης και χημικών αντιδράσεων. Σαν γενικός κανόνας οι εκπομπές των NMOCs διπλασιάζονται με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 18 °F.

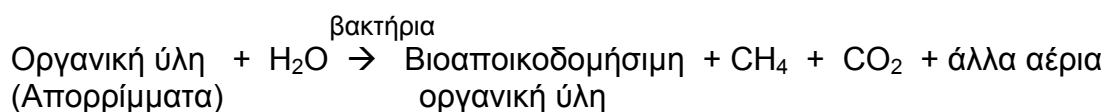
4.1.2 Μοντελοποίηση της παραγωγής του βιοαερίου

4.1.2.1 Γενικά στοιχεία

Ο σχηματισμός του βιοαερίου στους χώρους ταφής απορριμμάτων εξαρτάται από τον τύπο των απορριμμάτων, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και από την τεχνολογία του χώρου ταφής. Η σύσταση του βιοαερίου είναι αποτέλεσμα των διεργασιών αποδόμησης, της εξάτμισης των πτητικών ουσιών, των διαφόρων χημικών αντιδράσεων μεταξύ των απορριμμάτων και της ανταλλαγής αερίων ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και το χώρο διάθεσης ή υγειονομικής ταφής των απορριμμάτων. Η είσοδος οξυγόνου, για παράδειγμα, ενισχύει την αερόβια αποδόμηση σε ορισμένα τμήματα του χώρου, με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής CO₂, αλλά και την ενίσχυση της πτητικοποίησης ορισμένων ενώσεων λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών που επικρατούν κατά την αερόβια αποδόμηση [7].

Όταν στόχος είναι η πρόβλεψη της παραγωγής του βιοαερίου, λαμβάνεται υπόψη μόνο η παραγωγή του βιοαερίου που οφείλεται στην αναερόβια αποδόμηση του βιοαποικοδομήσιμου κλάσματος των απορριμμάτων. Η πιθανή παραγωγή του βιοαερίου μπορεί να υπολογιστεί από τη σύσταση του υποστρώματος. Έτσι χρησιμοποιούνται εμπειρικά δεδομένα ή πραγματοποιούνται δοκιμές αναερόβιας αποδόμησης των απορριμμάτων. Ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου αλλά και η ειδική παραγωγή βιοαερίου μεταβάλλονται σημαντικά από ΧΥΤΑ σε ΧΥΤΑ. Μια τυπική τιμή της ειδικής παραγωγής βιοαερίου είναι μέσα στο εύρος 200 – 300 m³ βιοαέριο ανά τόνο φρέσκων αστικών απορριμμάτων, και η παραγωγή του CH₄ κυμαίνεται από λιγότερο από 1 – 40 m³/ tn MSW / year.

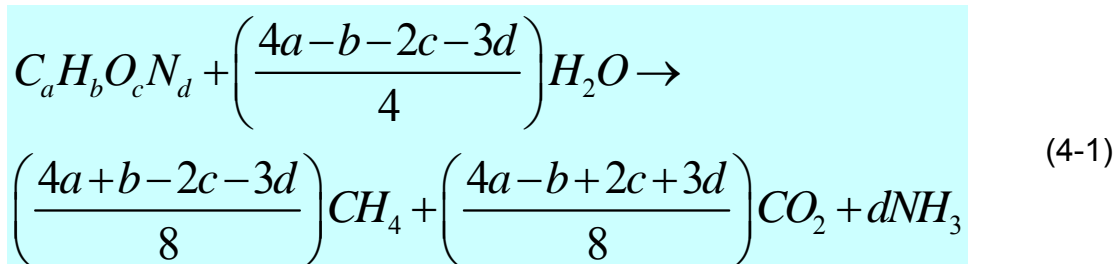
Η γενικευμένη χημική αντίδραση για την αναερόβια αποσύνθεση των στερεών απορριμμάτων μπορεί να γραφθεί ως εξής [8]:



Όπως φαίνεται, στην παραπάνω χημική αντίδραση απαιτείται η παρουσία νερού. ΧΥΤΑ που δεν περιέχουν αρκετή ποσότητα υγρασίας έχουν βρεθεί σε μια κατάσταση “μουμιοποίησης”, και ακόμα και εφημερίδες που έχουν ταφεί πριν από δεκαετίες να μπορούν ακόμα να διαβασθούν. Ακόμα, αν και η συνολική ποσότητα του βιοαερίου που θα παραχθεί από τα απορρίμματα εξάγεται στοιχειομετρικά από την παραπάνω αντίδραση, οι τοπικές υδρολογικές συνθήκες επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό και τη χρονική περίοδο της παραγωγής του βιοαερίου.

4.1.2.2 Υπολογισμός του όγκου του παραγόμενου βιοαερίου

Ο όγκος των αερίων που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της αναερόβιας αποσύνθεσης μπορεί να υπολογιστεί με αρκετούς τρόπους. Για παράδειγμα, αν τα οργανικά συστατικά που περιλαμβάνονται στα αστικά απορρίμματα περιγράφονται από τον τύπο $C_aH_bO_cN_d$ (με εξαίρεση τα πλαστικά), τότε ο συνολικός όγκος του βιοαερίου μπορεί να υπολογισθεί με τη χρήση της εξίσωσης (4-1), με την παραδοχή ότι όλο το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα μετατρέπεται σε CH_4 και CO_2 . Τυπικές τιμές παραγωγής βιοαερίου είναι 100 - 200 m^3 / tn MSW.



Γενικά, τα οργανικά υλικά που υπάρχουν στα απορρίμματα μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες: 1) Τα υλικά που αποδομούνται γρήγορα (3 μήνες έως 5 χρόνια) και 2) Τα υλικά που αποδομούνται βραδέως (μέχρι 50 χρόνια ή και περισσότερο). Τα συστατικά του οργανικού κλάσματος των αστικών απορριμμάτων που αποδομούνται γρήγορα και αυτά που αποδομούνται αργά, φαίνονται στον Πίνακα 4-1 που ακολουθεί:

Συστατικά οργανικού κλάσματος	Γρήγορα βιοαποικοδομήσιμα	Βραδέως βιοαποικοδομήσιμα
Υπολείμματα τροφών	✓	
Εφημερίδες	✓	
Χαρτιά γραφείου	✓	
Χαρτόνια	✓	
Πλαστικά ¹		
Υφάσματα		✓
Λάστιχο		✓
Δέρμα		✓
Υπολείμματα κήπου	✓ ²	✓ ³
Ξύλο		✓

Πίνακας 4-1: Συστατικά του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της παραγωγής του βιοαερίου βασίζονται στη σύσταση των απορριμμάτων, π.χ. στο ποσοστό άνθρακα, στο βαθμό αποδόμησης, και στην κινητική της αποδόμησης. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο στην Ευρώπη είναι αυτό του Tabasaran το οποίο αρχικά δημιουργήθηκε για την αναερόβια χώνευση λυμάτων (Εξίσωση 4-2) [7].

Η παραγωγή του βιοαερίου δίνεται από τη σχέση:

$$G_a = G_e (1 - e^{-ka}) \quad (4-2)$$

όπου

G_a = η ειδική παραγωγή βιοαερίου το έτος a ($m^3 / tn \text{ MSW} / yr$)

G_e = η συνολική ειδική παραγωγή βιοαερίου ($m^3 / tn \text{ MSW}$)

¹ Τα πλαστικά θεωρούνται μη αποικοδομήσιμα

² Φύλλα και υπολείμματα γρασιδιού (περίπου 60% των συνολικών υπολειμμάτων κήπου)

³ Τμήματα ξύλου

k = η σταθερά αποδόμησης = $\ln 2 / t_{1/2}$ (1 / yr)

a = χρόνος (yr)

Η ειδική παραγωγή βιοαερίου υπολογίζεται από τον τύπο

$$G_e = 1.868C_o(0.014T + 0.28) \quad (4-3)$$

όπου

C_o = το ποσοστό του βιοαποικοδομήσιμου άνθρακα στα απορρίμματα
(kg C / tn MSW)

T = η θερμοκρασία (°C)

Η διόρθωση της θερμοκρασίας στον υπολογισμό του G_e προκύπτει από το γεγονός ότι το ποσοστό του υποστρώματος που χρησιμοποιείται για τη σύνθεση των κυττάρων των μ / ο μπορεί να διαφέρει με τη θερμοκρασία. Όμως, μια και ο “χρόνος παραμονής της λάσπης” στους ΧΥΤΑ είναι σε εντελώς διαφορετική κλίμακα από τους αναερόβιους χωνευτές, η διόρθωση αυτή δεν έχει κανένα νόημα στους ΧΥΤΑ.

Έτσι η συνολική εξίσωση παραγωγής βιοαερίου είναι :

$$G_a = 1.868C_o(0.014T + 0.28)(1 - e^{-ka}) \quad (4-4)$$

Είναι χρήσιμο τώρα να δούμε πως εξάγεται ο συντελεστής 1.868 στην εξίσωση παραγωγής του βιοαερίου [9]. Από 1 mol C παράγεται 1 mol βιοαερίου ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) ή 22.4 l βιοαερίου. Δηλαδή από 12 g C παράγονται 22.4 l βιοαερίου. Άρα από 1 g C παράγονται $22.4 / 12 = 1.868$ l βιοαέριο. Ακόμη σε 1 tn MSW περιέχονται περίπου 170 - 220 kg C, άρα από 1 tn MSW παράγονται συνολικά 318 - 411 m³ βιοαέριο. Αυτός είναι ένας θεωρητικός υπολογισμός της παραγωγής του βιοαερίου, που όμως δίνει αποτελέσματα μεγαλύτερα από τα πραγματικά που κυμαίνονται από 100 - 200 m³ / tn MSW.

Στον Πίνακα 4-2 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα ποσοστά του βιοαποικοδομήσιμου άνθρακα στα αστικά απορρίμματα από διάφορους μελετητές

Βιοαποικοδομήσιμος άνθρακας (kg C / t MSW)	Μελετητές
170 -220	Tabasaran & Rettenberger 1987
170	Ringhofer et al 1991
170	Erhart – Schippeck 1994
200	Hackl & Mauschwitz 1999
137	Owan 2002

Πίνακας 4-2: Ποσοστά του βιοαποικοδομήσιμου άνθρακα

Όπως στην Ευρώπη χρησιμοποιείται συνήθως το μοντέλο του Tabasaran, έτσι και στις ΗΠΑ χρησιμοποιείται συνήθως το μοντέλο Scoll Canyon. Και αυτό το μοντέλο είναι πρώτης τάξης και δεν περιέχει την υπό αμφισβήτηση διόρθωση της θερμοκρασίας. Για την ίδια μελετούμενη περίπτωση και τις ίδιες συνθήκες, τα δύο μοντέλα δίνουν πανομοιότυπα αποτελέσματα. Η USEPA χρησιμοποίησε το μοντέλο Scoll Canyon για τη δημιουργία του προγράμματος LANDGEM το οποίο διατίθεται στο δίκτυο στη διεύθυνση [http:// www.epa.gov/oar/oaqps](http://www.epa.gov/oar/oaqps) . Το μοντέλο αυτό μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των εκπομπών αρκετών ιχνοαερίων, με βάση όμως σταθερών συγκεντρώσεων στο βιοαέριο. Τη μέθοδο αυτή πρότεινε και το IPCC το 1996 [10].

Η βασική εξίσωση του μοντέλου είναι [11]:

$$LFG_t = L_o R(e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (4-5)$$

όπου:

LFG_t = παραγωγή βιοαερίου το έτος t (m^3 / yr)

L_o = συνολική ειδική παραγωγή βιοαερίου ανά kg MSW (m^3 / kg)

R = ρυθμός απόθεσης απορριμμάτων (kg / yr)

t = χρόνια από την έναρξη λειτουργίας (yr)

c = χρόνια από το κλείσιμο. Αν ο ΧΥΤΑ λειτουργεί $c = 0$ (yr)

k = ετήσιος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου ($1/ yr$)

Ο ετήσιος ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου μπορεί να εκφραστεί ως το αντίστροφο των ετών απελευθέρωσης του βιοαερίου. Για παράδειγμα αν η

απελευθέρωση αναμένεται να διαρκέσει 20 χρόνια τότε $k = 1 / 20 = 0.05$. Η US EPA θέτει το k ίσο με 0.05 εξορισμού.

Σύμφωνα με άλλους μελετητές το k κυμαίνεται από 0,02 – 0,05 για συμβατικούς ΧΥΤΑ, και από 0,1 – 0,25 για ΧΥΤΑ βιοαντιδραστήρες [12].

Το 1996 το IPCC, εκτός από το μοντέλο κινητικής πρώτης τάξης, πρότεινε και την default IPCC μέθοδο για τον υπολογισμό της παραγωγής του CH_4 [10].

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εξίσωση (4-6) που ακολουθεί:

$$CH_4 (Gg / yr) = MSW_T * MSW_F * MCF * DOC * DOC_F * F * 16/12$$

όπου : (4-6)

MSW_T = συνολική ποσότητα των παραγόμενων απορριμμάτων (Gg/yr)

MSW_F = κλάσμα των απορριμμάτων που καταλήγει σε χώρους διάθεσης

MCF = συντελεστής διόρθωσης μεθανίου (κλάσμα)

DOC = κλάσμα αποδομήσιμου οργανικού άνθρακα (kg C / kg MSW)

DOC_F = κλάσμα του DOC που έγινε τελικά μεθάνιο

F = κλάσμα του CH_4 στο βιοαέριο (IPCC default 0.5)

16/12 = μετατροπή του C σε CH_4

Η μέθοδος υποθέτει πως η παραγωγή και οι εκπομπές του CH_4 λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του ίδιου έτους που αποτίθενται τα απορρίμματα. Αυτό βέβαια δεν είναι απόλυτα σωστό αφού για να σταθεροποιηθεί η παραγωγή του CH_4 δεν αρκεί μόνο ένας χρόνος.

Το 2000 το IPCC [13], πρότεινε μια άλλη εξίσωση μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης που βελτίωνε τις εξισώσεις που είχε προτείνει το 1996 όσον αφορά τη διάσταση του χρόνου.

Η εξίσωση αυτή είναι:

$$Q_t = \sum_x [(A * k * MSW_{T(x)} * MSW_{F(x)} * L_{o(x)}) * e^{-k(t-x)}] \quad (4-7)$$

όπου:

- Q_t** = παραγωγή του CH_4 το έτος t (Gg / yr)
- x** = χρόνια για τα οποία προστίθενται δεδομένα (yr)
- A** = $(1-e^{-k}) / k$ Παράγοντας διόρθωσης του αθροίσματος
- k** = σταθερά του ρυθμού παραγωγής CH_4 (1/yr)
- $MSW_{T(x)}$** = συνολική ποσότητα των παραγόμενων απορριμμάτων το έτος x (Gg/yr)
- $MSW_{F(x)}$** = κλάσμα των απορριμμάτων που καταλήγει σε χώρους διάθεσης το έτος x
- $L_{o(x)}$** = ειδική παραγωγή CH_4 = $(MCF_{(x)} * DOC_{(x)} * DOC_F * F * 16/12)$
- $MCF_{(x)}$** = συντελεστής διόρθωσης μεθανίου (κλάσμα)
- $DOC_{(x)}$** = κλάσμα αποδομήσιμου οργανικού άνθρακα (kg C / kg MSW)
- DOC_F** = κλάσμα του DOC που έγινε CH_4
- F** = κλάσμα του CH_4 στο βιοαέριο (IPCC default 0.5)
- 16/12** = μετατροπή του C σε CH_4

Συνοψίζοντας, το IPCC προτείνει τον υπολογισμό της παραγωγής του CH_4 με τη default IPCC μέθοδο μόνο στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία πεδίου για το παρόν αλλά και τα προηγούμενα έτη.

4.2 Τα χαρακτηριστικά του βιοαερίου

Τα χαρακτηριστικά του βιοαερίου περιλαμβάνουν τα φυσικά χαρακτηριστικά και τα χημικά χαρακτηριστικά [14].

4.2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

Τα φυσικά χαρακτηριστικά είναι:

- Η πυκνότητα
- Το ιξώδες
- Η θερμοκρασία
- Η θερμογόνος δύναμη
- Η υγρασία

Πυκνότητα. Η πυκνότητα του βιοαερίου εξαρτάται από τα ποσοστά των αερίων που το απαρτίζουν. Για παράδειγμα, ένα μίγμα 10% H₂ και 90% CO₂, το οποίο συναντάται στην πρώτη φάση αποδόμησης των απορριμμάτων, θα είναι βαρύτερο από τον αέρα, ενώ ένα μίγμα 60% CH₄ και 40% CO₂, το οποίο συναντάται στη φάση της μεθανογένεσης, είναι ελαφρύτερο του αέρα. Η πυκνότητα ρ, έχει μονάδες kg / m³ και ορισμένες συνήθεις τιμές της είναι:

$$\rho \text{ CH}_4 = 0,714 \text{ kg / m}^3$$

$$\rho \text{ LFG} = 1.07 \text{ kg / m}^3$$

Ιξώδες. Το ιξώδες ενός ρευστού (υγρού ή αερίου) είναι η ιδιότητα που προκαλεί την αντίσταση στη ροή εξαιτίας της ύπαρξης εσωτερικής τριβής μέσα στο ρευστό. Αυτή η αντίσταση στη ροή, η οποία εκφράζεται σαν συντελεστής δυναμικού ή απόλυτου ιξώδους, είναι η απαιτούμενη δύναμη για την κίνηση μιας μονάδας επιφάνειας κατά μια μονάδα μήκους.

Το απόλυτο ιξώδες μ μετράται σε μονάδες Newton * sec / m², centipoises, κ. ά. Για παράδειγμα, στους 0 °C και σε 1 atm, ισχύει:

$$\mu \text{ CH}_4 = 1.04 * 10^{-5} \text{ Newton * sec / m}^2$$

$$\mu \text{ LFG} = 1.15 * 10^{-5} \text{ Newton * sec / m}^2$$

Θερμοκρασία. Η θερμοκρασία του βιοαερίου ποικίλει ανάλογα με το βάθος, τη θέση και τη φάση της αποδόμησης

Θερμογόνος δύναμη. Τα μίγματα του βιοαερίου έχουν θερμογόνο δύναμη της τάξεως των 500 Btu / cft κατά τη φάση της μεθανογένεσης. Το CH₄ έχει θερμογόνο δύναμη της τάξεως των 33.810 kJ / m³.

Υγρασία. Το ποσοστό της υγρασίας στο βιοαέριο εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση και έτσι μπορεί να είναι κορεσμένο ή ακόρεστο. Τα εισερχόμενα απορρίμματα έχουν μια μέση υγρασία 25 % , με τα ζυμώσιμα να έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας (70%). Η επιπλέον υγρασία προέρχεται από τη βροχόπτωση, τη διήθηση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, και από την αποδόμηση των απορριμμάτων.

4.2.2 Χημικά χαρακτηριστικά

Τα χημικά χαρακτηριστικά θα αναφερθούν για κάθε αέριο του βιοαερίου χωριστά:

Μεθάνιο (CH_4). Είναι από τα κύρια αέρια του βιοαερίου, ελαφρύτερο από τον αέρα, και άοσμο. Το βιοαέριο είναι εύφλεκτο λόγω της παρουσίας του CH_4 , και μπορεί να προκαλέσει ασφυξία όταν υπάρχει σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Τέλος σχηματίζει εκρηκτικά μίγματα στον αέρα όταν βρίσκεται σε συγκεντρώσεις από 5% έως 15 %

Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Είναι και αυτό από τα κύρια αέρια του βιοαερίου, βαρύτερο από τον αέρα, άχρωμο και άοσμο.

Οργανικές ενώσεις πλην του μεθανίου (NMOC). Βρίσκονται στο βιοαέριο ως ιχνοαέρια, και παράγονται μέσα από φυσικές, χημικές, και βιολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα απορρίμματα. Οι NMOCs καταλαμβάνουν λιγότερο από το 1 % του όγκου του βιοαερίου και αποτελούνται από δεκάδες ενώσεις. Σε δείγματα βιοαερίου στη Μεγάλη Βρετανία ανιχνεύθηκαν 116 διαφορετικά ίχνη οργανικών ενώσεων. Η συγκέντρωση ενός τυπικού συστατικού των NMOCs μπορεί να κυμαίνεται από τιμές κάτω από το όριο ανίχνευσης, μέχρι και 1780 ppm. Η μέση συγκέντρωση των συνολικών NMOCs είναι περίπου 4000 ppm.

Οι κυριότερες ενώσεις είναι:

- Βενζόλιο
- Τολουόλιο
- Αιθυλοβεζόλιο
- Βινυλοχλωρίδιο
- Διχλωρομεθάνιο κ.ά.

Υδρατμοί. Το αέριο που παράγεται κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης των οργανικών ενώσεων τυπικά περιέχει υδρατμούς σε ποσοστό 4 – 7% κ.ό. Οι θερμοκρασίες μέσα στα απορρίμματα είναι συνήθως μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής με αποτέλεσμα την αύξηση της εξάτμισης του νερού μέσα στο βιο-

αέριο. Το ποσοστό υδρατμών στο βιοαέριο εξαρτάται από τη θερμοκρασία του συστήματος, και την πίεση.

4.3 Κίνηση του βιοαερίου

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 διαμέσου 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 διαμέσου 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 υποεδάφειες περιοχές, όπως διάδρομοι διάφορων χρήσεων.

4.3.1 Παράγοντες κίνησης του βιοαερίου

Η κίνηση των αερίων του ΧΥΤΑ εξαρτάται από τρεις κύριους παράγοντες: τη διάχυση (συγκέντρωση), την πίεση, και τη διαπερατότητα [6].

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 ένα ΧΥΤΑ κινούνται από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης. Επειδή οι συγκεντρώσεις των αερίων μέσα στο 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 στο 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 τη 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 εσωτερικών χώρων.

Διαπερατότητα. Τα αέρια όπως προαναφέραμε 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 λιγότεροι διαπερατοί. Τα αέρια τείνουν να κινούνται διαμέσου περιοχών υψηλής διαπερατότητας (άμμος ή χαλίκι) παρά από περιοχές με χαμηλή διαπερατότητα (άργιλος, ιλύες). Τα τελικά καλύμματα των ΧΥΤΑ συνήθως φτιάχνονται από εδάφη χαμηλής διαπερατότητας όπως άργιλος. Τα αέρια σε ένα καλυμμένο ΧΥΤΑ τείνουν να κινούνται οριζόντια παρά κάθετα.

4.3.2 Συνθήκες που επηρεάζουν την κίνηση του βιοαερίου

Η κατεύθυνση, η ταχύτητα, και η απόσταση που θα διανύσει το βιοαέριο εξαρτώνται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων που περιγράφονται παρακάτω:

Είδος τελικού καλύμματος . Αν το τελικό κάλυμμα του Χ.Υ.Τ.Α. 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 του τμήματος.

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.

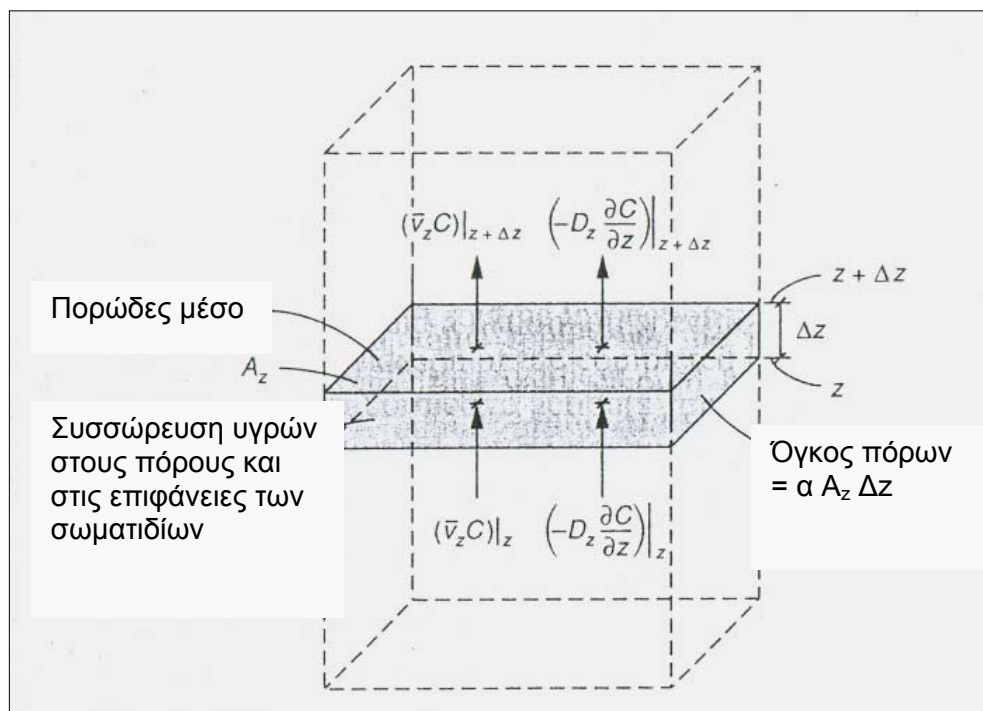
Θερμοκρασία. Η αύξηση της θερμοκρασίας ενισχύει την κίνηση των σωματιδίων των αερίων, και τείνει να αυξήσει τη διάχυσή τους. Έτσι σε θερμές συνθήκες τα αέρια εξαπλώνονται γρηγορότερα. Αν και οι χώροι ταφής συνήθως διατηρούν μια σταθερή θερμοκρασία, οι κύκλοι ψύξης και θέρμανσης προκαλούν θραύση της επιφάνειας 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 στην 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 μετανα-

στεύσει έξω από τον ΧΥΤΑ, ενώ όταν ανεβαίνει το βιοαέριο κινείται προσωρινά οριζόντια μέσα στον ΧΥΤΑ.

4.3.3 Εξισώσεις κίνησης του βιοαερίου

Κάτω από φυσιολογικές συνθήκες, τα αέρια που παράγονται στους ΧΥΤΑ απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μέσω της μοριακής διάχυσης [8]. 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 κατανάλωση του διαμέσου χημικών αντιδράσεων ή βιολογικής δραστηριότητας. Η γενική εξίσωση που ακολουθεί συσχετίζει αυτούς τους παράγοντες σε ένα μονοδιάστατο (κάθετο) όγκο ελέγχου (Εικόνα 4-1)



Εικόνα 4-1: Όγκος ελέγχου για την κατακόρυφη κίνηση του βιοαερίου.

Η εξίσωση είναι :

$$\alpha(1 + \beta) \cdot \frac{\partial C_A}{\partial t} = -V_z \cdot \frac{\partial C_A}{\partial z} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} + G \quad (4-8)$$

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, cm^2 / s

G = παράμετρος που αναφέρεται σε όλα τα φαινόμενα παραγωγής, g / cm^3

z = βάθος, cm

Η ταχύτητα λόγω συμμεταφοράς V_z , στην κατακόρυφο, υπολογίζεται με τη χρήση του Νόμου του Darcy

$$V_z = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{dP}{dz} \quad (4-9)$$

όπου

V_z = ταχύτητα λόγω συμμεταφοράς στην κατακόρυφη διεύθυνση, m / s

k = διαπερατότητα εδάφους, m^2

μ = ιξώδες του αέριου μίγματος, $\text{N s} / \text{m}^2$

P = πίεση, N / m^2

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 (4-8) εξάγονται συνήθως με τη 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 (4-8). Για παράδειγμα, αν αγνοηθούν τα φαινόμενα

ρόφησης και παραγωγής, κάτω από σταθερές συνθήκες (Steady – State) έχουμε:

$$0 = -V_z \cdot \frac{dC_A}{dz} + D_z \cdot \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \quad (4-10)$$

Αν δεν παράγεται πια βιοαέριο σε σημαντικές ποσότητες, παραμένει μόνο το τμήμα της εξίσωσης (4-10) που αφορά τη διάχυση το οποίο μπορεί να ολοκληρωθεί για να δώσει την ακόλουθη εξίσωση:

$$N_A = -D_z \cdot \frac{dC_A}{dz} \quad (4-11)$$

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:

$$D_z = D \cdot \frac{(a_{gas})^{10/3}}{a^2} \quad (4-12)$$

όπου:

D_z = συντελεστής ενεργούς διάχυσης, cm²/s

D = συντελεστής διάχυσης, cm²/s

a_{gas} = πορώδες γεμάτο με αέρια, cm³/ cm³

a = συνολικό πορώδες, cm³/ cm³

Μια άλλη προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του συντελεστή ενεργούς διάχυσης είναι:

$$D_z = D \cdot a \cdot \tau \quad (4-13)$$

όπου:

τ = ο συντελεστής στρεβλότητας (τυπική τιμή = 0,67)

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 και 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 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 [8].

4.3.4.1 Ανοδική κίνηση του βιοαερίου

Το CH_4 και το CO_2 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 (4-11) και (4-12) 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 πλήρωσης τους με αέρια. Έτσι προκύπτει η εξίσωση (4-14) :

$$N_A = - \frac{D \cdot a^{4/3} \cdot (C_{A_{atm}} - C_{A_{fill}})}{L} \quad (4-14)$$

όπου:

N_A = πυκνότητα ροής του συστατικού A , g/cm² s

$C_{A_{atm}}$ = συγκέντρωση του συστατικού A στην επιφάνεια του καλύμματος του ΧΥΤΑ., g/cm³

$C_{A_{fill}}$ = 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 της διάχυσης του CH₄ και του CO₂ είναι 0,20 και 0,13 cm²/s αντίστοιχα.

4.3.4.2 Καθοδική κίνηση του βιοαερίου

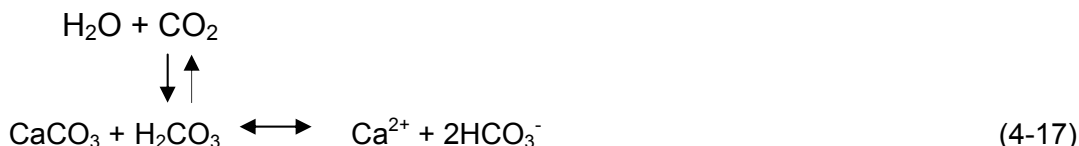
Τελικά, το διοξείδιο του άνθρακα, λόγω της πυκνότητάς του, θα συσσωρευτεί στον πυθμένα του ΧΥΤΑ. Αν έχει τοποθετηθεί γεωμεμβράνη στον πυθμένα του ΧΥΤΑ, το διοξείδιο του άνθρακα θα κινηθεί προς τα κάτω λόγω διάχυσης, διαμέσου της γεωμεμβράνης, και διαμέσου των υποκείμενων σχηματισμών, μέχρι να φτάσει στο υπόγειο νερό (η κίνηση του CO₂ περιορίζεται με τη 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 του 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 CO₂, θα συνεχιστεί η αντίδραση που φαίνεται στην εξίσωση (4-15) μέχρι να επιτευχθεί χημική ισορροπία όπως φαίνεται στην εξίσωση (4-17):



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 CO₂ στο υπόγειο νερό.

4.3.4.3 Κίνηση των ιχνοαερίων (*Trace gases*)

Για τις οριακές συνθήκες που φαίνονται στην Εικόνα 4-2, η εξίσωση (4-14) μπορεί να τροποποιηθεί για τα αέρια που βρίσκονται ως ίχνη στους ΧΥΤΑ ως εξής

$$N_i = - \frac{D \cdot a^{4/3} \cdot (C_{iatm} - C_{is} W_i)}{L} \quad (4-18)$$

όπου:

N_i = πυκνότητα ροής του συστατικού i, g/cm² s

D = συντελεστής διάχυσης, cm²/s

C_{iatm} = συγκέντρωση του συστατικού i στην επιφάνεια του καλύμματος του ΧΥΤΑ, g/cm³

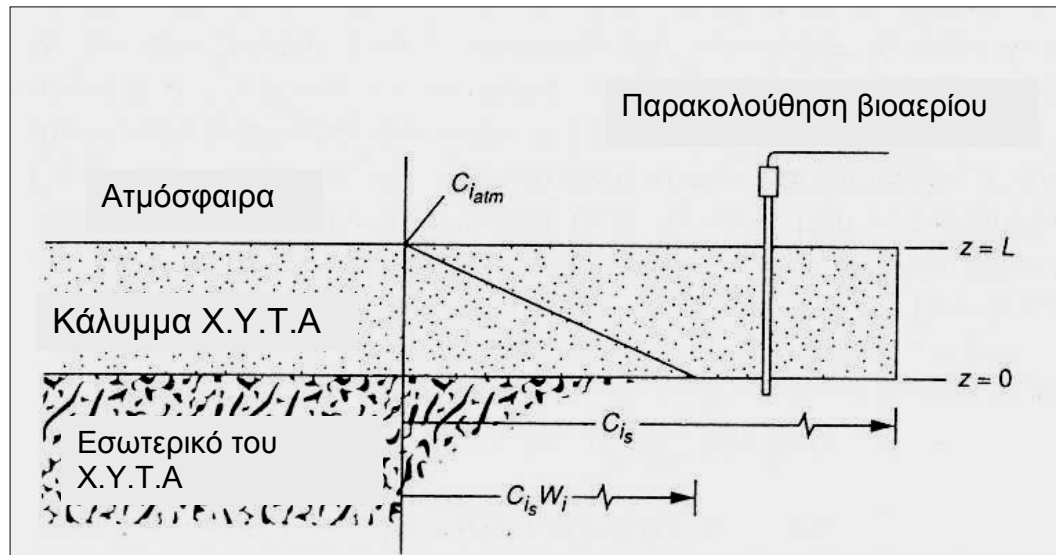
C_{is} = συγκέντρωση κορεσμού ατμών του συστατικού i, g/cm³

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/cm³

L = πάχος του εδαφικού καλύμματος, cm

Η εξίσωση (4-18) 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.



Εικόνα 4-2: Κίνηση των ιχνοαερίων διαμέσου του τελικού καλύμματος

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 (4-18) είναι η παρακάτω:

$$N_i = - \frac{D \cdot a^{4/3} \cdot (C_{is} W_i)}{L} \quad (4-19)$$

Οι εκτιμώμενες τιμές του συντελεστή διάχυσης D δώδεκα αερίων που συναντώνται ως ίχνη, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-3, για θερμοκρασίες από 0 – 50°C. Οι τιμές του πορώδους κυμαίνονται από 0,01 έως 0,3 για τις διαφορετικές τιμές αργίλου. Ο όρος $C_{is} W_i$ αναφέρεται στη συγκέντρωση του συστατικού του ενδιαφέροντος, στην κορυφή του ΧΥΤΑ και μόλις κάτω από το τελικό κάλυμμα. Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις πεδίου, η τιμή του όρου $C_{is} W_i$

μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τη βιβλιογραφία (Πίνακας 4-3) [8]. Αν κάποιο συστατικό που μας ενδιαφέρει δεν περιλαμβάνεται στη βιβλιογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή 0,001 σαν 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 πολύ εύκολα.

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

Πίνακας 4-3 : Δεδομένα από μετρήσεις σε 44 ΧΥΤΑ στην Καλιφόρνια

5.ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

Γενικά, η παρακολούθηση των αερίων που εκπέμπονται από τους ΧΥ-ΤΑ μπορεί να χωριστεί σε πέντε κατηγορίες [6]:

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)

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την παρακολούθηση των αερίων μέσα στο έδαφος, γι' αυτό και η κατηγορία αυτή θα αναλυθεί εκτενέστερα και θα αποτελέσει και ξεχωριστό κεφάλαιο (6^ο Κεφάλαιο).

5.1 Παρακολούθηση των εδαφικών αερίων (Soil gas monitoring)

Η αποδόμηση των απορριμμάτων μέσα στους ΧΥΤΑ και στους ΧΔΑ παράγει αέρια που περιέχουν πολλά χημικά τα οποία 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.

5.1.1 Παρακολούθηση των εδαφικών αερίων σε ΧΥΤΑ και ΧΔΑ

Υπάρχουν πολλοί λόγοι που συνιστούν την παρακολούθηση των επιπέδων των ρυπαντών 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 μέθάνιο. Τα δεδομένα που συλλέγονται για την εκπλήρωση των κανονισμών, εξυπηρετούν δύο σκοπούς: παρέχουν στοιχεία για την απόδοση των συστη-

μάτων 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 για φωτιά ή έκρηξη.

Ποσοτικοποίηση της *off site* μετακίνησης χημικών. Επειδή μέσα στα αστικά απορρίμματα υπάρχουν πολλά χημικά (ίχνη NMOCs), τα οποία πιθανώς να μετακινηθούν προς κατοικημένες περιοχές μέσω των εδαφικών αερίων, κρίνεται απαραίτητη 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.

5.1.2 Σημασία των δεδομένων παρακολούθησης των εδαφικών αερίων

Τα αποτελέσματα της δειγματοληψίας των εδαφικών αερίων παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τα αέρια ενός ΧΥΤΑ και πως 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 του 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 συγκεντρώσεων 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 της δειγματοληψίας των εδαφικών αερίων για τη διασφάλιση του ότι τα δεδομένα είναι πλήρως αντιπροσωπευτικά των υπόγειων συνθηκών.

5.1.3 Ερωτήσεις για τα δεδομένα δειγματοληψίας

Αέρια υπό παρακολούθηση

- Ποια αέρια παρακολουθούνται επί μονίμου βάσεως ?
- Περιλαμβάνονται σε αυτά τα χημικά που ενδιαφέρουν τη νομοθεσία, την κοινωνία, και τα θέματα υγείας?
- Περιέχουν οι αναφορές ρουτίνας το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα, όταν αναφέρονται τα επίπεδα μεθανίου?
- Περιέχονται στα χημικά που παρακολουθούνται αυτά που αναμένονται να υπάρχουν στη μεγαλύτερη ποσότητα και αυτά που είναι πιο τοξικά?
- Υπάρχουν κενά δεδομένων στα χημικά που παρακολουθούνται?

Παρακολούθηση της 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 ΕΡΑ? 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 των 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 πηγαιδιών 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 αξιολογήσεις τις 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 των 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 είτε είναι κορεσμένα με νερό είτε δεν παρέχουν συνεχείς μετρήσεις των επιπέδων του μεθανίου?
- Υπήρχαν παραλήψεις από την ομάδα δειγματοληψίας με βάση τους κανονισμούς?

5.2 Παρακολούθηση των αερίων 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 για σύστημα συλλογής του 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. Το σημαντικό στην 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 το 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 ΧΥΤΑ. Το φορητό όργανο χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των “hot spots”, δηλαδή των σημείων στην επιφάνεια με τις σχετικά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του 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 ΧΥΤΑ, 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 ΧΥΤΑ.

5.3 Παρακολούθηση των εκπομπών (Emissions monitoring)

Σε αντίθεση με την παρακολούθηση των εδαφικών αερίων και των αερίων κοντά στην επιφάνεια που μετράνε τις συγκεντρώσεις των χημικών στο βιοαέριο, η παρακολούθηση των εκπομπών μετρά τους ρυθμούς με τους οποίους τα χημικά αυτά απελευθερώνονται από τους ΧΥΤΑ. Οι πηγές εκπομπών στους χώρους ταφής είναι η ίδια επιφάνεια του ΧΥΤΑ, 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: για την τήρηση της περιβαλλοντικής νομοθεσίας, για την τεκμηρίωση της ανάγκης ή της αποτελεσματικότητας ενός συστήματος

συλλογής του βιοαερίου, και 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 εκτιμηθεί αν είναι τεχνικά και οικονομικά εφικτό να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί το βιοαέριο για την παραγωγή ενέργειας.

Οι εκπομπές μετρούνται με τη 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:

- Όταν μετριοούνται οι εκπομπές 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 ρυπαντές στον αέρα κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής. Οι μετρήσεις δίνονται σε συγκέντρωση όγκου ανά μονάδα απόστασης (ppm-m), 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.
- Όταν μετρούνται οι εκπομπές 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.
- Όταν μετρούνται οι εκπομπές από μια καμινάδα με υψηλό ρυθμό ροής (π.χ. η εκροή από ένα αποτεφρωτήρα βιοαερίου), συνήθως εισάγεται ένας δειγματολήπτης απευθείας μέσα στην καμινάδα. Ανάλογα με τις ενώσεις που μετρούνται μπορούν να χρησιμοποιηθούν διά-

φορες 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 το χαρακτηρισμό των σχετικών ποσοτήτων των εκπεμπόμενων χημικών, έχουν τρεις τουλάχιστον περιορισμούς όσον αφορά την αξιοποίησή τους για θέματα υγείας. Πρώτον, όπως και οι 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 ρυπαντές. Δεύτερον, 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. Τρίτον, 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 ρυπαντές στην ατμόσφαιρα, τα περισσότερα δεδομένα παρακολούθησης των εκπομπών δεν χαρακτηρίζουν τις συνολικές εκπομπές ενός χώρου ταφής.

5.4 Παρακολούθηση του αέρα του 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 στη ζώνη αναπνοής. Τα δεδομένα αυτά, μαζί με τα δεδομένα παρακολούθησης του αέρα εσωτερικών χώρων (όπου είναι διαθέσιμα), είναι τα χρησιμότερα στην αξιολόγηση των μονοπατιών έκθεσης της αναπνοής σε χημικά στους ΧΥΤΑ.

Η παρακολούθηση του αέρα του περιβάλλοντος είναι η μέτρηση των επιπέδων της ρύπανσης του εξωτερικού αέρα, ή του αέρα που οι άνθρωποι εισπνέουν. Τα επίπεδα της ρύπανσης που μετρούνται στον αέρα του περι-

βάλλοντος 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, είναι για την εκτίμηση της ανησυχίας των εργατών ή της κοινωνίας όσον αφορά την απελευθέρωση τοξικών ουσιών στον αέρα. Παρόλα αυτά, επειδή η νομοθεσία δεν απαιτεί την παρακολούθηση του αέρα του περιβάλλοντος, στις περιοχές όπου υπάρχουν ΧΥΤΑ., δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τους περισσότερους ΧΥΤΑ..

Ο τρόπος μέτρησης των συγκεντρώσεων του αέρα του περιβάλλοντος διαφέρει από μελέτη σε μελέτη, αλλά όλες οι μελέτες αναφέρονται στα παρακάτω καίρια στοιχεία της παρακολούθησης του αέρα:

- **Επιλογή των χημικών για παρακολούθηση.** Μια από τις πρώτες αποφάσεις που καλούνται οι μελετητές να πάρουν όταν αναπτύσσουν ένα σχέδιο παρακολούθησης του αέρα του περιβάλλοντος είναι η επιλογή των ενώσεων που θα παρακολουθούνται. Η απόφαση αυτή επηρεάζεται κυρίως από το σκοπό της παρακολούθησης. Για παράδειγμα σε περιοχές όπου μας 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 πρακτική άποψη, η επιλογή των χημικών που θα μετρούνται καθορίζεται μετά τη στάθμιση διαφόρων παραγόντων όπως το κόστος, η τοξικότητα των χημικών, και η διαθεσιμότητα των τεχνικών δειγματοληψίας που μπορούν αξιόπιστα να μετρήσουν τις συγκεντρώσεις ενός δοσμένου χημικού στον αέρα.
- **Μέθοδοι δειγματοληψίας.** Μετά από έρευνες πολλών ετών η EPA έχει εγκρίνει πολλούς διαφορετικούς τύπους δειγματοληψίας και αναλυτικών μεθόδων για μια μεγάλη λίστα συνηθισμένων αέριων ρυπαντών.
- **Τοποθεσίες παρακολούθησης του αέρα του περιβάλλοντος.** Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία του σχεδιασμού ενός προγράμματος παρακολούθησης του αέρα είναι η επιλογή των σημείων παρακο-

λούθησης. Γενικά, οι τοποθεσίες παρακολούθησης επιλέγονται με βάση το σκοπό του προγράμματος δειγματοληψίας.

- **Πρόγραμμα παρακολούθησης.** Τα σχέδια παρακολούθησης του αέρα του περιβάλλοντος θα πρέπει να καθορίζουν και τη συχνότητα και τη διάρκεια της προτεινόμενης δειγματοληψίας. Αυτοί οι παράγοντες είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη, στη 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 ρυπαντή μόνο. 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 ρυπαντών.

- **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 πάνω από 50 % είναι συνήθως εφικτή. Η πληρότητα της δειγματοληψίας, που ορίζεται ως το ποσοστό των επιτυχημένων δειγματοληψιών, είναι επιθυμητό να είναι πάνω από 90%.

5.5 Παρακολούθηση του αέρα των εσωτερικών χώρων (Indoor monitoring)

Η παρακολούθηση του αέρα των εσωτερικών χώρων είναι η μέτρηση των συγκεντρώσεων των ρυπαντών στον αέρα στο εσωτερικό κτιρίων ή κλειστών τοποθεσιών. Οι θέσεις δειγματοληψίας του αέρα των εσωτερικών χώρων περιλαμβάνουν (αλλά δεν περιορίζονται σε) 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 τα χημικά που περιέχονται στο βιοαέριο μπορούν να εισχωρήσουν απευθείας σε κατασκευές που βρίσκονται πάνω από 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 ΕΡΑ, η συγκέντρωση του μεθανίου στα δείγματα αέρα που συλλέγονται μέσα στις εγκαταστάσεις του ΧΥΤΑ δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 25 % του LEL του 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 ΕΡΑ 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 του περιβάλλοντος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παρακολούθηση του αέρα των εσωτερικών χώρων.

Μοντελοποίηση του αέρα (Air modeling)

Εδώ και χρόνια, οι επιστήμονες έχουν αναπτύξει ένα μεγάλο αριθμό 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 ρυπαντές από μια πηγή, ή ποια είναι η συνεισφορά μιας πηγής στη συνολική ρύπανση μιας περιοχής. Τα μοντέλα μπορεί να είναι αναγνωριστικά, δηλαδή με λίγη πληροφορία 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 ένα 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 ρυπαντές 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 το 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.

6. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

6.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η επισκόπηση των εδαφικών αερίων (Soil-Gas Survey) περιλαμβάνει τη συλλογή, ανάλυση, και ερμηνεία των δεδομένων των εδαφικών αερίων. Έτσι, η επισκόπηση των εδαφικών αερίων παρέχει πληροφορίες για την εδαφική ατμόσφαιρα στην ακόρεστη ζώνη, οι οποίες βοηθούν στην εκτίμηση της παρουσίας, της σύστασης, της πηγής και της κατανομής των ρυπαντών. Ακόμη παρέχει δεδομένα πεδίου σχετικά γρήγορα και οικονομικά, τα οποία βοηθούν στην καθοδήγηση άλλων πιο ακριβών και πολύπλοκων τεχνικών. Αν και η επισκόπηση των εδαφικών αερίων εφαρμόζεται συνήθως για την επίσπευση της εκτίμησης της κατάστασης του πεδίου, μπορεί ακόμα να εφαρμοστεί για την παρακολούθηση διαρροών από υπόγειες δεξαμενών αποθήκευσης (USTs), για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των τεχνικών εξυγίανσης, για την εκτίμηση της ανοδικής κίνησης και της εισόδου ατμών σε κτίρια, και για την παρακολούθηση των αερίων σε ΧΥΤΑ και ΧΔΑ.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη παρακολούθησης των εδαφικών αερίων [15]. Το πρώτο είδος είναι η ενεργή επισκόπηση (Active Soil Gas Survey), κατά το οποίο ένας ορισμένος όγκος εδαφικού αερίου αντλείται έξω από την ακόρεστη ζώνη σε μια δειγματοληπτική συσκευή για ανάλυση. Το δεύτερο είδος είναι η παθητική επισκόπηση των εδαφικών αερίων (Passive Soil Gas Survey), κατά το οποίο ένα ροφητικό υλικό τοποθετείται μέσα στο έδαφος έτσι ώστε οι ατμοί των ρυπαντών να μπορούν να προσροφηθούν επιλεκτικά με το χρόνο, κινούμενοι φυσικά στην ακόρεστη ζώνη. Η ενεργή επισκόπηση μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα σε μια μέρα και χρησιμοποιείται συνήθως σε περιοχές με πτητικούς οργανικούς υδρογονάνθρακες (VOCs). Αντιθέτως, η παθητική επισκόπηση μπορεί να διαρκέσει μερικές μέρες ή εβδομάδες και χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν ημιπτητικοί οργανικοί υδρογονάνθρακες (SVOCs), ή όταν τα εδάφη εμποδίζουν τη ροή των αερίων που απαιτεί η ενεργή επισκόπηση.

6.2 Εφαρμογή της δειγματοληψίας των εδαφικών αερίων

Για την κατανόηση της εφαρμογής και του σχεδιασμού της επισκόπησης των εδαφικών αερίων, είναι σημαντικό πρώτα να κατανοηθούν οι παράμετροι που ελέγχουν τη μετακίνηση των ρυπαντών διαμέσου της ακόρεστης ζώνης. Οι κυρίαρχοι παράμετροι είναι οι φυσικοχημικές ιδιότητες του ρυπαντή, η γεωλογία της περιοχής, και οι βιολογικές διεργασίες. Παρακάτω περιγράφονται εν συντομία αυτοί οι παράμετροι, πως επηρεάζουν τους ρυπαντές, και πως συσχετίζονται με την εφαρμογή ενεργής ή παθητικής επισκόπησης [15].

6.2.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες των υδρογονανθράκων

Για την εκτίμηση του αν η δειγματοληψία των εδαφικών αερίων είναι εφαρμόσιμη για το χαρακτηρισμό της υπόγειας ρύπανσης, πρέπει να αξιολογηθεί η δυνατότητα του ρυπαντή να βρίσκεται στην φάση των ατμών. Ο βαθμός στον οποίο ένα χημικό θα διαμεριστεί στη φάση των ατμών εξαρτάται κυρίως από την τάση των ατμών του συστατικού και τη σταθερά του νόμου του Henry.

Τάση ατμών. Η τάση των ατμών είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός συστατικού που καθορίζει αν ο συγκεκριμένος υδρογονάνθρακας μπορεί να ανιχνευθεί ως αέριο στην περιοχή της ρύπανσης. Η τάση ατμών ενός συστατικού είναι μέτρο της τάσης του να εξατμίζεται. Πιο συγκεκριμένα, είναι η πίεση που ασκούν οι ατμοί όταν βρίσκονται σε ισορροπία με καθαρό υγρό ή στερεό. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερη είναι η τάση των ατμών ενός συστατικού, τόσο πιο γρήγορα εξατμίζεται. Σαν γενικό κανόνα, τάσεις ατμών μεγαλύτερες των **0.5 mm Hg** θεωρούνται ανιχνεύσιμες με τις ενεργητικές μεθόδους. Καμιά φορά, και συστατικά με χαμηλότερες τάσεις ατμών μπορούν να ανιχνευθούν, αλλά οι συγκεντρώσεις στο έδαφος πρέπει να είναι υψηλές και ο γεωλογικός σχηματισμός πρέπει να είναι διαπερατός. Αν ο ρυπαντής είναι διαλυμένος στο υπόγειο νερό ή στην εδαφική υγρασία τότε εκτός από την τάση των ατμών πρέπει να ληφθεί υπόψη και η σταθερά του νόμου του Henry.

Νόμος του Henry. Η σταθερά του νόμου του Henry είναι μέτρο της τάσης μιας ένωσης να κατανέμεται ανάμεσα στην υδατική φάση και την φάση ατμών.

Αυτή η σταθερά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της πιθανότητας να ανιχνευθεί ένα συστατικό, που έχει διαλυθεί στο υπόγειο νερό ή στην εδαφική υγρασία, στη φάση των ατμών. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να εκφραστεί αυτή η σταθερά, αλλά ο πιο χρήσιμος τρόπος είναι στην αδιάστατη μορφή. Η σταθερά του νόμου του Henry μπορεί να εξαχθεί διαιρώντας τη συγκέντρωση ισορροπίας ενός συστατικού στην αέρια φάση με τη συγκέντρωση ισορροπίας του συστατικού στην υδατική φάση (σε ορισμένη θερμοκρασία και πίεση). Επειδή οι μονάδες και στις τιμές είναι οι ίδιες, η σταθερά είναι αδιάστατη.

Οι ενώσεις που έχουν μεγαλύτερη τάση να βρίσκονται στην φάση των ατμών έχουν σταθερά του νόμου του Henry μεγαλύτερη από 1, ενώ οι ενώσεις που έχουν τάση να βρίσκονται στην υδατική φάση έχουν τάση ατμών μικρότερο από 1. Γενικά, ενώσεις με σταθερά του νόμου του Henry μεγαλύτερη από 0.1 θεωρούνται ανιχνεύσιμες με την ενεργή δειγματοληψία, αν βέβαια η τάση των ατμών είναι επαρκής και οι γεωλογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές. Ενώσεις με λίγο μικρότερες τιμές της σταθεράς, είναι ανιχνεύσιμες αν οι αρχικές συγκεντρώσεις είναι υψηλές. Οι τεχνικές παθητικής δειγματοληψίας εδαφικών αερίων είναι ικανές να ανιχνεύσουν ενώσεις με χαμηλότερες τιμές της σταθεράς.

6.2.2 Γεωλογικοί παράγοντες

Ο πιο σημαντικός γεωλογικός παράγοντας στην κίνηση των εδαφικών αερίων διαμέσου της ακόρεστης ζώνης είναι η διαπερατότητα του εδάφους, που εκφράζει τη σχετική ευκολία με την οποία αέρια ή υγρά διέρχονται μέσω πετρωμάτων, εδαφών ή ιζημάτων. Η διαπερατότητα του εδάφους σχετίζεται κυρίως με την κοκκομετρία και την υγρασία του εδάφους. Εδάφη με μικρό μέγεθος κόκκων και συνεπώς μικρά κενά πόρων, είναι λιγότερο διαπερατά. Για παράδειγμα οι άργιλοι, που έχουν το μικρότερο μέγεθος κόκκων περιορίζουν σημαντικά την μετακίνηση των ατμών του εδάφους.

Η υγρασία του εδάφους ελαττώνει τη διαπερατότητα επειδή η υγρασία που είναι παγιδευμένη στα κενά των πόρων αναστέλει ή παρεμποδίζει τη ροή των ατμών. Επειδή η υγρασία του εδάφους μεταβάλλεται εποχιακά και γεωγραφικά, η ενεργή διαπερατότητα είναι συνήθως άγνωστη πριν από τη δειγ-

ματοληψία. Για την ενεργή επισκόπηση, πρέπει να εκτελεστούν πειράματα διαπερατότητας αέρα – εδάφους σε κάθετα προφίλ, σε επιλεγμένες τοποθεσίες, για τη βελτιστοποίηση του βάθους δειγματοληψίας.

Επιπροσθέτως, υπάρχουν πολλοί άλλοι εδαφικοί παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν παραπλανητικές πληροφορίες για την τοποθεσία της ρύπανσης. Προτιμώμενα μονοπάτια ροής (π.χ. ρίζες δέντρων, ρωγμές) και στρώματα αδιαπέρατα από ατμούς (π.χ. στρώματα αργίλου, επιστρωμένες επιφάνειες, υπόγειο νερό) είναι χαρακτηριστικά που πρέπει να εκτιμηθούν. Ακόμη η προσρόφηση των υδρογονανθράκων σε εδάφη με υψηλά ποσοστά αργίλου ή οργανικής ύλης, περιορίζουν την κατανομή των ρυπαντών στη φάση ατμών.

Αν και η ενεργή δειγματοληψία εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους εδαφών, εκτός από πολύ συμπαγείς αργίλους, είναι συνήθως αναποτελεσματική όταν η υγρασία του εδάφους είναι πάνω από 80 -90 %, λόγω της έλλειψης αλληλοσυνδεδεμένων, γεμάτων με αέρα, πόρων. Οι συνθήκες υψηλής υγρασίας μπορούν να ξεπεραστούν με ορισμένες διαδικασίες δειγματοληψίας (π.χ. ελαχιστοποίηση όγκου δείγματος, αναμονή της ισορροπίας), αλλά αυτές οι διαδικασίες είναι συνήθως πολύ χρονοβόρες.

Η παθητική δειγματοληψία είναι γενικά χρήσιμη σε όλους τους τύπους των εδαφών και κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, αλλά ιζήματα με πολύ χαμηλές διαπερατότητες και υψηλά ποσοστά κορεσμού μπορούν να επηρεάσουν και την ποσότητα των ρυπαντών που έρχονται σε επαφή με το δειγματολήπτη, και την ποσότητα των ρυπαντών που προσροφούνται. Για παράδειγμα η παρουσία ενός πυκνού και υγρού αργιλικού φακού θα μειώσει την ποσότητα των ατμών που έρχονται σε επαφή με το δειγματολήπτη ακριβώς από πάνω του. Αν και η παθητική δειγματοληψία παραμένει πιο ευαίσθητη στην ανίχνευση ρυπαντών σε σύγκριση με τις ενεργητικές μεθόδους, η δειγματοληψία με χαμηλή διαπερατότητα, υψηλή υγρασία και ετερογένεια του υπεδάφους ενδέχεται να επηρεάσει και τα αποτελέσματα της παθητικής δειγματοληψίας.

6.2.3 Βιοαποικοδόμηση

Η βιοαποικοδόμηση των πτητικών οργανικών υδρογονανθράκων (VOCs) στην ακόρεστη ζώνη μειώνει την ικανότητα ανίχνευσης των ρυπαντών στα εδαφικά αέρια. Για παράδειγμα οι υδρογονάνθρακες του πετρελαίου αποδομούνται εύκολα από μικροοργανισμούς και παράγουν αυξημένα ποσά διαφόρων αερίων όπως διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, και μεθάνιο ενώ μειώνεται η συγκέντρωση του οξυγόνου. Ο ρυθμός της βιοαποικοδόμησης ελέγχεται από διάφορους παράγοντες όπως την υγρασία του εδάφους, τη συγκέντρωση των δεκτών ηλεκτρονίων, τα θρεπτικά, το είδος του ρυπαντή και τη θερμοκρασία του εδάφους.

Η δειγματοληψία εδαφικών αερίων που επηρεάζονται από τη βιοαποικοδόμηση (π.χ. οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο και μεθάνιο) μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την πηγή του ρυπαντή και το ρυπασμένο πλούμιο, με την προϋπόθεση ότι έχουν συλλεχθεί δείγματα από γειτονική μη ρυπασμένη περιοχή για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των ρυπαντών που πιθανόν προϋπήρχαν στο πεδίο. Η μέτρηση τέτοιων παραμέτρων είναι πιο χρήσιμη όταν εκτελείται ενεργή δειγματοληψία και ο ρυπαντής είναι ημιπτητικός ή μη-πτητικός, ή εάν είναι γνωστή η ύπαρξη ένας πτητικού υδρογονάνθρακα αλλά δεν έχει ανιχνευθεί άμεσα.

6.3 Επιλογή μεθόδου δειγματοληψίας

Η ανίχνευση μεμονωμένων συστατικών με ενεργητικές ή παθητικές μεθόδους δειγματοληψίας περιορίζεται από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των υδρογονανθράκων. Οι γενικές παράμετροι για την επιλογή της ενεργής δειγματοληψίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-1. Οι παθητικές μέθοδοι δειγματοληψίας είναι πιο ευαίσθητες από τις ενεργητικές, αλλά πρέπει να κληθούν διάφοροι κατασκευαστές για την ανίχνευση των διαφορετικών συστατικών.

Η τάση των ατμών και η σταθερά του νόμου του Henry είναι δείκτες της δυνατότητας μιας μεθόδου να ανιχνεύει ένα συγκεκριμένο συστατικό. Για την ενεργή δειγματοληψία η τάση των ατμών πρέπει να είναι πάνω από 0.5 mm Hg. Αν ο ρυπαντής είναι διαλυμένος στην εδαφική υγρασία ή το υπόγειο νερό,

η σταθερά του νόμου του Henry πρέπει να είναι πάνω από 0.1. Το CH₄ έχει σταθερά του Νόμου του Henry 26.2 και τάση ατμών 2,1 *10⁵ mm Hg. Οι γεωλογικοί παράγοντες (π.χ. στρώματα αργίλου, υψηλή υγρασία) επηρεάζουν και την ενεργή αλλά και την παθητική δειγματοληψία, αλλά η παθητική δειγματοληψία παρέχει συνήθως πιο ευαίσθητα αποτελέσματα κάτω από αυτές τις συνθήκες. Επιπροσθέτως τα παραπροϊόντα της βιοαποικοδόμησης μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες στην ενεργή δειγματοληψία για την έμμεση ανίχνευση ρυπαντών

Τάση Ατμών > 0.5 mm Hg
Σταθερά του Henry > 0.1
Βαθμός Κορεσμού < 80%
Απουσία αργίλου από τη ζώνη δειγματοληψίας

Πίνακας 6-1: Περίληψη των γενικών κριτηρίων για την ενεργή δειγματοληψία εδαφικών αερίων [15].

6.3.1 Μέθοδοι ενεργής δειγματοληψίας εδαφικών αερίων

Από τις δύο μεθόδους δειγματοληψίας εδαφικών αερίων – ενεργή και παθητική– η ενεργή δειγματοληψία είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται τυπικά όπου οι ρυπαντές κυρίου ενδιαφέροντος είναι VOCs. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη γρήγορη συλλογή των εδαφικών αερίων από ορισμένα βάθη με τη βοήθεια αντλιών και σωλήνων δειγματοληψίας. Τα δείγματα αναλύονται συνήθως on-site έτσι ώστε τα δεδομένα αυτά (real time data) να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καθοδήγηση της διαδικασίας δειγματοληψίας. Οι VOCs μπορούν να ανιχνευθούν απευθείας ενώ οι SVOCs και οι οργανικές ενώσεις χαμηλής πτητικότητας μπορούν να ανιχνευθούν έμμεσα με τη μέτρηση αερίων που επηρεάζονται από βιογενείς διεργασίες (π.χ. οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, και μεθάνιο).

Η ενεργή επισκόπηση των εδαφικών αερίων χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τη βιομηχανία πετρελαίου τη δεκαετία του 1960 για την παρακολούθηση των συστημάτων ελέγχου των αερίων, την καταγραφή της κίνησης των αερίων *off-site*, και την εκτίμηση των κοιτασμάτων. Ήταν αρχές της δεκαετίας του 1980 που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ύπαρξης VOCs στο πεδίο,

και γρήγορα έγινε ένα πολύ δημοφιλές εργαλείο για την ανίχνευση και περιγραφή υπόγειας ρύπανσης. Τα τελευταία χρόνια όμως εφαρμόζεται και για την παρακολούθηση του βιοαερίου σε ΧΥΤΑ και ΧΔΑ, με πολύ καλά αποτελέσματα.

Τα δείγματα συλλέγονται με την εισαγωγή μιας συσκευής δειγματοληψίας σε μια οπή όπως συστήματα άμεσης ώθησης (Direct Push Systems), ή πιο πολύπλοκα μηχανικά συστήματα (Hollow Stem Auger). Οι περισσότερες συσκευές δειγματοληψίας αποτελούνται από φίλτρα ή ανοίγματα που πιέζονται απευθείας στο έδαφος ή εισάγονται μέσω του εσωτερικού σωλήνων ή τρυπανιών. Το εδαφικό αέριο αντλείται από μια συσκευή κενού μέσω των ανοιγμάτων ή των φίλτρων, και στη συνέχεια μέσω πλαστικών (πολυαιθυλένιο-τεφλόν) ή μεταλλικών σωλήνων και οδηγείται σε ένα δοχείο δείγματος.

Επειδή η ενεργή δειγματοληψία έχει εξελιχθεί και έχει γίνει πιο οικονομική μέσω της εφαρμογής των τεχνολογιών άμεσης ώθησης, της *on-site* ανάλυσης των δειγμάτων με κινητά εργαστήρια που χρησιμοποιούν φορητά όργανα αέριας χρωματογραφίας, εφαρμόζεται πολύ συχνά στην επισκόπηση του πεδίου. Τα κινητά εργαστήρια παρέχουν ποσοτικά χημικά δεδομένα σε μικρό χρονικό διάστημα χωρίς να χρειάζεται η αποθήκευση και μεταφορά των δειγμάτων. Άλλα χρήσιμα αναλυτικά όργανα είναι τα όργανα ανίχνευσης ολικών οργανικών ατμών, όπως οι ανιχνευτές φωτοϊονισμού (PID), οι ανιχνευτές φλόγας ιονισμού (FID), οι φορητοί χρωματογράφοι μάζας κ.ά. Στην επιλογή της αναλυτικής μεθόδου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι στόχοι της εκτίμησης, επειδή οι δυνατότητες και οι περιορισμοί των διαφόρων μεθόδων είναι ποικίλες.

6.3.1.1 Προκαταρκτικές μετρήσεις για την ενεργή δειγματοληψία

Υπάρχουν τρεις συνθήκες που πρέπει να εκτιμηθούν πριν από τη δειγματοληψία, οι οποίες καθορίζουν πως θα συλλεχθούν τα δείγματα και διασφαλίζουν πως είναι αντιπροσωπευτικά: Η σχετική διαπερατότητα του εδαφικού αέρα, οι ρυθμοί και όγκοι άντλησης, και το υπόγειο “βραχυκύκλωμα”.

- **Δοκιμές σχετικής διαπερατότητας εδαφικού αέρα.** Η σχετική διαπερατότητα του εδαφικού αέρα μπορεί να βοηθήσει στην εκτίμηση της επίδρασης των γεωλογικών υλικών και της εδαφικής υ-

γραφίας στην περιοχή μελέτης. Μια εκτίμηση μπορεί να εξαχθεί συγκρίνοντας τα δεδομένα της ροής του αέρα με την πίεση του κενού. Για την ευκολότερη ερμηνεία των δεδομένων πρέπει να αναγνωριστούν ζώνες χαμηλής διαπερατότητας.

- **Ρυθμοί και όγκοι άντλησης.** Πριν την έναρξη της δειγματοληψίας σε μια περιοχή, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν δοκιμές για τη βελτιστοποίηση των ρυθμών και των όγκων άντλησης. Γενικά, οι δοκιμές αυτές θα πρέπει να πραγματοποιούνται σε διάφορους τύπους εδάφους που συναντώνται στο πεδίο και σε περιοχές όπου αναμένονται υψηλές συγκεντρώσεις VOCs. Στις δοκιμές αυτές ο ερευνητής μεταβάλλει τους όγκους και τους ρυθμούς άντλησης σε ένα σημείο καθώς συλλέγονται τα δείγματα. Βέλτιστες συνθήκες δειγματοληψίας συμβαίνουν όταν οι συγκεντρώσεις του ρυπαντή σταθεροποιούνται.
- **Υπόγειο “βραχυκύκλωμα.”** Οι δοκιμές του ρυθμού και του όγκου δειγματοληψίας θα πρέπει ακόμη να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο ύπαρξης υπόγειου βραχυκυκλώματος με την ατμόσφαιρα. Αυτό γίνεται αντιληπτό όταν τα επίπεδα του ρυπαντή μειώνονται απότομα, ή όταν ανιχνεύονται ατμοσφαιρικά αέρια όπως ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού είναι σημαντικό να μονώνεται το άνοιγμα του σωλήνα δειγματοληψίας, συνήθως με υγρό μπετονίτη. Επιπροσθέτως, η οπή στο έδαφος δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο του σωλήνα δειγματοληψίας γιατί από το κενό αυτό θα εισέλθουν ατμοσφαιρικά αέρια.

6.3.1.2 Αρχική δειγματοληψία

Τα σημεία της αρχικής δειγματοληψίας βρίσκονται συνήθως στην περιοχή όπου πιθανώς είναι η πηγή της ρύπανσης. Οι προτεινόμενες θέσεις δειγματοληψίας πρέπει να σημειωθούν σε ένα χάρτη της περιοχής στον οποίο θα σημειώνονται και οι υπόγειες εγκαταστάσεις. Επιπλέον σημεία δειγματοληψίας πρέπει να τοποθετηθούν κατά μήκος αγωγών μέσω των οποίων εν-

δέχεται να μετακινηθούν οι ρυπαντές (τάφροι, σωληνώσεις). Η δειγματοληψία μπορεί ακόμη να οργανωθεί με βάση ορθογωνικό κάναβο.

6.3.1.3 Βάθος δειγματοληψίας

Το βάθος της δειγματοληψίας διαφέρει ανάλογα με το ύψος του υπόγειου νερού και τη διαστρωμάτωση της περιοχής. Η ενεργή δειγματοληψία σε διάφορα βάθη είναι απαραίτητη για τον καθορισμό των διαπερατών οριζόντων και της κατακόρυφης κατανομής των ρυπαντών. Οι αρχικές κατακόρυφες κατανομές των ρύπων πρέπει να ολοκληρωθούν σε περιοχές οι οποίες σίγουρα ή πιθανώς αποτελούν την πηγή της ρύπανσης και σε περιοχές όπου έχουν ανιχνευθεί υψηλές συγκεντρώσεις VOCs. Αν ο σκοπός της έρευνας είναι η σκιαγράφηση της υγρής φάσης των υδρογονανθράκων, τότε η ενεργή δειγματοληψία πρέπει να γίνει μόλις πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

6.3.1.4 Απόσταση σημείων δειγματοληψίας

Η οριζόντια απόσταση των σημείων δειγματοληψίας εξαρτάται κυρίως από το σκοπό της μελέτης, το μέγεθος της περιοχής, και το μέγεθος της πιθανής πηγής ρύπανσης. Για παράδειγμα σε περιοχές έκτασης 1-2 acre (4-8 στρέμματα) με υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης, η αρχική απόσταση των σημείων δειγματοληψίας κυμαίνεται από 10 έως 50 ft (3-15 m). Όταν σκοπός είναι ο εντοπισμός της πηγής ρύπανσης σε μεγάλες βιομηχανικές εκτάσεις, η απόσταση μπορεί να είναι 400 ή 500 ft (122-152 m). Όπως έχει αναφερθεί είναι απαραίτητο να συλλεχθούν δείγματα από διάφορα βάθη της ακόρεστης ζώνης για τη δημιουργία της τρισδιάστατης κατανομής των ρύπων. Η απόσταση μεταξύ των κάθετων σημείων δειγματοληψίας εξαρτάται κυρίως από το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, και το σκοπό της έρευνας. Στη συνέχεια τα δεδομένα πρέπει να τοποθετηθούν σε χάρτες, να γίνει κάποιου είδους παλινδρόμηση. Σαν γενικό κανόνα, αν δυο σημεία δειγματοληψίας έχουν διαφορά 2 ή 3 τάξεων μεγέθους, είναι απαραίτητο να συλλεχθούν δείγματα και από την περιοχή ανάμεσα σε αυτά τα σημεία.

6.3.1.5 Περιέκτες δειγμάτων

Υπάρχουν τέσσερα είδη περιεκτών που χρησιμοποιούνται συνήθως, το καθένα με τα πλεονεκτήματά του και του περιορισμούς του. Τα ατσάλινα δο-

χεία έχουν μεγάλο χρόνο ζωής, αλλά είναι δύσκολο να καθαρισθούν. Τα γυάλινα δοχεία απορρυπαίνονται εύκολα αλλά σπάνε εύκολα και μπορεί να έχουν διαρροές από το διάφραγμα. Οι σακούλες από Tedlar® είναι εύχρηστες και οι πιθανές διαρροές φαίνονται άμεσα, αλλά το μειονέκτημά τους είναι ότι ορισμένοι ρύποι ίσως προσροφηθούν. Οι σύριγγες είναι φθηνές και επιτρέπουν την εύκολη συλλογή του δείγματος, αλλά έχουν μικρό χρόνο ζωής και δεν απολυμαίνονται εύκολα. Αν και κανένας περιέκτης δεν είναι τέλειος, τα προβλήματα ελαχιστοποιούνται όσο πιο γρήγορα γίνεται η ανάλυση των δειγμάτων μετά τη συλλογή τους. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια, για την αποθήκευση των δειγμάτων μέχρι να αναλυθούν χρησιμοποιούνται και ορισμένα προσροφητικά μέσα από τα οποία μετά εκχυλίζονται οι ρύποι.

6.3.1.6 Διαδικασίες διασφάλισης και ελέγχου ποιότητας (QA/QC)

Υπάρχουν πολλές διαδικασίες διασφάλισης και ελέγχου ποιότητας που πρέπει να ακολουθηθούν κατά τη διάρκεια της ενεργής επισκόπησης των εδαφικών αερίων ώστε να διασφαλίζεται ότι τα δείγματα είναι αντιπροσωπευτικά των συνθηκών του υπεδάφους. Η ακόλουθη λίστα δεν είναι επαρκής για όλες τις συνθήκες πεδίου ή τον εξοπλισμό, αλλά περιέχει τα βασικά στοιχεία που πρέπει ο ερευνητής να ελέγξει όταν αξιολογεί τις αναφορές από την ενεργή δειγματοληψία. Οι διαδικασίες αυτές περιέχουν :

- Όλα τα δείγματα της ενεργής δειγματοληψίας πρέπει να συλλεχθούν με την ίδια διαδικασία.
- Η δειγματοληψία πρέπει να ολοκληρωθεί σε ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα (ώρες, ημέρες), επειδή οι χρονικές μεταβολές της θερμοκρασίας, υγρασίας, βαρομετρικής πίεσης και βροχόπτωσης μπορούν να επηρεάσουν τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών.
- Πρέπει να απορρυπαίνεται ο εξοπλισμός για την αποφυγή αλλοίωσης των αποτελεσμάτων από πιθανή προσρόφηση ρύπων στον εξοπλισμό της δειγματοληψίας.
- Το εσωτερικό μέρος του συλλέκτη του δείγματος πρέπει να είναι όσο πιο στεγνό γίνεται, γιατί η υγρασία μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών.

- Πριν τη συλλογή του δείγματος πρέπει να αφαιρείται ο αέρας που περιέχεται στο δειγματολήπτη.
- Όταν η δειγματοληψία γίνεται απευθείας από σωληνώσεις, πρέπει να γίνεται έλεγχος στις συνδέσεις τους, ώστε να είναι αεροστεγείς.
- Το δακτυλιοειδές κενό ανάμεσα στις άκρες του ανοίγματος στο έδαφος και στο σωλήνα δειγματοληψίας πρέπει να μονώνεται στην επιφάνεια με μπετονίτη ή άλλα παρόμοια υλικά.
- Πρέπει να γίνονται τακτικές μετρήσεις σε “τυφλά” δείγματα ώστε να αξιολογούνται οι διαδικασίες απορρύπανσης και να καθορίζονται οι προϋπάρχουσες συγκεντρώσεις των VOCs.
- Πρέπει να συλλέγονται δίδυμα δείγματα κάθε μέρα (γενικά 1 ανά δέκα δείγματα), ώστε να διασφαλίζεται η επαναληψιμότητα - αναπαραγωγή των δεδομένων.
- Οι περιέκτες των δειγμάτων πρέπει να ελέγχονται για διαρροές.

6.3.1.7 Ερμηνεία των δεδομένων της ενεργής δειγματοληψίας εδαφικών αερίων

Η εις βάθος κατανόηση των δυνατοτήτων των ενεργών μεθόδων δειγματοληψίας εδαφικών αερίων είναι απαραίτητα για την αποφυγή της παρερμηνείας των αποτελεσμάτων. Οι συγκεντρώσεις των εδαφικών αερίων πρέπει να συγκρίνονται με τα χαρακτηριστικά της στρωματογραφίας, για να καθοριστεί ο τρόπος κίνησης και κατανομής των ρυπαντών. Τα υπόγεια εμπόδια και τα δευτερεύοντα μονοπάτια ροής μπορούν να προκαλέσουν μια πολύ διαφορετική κατανομή των ρύπων από αυτή της ρύπανσης του εδάφους και του υπόγειου νερού. Συνεπώς, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούνται χάρτες που δείχνουν τη στρωματογραφία σε τομή ώστε να εκτιμηθούν οι κατακόρυφες συγκεντρώσεις.

Η ερμηνεία των δεδομένων πρέπει να ξεκινήσει στο πεδίο. Η καταγραφή των δεδομένων σε χάρτη της περιοχής βοηθάει στην εκτέλεση και στον επανασχεδιασμό του σχεδίου δειγματοληψίας. Τα τελικά αποτελέσματα της ενεργής δειγματοληψίας παρουσιάζονται συνήθως σε χάρτες οι οποίοι δείχνουν καμπύλες ίσης συγκέντρωσης των αερίων (contour maps) σε διάφορα βάθη. Τα βάθη της δειγματοληψίας πρέπει να διορθώνονται με βάση τις αλ-

λαγές υψομέτρου της περιοχής έτσι ώστε οι καμπύλες να αντιπροσωπεύουν ένα οριζόντιο επίπεδο. Με τη δημιουργία πολλών οριζοντίων χαρτών σε διάφορα βάθη, τα δεδομένα μπορούν να αναλυθούν σε τρεις διαστάσεις. Η γραφική απεικόνιση των ολικών VOCs είναι συνήθως η ευκολότερη μέθοδος, αλλά είναι σημαντικό να εκτιμηθεί αν υπάρχουν διαφορετικές πηγές με την εξέταση της κατανομής του κάθε ρύπου ξεχωριστά.

Ένα άλλο σημαντικό κομμάτι της ερμηνείας των αποτελεσμάτων είναι η ανάλυση των μονάδων μέτρησης. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο τύποι μονάδων στις αναφορές των δεδομένων των εδαφικών αερίων: Μονάδες όγκου ανά όγκο (π.χ. ppm_v ή ppb_v) ή μονάδες μάζας ανά μάζα (π.χ. μg/l ή mg/m³). Αν και για το νερό τα μg/l είναι ισοδύναμα με τα ppb_v, αυτό δεν ισχύει για τα αέρια. Αν οι συγκεντρώσεις αναφέρονται σε μg/l πρέπει να γίνει μετατροπή. Για δείγματα που αναλύονται στους 20 °C και σε πίεση 1 atm ισχύει:

$$\text{ppb}_v = \mu\text{g/l} * (2,447 * 10^4) / \text{MB αερίου}$$

6.3.1.8 Κόστος της ενεργής επισκόπησης των εδαφικών αερίων

Επειδή ο εξοπλισμός δειγματοληψίας και ανάλυσης που χρησιμοποιείται στην ενεργή επισκόπηση των εδαφικών αερίων διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες της κάθε περιοχής, το σκοπό της μελέτης, και τις προτιμήσεις του ερευνητή, το κόστος διαφέρει πολύ από περίπτωση σε περίπτωση. Οι περισσότερες μελέτες γίνονται με τη χρήση τεχνολογιών άμεσης ώθησης (Direct Push – DP). Το κόστος της δειγματοληψίας χρησιμοποιώντας οχήματα εξοπλισμένα με συστήματα άμεσης ώθησης κυμαίνεται από 1000 έως 2000 ευρο ανά ημέρα. Σε μερικές περιπτώσεις οι τεχνικές αυτές μπορούν να εφαρμοστούν χειροκίνητα, που ίσως είναι πιο φτηνό. Τυπικά, 10 έως 30 δείγματα συλλέγονται ανά ημέρα ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, το βάθος δειγματοληψίας, και τη μέθοδο δειγματοληψίας. Υπάρχουν πολλές αναλυτικές μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν στην επισκόπηση των εδαφικών αερίων, παρόλα αυτά οι φορητοί χρωματογράφοι μάζας είναι οι πιο συνηθισμένοι λόγω του υψηλού επιπέδου ποιότητας ανάλυσης δεδομένων που παρέχουν. Τα δείγματα σπάνια στέλνονται *off – site* σε εργαστήρια για ανάλυση επειδή οι *on*

– *site* πληροφορίες συνήθως χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των επόμενων σημείων δειγματοληψίας, και η καθυστέρηση στην ανάλυση μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα των δεδομένων. Η ενεργή δειγματοληψία μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα σε μια μέρα σε μια περιοχή έκτασης περίπου 4 στρεμμάτων και σπάνια διαρκεί πάνω από 3 ημέρες. Σαν αποτέλεσμα, το κόστος μιας ολοκληρωμένης ενεργής επισκόπησης και της αναφοράς κοστίζει περίπου 3000 έως 15000 euro.

6.3.1.9 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ενεργής επισκόπησης των

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι :

- ◆ Τα δείγματα μπορούν να αναλυθούν on – site και να παραχθούν “real time” αποτελέσματα
- ◆ Μπορούν να συλλεχθούν και να αναλυθούν από 10 έως 30 δείγματα ημερησίως
- ◆ Δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού και περιγραφής της πηγής ρύπανσης καθώς και του πλουμίου των VOCs.
- ◆ Παρέχει τη δυνατότητα της έμμεσης παρακολούθησης των SVOCs και των βαριών κλασμάτων του πετρελαίου μέσω της μέτρησης των προϊόντων της βιοαποικοδόμησης.

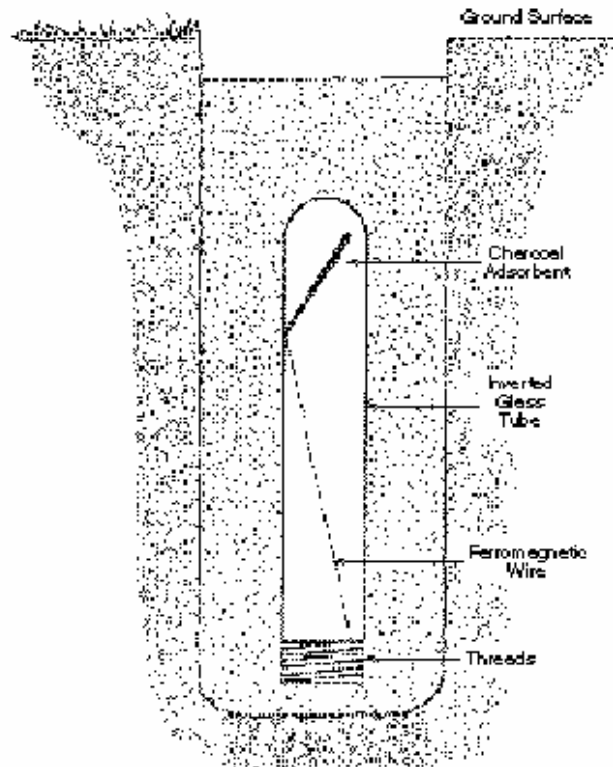
Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι :

- ◆ Δεν είναι αποτελεσματική στον χαρακτηρισμό υδρογονανθράκων χαμηλής πτητικότητας και SVOCs
- ◆ Πρέπει να ακολουθήσουν εκτεταμένες διαδικασίες ελέγχου και διασφάλισης ποιότητας
- ◆ Δεν μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας ή σε κορεσμένα εδάφη
- ◆ Ο αναλυτικός εξοπλισμός που θα επιλεγεί ίσως να μην έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει όλες τις ενώσεις που υπάρχουν

6.3.2 Παθητικές μέθοδοι δειγματοληψίας

Το δεύτερο είδος δειγματοληψίας εδαφικών αερίων, η παθητική, χρησιμοποιείται τυπικά όταν τα συστατικά που ενδιαφέρουν τον ερευνητή είναι

SVOCs ή ενώσεις χαμηλής πτητικότητας. Στην παθητική επισκόπηση των εδαφικών αερίων χρησιμοποιούνται σωλήνες που τοποθετούνται στο υπέδαφος για ημέρες ή εβδομάδες ώστε να προσροφηθούν οι ρυπαντές σε ειδικά ροφητικά υλικά μέσω της φυσικής κίνησης των ατμών στο υπέδαφος. Μετά την απομάκρυνση του σωλήνα, στέλνεται στο εργαστήριο όπου οι ρυπαντές εκροφούνται και αναλύονται. Ένα παράδειγμα ενός παθητικού δειγματολήπτη φαίνεται στην Εικόνα 6-1 που ακολουθεί.



Εικόνα 6-1: Ένας παθητικός δειγματολήπτης [15]

6.3.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της παθητικής επισκόπησης των εδαφικών αερίων.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι :

- ◆ Μπορεί να ανιχνευθεί μια ποικιλία VOCs, SVOCs και μιγμάτων χαμηλής πτητικότητας
- ◆ Είναι πιο αποτελεσματική από την ενεργή δειγματοληψία σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας και υψηλής υγρασίας
- ◆ Μπορούν να εγκατασταθούν από 40 έως 100 συσκευές δειγματοληψίας ανά ημέρα

- ◆ Προκαλείται ελάχιστη όχληση στο υπέδαφος και στη λειτουργία της περιοχής
- ◆ Είναι εύκολη στη χρήση
- ◆ Είναι πιο οικονομική από την ενεργή δειγματοληψία (~ ¼ κόστους)

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι :

- ◆ Τα δεδομένα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της μάζας του ρυπαντή
- ◆ Η κατακόρυφη κατανομή των ρυπαντών δεν εκτιμάται συνήθως
- ◆ Ο απαιτούμενος χρόνος για τη συλλογή και ανάλυση των δειγμάτων είναι περίπου 3 έως 6 εβδομάδες
- ◆ Η εκρόφηση από το ροφητικό υλικό ίσως καταστρέψει ορισμένους ρυπαντές
- ◆ Οι μετρήσεις εξαρτώνται από το χρόνο και δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα με τις εργαστηριακές μεθόδους για το έδαφος και το υπόγειο νερό
- ◆ Τα αδιαπέρατα στρώματα και οι αλλαγές στο πάχος των στρωμάτων αργίλου μπορεί να προκαλέσουν παραπλανητικές πληροφορίες.

6.3.3 Σύγκριση των μεθόδων της δειγματοληψίας των εδαφικών αερίων

Οι μέθοδοι ενεργής δειγματοληψίας είναι πιο κατάλληλες από τις παθητικές μεθόδους στις περισσότερες περιοχές με υπόγειες δεξαμενές αποθήκευσης πετρελαίου, επειδή παρέχουν περισσότερες πληροφορίες, γρηγορότερα, και σχεδόν με το ίδιο κόστος που έχουν οι παθητικές μέθοδοι. Τα δεδομένα που συλλέγονται με την ενεργή δειγματοληψία μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για την καθοδήγηση επιπρόσθετων δειγματοληψιών και ανα-

λύσεων, έτσι ώστε η εκτίμηση του πεδίου να ολοκληρωθεί σε μικρό χρονικό διάστημα και με καλύτερα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, η ενεργή επισκόπηση των εδαφικών αερίων παρέχει τρισδιάστατη πληροφορία για την κατανομή των ρυπαντών και την υπόγεια στρωματογραφία, που επιτρέπει την καλύτερη ερμηνεία των δεδομένων σε σύγκριση με την παθητική επισκόπηση.

Από την άλλη, όμως, η παθητική δειγματοληψία είναι πιο χρήσιμη ως εργαλείο έρευνας όταν είναι γνωστή η ύπαρξη ή πιθανολογείται ότι υπάρχουν SVOCs ή ενώσεις χαμηλής πτητικότητας στην περιοχή. Λόγω της υψηλής της ευαισθησίας στους ατμούς των ρυπαντών, η παθητική δειγματοληψία, μπορεί να παρέχει ακριβείς πληροφορίες για συγκεκριμένες ενώσεις και τις σχετικές τους συγκεντρώσεις σε δυο διαστάσεις. Μια περίληψη και σύγκριση των εφαρμογών των δύο παραπάνω μεθόδων δειγματοληψίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-2 που ακολουθεί:

Εφαρμογή	Ενεργή	Παθητική
Ανίχνευση παρουσίας VOCs	+	+
Ανίχνευση παρουσίας SVOCs		+
Εκτίμηση της παρουσίας υδρογονανθράκων με τη μέτρηση δεικτών βιοαποικοδόμησης	+	
Χαρακτηρισμός συγκεκριμένων ενώσεων	+	+
Έμμεση εκτίμηση της συγκέντρωσης των ρύπων στο έδαφος	+	
Δισδιάστατη κατανομή ρυπαντών	+	+
Τρισδιάστατη κατανομή ρυπαντών	+	
Αξιολόγηση επιλογών εξυγίανσης	+	
Παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας εξυγίανσης	+	+

Πίνακας 6-2: Εφαρμογές της ενεργής και παθητικής δειγματοληψίας [15]

6.4 Μετρήσεις εδαφικών αερίων σε ΧΥΤΑ και ΧΔΑ

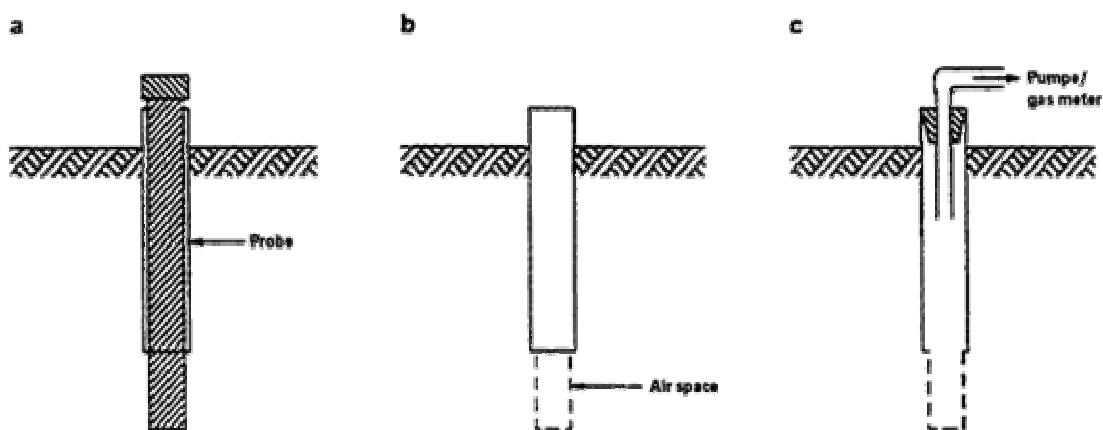
Οι μετρήσεις των εδαφικών αερίων, είναι οι μετρήσεις των αερίων που υπάρχουν στους πόρους του εδάφους ή στα απορρίμματα. Τα αέρια αντλούνται από προσωρινούς δειγματολήπτες ή από σταθερά σημεία δειγματοληψί-

ας (ενεργή δειγματοληψία). Οι δειγματολήπτες εισάγονται στο έδαφος χειροκίνητα ή μηχανικά, και αν είναι αναγκαίο μπορεί να προηγηθεί άνοιγμα γεώτρησης.

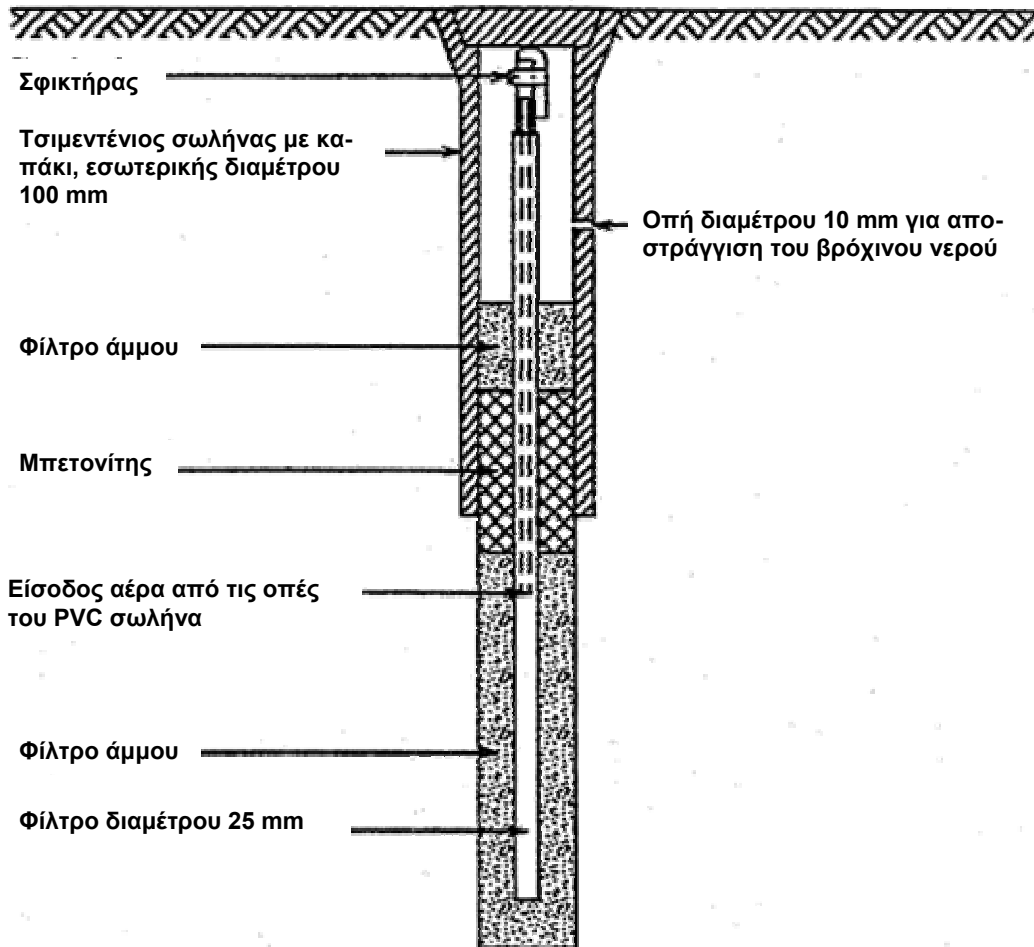
Το βάθος των μετρήσεων καθορίζεται από το βάθος του δειγματολήπτη ή από την εισαγωγή του αέρα στο σημείο δειγματοληψίας. Τυπικά βάθη μετρήσεων είναι από 0.5 έως 5 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ανάλογα με τις συνθήκες της περιοχής και το σκοπό της έρευνας. Στις περιπτώσεις όπου εξετάζεται η εξάτμιση στην ατμόσφαιρα, οι μετρήσεις πρέπει να εκτελούνται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, σε βάθη από 0.5 έως 1 μέτρο. Όταν λαμβάνονται δείγματα σε συνδυασμό με την εκτίμηση του αέρα εσωτερικών χώρων σε κτίρια, τα δείγματα αυτά πρέπει να συλλέγονται ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους [16].

Σε αντίθεση με τη δειγματοληψία οργανικών ή ανόργανων ατμών, η δειγματοληψία του βιοαερίου δεν έχει ειδικές απαιτήσεις όσο αναφορά το υλικό των δειγματοληπτών, των περιεκτών και των ενώσεών τους, καθώς και των αποστάσεων των σημείων δειγματοληψίας. Οι μετρήσεις είναι ακόμα ευκολότερες όταν χρησιμοποιούνται φορητοί αναλυτές αφού οι αναλύσεις γίνονται in-situ.

Η αρχή της εισαγωγής ενός δειγματολήπτη στο έδαφος φαίνεται στην Εικόνα 6-2, ενώ στην Εικόνα 6-3 φαίνεται μια σχεδιαστική πρόταση για ένα σταθερό σημείο δειγματοληψίας



Εικόνα 6-2: Αρχή της εισαγωγής ενός δειγματολήπτη στο έδαφος



Εικόνα 6-3: Σχεδιαστική πρόταση για ένα σταθερό σημείο δειγματοληψίας

Στην ανάλυση του βιοαερίου, το περιεχόμενο σε CH_4 , CO_2 , CO , και O_2 μετρίεται συνήθως με ένα φορητό όργανο ανάλυσης. Συστήνεται, το CH_4 , CO_2 , CO να προσδιορίζονται με απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ οι συγκεντρώσεις του οξυγόνου να προσδιορίζονται με ηλεκτροχημικό κελί.

Για την επιλογή της θέσης της δειγματοληψίας δεν υπάρχει κάποιος κανόνας. Όπως είναι γνωστό, η σύσταση του βιοαερίου εξαρτάται από την ηλικία των απορριμμάτων, δηλαδή από τη φάση αποδόμησης των απορριμμάτων. Άρα ανάλογα με το σκοπό της δειγματοληψίας πρέπει να επιλέγονται σημεία με γνωστή ηλικία απορριμμάτων.

Αν οι συγκεντρώσεις του βιοαερίου καταγράφονται συνεχώς, η συνεχής άντληση των εδαφικών αερίων πρέπει να αποφεύγεται, επειδή ίσως διαταράξει την παραγωγή του βιοαερίου στο κελί των απορριμμάτων. Η συνεχής ά-

ντληση μπορεί να αποφευχθεί με πολλούς τρόπους όπως για παράδειγμα με την εναλλασσόμενη άντληση εξωτερικού αέρα και βιοαερίου. Οι μετρήσεις των αερίων καταγράφονται μόνο όταν αντλείται βιοαέριο.

Αν ανιχνευθεί βιοαέριο σε ένα σημείο μέτρησης, μετριέται η πίεση του. Τέτοιες μετρήσεις πίεσης θα δείξουν την πίεση πάνω από αυτής της ατμόσφαιρας που προκαλείται από τα αέρια του ΧΥΤΑ.

Όταν παρακολουθείται το βιοαέριο, οι συγκεντρώσεις των αερίων πρέπει να αξιολογούνται με βάση τις μετεωρολογικές συνθήκες, όπως τη βροχόπτωση, τη βαρομετρική πίεση και τη θερμοκρασία του εδάφους.

7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

7.1 Μέθοδοι ανάλυσης

Τα δείγματα του CH₄ μπορούν να αναλυθούν με μια συσκευή GC με βάση την τροποποιημένη Μέθοδο 8015B της EPA, τη Μέθοδο TO – 3 της EPA, τη Μέθοδο 3416M του ASTM (EPA Method 3C), ή με ένα κατάλληλο φορητό όργανο (π.χ. Land Tech Gas Analyzer GA-90, Gas Emissions Monitor GEM-500, GEM-2000, DGA3 Infrared Analyzer) [17].

Στον Πίνακα 7-1 που ακολουθεί περιγράφονται οι κύριες αναλυτικές μέθοδοι για τη μέτρηση των διαφόρων συστατικών του βιοαερίου [18].

ΜΕΘΟΔΟΙ	ΑΕΡΙΑ	ΟΡΓΑΝΑ
EPA 3C	O ₂ , CO ₂ , CH ₄ , CO	GC/TCD
EPA 25C	NMOC	GC/FID
EPA 18	Speciated VOC (HAP)	GC/FID, ECD
EPA TO 14/15	Speciated VOC (HAP)	GC/MS
EPA 15/16	H ₂ S, COS, CS ₂ and mercaptans	GC/FPD
EPA 25	NMOC	GC/FID
EPA 25A	TOC	FIA
SCAQMD Method 25.3	VOC	GC/FID

Πίνακας 7-1: Κύριες αναλυτικές μέθοδοι για τη μέτρηση διαφόρων ρυπαντών του βιοαερίου [18]

όπου

GC:	Gas Chromatography	(Αέρια χρωματογραφία)
TCD:	Thermal Conductivity Detector	(Ανιχνευτής θερμικής αγωγιμότητας)
FID:	Flame Ionization Detector	(Ανιχνευτής φλόγας ιονισμού)
ECD:	Electron Counter Detector	(Ανιχνευτής ηλεκτρονίων)
GC-MS:	Gas Chromatography- Mass Spectrometry	(Αέρια χρωματογραφία – Φασματοσκοπία μάζας)
FPD:	Flame Photometric Detector	(Φωτομετρικός ανιχνευτής)
TOC:	Total Organic Compound	(Συνολικές οργανικές ενώσεις)
FIA:	Flame Ionization Analyzer	(Αναλυτής φλόγας ιονισμού)

7.2 Σημαντικά στοιχεία της ανάλυσης του βιοαερίου

Κατά τη δειγματοληψία και ανάλυση του βιοαερίου πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στα παρακάτω [17]:

1. **Όριο ανίχνευσης** : Το όριο ανίχνευσης για την ανάλυση του CH₄ δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 500 ppmv.
2. **Περιέκτες δειγμάτων CH₄** : Μπορούν να χρησιμοποιηθούν δοχεία SummaTM, σύριγγες, γυάλινα δοχεία, και σακούλες TedlarTM με χρόνο παραμονής του δείγματος μέσα σε αυτές το πολύ 24 ώρες.
3. **Επίπεδα συγκέντρωσης CH₄** : Όταν η συγκέντρωση του CH₄ είναι 1000 ppmv ή μεγαλύτερη, συνίσταται η διεξαγωγή περαιτέρω δειγματοληψίας για τον εντοπισμό της πηγής του CH₄
4. Σε περιοχές όπου ερευνάται το CH₄ και βρεθεί σε συγκεντρώσεις της τάξεως των 5000 ppmv ή μεγαλύτερες, πρέπει να συλλεχθούν δεδομένα βιογενών αερίων (O₂, CO₂, CH₄), με τη χρήση ενός ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας (TCD) ή κάποιου άλλου φορητού οργάνου.
5. Εξαιτίας της σχέσης μεταξύ της βαρομετρικής πίεσης και των εκπομπών του CH₄, είναι σημαντικό να καταγράφεται η βαρομετρική πίεση σε κάθε σημείο δειγματοληψίας και να παρουσιάζεται μαζί με τη συγκέντρωση του CH₄.
6. **Ειδικές απαιτήσεις της μεθόδου GC** : Η μέθοδος χρωματογραφίας αερίου απαιτεί καμπύλες βαθμονόμησης για ενώσεις όπως το CH₄ μια και δεν είναι μια ένωση “στόχος” για μια τέτοια αναλυτική μέθοδο.
7. **Απαιτήσεις φορητών οργάνων** : Τα φορητά όργανα ανάλυσης πρέπει να βαθμονομούνται με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή. Όταν χρησιμοποιείται ένα φορητό όργανο για την ανάλυση των δειγμάτων του CH₄, η EPA συνιστά ότι το λιγότερο το 10 % των θετικών δειγμάτων του CH₄ (> 5000 ppmv), πρέπει να αναλυθούν και με ένα άλλο φορητό όργανο (διαφορετική μονάδα ή μάρκα) ή με τη μέθοδο της αέριας χρωματογραφίας

7.3 Ερμηνεία των δεδομένων

Η ορθή ερμηνεία των δεδομένων του βιοαερίου που έχουν συλλεχθεί, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στη λειτουργία των συστημάτων συλλογής του βιοαερίου. Τα σωστά δεδομένα μπορούν να βοηθήσουν στον καθορισμό του αν υφίσταται ή αν πρόκειται να εμφανιστεί κάποιο πρόβλημα με το σύστημα συλλογής του βιοαερίου. Ακόμη, μπορούν να βοηθήσουν στον προσδιορισμό της πηγής του προβλήματος, στην ποσοτικοποίηση των επιφανειακών εκπομπών του βιοαερίου από τον ΧΥΤΑ, στην εκτίμηση της ποσότητας του αέρα που εισάγεται στο χώρο ταφής. Τέλος, συμβάλλουν στην εκτίμηση του αν το πρόβλημα είναι μεταβατικό (ανάλογα με τις αλλαγές της βαρομετρικής πίεσης) ή συνεχές. Ορισμένες από τις ερωτήσεις στις οποίες ο διαχειριστής του ΧΥΤΑ θέλει απάντηση είναι [19] :

1. Είναι τα δεδομένα έγκυρα (είναι λογικά) ?
2. Υπάρχει κίνδυνος φωτιάς στο ΧΥΤΑ?
3. Πόσο βιοαέριο διαφεύγει από την επιφάνεια ή το υπέδαφος?
4. Τηρεί ο ΧΥΤΑ τα περιβαλλοντικά όρια?
5. Υπάρχει κίνδυνος για τις κατασκευές μέσα ή κοντά στον ΧΥΤΑ?
6. Είναι πιθανό το βιοαέριο να προκαλέσει ρύπανση των υπογείων νερών?
7. Υπάρχει περισσότερο βιοαέριο για συλλογή?

7.3.1 Βήματα για την ερμηνεία των δεδομένων του βιοαερίου

Δεν υπάρχουν απόλυτοι κανόνες στην ερμηνεία των δεδομένων, αλλά υπάρχει μια γενική διαδικασία που πρέπει να χρησιμοποιείται. Τα βήματά της είναι :

- A. Έλεγχος της αξιοπιστίας των δεδομένων
- B. Εντοπισμός μη φυσιολογικών τιμών στα δεδομένα, γεγονόσ που είναι συνήθως ένδειξη προβλημάτων
- C. Σύγκριση των τωρινών δεδομένων με δεδομένα του παρελθόντος για εύρεση κάποιου συσχετισμού

Δ. Με βάση το σκοπό του συστήματος συλλογής του βιοαερίου, να προταθούν τροποποιήσεις ή βελτίωση του συστήματος

Ε. Αν σκοπός είναι η επίλυση κάποιου προβλήματος, τότε πρέπει να σχηματίζεται μια υπόθεση για την αιτία του προβλήματος και να ελέγχεται με βάση τα δεδομένα για τον έλεγχο της εγκυρότητάς της.

A. Έλεγχος της αξιοπιστίας των δεδομένων

Το πρώτο βήμα στην ερμηνεία των δεδομένων είναι ο έλεγχος του αν τα δεδομένα είναι λογικά. Συχνά παρατηρούνται σφάλματα ή ανωμαλίες στα δεδομένα που τα καθιστούν ακατάλληλα για περαιτέρω χρήση. Οι πηγές των σφαλμάτων περιλαμβάνουν : *Περιορισμούς των οργάνων, λανθασμένη βαθμονόμηση, διαρροές στο σύστημα δειγματοληψίας, ελλιπείς ή λανθασμένες διαδικασίες δειγματοληψίας, κατασκευαστικές ατέλειες του σημείου δειγματοληψίας*. Παραδείγματα αυτών των περιορισμών είναι:

1. Ένδειξη μηδενικής συγκέντρωσης μεθανίου σε ένα καταλυτικού τύπου ανιχνευτή καύσιμου αερίου

Κάποιος θα πίστευε πως η μηδενική αυτή ένδειξη του μεθανίου είναι πολύ καλό δεδομένο. Παρόλα αυτά, αυτό είναι έγκυρο μόνο όταν υπάρχει αρκετή ποσότητα οξυγόνου στο δείγμα για την καταλυτική καύση των υδρογονανθράκων που περιέχονται στο μείγμα. Αν όμως η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι μικρότερη από 10 % τότε δεν επαρκεί για την καύση, και η φαινομενική μηδενική συγκέντρωση του μεθανίου είναι πλασματική

2. Χαμηλές συγκεντρώσεις μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα και υψηλές συγκεντρώσεις οξυγόνου και αζώτου

Υπάρχουν δύο δοκιμές που εφαρμόζονται για τον έλεγχο του αν εισέρχεται αέρας στο δείγμα του αερίου, ή εάν διέρχεται πρώτα διαμέσου του εδάφους και των απορριμμάτων. Στις δοκιμές αυτές γίνεται η παραδοχή ότι ο αέρας που κινείται διαμέσου του εδάφους ή των απορριμμάτων παρέχει οξυγόνο σε αερόβια βακτήρια τα οποία το καταναλώνουν. Στην πρώτη δοκιμή εξετάζεται ο λόγος CH_4 / CO_2 . Για αδιάλυ-

το, καθαρό βιοαέριο ο λόγος κυμαίνεται από 1.3 έως 1.5. Αν ο λόγος είναι μικρότερος από αυτές τις τυπικές τιμές τότε είναι μια ένδειξη αερόβιας δραστηριότητας. Η δεύτερη δοκιμή είναι η σύγκριση του ποσοστού του αζώτου με το ποσοστό του οξυγόνου. Ένας λόγος N_2 / O_2 κοντά στο 3.7 δείχνει πως το δείγμα είναι πιθανώς διαλυμένο με καθαρό αέρα. Η αφαίρεση του αέρα και η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων θα δώσει τις πιθανές συγκεντρώσεις του καθαρού βιοαερίου.

3. Τα μοντέρνα φορητά αναλυτικά όργανα πεδίου μπορούν ορισμένες φορές να περιπλέξουν την ερμηνεία των δεδομένων.

Αυτό οφείλεται στο ότι οι αλγόριθμοί που περιέχονται στα όργανα ορισμένες φορές ξαναυπολογίζουν τις μετρημένες συγκεντρώσεις έτσι ώστε το σύνολο να μην υπερβαίνει το 100 %. Αυτό αφαιρεί από τον τεχνικό τη δυνατότητα να παρατηρήσει πιθανά προβλήματα του οργάνου.

Ορισμένα από τα όργανα πεδίου που χρησιμοποιούνται συνήθως καθώς και τα προβλήματα που παρουσιάζουν, παρατίθενται στη συνέχεια:

- **Ανιχνευτής φλόγας ιονισμού (FID)** – Χωρίς μια ενσωματωμένη στήλη αέριας χρωματογραφίας το όργανο δεν ξεχωρίζει πολλούς υδρογονάνθρακες διαφόρων μοριακών βαρών. Για παράδειγμα ένας όγκος βενζολίου, δίνει παρόμοια αποτελέσματα με έξι όγκους μεθανίου.
- **Υπέρυθρη ακτινοβολία (IR)** – Τα όργανα αυτά είναι πολύλειτουργικά (multi function) και περιέχουν συγκεκριμένους αλγορίθμους. Ορισμένοι ρυπαντές μπορούν να προκαλέσουν σφάλματα στις μετρήσεις.
- **Ανιχνευτής καύσιμων αερίων (CGI)** –Επειδή το όργανο αυτό καίει καταλυτικά το δείγμα, εάν δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο, τα αποτελέσματα θα είναι χαμηλά. Μια αρνητική ένδειξη σε ένα CGI συνήθως είναι ένδειξη υψηλής συγκέντρωσης μεθανίου και χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου.

- **Ανιχνευτής φωτοϊονισμού (PID)** – Τα όργανα αυτά συνήθως χρησιμοποιούνται για παρακολούθηση με σκοπό την ασφάλεια. Οι υψηλές συγκεντρώσεις CH₄ και η υγρασία μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα Σε ένα ΧΥΤΑ χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση χλωριωμένων υδρογονανθράκων στο επεξεργασμένο βιοαέριο. Εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης CH₄ στο δείγμα, δεν ανιχνεύθηκε βινυλοχλωρίδιο συγκέντρωσης 15 – 20 ppm.

Β. Εντοπισμός μη φυσιολογικών τιμών στα δεδομένα

Όταν έχει αποδειχθεί η αξιοπιστία των δεδομένων, σημαντικός είναι ο εντοπισμός μη φυσιολογικών τιμών στα δεδομένα, γεγονός που είναι συνήθως ένδειξη προβλημάτων. Ορισμένοι παράμετροι στους οποίους πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία, καθώς και η σημασία τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-2 που ακολουθεί

Μη φυσιολογικά δεδομένα	Ερμηνεία
Υψηλή θερμοκρασία	Κίνδυνος φωτιάς
Ασυνήθιστα υψηλή συγκέντρωση CH ₄	Πιθανώς προκύπτει από “κακή” μέτρηση
Ασυνήθιστα υψηλή συγκέντρωση CO ₂	Υψηλή αερόβια δραστηριότητα
Συγκέντρωση O ₂ στο βιοαέριο μεγαλύτερη από 2%	Διαρροή από το δειγματολήπτη / αυξημένος κίνδυνος για φωτιά
Το υπολειμματικό ⁴ N ₂ είναι μεγαλύτερο από 20 %	Είσοδος ατμοσφαιρικού αέρα

Πίνακας 7-2: Σημαντικοί παράμετροι κατά την ανάλυση του βιοαερίου

Στην περίπτωση που βρεθούν μη φυσιολογικές τιμές δεδομένων, είναι καλό συνήθως να επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των δεδομένων. Βέβαια οι μη φυσιολογικές τιμές μπορεί να είναι και πραγματικές. Για παράδειγμα, μέτρηση από ένα πηγάδι δειγματοληψίας σε ένα ΧΥΤΑ έδωσε συγκέντρωση CH₄ 80%.

⁴ Το υπολειμματικό άζωτο οφείλεται στην είσοδο του αέρα στον Χ.Υ.Τ.Α. Για παράδειγμα όταν υπάρχουν οι μετρήσεις : Οξυγόνο 2% και άζωτο 30%, το υπολειμματικό άζωτο είναι $RN_2 = 30 - (2 * 3,36) = 22,5 \%$ Η τιμή 3,76 είναι ο λόγος αζώτου προς οξυγόνο στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Γ. Σύγκριση των τωρινών δεδομένων με δεδομένα του παρελθόντος για εύρεση κάποιου συσχετισμού

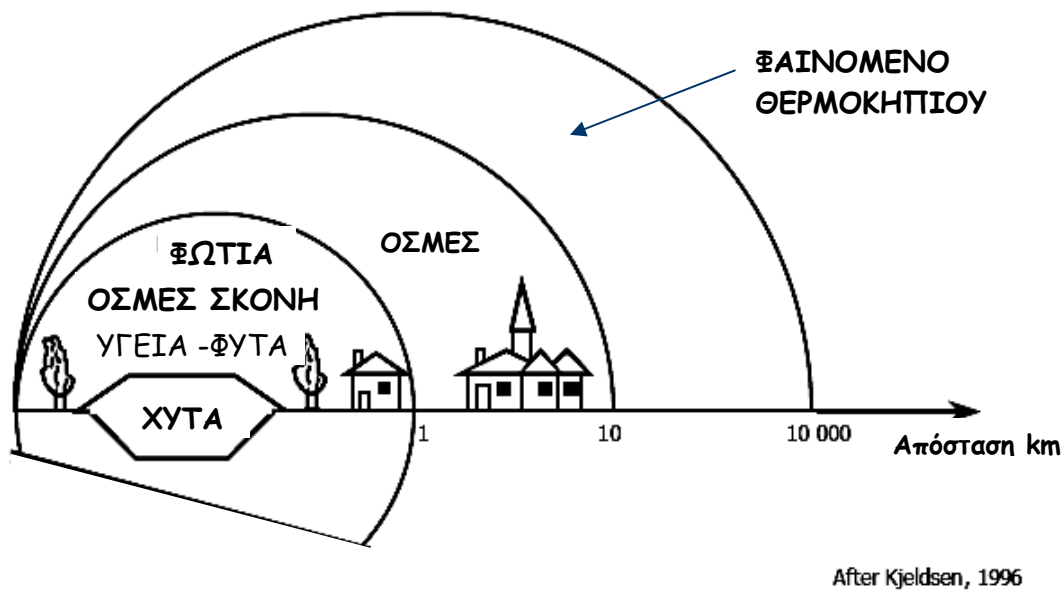
Η εύρεση της τάσης των δεδομένων με τη χρήση γραφημάτων είναι το πιο ισχυρό εργαλείο για τον καθορισμό της απόδοσης του συστήματος συλλογής του βιοαερίου. Για παράδειγμα σε ένα ΧΥΤΑ οι μηνιαίες τιμές των μετρήσεων άρχισαν να δείχνουν μια αύξηση στο υπολειμματικό άζωτο και στη θερμοκρασία του βιοαερίου. Οι τιμές αυτές καθ' αυτές δεν έδειχναν την ύπαρξη κάποιου προβλήματος, αλλά κοιτάζοντας την τάση των δεδομένων φαινόταν πως κάτι συνέβαινε. Πράγματι σε λιγότερο από ένα μήνα ξέσπασε φωτιά.

Η εύρεση της τάσης των δεδομένων έχει και ένα δεύτερο σημαντικό όφελος στην περίπτωση της εκτίμησης δεδομένων από σωλήνες δειγματοληψίας. Η ώρα στην οποία γίνεται η δειγματοληψία μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα. Για παράδειγμα αν οι μετρήσεις του CH₄ γίνουν το πρωί και συγκριθούν με τιμές του CH₄ που έχουν ληφθεί απογευματινές ώρες, φαίνεται πως οι συγκεντρώσεις του CH₄ έχουν την τάση να αυξάνονται τις απογευματινές ώρες λόγω της πτώσης της ατμοσφαιρικής πίεσης. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί περιγράφονται οι ανεξέλεγκτες εκπομπές του βιοαερίου και ιδιαίτερα του CH₄. Ακόμα παρουσιάζονται τρόποι μέτρησης ή εκτίμησής τους.

8.ΑΝΕΞΕΛΕΓΚΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

8.1 Επιδράσεις από την ανεξέλεγκτη εκπομπή του βιοαερίου

Τα αέρια που εκπέμπονται ανεξέλεγκτα από τους ΧΥΤΑ και τους ΧΔΑ έχουν πολλές αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον και επιδρούν σε πολλά επίπεδα όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-1 [20].



Εικόνα 8-1: Τα διάφορα επίπεδα επίδρασης του βιοαερίου στο περιβάλλον [20]

Εκτός από τη μεγάλη χωρική έκταση των συνεπειών των αέριων εκπομπών, είναι μεγάλη και η χρονική έκταση των συνεπειών. Σε σύγκριση με όλες τις άλλες διεργασίες που χρησιμοποιούνται στη διαχείριση των απορριμμάτων, αυτές που λαμβάνουν χώρα μέσα στους χώρους ταφής και οι εκπομπές που δημιουργούν διαρκούν πάρα πολλά χρόνια από τη στιγμή εναπόθεσης των απορριμμάτων (δεκάδες ή εκατοντάδες χρόνια). Όχι μόνο είναι μεγάλη όμως η διάρκεια των αέριων εκπομπών, αλλά και τα αέρια που εκπέμπονται έχουν διαφορετικές διάρκειες ζωής και επιδράσεων. Οι οσμές και η σκόνη, για παράδειγμα, παροδικά φαινόμενα, ενώ ορισμένα από τα ανθρωπογενή ιχνοαέρια του βιοαερίου συσσωρεύονται στους οργανισμούς ή στα φυσικά οικοσυστήματα για πάρα πολλά χρόνια. Το CH_4 μπορεί να προκαλέσει εκρήξεις και

φωτιές, αλλά συμβάλλει σημαντικά και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Στη συνέχεια θα περιγραφθούν οι συνέπειες των σημαντικότερων αερίων του βιοαερίου:

Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Το ατμοσφαιρικό CO_2 είναι ο περιοριστικός παράγοντας στη φωτοσύνθεση και είναι απαραίτητο στα φυτά. Παρόλα αυτά, όταν βρίσκεται σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις στα εδάφη, προκαλεί ασφυξία αφού παίρνει τη θέση του O_2 , ή μπορεί να είναι και τοξικό στα φυτά. Η κανονική συγκέντρωσή του στα εδάφη ποικίλει από 0.04 έως 2%. Μια αυξημένη συγκέντρωση CO_2 σε ένα έδαφος, σύνηθες φαινόμενο στα τελικά εδαφικά καλύμματα των χώρων ταφής, είναι άμεσα τοξικό στις ρίζες των φυτών, ακόμα και αν υπάρχει πολύ οξυγόνο διαθέσιμο. Μια έμμεση επίδραση του CO_2 είναι η πτώση του pH του εδάφους και οι επακόλουθες αλλαγές στη σύστασή του. Η ανάπτυξη των φυτών είναι ομαλή μέχρι το CO_2 να φτάσει συγκέντρωση 5 %.

Το CO_2 έχει καταταγεί ανάμεσα στις τοξικές και στις μη τοξικές ενώσεις και επιδρά με το να παίρνει τη θέση του O_2 στο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα είναι περίπου 250 – 350 ppm. Όταν η συγκέντρωσή του φτάσει το 3% δυσκολεύει η αναπνοή και προκαλούνται πονοκέφαλοι, ενώ όταν φτάσει το 5% υπάρχει κίνδυνος και για την ίδια τη ζωή του ανθρώπου.

Μεθάνιο (CH_4). Το CH_4 είναι ένα πολύ σημαντικό αέριο του θερμοκηπίου. Αν και η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα είναι σχετικά χαμηλή συγκριτικά με το CO_2 (1.75 ppm αντί 300 ppm), το υψηλό του δυναμικό απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας καθιστά τη συνεισφορά του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου 21 φορές μεγαλύτερη από το CO_2 .

Το CH_4 δε θεωρείται γενικά τοξικό στα φυτά ή στους οργανισμούς. Η κύρια επίδρασή του στα εδάφη είναι η μείωση του O_2 που οφείλεται στην οξείδωση του CH_4 . Έτσι αυξάνονται τα επίπεδα του CO_2 αλλά και η θερμοκρασία του εδάφους. Αυτό μπορεί να προκαλέσει το θάνατο των φυτών από ασφυξία.

Ο βασικός κίνδυνος από το CH_4 είναι η πρόκληση πυρκαγιών και εκρήξεων. Το εύρος αναφλεξιμότητας του CH_4 στον αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση

και θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι από 5 έως 15%, και η συγκέντρωση ασφαλείας για περιορισμένα περιβάλλοντα όπου ζουν ή εργάζονται άνθρωποι είναι 1% στον αέρα. Τα εύφλεκτα μίγματα γίνονται εκρηκτικά όταν περιέχονται σε ένα πολύ μικρό όγκο και υπάρχει και μια πηγή φλόγας. Βέβαια σημαντικό είναι τι ότι δεν δημιουργούνται εύφλεκτα μίγματα όταν η συγκέντρωση του O_2 πέσει κάτω από το 12.8%. Επειδή οι ανεξέλεγκτες εκπομπές του CH_4 προκαλούν πολύ σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα θα εξεταστούν εκτενέστερα παρακάτω.

Υδροθείο (H_2S) και οργανοθειϊκές ενώσεις. Οι οργανοθειϊκές ενώσεις, όπως οι μερκαπτάνες για διάφορα άλλα σουλφίδια του άνθρακα, ευθύνονται για την οσμή του βιοαερίου, αλλά επηρεάζουν και το νευρικό σύστημα. Προέρχονται συνήθως από την αποδόμηση των πρωτεϊνών, οι οποίες αποτελούν περίπου το 6% των τροφικών υπολειμμάτων. Αρχικά έχουν μια υψηλή συγκέντρωση αμέσως μετά την απόθεση των απορριμμάτων, αλλά με την κατανάλωση του εύκολα αποδομήσιμου κλάσματος τα επίπεδά τους στο βιοαέριο μειώνονται σημαντικά (περίπου στα 3 ppm).

Το H_2S , είναι πολύ τοξικό και επιδρά αρνητικά στο νευρικό σύστημα. Έχει μια έντονη οσμή και είναι πολύ εύφλεκτο. Το όριο για την πρόκληση οσμών είναι από 5 – 40 ppm. Πάνω από τα 50 ppm παραλύει το σύστημα της όσφρησης, πάνω από 400 ppm επηρεάζει το νευρικό σύστημα και συγκεντρώσεις πάνω από τα 700 ppm μπορούν να προκαλέσουν το θάνατο λόγω αναπνευστικής ανεπάρκειας.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των οργανοθειϊκών ενώσεων και του H_2S είναι η διαβρωτικότητά τους. Όταν το H_2S έρθει σε επαφή με νερό σχηματίζεται H_2SO_4 , το οποίο μπορεί να διαβρώσει τις εγκαταστάσεις άγκυσης του βιοαερίου. Μπορεί ακόμα να προκαλέσει αυξημένες εκπομπές SO_2 κατά την καύση του βιοαερίου. Το H_2S μπορεί να αφαιρεθεί από το βιοαέριο, πριν από τη χρήση του, με βιόφιλτρα, καταλυτική προσρόφηση, χημική οξειδωση ή οξειδωτική πλύση.

NMOCs. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις, **VOCs**, αποτελούν περίπου το 39 % των NMOCs, και είναι γνωστό ότι αντιδρούν με το ηλιακό φως με αποτέλεσμα την παραγωγή όζοντος στην επιφάνεια του εδάφους (ground – level

ozon). Μια και οι VOCs που υπάρχουν στο βιοαέριο δεν είναι εύκολο να μετρηθούν χωριστά, χρησιμοποιούνται οι NMOCs σαν υποκατάστατο [18].

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί ορισμοί των πτητικών οργανικών ενώσεων από διαφορετικούς ερευνητές. Γενικά, είναι γνωστοί ως η τάξη των ενώσεων στις οποίες ο οργανικός άνθρακας ενωμένος με υδρογόνο ή άλλα στοιχεία. Σαν ένα προσεγγιστικό κανόνα, οι περισσότερες οργανικές ενώσεις με λιγότερα από 12 άτομα άνθρακα είναι VOCs και αυτό περιλαμβάνει τους περισσότερους επικίνδυνους αέριους ρυπαντές (HAPs). Ο Dr Nevers το 1995, όρισε τους VOCs ως οργανικά υγρά ή στερεά που έχουν τάσεις ατμών μεγαλύτερες από 0.0007 atm (0.532 mm Hg) και σημεία βρασμού μικρότερα των 260 °C. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) ορίζει ως VOCs όλες τις οργανικές ενώσεις που έχουν τάσεις ατμών μεγαλύτερες από 0.0013 atm σε ορισμένη πίεση και θερμοκρασία. Η EPA ορίζει τους VOCs ως όλες τις οργανικές ενώσεις εκτός του μονοξειδίου του άνθρακα, του διοξειδίου του άνθρακα, του ανθρακικού οξέος, των μεταλλικών καρβιδίων, των ανθρακικών αλάτων, και του ανθρακικού αμμωνίου. Οι VOCs έχουν μεγάλη κινητικότητα στο περιβάλλον και εξαιτίας των υψηλών τάσεων ατμών τους, βρίσκονται κυρίως στην ατμόσφαιρα.

Οι VOCs στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής αστικών Απορριμμάτων αποτελούν λιγότερο από το 1 % του όγκου του βιοαερίου. Οι ενώσεις αυτές περιέχουν υδρογονάνθρακες, ολεφίνες, αρωματικά, και μόρια με αλογόνα, θείο, άζωτο, οξυγόνο, και έτσι πολλές από αυτές είναι τοξικές ή / και προκαλούν δυσάρεστες οσμές. Για αυτό το λόγο οι VOCs προκαλούν προβλήματα που σχετίζονται με την ανθρώπινη υγεία, το σχηματισμό όζοντος και επικίνδυνων αστικών αεροζόλ. Οι επιδράσεις των VOCs στην ανθρώπινη υγεία κυμαίνονται από μια απλή ενόχληση έως σοβαρούς κινδύνους. Ανάλογα με τη δόση και τον τρόπο έκθεσης, μπορούν να επηρεάσουν ορισμένα όργανα του σώματος ή και ολόκληρο το σώμα. Οι VOCs διαλύονται στους λιπώδεις ιστούς και βιοσυσσωρεύονται σε αυτούς. Οι πνεύμονες και το γαστρεντερικό σύστημα απορροφούν γρήγορα αυτές τις ενώσεις.

Οι εκπομπές των VOCs επιδρούν αρνητικά και στην ποιότητα του αέρα. Οι VOCs είναι γνωστοί για τη συμβολή τους στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους και της όξινης εναπόθεσης. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώ-

ρα όταν οι VOCs αναμειγνύονται με οξειδία του αζώτου (NO_x) παρουσία ακτινοβολίας UV, τους μετατρέπουν σε ενώσεις που είναι γενικά γνωστοί ως φωτοχημικοί ρύποι. Αυτές οι αντιδράσεις είναι κυρίως ασταθείς και πολύ ενεργές, και οι διεργασίες τελικά οδηγούν στην παραγωγή όζοντος, αλδεϋδών, υπεροξειδίου του υδρογόνου, οργανικά και ανόργανα οξέα, σωματίδια και PAN. Μεταξύ αυτών των ενώσεων το όζον θεωρείται το πιο σημαντικό εξαιτίας των υψηλών συγκεντρώσεων που φτάνει και το ευρύ φάσμα των επιπτώσεων που έχει στην ανθρώπινη υγεία, στην ανάπτυξη των φυτών και στις κλιματικές αλλαγές.

8.2 Εκπομπές CH_4 από την τελική διάθεση των αστικών απορριμμάτων

8.2.1 Εισαγωγή

Όταν τα απορρίμματα αποτίθενται σε ΧΥΤΑ και ΧΔΑ, το μεγαλύτερο ποσοστό του οργανικού κλάσματος θα αποδομηθεί κατά τη διάρκεια μιας μικρής ή μεγαλύτερης περιόδου, που κυμαίνεται από ένα χρόνο έως και εκατό χρόνια ή περισσότερο. Το μεγαλύτερο τμήμα αυτής της διεργασίας είναι η βιοαποικοδόμηση. Ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο απόθεσης των απορριμμάτων, η βιοαποικοδόμηση γίνεται κάτω από αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες. Τα κύρια προϊόντα της αερόβιας αποικοδόμησης είναι το CO_2 , το H_2O , και η θερμότητα, ενώ τα κύρια προϊόντα της αναερόβιας αποικοδόμησης είναι το CH_4 και το CO_2 . Το CH_4 που παράγεται και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Οι εκτιμώμενες παγκόσμιες ετήσιες εκπομπές CH_4 από ΧΥΤΑ και ΧΔΑ κυμαίνονται από 20 – 40 εκατομμύρια τόνους, και το μεγαλύτερο ποσοστό τους προέρχεται από τις βιομηχανοποιημένες χώρες. Εκτιμάται ότι αυτές οι εκπομπές του CH_4 αποτελούν το 5 – 20 % των ετήσιων παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών μεθανίου, που ισούται με το 1 – 4 % των συνολικών ετήσιων ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές από αναπτυσσόμενες χώρες και χώρες με οικονομίες σε μεταβατικό στάδιο θα αυξηθούν στο άμεσο μέλλον εξαιτίας της αύξησης του αστικού πληθυσμού και

της αύξησης της κατά κεφαλήν παραγωγής αστικών απορριμμάτων λόγω της ανόδου του βιοτικού επιπέδου [21].

8.2.2 Μέθοδοι μέτρησης των εκπομπών του CH₄

Οι κύριες μέθοδοι μέτρησης των εκπομπών του βιοαερίου και ιδιαίτερα του CH₄ είναι [18] :

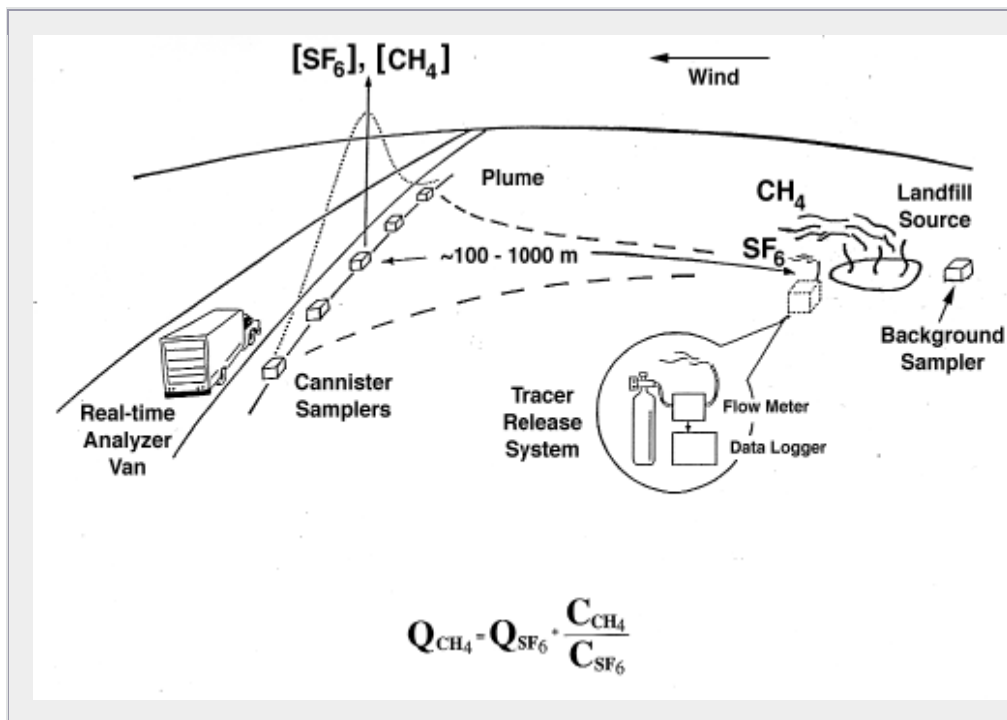
- Μέτρηση στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ. με ένα στατικό θάλαμο (static chamber method)
- Μέθοδος του ιχνηθέτη, η οποία είναι μια μέθοδος “πάνω από το έδαφος” (above – ground tracer method)
- Μικρομετεωρολογική μέθοδος, η οποία είναι και αυτή μια μέθοδος “πάνω από το έδαφος”
- Μέθοδος της κλίσης της συγκέντρωσης, η οποία είναι μια υπεδάφια μέθοδος δειγματοληψίας.

Συγκρίνοντας τις μεθόδους μέτρησης της πυκνότητας ροής του βιοαερίου από ΧΥΤΑ, η πιο κατάλληλη φαίνεται να είναι αυτή του στατικού θαλάμου για τους ακόλουθους λόγους:

- Είναι συγκριτικά η πιο άμεση μέθοδος μέτρησης της πυκνότητας ροής και η πιο εύκολη στη χρήση
- Παρέχει πιο αντιπροσωπευτικές πληροφορίες όσον αφορά τις εκπομπές του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα
- Ενδείκνυται για χρήση σε όλους τους ΧΥΤΑ
- Δεν επηρεάζεται σημαντικά από άλλες πηγές εκπομπών όπως γειτονικά εργοστάσια, διαρροές φυσικού αερίου, κλιματικές συνθήκες, και εγκαταστάσεις επεξεργασίας.

Παρόλα αυτά η μέθοδος χρονικής συσχέτισης του ιχνηθέτη (Time Correlation Tracer method), στην οποία χρησιμοποιείται η Υπέρυθρη Φασματοσκοπία με μετασχηματισμούς Fourier (FTIR) είναι μια αναπτυσσόμενη και

πολλά υποσχόμενη τεχνική για τη μέτρηση της σύστασης του βιοαερίου και της πυκνότητας ροής (Εικόνα 8-2).



Εικόνα 8-2: Χρήση ιχνηθέτη (SF6) για τη μέτρηση των εκπομπών CH₄ [22]

Επειδή όμως η μέτρηση των εκπομπών του βιοαερίου δεν αποτελεί σκοπό της παρούσας εργασίας δεν κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω ανάλυσή τους

8.2.3 Μέθοδοι εκτίμησης εκπομπών του CH₄

Οι κατευθυντήριες οδηγίες του IPCC περιγράφουν δυο κύριες μεθόδους υπολογισμού των εκπομπών CH₄ από ΧΥΤΑ και ΧΔΑ :

- 1) Την εξ' ορισμού μεθοδολογία του IPCC (default IPCC methodology), που βασίζεται στη θεωρητική παραγωγή CH₄ (εξίσωση ισοζυγίου μάζας).
- 2) Τις θεωρητικές μεθοδολογίες κινητικής πρώτης τάξεως, από τις οποίες το IPCC εισάγει το μοντέλο αποσύνθεσης πρώτης τάξης FOD (First Order decay model).

Η κύρια διαφορά ανάμεσα στις δύο αυτές μεθόδους είναι ότι η πρώτη μέθοδος δεν λαμβάνει υπ' όψη της τη χρονική παράμετρο στη διάθεση των

απορριμμάτων και τις διεργασίες αποδόμησης, καθώς υποθέτει ότι όλη η ποσότητα του CH₄ απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια του έτους απόθεσης των απορριμμάτων. Οι εκπομπές του CH₄ συναρτήσει του χρόνου, παρουσιάζονται στη δεύτερη μέθοδο. Μόνο αν οι ετήσιες ποσότητες και η σύνθεση των απορριμμάτων που αποτίθενται, καθώς και ο τρόπος απόθεσής τους, είναι αμετάβλητες για μεγάλες περιόδους, η πρώτη μέθοδος θα παράγει καλές εκτιμήσεις των ετήσιων εκπομπών CH₄. Οι αυξανόμενες ποσότητες των αποτιθέμενων απορριμμάτων θα οδηγήσουν σε υπερεκτίμηση των ετήσιων εκπομπών, ενώ οι ποσότητες των απορριμμάτων που μειώνονται θα οδηγήσουν αντίστοιχα σε υποεκτίμηση των ετήσιων εκπομπών. Συνήθως η δεύτερη μέθοδος δίνει πιο ακριβείς εκτιμήσεις των ετήσιων εκπομπών CH₄.

8.2.3.1 Η εξ' ορισμού μέθοδος του IPCC (default IPCC method)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εξίσωση (8-1) [10]:

Εκπομπές

$$\text{CH}_4 \text{ (Gg/yr)} = (\text{MSW}_T * \text{MSW}_F * \text{MCF} * \text{DOC} * \text{DOC}_F * F * 16/12) * (1 - \text{OX}) - R \quad (8-1)$$

όπου :

MSW_T : συνολική ποσότητα των παραγόμενων απορριμμάτων (Gg/yr)

MSW_F : κλάσμα των απορριμμάτων που καταλήγει σε χώρους διάθεσης

MCF : συντελεστής διόρθωσης CH₄ (κλάσμα)

DOC : κλάσμα αποδομήσιμου οργανικού άνθρακα (kg C / kg MSW)

DOC_F : κλάσμα του DOC που έγινε CH₄

F : κλάσμα του CH₄ στο βιοαέριο (IPCC default 0.5)

16/12 : μετατροπή του C σε CH₄

OX : κλάσμα του CH₄ που οξειδώνεται (IPCC default 0)

R : ανακτώμενο CH₄ (Gg/yr)

Η μέθοδος υποθέτει πως όλες οι δυνητικές εκπομπές CH₄ απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια του ίδιου έτους που αποτίθενται τα απορρίμματα. Η μεθοδολογία αυτή είναι απλή και οι υπολογισμοί των εκπομπών απαιτούν μόνο την εισαγωγή περιορισμένου αριθμού παραμέτρων , για τους οποίους το

IPCC παρέχει ενδεικτικές τιμές, όταν δεν υπάρχουν συγκεκριμένα δεδομένα πεδίου.

Το IPCC προτείνει διάφορες εξ' ορισμού τιμές των παραμέτρων (default values) οι οποίες είναι:

MSW_T : Μέσα από πίνακες παρέχονται τιμές ειδικής παραγωγής απορριμμάτων (σε kg /κάτοικο /ημέρα)

MSW_F : Μέσα από πίνακες παρέχονται τιμές ειδικής ταφής απορριμμάτων (σε kg /κάτοικο /ημέρα)

MCF : Παρέχονται τρεις τιμές που κυμαίνονται από 1 έως 0.4, ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης του χώρου διάθεσης (γενική τιμή 0.6)

DOC : Μέσα από πίνακες (πίνακας 8-2) παρέχονται τιμές του DOC για λίγες χώρες, αλλά

δίνεται και μια εξίσωση υπολογισμού του με βάση το κλάσμα των απορριμμάτων

DOC_F : Από τη θεωρητική εξίσωση του Tabasaran, **DOC_F = 0.014*T + 0.28**, όπου T = η θερμοκρασία των απορριμμάτων. Η εξ' ορισμού τιμή του IPCC είναι 0.77

F : Η εξ' ορισμού τιμή του IPCC είναι 0.5

OX : Η εξ' ορισμού τιμή του IPCC είναι 0

8.2.3.2 Θεωρητικές μεθοδολογίες αποσύνθεσης πρώτης τάξης

Το μοντέλο παρουσιάζεται μέσα από τρεις εξισώσεις. Η πρώτη εξίσωση εφαρμόζεται για έναν ή για μια επιλογή από ορισμένους ΧΥΤΑ και ΧΔΑ

$$Q = L_o * R * (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (8-2)$$

όπου

Q : παραγωγή του CH₄ το τρέχον έτος (m³/yr)

L_o : δυναμικό παραγωγής CH₄ (m³ CH₄/ tn απορριμμάτων)

R : μέσος ετήσιος ρυθμός αποδοχής απορριμμάτων κατά τη διάρκεια της

ενεργής ζωής του ΧΥΤΑ ή του ΧΔΑ (Mg /yr)

k : σταθερά του ρυθμού παραγωγής CH₄ (1/yr)

c : χρόνος από το κλείσιμο του ΧΥΤΑ ή του ΧΔΑ (yr)

t : χρόνος από το άνοιγμα του ΧΥΤΑ ή του ΧΔΑ (yr)

Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι το παραπάνω μοντέλο αρχικά σχεδιάστηκε για τον υπολογισμό της παραγωγής του βιοαερίου και όχι για τις εκπομπές του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα. Ενδέχεται να υπάρχουν και άλλα φαινόμενα που επηρεάζουν την τύχη του βιοαερίου, όπως η διαμήκης μετανάστευση, η δέσμευσή του, και η μικροβιακή του αποδόμηση στο εδαφικό κάλυμμα. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα που να περιγράφουν ικανοποιητικά τα παραπάνω φαινόμενα, και έτσι είναι γενικά αποδεκτό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του παραγόμενου βιοαερίου εκπέμπεται διαμέσου της επιφάνειας του χώρου ταφής. Ιδιαίτερα για χώρους ταφής χωρίς συστήματα συλλογής βιοαερίου και τελικό εδαφικό κάλυμμα, το σφάλμα ελαχιστοποιείται.

Όταν υπολογίζονται εκπομπές σε τοπικό ή εθνικό επίπεδο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (8-3), που ακολουθεί, για την παραγωγή CH₄ το έτος T από όλα τα απορρίμματα που ενταφιάστηκαν το έτος x

$$Q_{T,x} = k * R_x * L_o * e^{-k * (T-x)} \quad (8-3)$$

όπου

Q_{T,x} : ποσότητα του CH₄ που παρήχθη το έτος T από τα απορρίμματα R_x (Mg)

x : έτος απόθεσης των απορριμμάτων

R_x : ποσότητα των απορριμμάτων που ενταφιάστηκαν το έτος x

T : τρέχον έτος

Για τον υπολογισμό όλων των εκπομπών το έτος T_a από τα απορρίμματα που ενταφιάστηκαν τα προηγούμενα έτη, μπορεί να λυθεί η εξίσωση (8-3) για όλες τις τιμές R_x και να αθροιστούν τα αποτελέσματα με χρήση της εξίσωσης (8-4) που ακολουθεί :

$$Q_T = \sum Q_{T,x} \quad \text{για } x = \text{από το έτος ανοίγματος έως το τρέχον έτος } T \quad (8-4)$$

όπου

Q_T : συνολικές εκπομπές το έτος T από τα απορρίμματα που ενταφιάστηκαν τα προηγούμενα έτη (συμπεριλαμβανομένου του έτους T)

Δεν δίνονται συνιστώμενες εξ' ορισμού τιμές για παράγοντες όπως το k και το L_o , αλλά μόνο ένα εύρος τιμών : $L_o < 100 - > 200 \text{ Nm}^3 / \text{Mg}$ και $k = 0.005 - 0.4$

Τροποποιήσεις του μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης (FOD)

Πολλές χώρες έχουν τροποποιήσει το μοντέλο FOD εισάγοντας συμπληρωματικούς παράγοντες στις παραπάνω εξισώσεις.

Ένα μοντέλο που εφαρμόστηκε στη Νορβηγία το 1998 έχει ως εξής:

$$Q_{T,x} = k * MSW_{T(x)} * MSW_{F(x)} * MCF_{(x)} * L_{o(x)} * e^{-k(T-x)} * F \quad (8-5)$$

όπου

$Q_{T,x}$: ποσότητα του CH_4 που παρήχθη το τρέχον έτος από τα απορρίμματα που ενταφιάστηκαν το έτος x

T : τρέχον έτος (το έτος που υπολογίζονται οι εκπομπές)

x : έτος της απόθεσης των απορριμμάτων

$L_{o(x)}$: $\text{DOC} * \text{DOC}_F$ για το έτος x ($\text{Gg CH}_4 / \text{Gg απορριμμάτων}$)

k : $\ln(2) / t_{1/2}$ (1/yr)

$t_{1/2}$: περίοδος ημιζωής για τη διεργασία της αποδόμησης (yr)

Οι όροι F , $MSW_{T(x)}$, $MSW_{F(x)}$, $MCF_{(x)}$ είναι οι ίδιοι με αυτούς της εξίσωσης (8-1), αλλά υπολογίζονται για το έτος x.

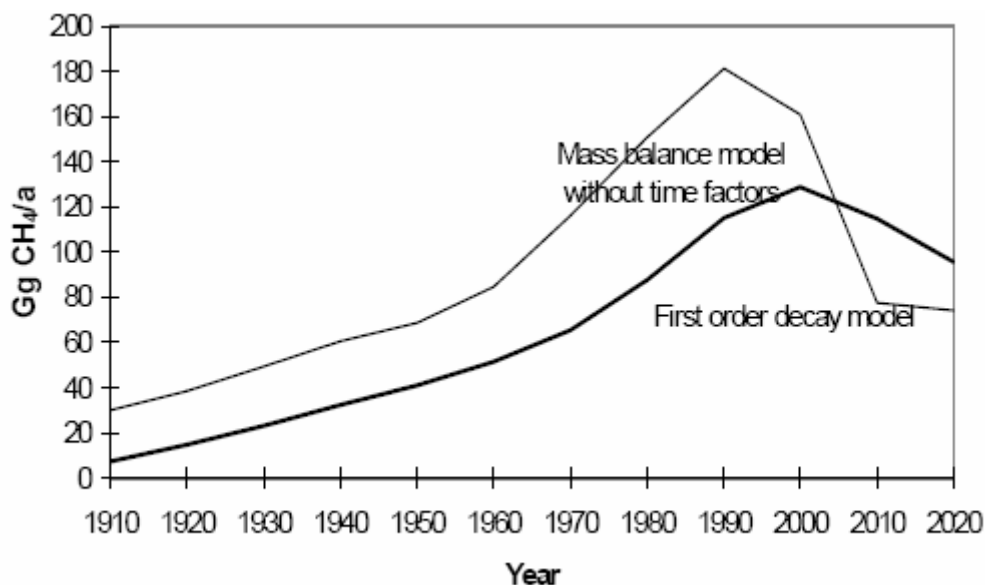
Για τον υπολογισμό όλων των εκπομπών το έτος T από τα απορρίμματα που ενταφιάστηκαν τα προηγούμενα έτη, μπορεί να λυθεί η εξίσωση (8-5) για όλα τα έτη και να αθροιστούν τα αποτελέσματα με χρήση της εξίσωσης (8-4).

Για τον υπολογισμό των καθαρών εκπομπών CH₄ (Q_{Net,T}), πρέπει να αφαιρεθούν από το Q_T οι ποσότητες του CH₄ που ανακτώνται ή οδηγούνται σε πυρσό το έτος T (R_T), καθώς και ποσότητες που οξειδώνονται. Έτσι προκύπτει η εξίσωση (8-6):

$$Q_{Net,T} = (Q_T - R_T) * (1 - OX) \quad (8-6)$$

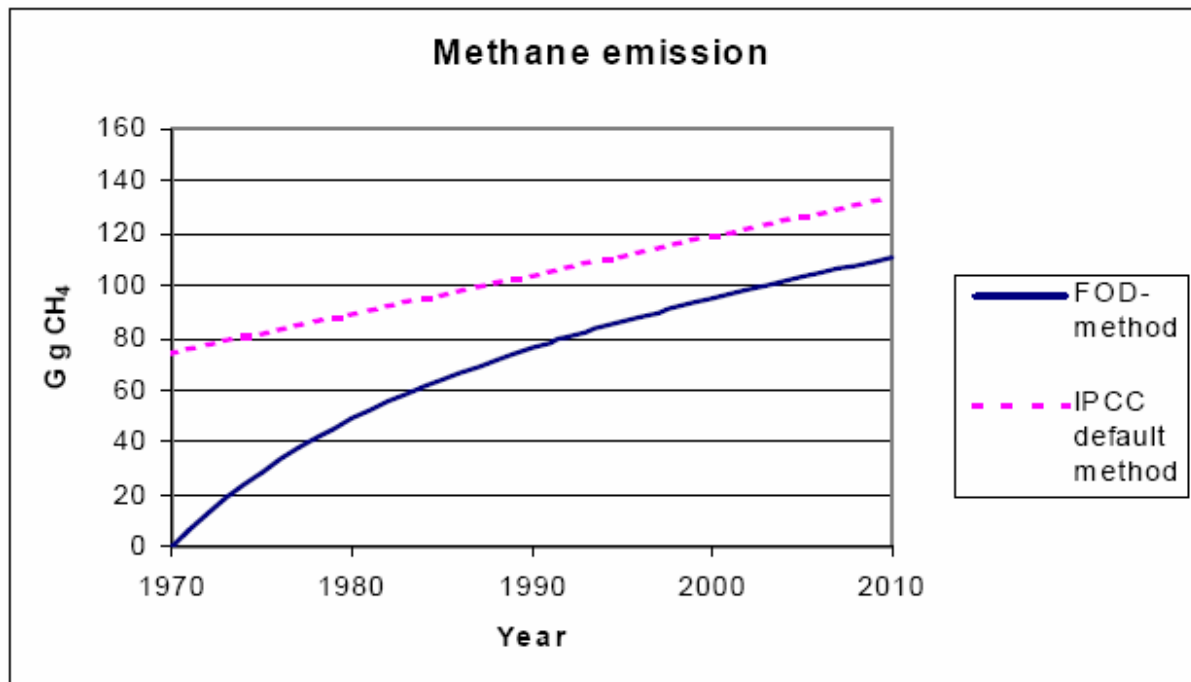
8.2.4 Σύγκριση των μεθόδων υπολογισμού των εκπομπών

Η εξ' ορισμού μέθοδος του IPCC (1) και το μοντέλο κινητικής πρώτης τάξης (2) δεν παρέχουν συγκρίσιμες εκτιμήσεις των ετήσιων εκπομπών. Η πρώτη μέθοδος παρέχει εκτιμήσεις των δυνητικών εκπομπών CH₄ χωρίς να λαμβάνει υπ' όψη του χρονικούς συντελεστές. Το μοντέλο κινητικής πρώτης τάξης από την άλλη μεριά, υπολογίζει τις πραγματικές ετήσιες εκπομπές CH₄. Οι διαφορές στα αποτελέσματα που εξάγονται από τις δύο μεθόδους παρουσιάζονται στο Γράφημα (8-1), όπου δείχνει τις εκπομπές CH₄ από ένα χώρο απόθεσης απορριμμάτων στη Φιλανδία. Η μέθοδος 1 προβλέπει περίπου 60% (το 1990) περισσότερες εκπομπές CH₄ από τη μέθοδο 2.



Γράφημα 8-1: Εκπομπές CH₄ με τις μεθόδους A και B σε περίπτωση αύξησης και μετά μείωσης της ποσότητας των αποτιθέμενων απορριμμάτων [10]

Στο Γράφημα (8-2), παρουσιάζονται οι εκπομπές CH₄ από τον ίδιο χώρο απόθεσης απορριμμάτων στη Φιλανδία αλλά γίνεται η παραδοχή της συνεχούς αύξησης του ρυθμού απόθεσης απορριμμάτων.



Γράφημα 8-2: Εκπομπές CH₄ με τις μεθόδους A και B σε περίπτωση αύξησης της ποσότητας των αποτιθέμενων απορριμμάτων [10]

Μακροπρόθεσμα οι συνολικές εκπομπές που υπολογίζονται και με τις δύο μεθόδους είναι παρόμοιες παρότι οι ετήσιες διαφέρουν σημαντικά. Μάλιστα σε ένα δοκιμαστικό υπολογισμό για μια μεγάλη χρονική περίοδο (60 χρόνια) με τις δύο μεθόδους, οι εκτιμήσεις των εκπομπών CH₄ της εξ' ορισμού μεθόδου του IPCC (1) ήταν μόνο 5 % υψηλότερες από τη μέθοδο της κινητικής πρώτης τάξης.

8.2.5 Βελτίωση του μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης

Το 2000 το IPCC, πρότεινε άλλη μια εξίσωση μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης που βελτιώνει τις εξισώσεις που είχε προτείνει το 1996 όσον αφορά τη διάσταση του χρόνου. Η εξίσωση αυτή είναι [13]:

$$CH_{4(t)} = [Q_t - R_t] * (1 - OX) \quad (8-7)$$

όπου

$$Q_t = \sum_x [(A * k * MSW_{T(x)} * MSW_{F(x)} * L_{o(x)}) * e^{-k(t-x)}]$$

και (8-8)

- Q_t** = παραγωγή του CH₄ το έτος t (Gg / yr)
- x** = χρόνια για τα οποία προστίθενται δεδομένα (yr)
- A** = (1-e^{-k}) / k Παράγοντας διόρθωσης του αθροίσματος
- k** = σταθερά του ρυθμού παραγωγής CH₄ (1/yr)
- MSW_{T(x)}** = συνολική ποσότητα των παραγόμενων απορριμμάτων το έτος x (Gg/yr)
- MSW_{F(x)}** = κλάσμα των απορριμμάτων που καταλήγει σε χώρους διάθεσης το έτος x
- L_{o(x)}** = ειδική παραγωγή CH₄ = (**MCF_(x)** * **DOC_(x)** * **DOC_F** * **F** * **16/12**
- MCF_(x)** = συντελεστής διόρθωσης μεθανίου (κλάσμα)
- DOC_(x)** = κλάσμα αποδομήσιμου οργανικού άνθρακα (kg C / kg MSW)
- DOC_F** = κλάσμα του DOC που έγινε CH₄
- F** = κλάσμα του CH₄ στο βιοαέριο (IPCC default 0.5)
- 16/12** = μετατροπή του C σε CH₄
- R_(t)** = ανάκτηση CH₄ το έτος t (Gg / yr)
- OX** = παράγοντας οξειδωσης

8.2.6 Επιλογή συντελεστών εκπομπής για όλες τις μεθόδους

8.2.6.1 Συντελεστές εκπομπής στην εξ 'ορισμού μέθοδο του IPCC (ισοζύγιο μάζας)

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τους παρακάτω συντελεστές εκπομπής:

MCF – Συντελεστής διόρθωσης CH₄

Τα αστικά απορρίμματα μπορούν να αποτεθούν σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών πεδίου. Οι μοντέρνοι ΧΥΤΑ χαρακτηρίζονται από συνθήκες ευνοϊκές για αναερόβια αποδόμηση:

- Μεγάλο βάθος ταφής (ελάχιστο 10 μέτρα)
- Υψηλή συμπίεση με ειδικά μηχανήματα
- Σωστά σχεδιασμένα συστήματα συλλογής των στραγγισμάτων και των όμβριων υδάτων
- Έλεγχος της ποσότητας και της σύστασης των εισερχομένων στο χώρο απορριμμάτων
- Συχνή επικάλυψη της επιφάνειας με χώμα
- Αποφυγή των πυρκαγιών
- Αποφυγή της εισόδου ζώων στο χώρο ταφής
- Εγκατάσταση συστήματος συλλογής, ελέγχου, ανάκτησης του βιοαερίου.

Αντιθέτως, οι συνθήκες που επικρατούν στους ανεξέλεγκτους χώρους ταφής απορριμμάτων (χωματερές) ευνοούν την αερόβια αποδόμηση των απορριμμάτων και χαρακτηρίζονται από συνθήκες όπως:

- Μικρά βάθη ταφής (< 5 μέτρων), τα οποία είναι ευνοϊκά για αερόβια αποδόμηση
- Φτωχός μηχανολογικός εξοπλισμός με αποτέλεσμα τη μικρή συμπίεση των απορριμμάτων (ευνοϊκό για την αερόβια αποδόμηση)
- Καθόλου ή περιορισμένη κάλυψη της επιφάνειας (ευνοϊκό για την αερόβια αποδόμηση)
- Αναμόχλευση των απορριμμάτων από ανθρώπους και ζώα
- Συνθήκες αερόβιας αποδόμησης στα περισσότερα τμήματα του χώρου ταφής
- Συχνές φωτιές, πολλές από τις οποίες προκαλούνται εσκεμμένα για τη μείωση του όγκου των απορριμμάτων

Στους περισσότερους χώρους ταφής επικρατούν συνθήκες ανάμερα στις δυο παραπάνω ακραίες περιπτώσεις. Οι κατευθυντήριες οδηγίες του

IPCC παρουσιάζουν τις παρακάτω εξ' ορισμού τιμές για το συντελεστή που αναφέρεται στις συνθήκες του χώρου ταφής:

- | | |
|--|-----------|
| ➤ Ελεγχόμενοι χώροι | MCF = 1 |
| ➤ Μη ελεγχόμενοι, βαθιοί χώροι (≥ 5 μέτρα) | MCF = 0,8 |
| ➤ Μη ελεγχόμενοι, ρηχοί χώροι (< 5 μέτρα) | MCF = 0,4 |
| ➤ Μη καθορισμένοι χώροι | MCF = 0,6 |

Η μείωση των εκπομπών που προκαλεί ο συντελεστής MCF οφείλεται σε δύο συνθήκες:

1. Οι χώροι διάθεσης απορριμμάτων επιτρέπουν την αερόβια αποδόμηση με αποτέλεσμα να εκπέμπονται άλλα αέρια αντί για CH₄. Αυτό ίσως οφείλεται στη χαλαρή συμπίεση των απορριμμάτων, στο μικρό βάθος των χώρων ταφής, στην απουσία εδαφικής κάλυψης, και συνηθέστερα στο συνδυασμό όλων αυτών των συνθηκών.
2. Οι φωτιές στους χώρους ταφής μειώνουν άμεσα την οργανική ύλη με αποτέλεσμα την περιορισμένη εκπομπή CH₄.

DOC – Ποσοστό του αποδομήσιμου οργανικού άνθρακα

Οι κατευθυντήριες οδηγίες του IPCC παρέχουν την παρακάτω εξίσωση

$$DOC = 0.4 * (A) + 0.17 * (B) + 0.15 * (\Gamma) + 0,3 * (\Delta) \quad (8-9)$$

Οι εξ' ορισμού τιμές του DOC σε σχέση με τα Α, Β, Γ, Δ, παρουσιάζονται στον Πίνακα (8-1)

Κλάσμα απορριμμάτων	DOC % κατά βάρος στα φρέσκα απορρίμματα
A. Χαρτί και ύφασμα (%)	40
B. Υπολείμματα κήπου (%)	17
Γ. Υπολείμματα τροφών (%)	15
Δ. Ξύλο (%)	30

Πίνακας 8-1: Τιμές του DOC στα κύρια κλάσματα των απορριμμάτων

Αυτά τα στοιχεία παρέχουν μια καλή εκτίμηση της τιμής του DOC, αλλά είναι σημαντικό να εξεταστούν τα παρακάτω θέματα:

- Το άθροισμα των A + B + Γ + Δ δε θα πρέπει να είναι 1 (100%), καθώς στα απορρίμματα περιέχονται και άλλα υλικά όπως μέταλλα, πλαστικά, γυαλί κ. ά
- Πρέπει να εξεταστεί αν θα συμπεριληφθούν ορισμένα πλαστικά στις παραπάνω κατηγορίες απορριμμάτων, όπως για παράδειγμα το πολυαιθυλένιο το οποίο έχει υψηλό ποσοστό οργανικού άνθρακα και βιοαποικοδομείται σε πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Δεδομένα παραγωγής, σύστασης και ταφής απορριμμάτων για διάφορες χώρες				
Χώρα	Ρυθμός παραγωγής απορριμμάτων (kg / κατ / ημέρα)	Ποσοστό των απορριμμάτων που ενταφιάζονται	Ποσοστό DOC στα απορρίμματα	Ρυθμός απόθεσης απορριμμάτων (kg / κατ / ημέρα)
ΗΠΑ	2	0,62	0,18 - 0,21	1,24
Αυστραλία	1,26	1	0,15	1,26
Αγγλία	1,9	0,9	0,1	1,7
Γερμανία	0,99	0,66	----	0,65
Ελλάδα	0,85	0,93	----	0,79
Ελβετία	1,1	0,23	----	0,25

Πίνακας 8-2: Δεδομένα παραγωγής, σύστασης και ταφής απορριμμάτων για διάφορες χώρες [10]

DOC_F – Ποσοστό του αποδομήσιμου οργανικού άνθρακα που αφομοιώνεται

Ο συντελεστής αυτός βασίζεται σε ένα θεωρητικό μοντέλο όπου οι διακυμάνσεις εξαρτώνται από τη θερμοκρασία στην αναερόβια ζώνη του χώρου ταφής:

$$\text{DOC}_F = 0.014 * T + 0.28 \quad (8-10)$$

Ο συντελεστής αυτός κυμαίνεται από 0,42 για 10 °C έως 0,98 για 50 °C. Μάλιστα σε ορισμένους ΧΥΤΑ μεγάλου βάθους (>20 μέτρων), έχουν μετρηθεί θερμοκρασίες αερίων πάνω από 50 °C σε πηγάδια εξαγωγής μεγάλης παραγωγικότητας (σίγουρα αναερόβιες συνθήκες).

Βέβαια, σήμερα, οι τιμές αυτού του συντελεστή είναι υπό εξέταση και ο IPCC προτείνει μια μέση τιμή της τάξης του 0,5. Παρόλα αυτά, δεν είναι ξεκάθαρο σε ποιο βαθμό η θερμοκρασία στην αναερόβια ζώνη επηρεάζει το ποσοστό του DOC που μετατρέπεται σε CH₄, κατά τη διάρκεια των διεργασιών αποδόμησης. Η θερμοκρασία επηρεάζει, ως γνωστόν, την ταχύτητα των διεργασιών, που στην περίπτωση του μοντέλου κινητικής πρώτης τάξης αφορά την επιλογή του χρόνου ημιζωής για την αποδόμηση ($t_{1/2}$).

Για το μοντέλο του ισοζυγίου μάζας, πρέπει να εξεταστεί πόσο ρεαλιστική είναι η επίδραση της θερμοκρασίας. Αν για παράδειγμα μόνο το 56% του DOC μετατρέπεται σε CH₄ και CO₂ κατά τη διάρκεια των διεργασιών (20 °C), τότε το 44% αποθηκεύεται στα απορρίμματα (ως σταθερή οργανική ύλη), ή αποδομείται κάτω από απροσδιόριστες και μάλλον μη βιολογικές διεργασίες, ή αποδομείται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από αυτό που εξάγεται από τη σχέση του DOC_F.

F – Ποσοστό του CH₄ στο βιοαέριο

Το βιοαέριο στην κύρια αναερόβια φάση, αποτελείται κυρίως από CH₄, CO₂ και από ένα μεγάλο αριθμό αερίων σε ίχνη, που συνήθως αποτελούν λιγότερο από το 1 % του όγκου του βιοαερίου. Μετά από δειγματοληψίες και πειράματα πεδίου έχει βρεθεί ότι το βιοαέριο περιέχει περίπου από 55 % CH₄ και 45 % CO₂. Η εξ' ορισμού τιμή του IPCC είναι 0.5 αν δεν υπάρχουν συγκεκριμένα στοιχεία πεδίου.

ΟΧ – Συντελεστής οξείδωσης

Η εξ' ορισμού τιμή του IPCC είναι 0, αν και τελευταία υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την πραγματική τιμή του συντελεστή αυτού. Πολλά πειράματα πεδίου, συμπεριλαμβανομένων μετρήσεων εκπομπών ανά μονάδα επιφάνειας (flux measurements), δείχνουν ξεκάθαρα ότι υπάρχει το φαινόμενο της οξείδωσης, αλλά τα αποτελέσματα δεν είναι συστηματικά ή σταθερά. Έχει

όμως βρεθεί ότι το φαινόμενο της οξειδωσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Συμπεράσματα

Οι εκπομπές που υπολογίζονται με την εξ' ορισμού μέθοδο του ισοζυγίου μάζας δεν αντανakλούν τις αλλαγές της σύστασης, των ποσοτήτων και των τρόπων διάθεσης των απορριμμάτων στο χρόνο. Πρόσφατα έχει προταθεί από διάφορους ερευνητές η προσθήκη ενός συντελεστή διόρθωσης, με σκοπό να συμπεριληφθούν οι αλλαγές στις ποσότητες των απορριμμάτων που ενταφιάζονται συναρτήσει του χρόνου, και να εισαχθούν οι επιδράσεις του χρόνου αποδόμησης στις διεργασίες. Η μαθηματική έκφραση του συντελεστή είναι :

$$\text{Συντελεστής διόρθωσης} = [1 / (1 + R)^T] * \{1 - 1 / [T * \ln(1 + R)]\} \quad (8-11)$$

όπου

R : ετήσιος ρυθμός αύξησης των αποτιθέμενων απορριμμάτων

T : διάρκεια της παραγωγής CH₄

8.2.6.2 Συντελεστές εκπομπής που σχετίζονται με τη μέθοδο κινητικής πρώτης τάξης

Υπάρχουν δύο συντελεστές εκπομπής στο μοντέλο FOD του IPCC που δεν έχουν συζητηθεί ακόμα : Το δυναμικό παραγωγής CH₄ ή η ειδική παραγωγή CH₄, L₀ και η σταθερά του ρυθμού παραγωγής CH₄, k.

L₀ – Ειδική παραγωγή CH₄

Οι κατευθυντήριες οδηγίες του IPCC αναφέρονται σε ένα εύρος τιμών από < 100 m³/Mg απορριμμάτων έως και περισσότερο από 200 m³/Mg. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το DOC, DOC_F, και τις συνθήκες που επικρατούν στο ΧΥΤΑ. Ο συντελεστής αυτός αντιστοιχεί με το γινόμενο MCF * DOC * DOC_F * F * 16/12 της εξ' ορισμού μεθόδου του ισοζυγίου μάζας.

k – Σταθερά του ρυθμού παραγωγής CH₄

Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τη σύσταση των απορριμμάτων και τις συνθήκες του πεδίου, και περιγράφει το ρυθμό της διεργασίας της αποδόμη-

σης. Οι κατευθυντήριες οδηγίες του IPCC αναφέρονται σε ένα εύρος τιμών από 0,005 έως και 0,4.

8.2.6.3 Συντελεστές εκπομπής που συνδέονται με το τροποποιημένο μοντέλο κινητικής πρώτης τάξης.

Οι βασικές εξισώσεις του τροποποιημένου μοντέλου κινητικής είναι οι (8-5) και (8-6). Ο συντελεστής εκπομπής της μεθόδου αυτής είναι το k .

k – Σταθερά του ρυθμού παραγωγής CH_4

Ο τύπος που δίνει το k είναι $k = \ln(2) / t_{1/2}$, όπου $t_{1/2}$ είναι ο μέσος χρόνος για αποδόμηση 50 %. Ο χρόνος ημιζωής $t_{1/2}$ κυμαίνεται συνήθως από 4 έως 10 χρόνια για την ταφή των αστικών απορριμμάτων, ενώ σε θερμά κλίματα κυμαίνεται σε χαμηλότερες τιμές. Η αποδόμηση είναι διαφορετική για το κάθε κλάσμα των απορριμμάτων. Τα οργανικά υλικά, όπως οι τροφές, αποδομούνται πολύ γρήγορα, ενώ υλικά όπως το χαρτί και το ξύλο αποδομούνται με αργό ρυθμό. Επιπροσθέτως, η επιλογή του χρόνου αποδόμησης αντανακλά το αν οι φυσικοχημικές συνθήκες (χημική σύσταση, υγρασία, κ.ά) μέσα στο χώρο ταφής ευνοούν την αποδόμηση. Αν για παράδειγμα ο χώρος ταφής είναι μερικώς γεμισμένος με νερό, τότε ο χρόνος αποδόμησης θα αυξηθεί σημαντικά.

Αν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για τα κλάσματα των απορριμμάτων, μπορεί να υπολογιστεί ένας συνολικός χρόνος ημιζωής. Αλλιώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ορισμένες τιμές από τη βιβλιογραφία, ανάλογα με το κλίμα και τη σύσταση των απορριμμάτων.

Μετά από πειράματα έχει υπολογιστεί πως μια τιμή του $t_{1/2}$ είναι ρεαλιστική για τις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες (σε τροπικά ή υποτροπικά κλίματα) και τις χώρες με μεταβατικές οικονομίες, όταν κυμαίνεται από 4 έως 7 χρόνια.

8.3 Υφιστάμενη κατάσταση εκπομπών CH_4 στην Ελλάδα και στην υπόλοιπη Ευρώπη

Οι εκπομπές CH_4 από ΧΥΤΑ και χώρους διάθεσης στην Ελλάδα και στις άλλες χώρες της Ευρώπης των 15 παρουσιάζονται στον Πίνακα 8-3 που

ακολουθεί. Αφορούν την απελευθέρωση του CH₄ στην ατμόσφαιρα, δηλαδή δεν περιλαμβάνονται οι ποσότητες του CH₄ που συλλέγονται ή καίγονται. Αυτές οι εκπομπές είναι εκτιμήσεις των χωρών μελών, έχουν κατατεθεί στα Ηνωμένα Έθνη (UNFCCC – UN Framework Convention on Climate Change), και έχουν υπολογιστεί με προκαθορισμένη μεθοδολογία. Βέβαια δεν είναι γνωστό το πόσο ακριβή είναι τα στοιχεία που καταθέτει το κάθε κράτος μέλος. Η αβεβαιότητα των εκτιμήσεων αυτών είναι μεγάλη λόγω του ότι ο υπολογισμός των εκπομπών δεν είναι εύκολος μια και ο ίδιος ο μηχανισμός των εκπομπών είναι πολύπλοκος.

Επίσης είναι πολύ δύσκολη η συλλογή αξιόπιστων, με μεγάλη ακρίβεια, στατιστικών στοιχείων για τα απορρίμματα, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν σαφείς κανονισμοί για τη διαχείριση των απορριμμάτων.

	1990	CH ₄ (ktn)	1995	CH ₄ (ktn)	Αλλαγή %
Αυστρία		193		185	-4.1
Βέλγιο		173		184	6.5
Δανία		71		72	1.4
Γαλλία		780		606	-22.2
Γερμανία		1842		1029	-44
Ελλάδα		102		105	2.8
Ιρλανδία		136		136	0
Ιταλία		302		464	53.6
Ολλανδία		562		479	-14.8
Πορτογαλία		493		528	7.1
Ισπανία		471		659	39.8
Ην. Βασίλειο		1117		912	-18.3
Σουηδία		85		61	-28.2
EU15		6560		5101	-22

Πίνακας 8-3: Εκπομπές CH₄ από ΧΥΤΑ και Χώρους Διάθεσης Απορριμμάτων [13]

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 8-4 που ακολουθεί φαίνεται πόσο μεγάλη είναι η συμβολή της ταφής των απορριμμάτων στη συνολική ποσότητα των ανθρωπογενών εκπομπών του CH₄, για το έτος 1990 στην Ευρώπη των 15.

	% των συνολικών εκπομπών CH ₄
ΧΥΤΑ - ΧΔΑ	30
Υγρά Απόβλητα	3,4
Καύση Απορριμμάτων	0,1
Άλλες (απορρίμματα)	0,3

Πίνακας 8-4: Εκπομπές CH₄ από διάφορους τομείς επεξεργασίας αποβλήτων [13]

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η όσο το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση των ανεξέλεγκτων εκπομπών του CH₄ με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων, που βασίζονται σε in situ μετρήσεις της σύστασης του βιοαερίου. Η εφαρμογή των παραπάνω θα γίνει στο Χώρο Διάθεσης Απορριμμάτων, ΧΔΑ, στους Πέρα Γαλήνους (Φόδελε) Ηρακλείου Κρήτης. Έτσι στα κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφεται ο ΧΔΑ, τα μοντέλα υπολογισμού των εκπομπών καθώς και η διαδικασία της μέτρησης της σύστασης του βιοαερίου.

9. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΧΔΑ ΣΤΟ ΦΟΔΕΛΕ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ

9.1 Γεωγραφική θέση – Έναρξη λειτουργίας

Ο χώρος διάθεσης απορριμμάτων, ΧΔΑ, στην περιοχή των Πέρα Γαλήνων (Φόδελε) βρίσκεται σε απόσταση 32 km περίπου από την πόλη του Ηρακλείου, προς τα Δυτικά, στα διοικητικά όρια του Δήμου Γαζίου. Η εναπόθεση των απορριμμάτων στο χώρο άρχισε το καλοκαίρι του 1992, όταν σταμάτησε η λειτουργία του ΧΔΑ στο Σκαφιδαρά του Δ. Γαζίου, 5 km δυτικά της πόλης του Ηρακλείου. Ο χώρος αυτός λειτούργησε για διάστημα 30 περίπου ετών. Η απόθεση γινόταν σε έκταση 93 στρεμμάτων και είχε δημιουργηθεί ένας λόφος απορριμμάτων μέσου ύψους 20 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους με πολύ απότομα πρανή. Η λειτουργία του χώρου αυτού διεκόπη απότομα λόγω υπερκορεσμού και λόγω του αυξημένου κινδύνου που παρουσιάστηκε για τους χειριστές των μηχανημάτων στη χωματερή όταν η στάθμη των απορριμμάτων πλησίασε καλώδια υψηλής τάσης που διέρχονταν πάνω από το χώρο. Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι ο χώρος αυτός έχει ήδη αποκατασταθεί [24].

9.2 Μορφολογία – Υψόμετρα απόθεσης

Μορφολογικά ο χώρος, πάνω στον οποίο αναπτύχθηκε η προς αποκατάσταση χωματερή αποτελούσε μια μισγάγγεια με προσανατολισμό ΒΔ-ΝΑ. Η συνολική έκταση του χώρου η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για τη διάθεση των απορριμμάτων αλλά και για βοηθητικές λειτουργίες, είναι περίπου 180 στρέμματα.

Το χαμηλότερο τμήμα της μισγάγγειας, στο οποίο έχουν αποτεθεί απορρίμματα είχε αρχικό υψόμετρο περίπου 104 m, και το υψηλότερο τμήμα περίπου 170 m. Στη διάρκεια της δεκαετούς λειτουργίας του χώρου, απορρίμματα έχουν αποτεθεί σε έκταση 85 περίπου στρεμμάτων, ενώ έχει δεσμευτεί συνολική έκταση περίπου 180 στρεμμάτων (που συμπεριλαμβάνει δρόμους πρόσβασης, χώρους απόληψης εδαφικού υλικού, μέτωπο εργασίας κλπ.).

Η απόθεση άρχισε από τα χαμηλά και συνεχίστηκε προς τα ψηλότερα μέχρι του φυσικού υψομέτρου των 170 m. Στο χώρο σήμερα έχουν διαμορφωθεί πέντε ταμπάνια απορριμμάτων σε μέσο υψόμετρο 122 m, 135 m, 152 m, 158 m και 170.5 m. Επίσης σε διακριτή θέση στο χώρο και σε έκταση περίπου 3.5 στρεμμάτων με μέσο υψόμετρο 167 m αποτίθεται η λάσπη από τη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων του Δ. Ηρακλείου.

9.3 Εξυπηρετούμενοι ΟΤΑ – Ποσότητες απορριμμάτων

Στον εξεταζόμενο ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους αποθέτουν εδώ και δέκα περίπου χρόνια τα απορρίμματά τους οι δήμοι Ηρακλείου, Ν. Αλικαρνασσού, Γαζίου, Τυλίσσου και Κρουσώνα, Ν. Ηρακλείου και πρόσφατα ο Δ. Γεροποτάμου του Ν. Ρεθύμνης.

Στο χώρο δεν υπάρχει γεφυροπλάστιγγα κι έτσι δεν υπάρχουν ακριβή στοιχεία σχετικά με τις ποσότητες των προσκομιζομένων στο χώρο απορριμμάτων. Κατά τη σύνταξη της μελέτης "Ολοκληρωμένος Σχεδιασμός Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων στην Περιφέρεια Κρήτης" έγιναν εκτιμήσεις που στηρίχτηκαν σε στοιχεία απογραφών και προβλέψεων για το μόνιμο πληθυσμό αλλά και σε στοιχεία του ΕΟΤ σχετικά με τις διανυκτερεύσεις τουριστών, για τους ΟΤΑ που παρουσιάζουν τουριστικές δραστηριότητες. Έτσι εκτιμήθηκε ότι σήμερα στο χώρο αποτίθενται περίπου 60.880 τόνοι απορριμμάτων το χρόνο -ποσοστό 26.84 % των συνολικά παραγομένων απορριμμάτων στην Περιφέρεια Κρήτης. Οι συμμετέχοντες στο σχήμα ΟΤΑ του Ν. Ηρακλείου παράγουν 57.325 τόνους απορριμμάτων το χρόνο (εκτίμηση 2001) ή ποσοστό 51.81 % σε επίπεδο Ν. Ηρακλείου.

Από στατιστικά στοιχεία που συλλέχθηκαν από τους εξυπηρετούμενους ΟΤΑ σχετικά με τα προσκομιζόμενα στο χώρο απορρίμματα προκύπτει ότι κατά μέσον όρο σε ημερήσια βάση προσέρχονται στο χώρο 279.30 τόνοι απορρίμματα. Σ' αυτά περιλαμβάνονται και 30 τόνοι την ημέρα από ιδιώτες καθώς και ογκώδη υλικά και μπάζα και απορρίμματα κήπου από τις αρμόδιες Υπηρεσίες των εξυπηρετούμενων Δήμων και της Περιφέρειας.

Επίσης σε καθημερινή βάση μεταφέρεται στο χώρο και η λάσπη από τη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων του Δ. Ηρακλείου - περίπου 25 m³ την ημέ-

ρα ή 7650 τόνοι σε ετήσια βάση. Η λάσπη αυτή είναι αφυδατωμένη - έχει υποστεί επεξεργασία σε σύστημα πάχυνσης και αφυδάτωσης σε ταινιοφιλτρόπρεσες - και αποτίθεται σε διακριτό τμήμα του χώρου. Με βάση λοιπόν τα πραγματικά στοιχεία υπολογίζεται ότι **το 2002 στο χώρο αποτίθονταν περίπου 280 τόνοι στερεά απορρίμματα την ημέρα ή σε ετήσια βάση 83791 τόνοι.**

Με βάση αυτές τις εκτιμήσεις και με μια ετήσια αύξηση 5% στις διατιθέμενες-στο χώρο ποσότητες απορριμμάτων υπολογίζεται ότι συνολικά στη διάρκεια της δεκαετούς λειτουργίας του χώρου έχουν αποτεθεί 730803 τόνοι απορρίμματα (Πίνακας 9 -2).

Η εκτίμηση αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με το γεγονός ότι τα καλυμμένα με χώμα απορρίμματα καλύπτουν σήμερα έκταση 85 στρεμμάτων.

	ΟΧΗΜΑΤΑ / d	ΟΓΚΟΣ / ΟΧΗΜΑ (m ³)	Πυκνότητα (tn / m ³)	ΒΑΡΟΣ (tn / d)	Βάρος (tn / yr)
Δ. Ηρακλείου-ΣΜΑ	10	56	0,37	207,2	62160
Δ.Αλικαρνασσοῦ - ΣΜΑ	1	56	0,37	14,5	4351,2
Δ. Γαζίου	3	8	0,23	5,52	1656
Δ. Γαζίου	3	16	0,23	11.04	3312
Δ. Τυλίσσου	1	12	0,23	2,76	828
Δ. Κρουσώνα	1	12	0,23	2,76	828
Λοιπά Φορτία	3	8	0,23	5,52	1656
Απορ. από ιδιώτες				30	9000
ΣΥΝΟΛΟ				279,3	83791.2

Πίνακας 9-1: Εισερχόμενα φορτία στο ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους το 2002 [24]

Για να προσδιοριστεί ακριβέστερα η ποσότητα των αποβλήτων που είναι συσσωρευμένη, λαμβάνονται υπόψη τα στοιχεία που προκύπτουν από εισερχόμενα φορτία των ετών 2001 και 2002, για τα οποία υπάρχει μια αρκετά καλή αποτύπωση. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα και γνωρίζοντας ότι, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις των διαχειριστών του χώρου η ετήσια αύξηση των εισερχόμενων απορριμμάτων είναι της τάξης του 5%, ποσοστό που δικαιολογείται μόνο από το γεγονός ότι σταδιακά μεγάλωνε και η εξυπη-

ρετούμενη περιοχή, μπορεί να θεωρηθεί ότι η ετήσια είσοδος αποβλήτων είναι αυτή του Πίνακα 9-2

ΕΤΟΣ	ΤΟΝΟΙ / ΕΤΟΣ
1992	51440
1993	54012
1994	56713
1995	59549
1996	62526
1997	65652
1998	68935
1999	72382
2000	76001
2001	79801
2002	83791
2003	86700

Πίνακας 9-2 Ετήσια φορτία στο ΧΔΑ [24]

9.4 Τρόπος λειτουργίας του χώρου - έργα υποδομής

Το 1992 ο Δήμος Ηρακλείου αντιμετώπισε, όπως προαναφέρθηκε, σοβαρό πρόβλημα με τη διάθεση των απορριμμάτων του και άρχισε την απόρριψη απορριμμάτων σε ένα χώρο στους Πέρα Γαληνούς χωρίς να έχουν γίνει οποιαδήποτε έργα υποδομής, όπως στεγανοποίηση του πυθμένα, δίκτυο αποστράγγισης ομβρίων, σύστημα διαχείρισης στραγγισμάτων και βιοαερίου.

Από την αρχή της λειτουργίας του χώρου τα απορρίμματα καλύπτονταν με χώμα κι έτσι δεν υπήρξαν προβλήματα αυτανάφλεξεων ή εκδήλωση πυρκαγιών. Μετά από μικρό διάστημα λειτουργίας, επειδή διαπιστώθηκε ότι υπήρχε επιφανειακή διαφυγή στραγγισμάτων προς το παρακείμενο ρέμα, κατασκευάστηκαν κατάντη του αναχώματος δύο ανοικτές δεξαμενές συλλογής

διαμέτρου 3 m και βάθους 4 m από προκατασκευασμένους τσιμεντοσωλήνες πάχους 15 cm.

Τα στραγγίσματα από τις δεξαμενές αυτές οδηγούνται μέσω αγωγού ανακυκλοφορίας στην επιφάνεια της χωματερής. Το σύστημα ανακυκλοφορίας ενεργοποιείται χειροκίνητα και επειδή η χωρητικότητα των δεξαμενών είναι ανεπαρκής έχουμε συνεχώς υπερχειλίσεις και διαφυγή στραγγισμάτων στο ρέμα. Πλησίον των δεξαμενών για τον περιορισμό του προβλήματος που προαναφέρθηκε έχει κατασκευαστεί τοίχιο από μπετόν πλάτους 12 m (καλύπτει όλο το άνοιγμα του ρέματος στη θέση αυτή), ύψους 1 m και πάχους 15 cm.

Μέχρι σήμερα όμως δεν έχει ληφθεί καμία μέριμνα για τη συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου, το οποίο λόγω της μέτριας χωματοκάλυψης και του ελάχιστου βαθμού συμπίεσης των απορριμμάτων στο χώρο, διαφεύγει ανεξέλεγκτα και σε διάφορα σημεία του χώρου υπάρχουν έντονες οσμές υδρόθειου.

Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν η συγκέντρωση αιγοπροβάτων στο χώρο. Δεδομένου ότι όπως προαναφέρθηκε η ευρύτερη περιοχή χρησιμοποιείται κυρίως ως βοσκότοπος. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος ο Δήμος Ηρακλείου, ως ο επίσημος και κύριος χρήστης του χώρου προχώρησε στην περίφραξη συνολικής έκτασης 280 περίπου στρεμμάτων που εκμισθώνει για τη διάθεση των απορριμμάτων. Παρά τη συνεχή φύλαξη του χώρου (σε 24ωρη βάση) συχνά παραβιάζεται η περίφραξη σε διαφορετικά σημεία κι έτσι στο χώρο απαντώνται κοπάδια αιγοπροβάτων.

Με την άνοδο της στάθμης των απορριμμάτων παρουσιάστηκαν επιπρόσθετα προβλήματα οπτικής όχλησης, δεδομένου ότι τα απορρίμματα ήταν ορατά από την εθνική οδό Ηρακλείου-Ρεθύμνου που διέρχεται σε μικρή απόσταση στα βόρεια του χώρου. Αυτός ήταν ένας από τους λόγους που οδήγησε στην επέκταση της χωματερής προς το εσωτερικό της μισγάγγειας νοτιοανατολικά κι επέβαλλε την ανάγκη μετακινήσεων απορριμματικών μαζών εντός του χώρου με σκοπό τη μείωση του υψομέτρου. Το γεγονός αυτό δημιουργεί δυσκολία στον προσδιορισμό διακριτών ζωνών απόθεσης απορριμμάτων με το χρόνο.

Στην είσοδο του χώρου κατασκευάστηκε, από την αρχή λειτουργίας του, φυλάκιο και υπάρχει σε 24ωρη βάση προσωπικό που ελέγχει και καταγράφει όλα τα εισερχόμενα απορριμματοφόρα (Εικόνα 9-1) .



Εικόνα 9-1: Η είσοδος του ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους

10. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CH₄

10.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ από το ΧΔΑ στο Φόδελε Ηρακλείου με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων. Ένα από τα απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής είναι η σύσταση του βιοαερίου, και έτσι κρίθηκε απαραίτητη η in – situ μέτρηση της σύστασης του βιοαερίου.

Με βάση τη βιβλιογραφία [18], η σύσταση του βιοαερίου που εισάγεται σε μοντέλα εκπομπών πρέπει να λαμβάνεται από μετρήσεις soil gas και όχι από τα ενεργά ή τα παθητικά συστήματα συλλογής του βιοαερίου. Αυτό οφείλεται στο ότι και τα ενεργά και τα παθητικά συστήματα, συλλέγουν αέρια από διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του ΧΥΤΑ. Τα αέρια αυτά δεν υπόκεινται σε βιολογική επεξεργασία, σε χημικές αντιδράσεις, σε ρόφηση δηλαδή στις διεργασίες που θα λάμβαναν χώρα, αν δεν υπήρχαν τα συστήματα συλλογής. Για αυτό τα δείγματα από ένα ενεργό σύστημα συλλογής περιέχουν περισσότερο CH₄ και άλλες ενώσεις, μια και το CH₄ είναι γνωστό πως οξειδώνεται στο εδαφικό κάλυμμα της επιφάνειας του ΧΥΤΑ. [18].

Για αυτό το λόγο αποφασίσαμε την in situ μέτρηση της σύστασης του βιοαερίου με τη χρήση σωλήνα δειγματοληψίας και φορητού αναλυτή βιοαερίου.

10.2 Περιγραφή συσκευών δειγματοληψίας και ανάλυσης του βιοαερίου

10.2.1 Γενική περιγραφή του αναλυτή BE – DGA 3

Για τη μέτρηση της σύστασης του βιοαερίου χρησιμοποιήθηκε ο πολυκάναλος αναλυτής αερίων BE – DGA 3 της εταιρίας BERNT MESSTECHNIK (Εικόνα 10-1) [25]. Ο αναλυτής αυτός είναι φορητός, εφοδιασμένος με εσωτερική αντλία, λειτουργεί με μπαταρία και προορίζεται για συχνή και κάτω από δύσκολες συνθήκες δειγματοληψία. Με τη χρήση φίλτρων και δειγματοληπτών παρέχει τη δυνατότητα φθηνής και γρήγορης μέτρησης μέχρι τριών αερίων σε

συνδυασμούς ανάλογα με τις απαιτήσεις των μετρήσεων. Τα αέρια που μπορεί να μετρήσει είναι το CH₄, το CO₂, το O₂ και το CO.



Εικόνα 10-1: Ο αναλυτής αερίων BE – DGA 3

10.2.2 Η τεχνική της μέτρησης των αερίων

Η μέτρηση των αερίων (εκτός του O₂) βασίζεται στην τεχνική της μη διαχεόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας (NDIR – Non dispersive Infrared Radiation). Η καινοτομία στον αναλυτή αυτό είναι ότι υπάρχει ένα μόνο οπτικό μονοπάτι, αντί για δύο που υπάρχουν στα συμβατικά όργανα με NDIR, δύο φίλτρα και ένας ανιχνευτής. Το φίλτρο του δείγματος επιλέγει ένα μήκος κύματος στο οποίο απορροφά το αέριο προς μέτρηση, ενώ το φίλτρο αναφοράς επιλέγει μια περιοχή στην οποία δεν απορροφά κανένα από τα αέρια που υπάρχουν στο δείγμα. Η μέτρηση της απορρόφησης των αερίων γίνεται με την ανάλυση των ηλεκτρικών σημάτων από μικροεπεξεργαστές. Η μέτρηση του O₂ γίνεται με τη χρήση ενός ηλεκτροχημικού κελιού.

10.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά του αναλυτή

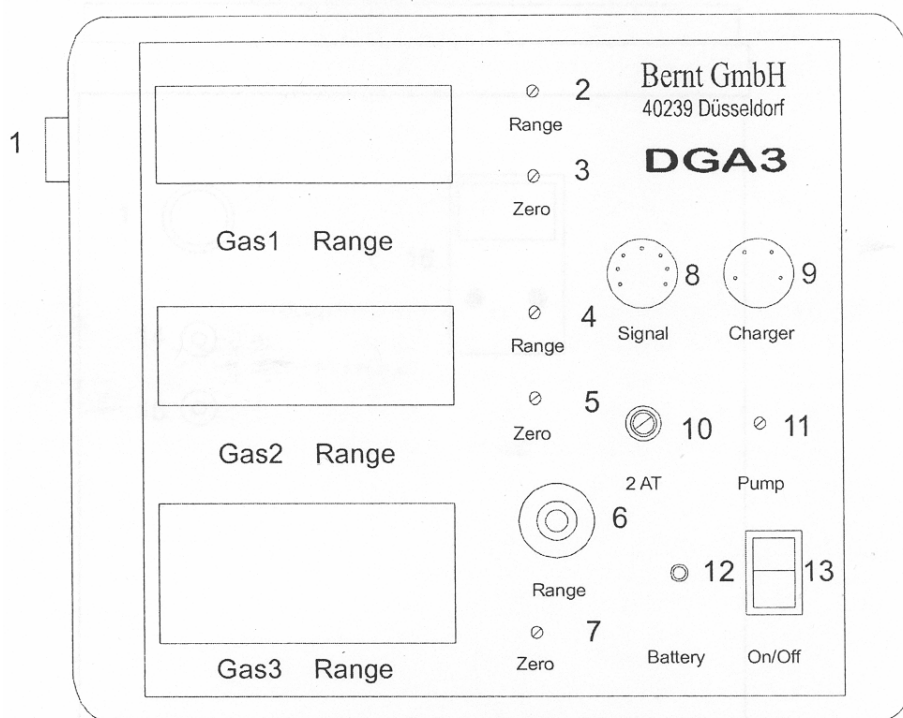
Οι διαστάσεις του αναλυτή είναι 240 x 210 x 170 mm και το βάρος του είναι 6.5 kg. Περιέχει τέσσερις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες των δώδεκα volts που του επιτρέπουν τη συνεχόμενη άντληση και ανάλυση αερίων για επτά ώρες. Το εύρος των θερμοκρασιών στο οποίο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα είναι από 0 – 45 °C και η επίδραση της θερμοκρασίας είναι $\pm 0,03$ % ανά 1 °C. Ο χρόνος προθέρμανσης του οργάνου είναι μικρότερος των τριών λεπτών και ο χρόνος απόκρισης είναι περίπου δέκα δευτερόλεπτα. Οι συγκεντρώσεις των αερίων απεικονίζονται σε οθόνες υγρών κρυστάλλων αλλά υπάρχει και η δυνατότητα λήψης των αποτελεσμάτων σε μορφή γραμμικοποιημένου ρεύματος ή τάσης.

10.2.4 Όψεις του αναλυτή

➤ Κάτοψη

Στην Εικόνα 10 -2 φαίνεται η κάτοψη του αναλυτή BE – DGA 3 και περιγράφονται τα διάφορα μέρη του

- 1 = διακόπτης της αντλίας
- 2 = ρυθμιστής του εύρους μέτρησης του αερίου 1
- 3 = ρυθμιστής του “μηδέν” του αερίου 1
- 4 = ρυθμιστής του εύρους μέτρησης του αερίου 2
- 5 = ρυθμιστής του “μηδέν” του αερίου 2
- 6 = ρυθμιστής του εύρους μέτρησης του αερίου 3
- 7 = ρυθμιστής του “μηδέν” του αερίου 3
- 8 = έξοδος του σήματος
- 9 = είσοδος του καλωδίου του φορτιστή
- 10 = ασφάλεια 2AT
- 11 = ρυθμιστής της αντλίας
- 12 = φωτεινή ένδειξη της κατάστασης της μπαταρίας
- 13 = κεντρικός διακόπτης

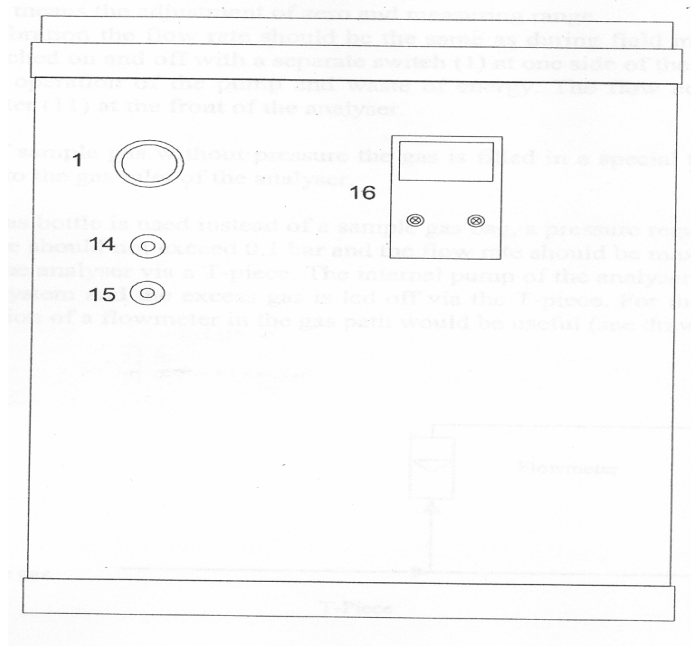


Εικόνα 10-2: Η κάτοψη του αναλυτή BE – DGA3

➤ Πλάγια όψη του αναλυτή

Στην Εικόνα 10-3 φαίνεται η πλάγια όψη του αναλυτή BE – DGA 3 και περιγράφονται τα διάφορα μέρη του:

- 1 = διακόπτης της αντλίας
- 14 = είσοδος των αερίων
- 15 = έξοδος των αερίων
- 16 = υποδοχή για τον ιμάντα μεταφοράς



Εικόνα 10-3: Η πλάγια όψη του αναλυτή BE – DGA3

10.2.5 Μέτρηση της συγκέντρωσης του βιοαερίου μέσα στο ΧΔΑ

Επειδή σκοπός μας είναι η μέτρηση του βιοαερίου σε κάποιο βάθος μέσα στο ΧΔΑ χρησιμοποιούμε επιπλέον τη συσκευή Draeger που φαίνεται στην Εικόνα 10- 4 :



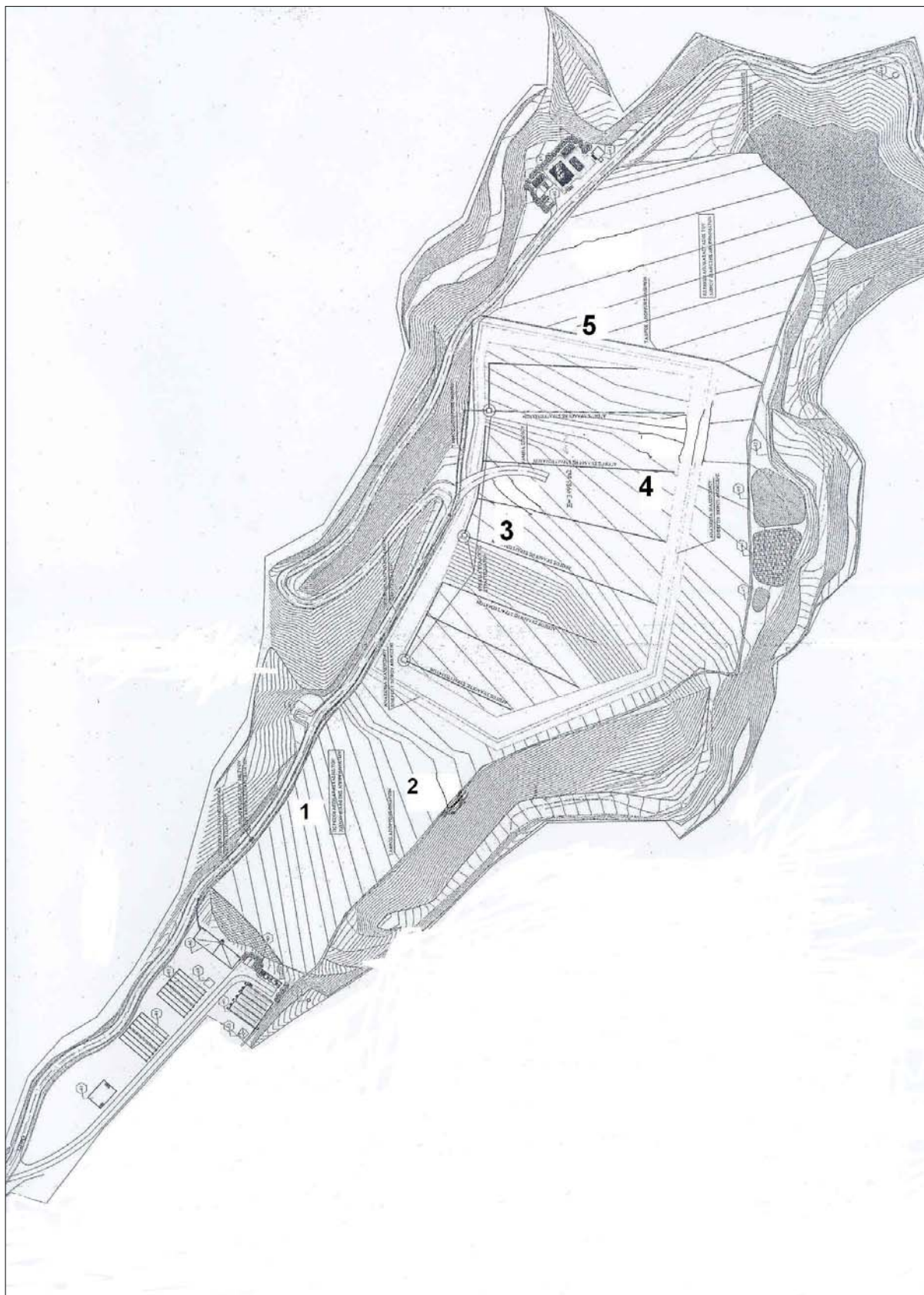
Εικόνα 10-4: Η διάταξη μέτρησης των εδαφικών αερίων

Η συσκευή αυτή είναι ένας ανοξείδωτος σωλήνας με ακροφύσιο ο οποίος τοποθετείται μέσα σε ένα μεγαλύτερο ατσάλινο σωλήνα για προστασία. Αρχικά, για να είναι ευκολότερη η είσοδος του ατσάλινου σωλήνα στη μάζα των απορριμμάτων ή στο έδαφος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα χειροκίνητο τρυπάνι για τη διάνοιξη μιας οπής στην οποία θα εισαχθεί ο σωλήνας. Στη συνέχεια συνδέεται ο αναλυτής με τον ανοξείδωτο σωλήνα με ένα σωληνάκι στο οποίο έχει τοποθετηθεί ένα φίλτρο υγρασίας για προστασία του αναλυτή, και εισάγεται μέσα στον ατσάλινο σωλήνα.

10.3 Εκπόνηση μετρήσεων βιοαερίου στο ΧΔΑ στο Φόδελε Ηρακλείου

Μετά τη βαθμονόμηση του αναλυτή και τον έλεγχο της διάταξης για διαρροές επισκεφτήκαμε το ΧΔΑ στο Φόδελε Ηρακλείου στις 15 Ιουλίου 2004 για την εκπόνηση των μετρήσεων. Οι θέσεις των μετρήσεων επιλέχθηκαν με βάση την ηλικία των απορριμμάτων. Έτσι για τις μετρήσεις επιλέξαμε σημεία όπου η ηλικία των απορριμμάτων ήταν τριών ή περισσότερων ετών, ώστε να έχει εδραιωθεί η μεθανογένεση. Η εκπόνηση των μετρήσεων ήταν αρκετά επίπονη γιατί τα απορρίμματα σκεπάζονται με ένα μίγμα χώματος και σχιστόλιθων που υπάρχουν στην περιοχή καθιστώντας τη χειροκίνητη διάνοιξη οπών πολύ δύσκολη. Το βάθος από το οποίο λήφθηκαν οι μετρήσεις ήταν τα 50 cm, τιμή που συναντήσαμε σε διάφορες μελέτες. Βέβαια, δεν υπάρχει κάποιος κανόνας για το βάθος των μετρήσεων, απλά πρέπει να εκτελούνται σε βάθη μεγαλύτερα των 30 cm για την αποφυγή της εισόδου του ατμοσφαιρικού αέρα η οποία αλλοιώνει το αποτέλεσμα της μέτρησης.

Κανόνας όμως δεν υπάρχει και για τον αριθμό των θέσεων των μετρήσεων. Έτσι εκτελέσαμε αρχικά πέντε μετρήσεις και αφού αξιολογήσαμε τα αποτελέσματα δεν κρίθηκε αναγκαία η συνέχιση των μετρήσεων. Στην Εικόνα 10-5 που ακολουθεί φαίνονται αριθμημένες οι θέσεις των μετρήσεων.



Εικόνα 10-5: Οι θέσεις των μετρήσεων στο ΧΔΑ

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι μετρήσεις στο ΧΔΑ στο Φόδελε Ηρακλείου.



Εικόνα 10-6: Μέτρηση στη θέση 3



Εικόνα 10-7: Μέτρηση στη θέση 5

Στον Πίνακα 10-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων

ΘΕΣΗ	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
1	55	45
2	53	46
3	52	46
4	51	48
5	49	50

Πίνακας 10-1: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του βιοαερίου

Από τον παραπάνω Πίνακα λαμβάνουμε μέση τιμή του CH₄ ίση με 52 % και του CO₂ ίση με 47 %, τιμές που είναι μέσα στα όρια των τιμών που προτείνει η διεθνής βιβλιογραφία. Τις τιμές αυτές εισάγουμε στα μοντέλα Landgem και Gassim για τον υπολογισμό των εκπομπών του CH₄. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε δύο μοντέλα για τον υπολογισμό των εκπομπών του CH₄ είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Βέβαια αν στόχος είναι μόνο η εκτίμηση των εκπομπών συνήθως χρησιμοποιείται το LandGem, ενώ το GasSim χρησιμοποιείται επιπλέον για θέματα διαχείρισης ή ανάκτησης του βιοαερίου.

10.4 Το μοντέλου εκτίμησης εκπομπών LandGem

10.4.1 Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) είναι ένα εύχρηστο αυτοματοποιημένο εργαλείο για την ποσοτικοποίηση των αέριων εκπομπών από ΧΥΤΑ και ΧΔΑ. Αναπτύχθηκε από το Κέντρο Ελέγχου Τεχνολογίας της Αμερικάνικης Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (U.S EPA), και μπορεί να βρεθεί στο διαδίκτυο στην ηλεκτρονική διεύθυνση www.epa.gov/ttn/catc.

Η μέθοδος εκτίμησης των εκπομπών που χρησιμοποιεί το μοντέλο είναι μια απλή εξίσωση αποδόμησης πρώτης τάξης. Επειδή τα διαθέσιμα δεδομένα, όπως οι ποσότητες των απορριμμάτων, η ηλικία και η σύστασή τους είναι περιορισμένα, η χρήση ενός πιο πολύπλοκου μοντέλου δε έχει νόημα.

Οι αέριες εκπομπές από τους ΧΥΤΑ προέρχονται από το βιοαέριο που παράγεται κυρίως από την αποσύνθεση των απορριμμάτων και αποτελείται

βασικά από CH₄, CO₂ και σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις άλλων αέριων ρύπων. Για την εκτίμηση των εκπομπών είναι απαραίτητα τα παρακάτω στοιχεία:

- Η χωρητικότητα σχεδιασμού του χώρου
- Ο ετήσιος ρυθμός ταφής απορριμμάτων ή η ποσότητα των απορριμμάτων που έχουν ταφεί
- Η σταθερά του ρυθμού παραγωγής του CH₄ (k)
- Η ειδική παραγωγή CH₄ (Lo)
- Η σύσταση του βιοαερίου
- Η συγκέντρωση των οργανικών ρυπαντών εκτός του CH₄ (NMOC) που βρίσκονται στο βιοαέριο
- Το έτος έναρξης λειτουργίας του χώρου
- Αν στο χώρο καταλήγουν και επικίνδυνα απόβλητα (συνδιάθεση)

Στο μοντέλο γίνεται η παραδοχή ότι όλη η ποσότητα του βιοαερίου που παράγεται, εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, και πως ο μέγιστος ρυθμός εκπομπής λαμβάνει χώρα το έτος που κλείνει ο χώρος.

Η βασική εξίσωση του μοντέλου είναι:

$$Q = Lo \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (10-1)$$

όπου

Q = εκπομπές CH₄ το έτος t (m³ / yr)

Lo = ειδική παραγωγή CH₄ (m³ CH₄ / tn MSW)

R = ετήσιος ρυθμός ταφής απορριμμάτων (tn MSW / yr)

k = σταθερά του ρυθμού παραγωγής CH₄ (1 / yr)

c = χρόνια από το κλείσιμο (c = 0 για ενεργούς ΧΥΤΑ) (yr)

t = χρόνια από την πρώτη εναπόθεση απορριμμάτων (yr)

Τώρα κρίνεται σημαντικό να δούμε λίγα στοιχεία για τους συντελεστές της παραπάνω εξίσωσης, και για τα άλλα απαιτούμενα δεδομένα:

Η σταθερά του ρυθμού παραγωγής CH₄, k, είναι η σταθερά που καθορίζει το ρυθμό παραγωγής του CH₄. Το μοντέλο αποσύνθεσης πρώτης τά-

ξης κάνει την παραδοχή πως οι τιμές του k πριν και μετά από το μέγιστο ρυθμό παραγωγής CH₄ είναι οι ίδιες. Η σταθερά αυτή είναι συνάρτηση του ποσοστού υγρασίας των απορριμμάτων, της διαθεσιμότητας θρεπτικών για μεθανογένεση, του pH, και της θερμοκρασίας. Το εύρος των τιμών του είναι από 0,003 – 0,21. Το k μπορεί να υπολογιστεί και από το μοντέλο με την προϋπόθεση να έχει γίνει δοκιμή με βάση τη Μέθοδο 2E της EPA (Εικόνα 10-8)

Οι οργανικοί ρυπαντές εκτός του CH₄, NMOC, περιλαμβάνουν αέριους ρυπαντές και πτητικές οργανικές ενώσεις. Οι συγκεντρώσεις τους μπορεί να μετρηθούν με βάση τη Μέθοδο 25 C της EPA, ή να επιλεγθούν από τιμές εξ' ορισμού. Στο μοντέλο εκφράζονται ως εξάνιο.

Η ειδική παραγωγή CH₄, Lo, είναι μια σταθερά που αντιπροσωπεύει την εν δυνάμει ικανότητα των απορριμμάτων να παράγουν CH₄, και εξαρτάται από το ποσοστό κυτταρίνης και ημικυτταρίνης των απορριμμάτων. Το εύρος των τιμών του είναι από 6,2 – 270 m³ CH₄ / tn MSW.

The image shows a software window titled "Method 2E Calculator". It contains several input fields with the following labels and values:

- Average Well Depth (m): 0
- Average Stabilized Radius of Influence (m): 0
- Refuse Density (Mg/m³): 0.636
- Fraction of Decomposable Refuse: 1
- Methane Generation Potential (L0) (m³/Mg): 90
- Average Stabilized Flow Rate per Well (m³/min): 0
- Average Age of Refuse (years): 0

Below the input fields, there is a row of three buttons: "Calculate --->", "k (1/yr)", and "No Solution". At the bottom of the window, there are three more buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Εικόνα 10-8: Υπολογισμός του k

Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να υπολογίσει τις εκπομπές με βάση δεδομένα του συγκεκριμένου ΧΥΤΑ, ή με βάση δύο διαφορετικά σεντ τιμών εξ'

ορισμού (default values). Το πρώτο σετ τιμών προέρχεται από τους κανονισμούς του Clean Air Act (CAA) και περιλαμβάνει τις παρακάτω τιμές :

$$k = 0.05 \text{ 1 / yr}$$

$$Lo = 170 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{tn MSW}$$

$$\text{NMOC} = 4000 \text{ ppmv}$$

Το δεύτερο σετ τιμών βασίζεται στους συντελεστές εκπομπής της U.S EPA (Agency's Compilation of Air Pollutant Emissions Factors), ονομάζεται AP – 42 και περιλαμβάνει τις παρακάτω τιμές :

$$k = 0.04 \text{ 1 / yr}$$

$$Lo = 100 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{tn MSW}$$

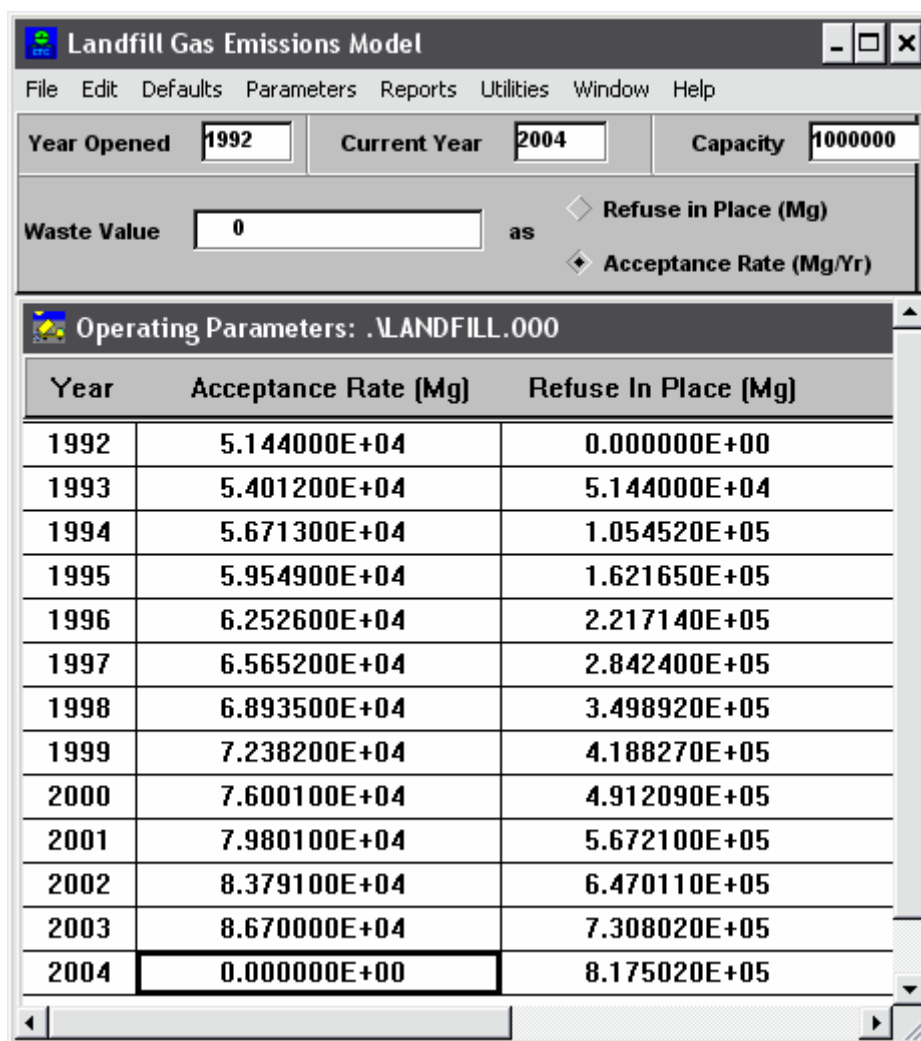
$$\text{NMOC} = 2420 \text{ ppmv (συνδιάθεση)}$$

$$595 \text{ ppmv (όχι συνδιάθεση)}$$

Στην περίπτωση όμως που η βροχόπτωση στην περιοχή είναι χαμηλότερη από τα 635 mm το k στο CAA γίνεται 0,02 ενώ στο AP – 42 γίνεται πάλι 0,02.

10.4.2 Εφαρμογή του μοντέλου στο ΧΔΑ στο Φόδελε Ηρακλείου

Από το “Menu”, επιλέγουμε “File” και δημιουργούμε ένα νέο σενάριο με το “New”. Τότε εμφανίζεται το γενικό παράθυρο του Landgem (Εικόνα 10-9)



Year	Acceptance Rate (Mg)	Refuse In Place (Mg)
1992	5.144000E+04	0.000000E+00
1993	5.401200E+04	5.144000E+04
1994	5.671300E+04	1.054520E+05
1995	5.954900E+04	1.621650E+05
1996	6.252600E+04	2.217140E+05
1997	6.565200E+04	2.842400E+05
1998	6.893500E+04	3.498920E+05
1999	7.238200E+04	4.188270E+05
2000	7.600100E+04	4.912090E+05
2001	7.980100E+04	5.672100E+05
2002	8.379100E+04	6.470110E+05
2003	8.670000E+04	7.308020E+05
2004	0.000000E+00	8.175020E+05

Εικόνα 10-9: Το γενικό παράθυρο του Landgem

Τα δεδομένα εισαγωγής που απαιτεί το μοντέλο είναι :

1. Έτος έναρξης λειτουργίας ΧΔΑ ή ΧΥΤΑ
2. Τρέχον έτος
3. Έτος παύσης λειτουργίας χώρου
4. Χωρητικότητα
5. Ειδική παραγωγή CH₄, L₀ (m³ / tn MSW)
6. Σταθερά ρυθμού αποδόμησης, k (1 / yr)
7. Ετήσιες απορριπτόμενες ποσότητες αστικών απορριμμάτων
8. Σύσταση βιοαερίου (%)
9. Αν ο χώρος δέχεται μόνο αστικά απορρίμματα

Τα στοιχεία που εισάγουμε εμείς είναι :

1. Έτος έναρξης είναι το 1992
2. Τρέχον έτος είναι το 2004
3. Έτος παύσης λειτουργίας το 2004
4. Χωρητικότητα περίπου 1.000.000 τόνοι
5. Η ειδική παραγωγή CH₄, L_o θα υπολογιστεί με βάση τον τύπο του IPCC (2000), όπου:

$$L_o = MCF * DOC * DOC_F * F * 16/12$$

Το **MCF** επιλέγεται ίσο με 0,8 επειδή στο ΧΔΑ δε γίνεται σωστή διαχείριση των απορριμμάτων και το βάθος του χώρου είναι πάνω από 5 μέτρα (έως και 8 - 9 μέτρα).

Το **DOC_F** επιλέγεται ίσο με 0,66 δηλαδή με την default value του IPCC λόγω έλλειψης στοιχείων.

Το **F** είναι ίσο με 0.52, τιμή που εξάχθηκε από in situ μετρήσεις του CH₄.

Τέλος το **DOC** υπολογίζεται από τη σχέση του IPCC (1996) η οποία είναι :

$$DOC = 0.4 * (A) + 0.17 * (B) + 0.15 * (\Gamma) + 0,3 * (\Delta) \quad (10-2)$$

όπου για την περίπτωση μας με βάση τη σύσταση των απορριμμάτων που καταλήγουν στο Φόδελε έχουμε [27]:

A = Χαρτί και ύφασμα = 0,1896

B = Υπολείμματα κήπου = 0

Γ = Υπολείμματα τροφών = 0,3595

Δ = Ξύλο = 0,01

Μετά από τους απαιτούμενους υπολογισμούς παίρνουμε:

DOC = 0.133 και L_o = 0.048 tn CH₄ / tn MSW ή

$$L_o = 68 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{tn MSW}$$

6. Η σταθερά του ρυθμού αποδόμησης θα υπολογιστεί θεωρώντας ότι η μεγαλύτερη ποσότητα των απορριμμάτων αποδομείται σε 30 χρόνια. Έτσι :

$$k = 1 / 30 = 0.033 \text{ 1 / yr}$$

7. Οι ετήσιες απορριπτόμενες ποσότητες αστικών απορριμμάτων είναι :

Έτος	Τόνοι
1992	51440
1993	54012
1994	56713
1995	59549
1996	62526
1997	65652
1998	68935
1999	72382
2000	76001
2001	79801
2002	83791
2003	86700

Πίνακας 10-2: Οι ετήσιες ποσότητες απορριμμάτων που καταλήγουν στο ΧΔΑ (τόνοι)

8 . Η σύσταση του βιοαερίου μετά από τις μετρήσεις είναι :

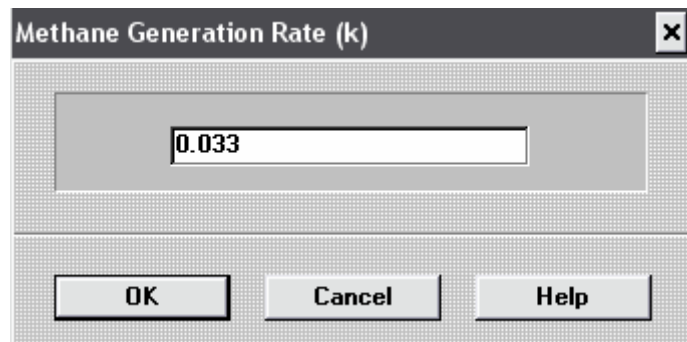
Αέριο	Ποσοστό (%)
CH ₄	52
CO ₂	47
Άλλα	1

Πίνακας 10-3: Η σύσταση του βιοαερίου

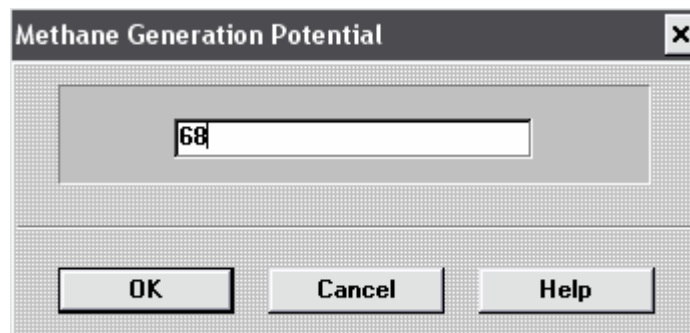
9. Ο χώρος δεν είναι συνδιάθεσης, δέχεται δηλαδή μόνο αστικά απορρίμματα

Στη συνέχεια από το “Menu”, επιλέγουμε “Parameters” και από εκεί καθορίζουμε το k (Εικόνα 10-10) , το Lo (Εικόνα 10-11), τους NMOC, τη σύστα-

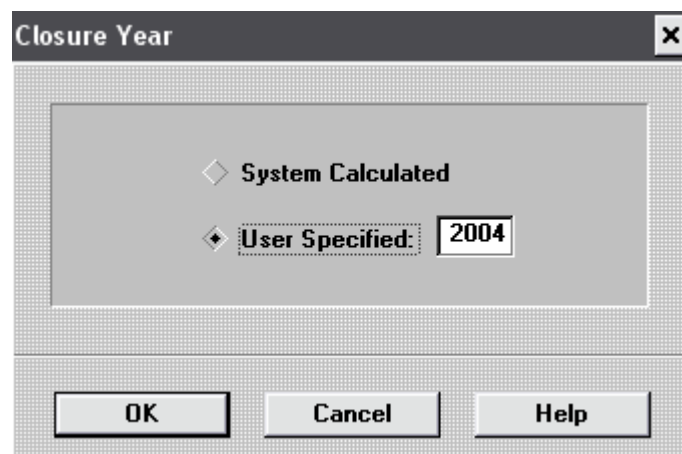
ση του βιοαερίου (Εικόνα 10-13), αν έχουμε συνδιάθεση, και το έτος που κλείνει ο χώρος (Εικόνα 10-12)



Εικόνα 10-10: Καθορισμός του k



Εικόνα 10-11: Καθορισμός του L₀



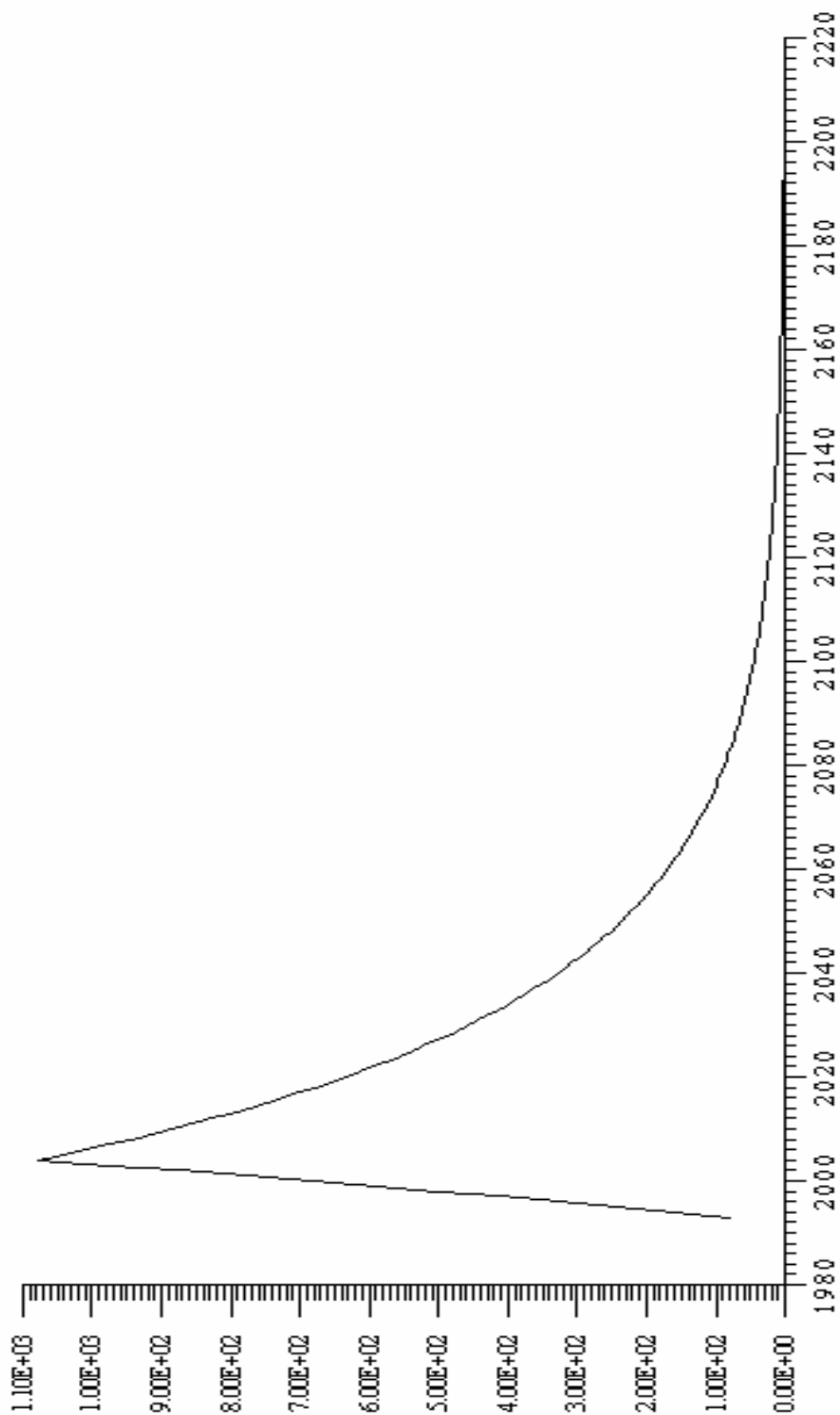
Εικόνα 10-12: Έτος παύσης λειτουργίας του ΧΔΑ

Εικόνα 10-13: Σύσταση βιοαερίου και συγκέντρωση NMOCs

Τέλος για να δούμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, από το “Menu”, επιλέγουμε “Reports” και από εκεί “Text” αν θέλουμε να δούμε τις εκπομπές σαν τιμές (Παράρτημα 1) ή “Graphics” (Γράφημα 10-1) για να δούμε τις εκπομπές σε γραφική παράσταση με το χρόνο.

Στην επόμενη σελίδα ακολουθεί το Γράφημα 10-1

ΕΤΗΣΙΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΜΕΘΑΝΙΟΥ



Γράφημα 10-1: Εκπομπές CH₄ σε συνάρτηση με το χρόνο

Ακολουθεί ο υπολογισμός των εκπομπών CH₄ με το μοντέλο GasSim:

10.5 Το μοντέλου εκτίμησης εκπομπών GasSim

10.5.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη του μοντέλου GasSim Lite οφείλεται στην ανάγκη ύπαρξης ενός εργαλείου για την εκτίμηση των ετήσιων εκπομπών μάζας στην ατμόσφαιρα από ΧΥΤΑ, ουσιών που περιλαμβάνονται στο Pollution Inventory (PI).

Το GasSim Lite θεωρεί πως ο ΧΥΤΑ είναι μια ενιαία μονάδα, και σε αντίθεση με τα στραγγίσματα, τα κελιά είναι σπάνια απομονωμένα όσον αφορά το βιοαέριο. Το μοντέλο χωρίζεται σε δύο ενότητες :

- Στον όρο της πηγής, και
- Στην ενότητα των εκπομπών

Ο όρος της πηγής καθορίζει την παραγωγή του βιοαερίου με βάση την ποσότητα και τη σύσταση των απορριμμάτων που εναποτίθενται στον χώρο ταφής, ένα έτος μετά από το έτος ταφής. Το υπομοντέλο των εκπομπών δέχεται τα αποτελέσματα του υπομοντέλου της πηγής και τα χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό των εκπομπών του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα. Στον υπολογισμό αυτό λαμβάνεται υπόψη η συλλογή, καύση, ανάκτηση, και βιολογική οξείδωση του βιοαερίου. Το μοντέλο κάνει την παραδοχή, ότι το βιοαέριο που παράγεται και δεν συλλέγεται βρίσκεται σε ισορροπία, εκπέμπεται διαμέσου του τελικού καλύμματος ή της μεμβράνης κάτω από σταθερές συνθήκες (steady state)

10.5.2 Γενικές παραδοχές του μοντέλου GasSim Lite

Το μοντέλο GasSim Lite παρέχει μια μεθοδολογία ανάλυσης επικινδυνότητας όσον αφορά τις αέριες εκπομπές από ΧΥΤΑ και ΧΔΑ. Στο μοντέλο γίνονται οι παρακάτω παραδοχές [28] :

- Το GasSim Lite μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τον υπολογισμό αέριων εκπομπών από χώρους ταφής απορριμμάτων και όχι για τον υπολογισμό εκπομπών από ρυπασμένα εδάφη και υπόγεια νερά.
- Όταν τα αέρια κινούνται μέσα στη μάζα των απορριμμάτων δε λαμβάνει χώρα βιολογική οξείδωση του μεθανίου, διασπορά, επιβρά-

δυνση ή άλλες αντιδράσεις / διεργασίες οι οποίες θα μειώσουν τη συγκέντρωσή τους.

- Το μοντέλο λειτουργεί σε σταθερές συνθήκες με ελάχιστο χρονικό βήμα το ένα έτος.
- Το μοντέλο δεν καθορίζει την πίεση που παράγεται από το χώρο ταφής, και για την απλοποίησή του, η πίεση δεν έχει συμπεριληφθεί στα επιμέρους υπομοντέλα – ενότητες.
- Το βιοαέριο συλλέγεται μόνο από τις καλυμμένες εκτάσεις, και το βιοαέριο που παράγεται από τις περιοχές που βρίσκονται σε λειτουργία εκπέμπεται απευθείας στην ατμόσφαιρα .
- Η ποσότητα του βιοαερίου που παράγεται από το καλυμμένο τμήμα του ΧΥΤΑ και δε συλλέγεται, εκπέμπεται ανεξέλεγκτα στην ατμόσφαιρα
- Το GasSim Lite υπολογίζει εκπομπές από την επιφάνεια του χώρου ταφής (surface emissions) και εκπομπές από τους πυρσούς καύσης και της μηχανής παραγωγής ενέργειας. Δεν υπολογίζονται εκπομπές από τις πλευρές του χώρου ταφής (lateral emissions), καθώς είναι πολύ μικρές και έτσι δεν θεωρούνται σημαντικές.
- Το βιοαέριο δε διαλύεται στα στραγγίσματα.

10.5.3 Περιγραφή του μοντέλου GasSim Lite

Το GasSim Lite, προσδιορίζει την παραγωγή του CH₄, του CO₂ και του H₂ από τη μάζα των απορριμμάτων (μέχρι και για 200 χρόνια), με τη χρήση μιας εξίσωσης πολλαπλών φάσεων, η οποία ακολουθεί κινητική πρώτης τάξης, και για τη μεθανογενή αλλά και την όξινη φάση. Στην επίλυση λαμβάνεται υπόψη η σύσταση των απορριμμάτων και το ποσοστό υγρασίας τους. Το μοντέλο έχει επίσης τη δυνατότητα να υπολογίσει την παραγωγή των αερίων που βρίσκονται ως ίχνη στο βιοαέριο με βάση συγκεντρώσεις (ανά m³ βιοαερίου) που εισάγει ο χρήστης, ή τυπικές συγκεντρώσεις που παρέχει το μοντέλο.

Οι εκπομπές των κυρίαρχων αερίων του βιοαερίου αλλά και των ιχνών από το τελικό κάλυμμα και από το σύστημα στεγάνωσης του πυθμένα, προσομοιώνονται με τη χρήση πληροφοριών από το σύστημα συλλογής βιοαερί-

ου, τους πυρσούς, τις μηχανές παραγωγής ενέργειας, και από τα μηχανικά συστήματα περιορισμού του βιοαερίου (κάλυμμα και στεγάνωση πυθμένα). Οι εκπομπές αερίων, που δεν προέρχονται από την καύση, από τους πυρσούς και τις μηχανές παραγωγής ενέργειας, υπολογίζονται από τον όγκο του αερίου που συλλέγεται και από το ποσοστό καταστροφής των αερίων. Οι εκπομπές των αερίων που προέρχονται από την καύση προσομοιώνονται με βάση συγκεντρώσεις (ανά m³ που εξέρχονται από τις καμινάδες) που καθορίζει ο χρήστης ή από τυπικές τιμές [28].

Οι υπολογισμοί που εκτελούνται από το μοντέλο είναι :

- Υπολογισμός της υγρασίας των απορριμμάτων λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό διήθησης της βροχής, τη διαχείριση των στραγγισμάτων, τις υδραυλικές ιδιότητες των απορριμμάτων, και την υδρογεωλογία της περιοχής.
- Υπολογισμός του ρυθμού παραγωγής των βασικών αερίων του βιοαερίου λαμβάνοντας υπόψη την ποσότητα των απορριμμάτων, την προέλευσή τους, τη σύστασή τους, τις σταθερές των ρυθμών αποδόμησης, την υγρασία και το λόγο εκπομπών CH₄ / CO₂.
- Υπολογισμός των συγκεντρώσεων των αερίων που βρίσκονται σε ίχνη, με τον καθορισμό του όγκου του βιοαερίου που παράγεται, της συγκέντρωσης των ιχνών που μετρήθηκαν σε 1 m³ βιοαερίου, και των χρόνων ημιζωής τους.
- Υπολογισμός του όγκου του βιοαερίου που ανακτάται ή οδηγείται στους πυρσούς, των εκπομπών από αυτές τις διεργασίες, και των ανεξέλεγκτων εκπομπών από την επιφάνεια.
- Προσομοίωση της βιολογικής οξειδωσης του CH₄ συμπεριλαμβανομένης και της ύπαρξης ρωγμών στο κάλυμμα.
- Εκτίμηση των εκπομπών των ουσιών που περιέχονται στο Pollution Inventory.

Ο όρος της Πηγής

Η καρδιά του μοντέλου είναι ο όρος της πηγής, ο οποίος προσομοιώνει τη γένεση του CH₄, του CO₂ και του H₂, που παράγονται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά των απορριμμάτων:

- Τύπος των απορριμμάτων, και ανάμιξη απορριμμάτων διαφορετικών δραστηριοτήτων.
- Σύσταση των απορριμμάτων και τα διάφορα κλάσματα που τα αποτελούν. Τα κλάσματα των απορριμμάτων καθορίζονται από το ποσοστό αποσύνθεσης του κάθε υλικού, το ποσοστό κυτταρίνης και ημι – κυτταρίνης, και το ποσοστό υγρασίας.
- Ποσοστό υγρασίας, το οποίο εξαρτάται από τη διήθηση, τη διαχείριση των στραγγισμάτων, και τα φυσικά χαρακτηριστικά των απορριμμάτων.
- Ποσοστό βιοαποικοδόμησης των διαφόρων κλασμάτων, ρυθμός αποσύνθεσης της κυτταρίνης στα κλάσματα των απορριμμάτων.

Ο καθορισμός αυτών των παραμέτρων καθιστά το μοντέλο αρκετά ευέλικτο και εφαρμόσιμο σε διάφορους ΧΥΤΑ, λαμβάνοντας υπόψη τους συγκεκριμένους τύπους των αποτιθέμενων απορριμμάτων, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς και τους ρυθμούς απόθεσης.

Η μεθανογενής αποδόμηση του άνθρακα προσομοιώνεται με το διαχωρισμό των διαφόρων τύπων των απορριμμάτων σε τρία κλάσματα ανάλογα με το ρυθμό αποδόμησης. Το πρώτο κλάσμα (αργό) περιλαμβάνει τα υλικά που αποδομούνται αργά, όπως εφημερίδες και υφάσματα. Το δεύτερο κλάσμα (μέσο) περιλαμβάνει τα υλικά που αποδομούνται με μέσο ρυθμό, όπως χαρτιά ή πάνες. Τέλος, το τρίτο κλάσμα περιλαμβάνει τα υλικά που αποδομούνται γρήγορα, όπως υπολείμματα κήπου και λάσπη βιολογικών καθαρισμών (Πίνακας 10-4). Στη συνέχεια υπολογίζεται η παραγωγή του βιοαερίου με τη χρήση της εξίσωσης (10-3) που ακολουθεί

$$C_t = C_0 - (C_{0,1} * e^{(-k_1 t)} + C_{0,2} * e^{(-k_2 t)} + C_{0,3} * e^{(-k_3 t)}) \quad (10-3)$$

και

$$C_x = C_t - C_{t-1}$$

όπου:

C_t = μάζα του αποδομήσιμου άνθρακα που έχει αποδομηθεί μέχρι τη χρονική στιγμή t (τόνοι)

C_0 = μάζα του αποδομήσιμου άνθρακα τη χρονική στιγμή $t = 0$ (τόνοι)

- $C_{0,i}$ = μάζα του αποδομήσιμου άνθρακα τη χρονική στιγμή $t = 0$ σε κάθε κλάσμα (τόνοι)
- C_x = μάζα του αποδομήσιμου άνθρακα που αποδομήθηκε το έτος t (τόνοι)
- t = χρονικό διάστημα ανάμεσα στην ταφή των απορριμμάτων και την παραγωγή του μεθανίου
- k_i = σταθερά του ρυθμού αποδόμησης για κάθε κλάσμα αποδομήσιμου άνθρακα (ανά έτος)

Αποδόμηση	Κλάσματα
Γρήγορη	Ζυμώσιμα
	Υπολείμματα κήπου
	Λάσπη βιολογικών
Μέτρια	Πάνες
	1/4 Χαρτί
Αργή	3/4 Χαρτί
	Εφημερίδες
	Υφάσματα

Πίνακας 10-4: Κατάταξη κλασμάτων ανάλογα με το ρυθμό αποδόμησης

Υπολογισμός των εκπομπών του βιοαερίου

Οι εκπομπές του βιοαερίου από τους ΧΥΤΑ ελέγχονται συνήθως από μηχανικά μέσα, όπως για παράδειγμα από την εγκατάσταση μέσων περιορισμού του βιοαερίου (τελικό κάλυμμα, μεμβράνη) και των συστημάτων συλλογής του βιοαερίου. Το αέριο που συλλέγεται μπορεί στη συνέχεια να οδηγηθεί στους πυρσούς για καύση, ή σε μηχανές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το GasSim Lite λαμβάνει τις πληροφορίες που παρέχουν τα μηχανικά μέσα για τον καθορισμό της ποσότητας των ανεξέλεγκτων εκπομπών βιοαερίου διαμέσου της επιφάνειας του ΧΥΤΑ, του τελικού καλύμματος, και των πλευρικών τοιχωμάτων του ΧΥΤΑ (μεμβράνη). Το μοντέλο κάνει την παραδοχή, πως όσο βιοαέριο δε συλλέγεται βρίσκεται σε ισορροπία με το ρυθμό εκπομπής του βιοαερίου διαμέσου του καλύμματος ή της μεμβράνης (σε σταθερές συνθήκες).

Το μοντέλο θεωρεί πως το συνολικό βιοαέριο που παράγεται ισούται με το άθροισμα του βιοαερίου που παράγεται από το καλυμμένο τμήμα του ΧΥΤΑ συν το βιοαέριο που παράγεται από το ακάλυπτο τμήμα του ΧΥΤΑ. Επί-

σης γίνεται η παραδοχή πως η ποσότητα του βιοαερίου που παράγεται από το καλυμμένο τμήμα του ΧΥΤΑ και δε συλλέγεται, εκπέμπεται ανεξέλεγκτα στην ατμόσφαιρα (Εξίσωση 10-4)

$$Q_{res} = Q_{gencapped} - ((Q_{flare} + Q_{utilisation}) * (1 - \frac{CF}{100}))$$

(10-4)

όπου :

- Q_{res} = υπολειμματική παραγωγή βιοαερίου
- $Q_{gencapped}$ = βιοαέριο που παράγεται από το καλυμμένο τμήμα του ΧΥΤΑ
- Q_{flare} = βιοαέριο που οδηγείται στους πυρσούς
- $Q_{utilisation}$ = βιοαέριο που οδηγείται σε μηχανές παραγωγής ηλεκτρισμού
- CF = απόδοση του συστήματος συλλογής βιοαερίου

Οι εκπομπές του βιοαερίου διαμέσου του καλύμματος και της μεμβράνης καθορίζονται από τη διαπερατότητα και το πάχος του πιο αδιαπέρατου στρώματος. Το μοντέλο κάνει ακόμα την παραδοχή πως η κίνηση του βιοαερίου είναι εμβολικής ροής (plug flow), και πως το κάλυμμα και η μεμβράνη είναι ομογενή και ισότροπα, παρότι στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει. Το σφάλμα όμως λόγω της παραδοχής αυτής είναι αμελητέο. Οι ανεξέλεγκτες εκπομπές του βιοαερίου από το κάλυμμα και τη μεμβράνη υπολογίζονται από :

- Το σχέδιο του καλύμματος
- Την υδραυλική αγωγιμότητα του καλύμματος
- Το πάχος του καλύμματος
- Το πάχος των απορριμμάτων
- Την υδραυλική αγωγιμότητα των απορριμμάτων
- Το πάχος της μεμβράνης
- Την υδραυλική αγωγιμότητα της μεμβράνης
- Τις διαστάσεις του ΧΥΤΑ

Οι εκπομπές του βιοαερίου διαμέσου του καλύμματος και της μεμβράνης μπορούν να υπολογιστούν με χρήση της εξίσωσης του Darcy για ομογε-

νές μέσο. Υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο, καθώς η περίσσεια του βιοαερίου (Q_{res}) εκπέμπεται από κάθε μέσο σε διαφορετικά ποσοστά (Εξίσωση 10-5)

$$Q_c = \frac{Q_{res}}{\left(\frac{d_c}{K_c A_c} \cdot \frac{K_l A_l}{d_l} \right) + 1}$$

$$Q_l = \frac{Q_{res}}{\left(\frac{d_l}{K_l A_l} \cdot \frac{K_c A_c}{d_c} \right) + 1} \quad (10-5)$$

όπου :

Q_c = Ροή ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας του καλύμματος (l = μεμβράνη)

Q_{res} = Υπολειμματική παραγωγή βιοαερίου

K_c = Ενεργή διαπερατότητα του καλύμματος (l = μεμβράνη)

d_c = Πάχος του καλύμματος στη διεύθυνση της ροής (l = μεμβράνη)

A_c = Επιφάνεια του καλύμματος στη διεύθυνση της ροής (l = μεμβράνη)

Η επιφάνεια της μεμβράνης καθορίζεται από την περίμετρο του ΧΥΤΑ και από το βάθος της ακόρεστης ζώνης μέσα στο ΧΥΤΑ, καθώς γίνεται η παραδοχή πως το βιοαέριο δε διαλύεται στα στραγγίσματα. Το βιοαέριο που παράγεται από το ακάλυπτο τμήμα του ΧΥΤΑ εκπέμπεται όλο από την επιφάνεια, καθώς η ελεύθερη επιφάνεια των απορριμμάτων είναι πολύ πιο διαπερατή από τα πλευρικά τοιχώματα του χώρου ταφής, είτε αυτά είναι μηχανικά κατασκευασμένα ή φυσικά.

Υπολογισμός εκπομπών αερίων ιχνών και VOCs

Οι συγκεντρώσεις των αερίων ιχνών μπορούν είτε να εισαχθούν από το χρήστη είτε να επιλεγούν οι εξ' ορισμού τιμές. Το GasSim Lite προσομοιώνει τις συγκεντρώσεις των αερίων σε mg / m³. Παρόλο που οι συγκεντρώσεις των αερίων στο πεδίο μετρώνται σε ppm, μπορούν να μετατραπούν σε mg / m³ με βάση την εξίσωση 10-6 που ακολουθεί:

$$C_p = \frac{C_{\%v/v}}{100\%} \cdot \frac{(1000 \cdot MW_p)}{Vm} \quad (10-6)$$

όπου

C_p = συγκέντρωση του ρύπου p (mg / m³)

$C_{\%v/v}$ = συγκέντρωση του ρύπου p (%v/v)

MW_p = μοριακό βάρος του ρύπου p (g)

Vm = μοριακός όγκος (2,241 * 10⁻² m³ / mol)

Η μελέτη των εκπομπών των συνολικών πτητικών υδρογονανθράκων (VOCs) έχει δείξει πως η συγκέντρωση των εκπεμπόμενων αέριων ιχνών, με την παραδοχή πως μειώνεται με την πάροδο του χρόνου), ακολουθεί την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{tg} = C_g \cdot e^{(-k_{tg}t)} \quad (10-7)$$

όπου

C_{tg} = συγκέντρωση του ρύπου τη χρονική στιγμή t (tones)

C_g = συγκέντρωση του ρύπου τη χρονική στιγμή t = 0 (tones)

k_{tg} = σταθερά αποδόμησης, ο χρόνος ημιζωής του ρύπου

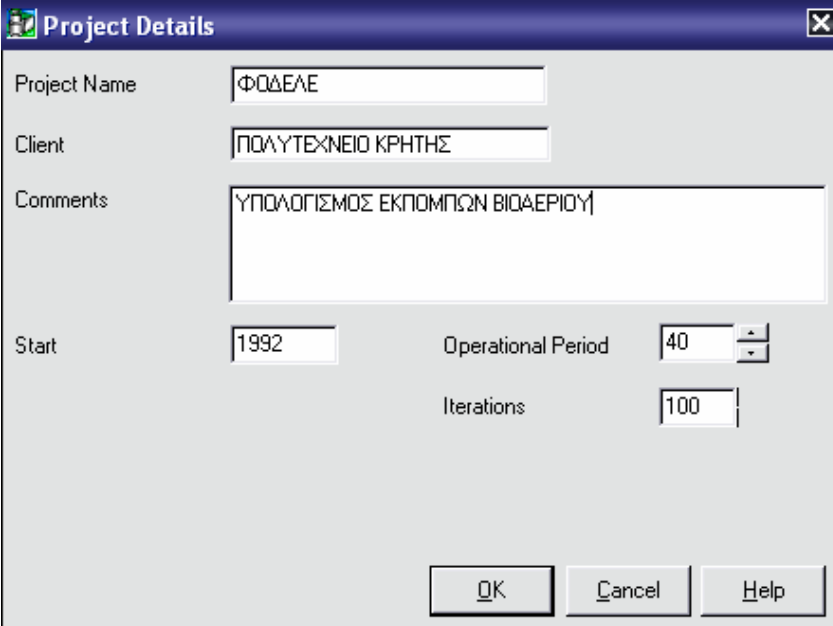
t = χρονικό διάστημα μεταξύ της απόθεσης των απορριμμάτων και της παραγωγής του βιοαερίου (χρόνια)

Λεπτομέρειες του προγράμματος GasSim Lite

Οι πρώτες πληροφορίες που απαιτούνται από το μοντέλο, σχετίζονται με την περιοχή της προσομοίωσης και παρουσιάζονται στην εικόνα 10-14. Στο παράθυρο με τίτλο 'Project Details', εισάγονται το όνομα της μελέτης, το όνομα του μελετητή, ορισμένα σχόλια, και τα παρακάτω:

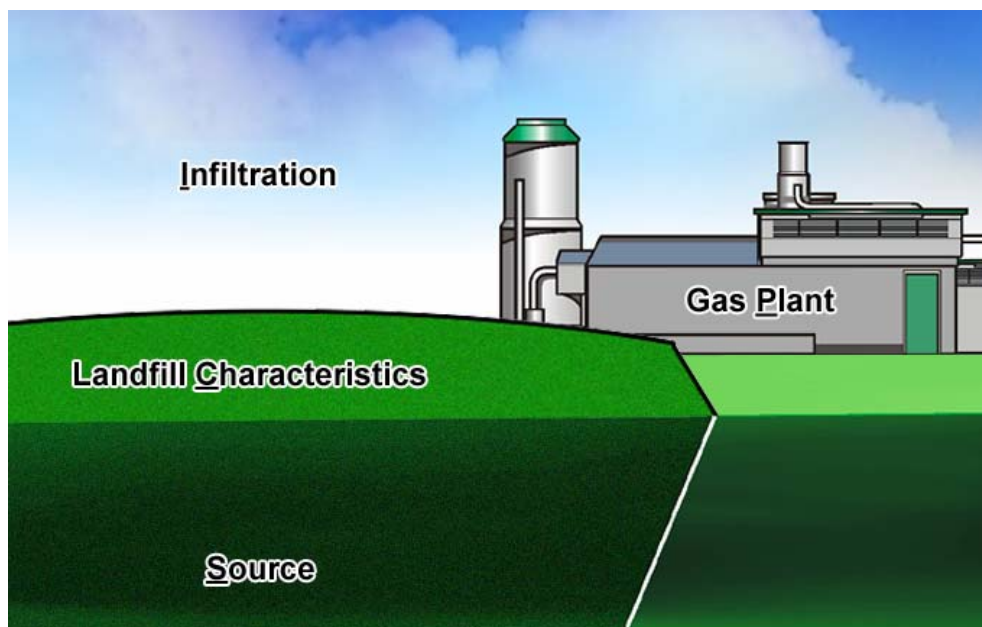
- Το έτος έναρξης απόρριψης των απορριμμάτων, 'Start'
- Η διάρκεια απόρριψης των απορριμμάτων, 'Operational Period'

- Ο αριθμός των επαναλήψεων, 'Iterations', (δηλαδή πόσες φορές θα τρέξει το μοντέλο χρησιμοποιώντας την προσομοίωση Monte Carlo). Η εξ' ορισμού τιμή είναι 100.



Εικόνα 10-14: Το παράθυρο 'Project Details'

Η πρόσβαση στο παράθυρο αυτό γίνεται από το κύριο μενού από την επιλογή 'Edit - 'Project Details'



Εικόνα 10-15: Το κύριο μενού του GasSim Lite

Τα δεδομένα εισαγωγής που απαιτεί το μοντέλο είναι:

1. Το είδος απορριμμάτων
2. Η σύσταση των απορριμμάτων
3. Οι ετήσιες ποσότητες απορριμμάτων
4. Οι ρυθμοί αποδόμησης (γρήγορη, μέση, αργή αποδόμηση)
5. Η έκταση Χώρου Διάθεσης Απορριμμάτων
6. Η διήθηση
7. Αν έχει στεγάνωση πυθμένα
8. Αν έχει τελικό κάλυμμα
9. Η σύσταση βιοαερίου
10. Αν συλλέγεται το βιοαέριο

Στην περίπτωση του ΧΔΑ στο Φόδελε τα δεδομένα αυτά είναι:

1. Τα απορρίμματα είναι αστικά
2. Η σύστασή τους παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Κλάσματα	Ποσοστό (%)	Κλάσματα	Ποσοστό (%)
Μέταλλα	4,05	Χαρτί - Χαρτόνι	18,96
Αλουμίνιο	2,58	Πλαστικά	20,92
Γυαλί	6,73	ΔΞΥΛ	3,88
Ζυμώσιμα	35,95	Αδρανή - Υπόλοιπα	6,93

Πίνακας 10-5: Η σύσταση των απορριμμάτων [27]

3. Οι ετήσιες ποσότητες των απορριμμάτων παρουσιάστηκαν παραπάνω
4. Οι ρυθμοί αποδόμησης (1 / yr) είναι:

Αργός = 0,013

Μέτριος = 0,033

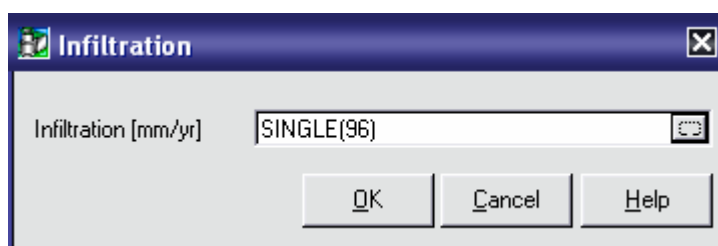
Γρήγορος = 0,04
5. Η έκταση του ΧΔΑ είναι 85.000 m²
6. Η διήθηση είναι περίπου το 20% της βροχόπτωσης. Η βροχόπτωση είναι 480 mm / yr άρα η διήθηση είναι 96 mm / yr

7. Δεν έχει στεγάνωση πυθμένα
8. Δεν έχει τελικό κάλυμμα
9. Η σύσταση του βιοαερίου παρουσιάστηκε παραπάνω
10. Το βιοαέριο δε συλλέγεται

Στη συνέχεια δίνονται περισσότερες πληροφορίες για τα απαιτούμενα δεδομένα, καθώς και ο τρόπος εισαγωγής τους.

1. Διήθηση (Infiltration)

Η διήθηση μπορεί να εισαχθεί από το παράθυρο 'Infiltration', το οποίο επιλέγει ο χρήστης από την επιφάνεια εργασίας του μοντέλου, εικόνα 10-15. Η επιλογή αυτή επιτρέπει στο χρήστη να καθορίζει τον ετήσιο ρυθμό (mm / yr) με τον οποίο το νερό εισάγεται στο ΧΥΤΑ διαμέσου των καλυμμένων ή των ακάλυπτων περιοχών.



Εικόνα 10-16: Εισαγωγή της διήθησης

Η διήθηση είναι η ενεργή βροχόπτωση που εισάγεται στη μάζα των απορριμμάτων και υπολογίζεται, αν από τη βροχόπτωση αφαιρεθεί η επιφανειακή απορροή και η εξατμισοδιαπνοή.

Το GasSim Lite χρησιμοποιεί παραμέτρους από τους τρεις αυτούς τομείς καθώς και δεδομένα από τη διήθηση (Infiltration) και από το παράθυρο που περιέχει τα χαρακτηριστικά του ΧΥΤΑ (Landfill Characteristics), για τον υπολογισμό της παραγωγής του βιοαερίου.

2. Εισαγωγή των χαρακτηριστικών του ΧΥΤΑ (Landfill Characteristics)

Τα χαρακτηριστικά του ΧΥΤΑ, εικόνα 10-16, χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: Στη γεωμετρία του χώρου (Landfill Geometry), και στα συστήματα ελέγχου (Engineered Controls).

Στο παρακάτω παράθυρο εισάγεται το μήκος του ΧΥΤΑ (κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο), και το πλάτος του ΧΥΤΑ (κατεύθυνση από Ανατολή προς Δύση). Αυτές οι διαστάσεις καθορίζουν την περιοχή στην οποία έχουν αποθεθεί τα απορρίμματα.

Εικόνα 10-17: Τα χαρακτηριστικά του ΧΥΤΑ

Το GasSim Lite κάνει την παραδοχή ότι όλος ο ΧΥΤΑ είναι μια φάση, με κάθετες πλευρές, το οποίο είναι λογικό αφού τα κελιά κατασκευάζονται έτσι ώστε να εμποδίζεται η ροή στραγγισμάτων, αλλά είναι συνήθως διαπερατά για το βιοαέριο. Το GasSim Lite χρησιμοποιεί αυτά για να καθορίσει την έκταση και τον όγκο των απορριμμάτων. Γι' αυτό το μήκος και το πλάτος πρέπει να μετριοούνται στην επιφάνεια του ΧΥΤΑ. Η έκταση της επιφάνειας χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ποσοστού του νερού στον ΧΥΤΑ με βάση το

ρυθμό διήθησης και το δυναμικό των στραγγισμάτων, αλλά χρησιμοποιείται και για τον υπολογισμό του ποσοστού των εκπομπών που απελευθερώνονται από το κάλυμμα του ΧΥΤΑ.

Το GasSim Lite χρησιμοποιεί το βάθος των ακόρεστων απορριμμάτων, (το βάθος των απορριμμάτων μείον το δυναμικό – ύψος των στραγγισμάτων) για τον καθορισμό του ποσοστού των εκπομπών που απελευθερώνονται πλευρικά διαμέσου της μεμβράνης.

Οι εκπομπές του CH₄ μπορεί να ελαττωθούν καθώς περνούν διαμέσου του καλύμματος του ΧΥΤΑ λόγω της μικροβιακής δραστηριότητας. Το ποσοστό του CH₄ που μετατρέπεται σε CO₂ εισάγεται στην επιλογή 'Biological Methane Oxidation' και πρέπει να υπολογίζεται για την συγκεκριμένη περιοχή, αφού η ποσότητα της οξείδωσης του CH₄ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το πάχος του καλύμματος, η διαπερατότητά του κ.ά. Το GasSim Lite προσομοιώνει τη μείωση του CH₄ χρησιμοποιώντας δύο προσεγγίσεις. Η απλούστερη είναι η μείωση του CH₄ κατά 10 % με βάση τις οδηγίες του IPCC. Αυτή η τιμή μπορεί να χρησιμοποιείται αν δεν υπάρχουν συγκεκριμένα δεδομένα πεδίου.

Η δεύτερη προσέγγιση υπολογίζει το ρυθμό οξείδωσης του CH₄ για διαφορετικά υλικά καλύμματος. Αυτό μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα εύρος οξείδωσης του CH₄ της τάξεως του 10 – 46 %, με μέση τιμή το 25 %, που προκύπτει αν το πάχος του εδαφικού καλύμματος είναι μεγαλύτερο από 300 mm. Αν το πάχος του εδαφικού καλύμματος είναι μικρότερο των 300 mm το GasSim Lite θεωρεί πως δε λαμβάνει χώρα οξείδωση. Επιπροσθέτως, το GasSim Lite δίνει τη δυνατότητα της προσομοίωσης των ρωγμών στο εδαφικό κάλυμμα, από όπου το CH₄ απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα χωρίς να υποστεί μικροβιακή οξείδωση. Η εξ' ορισμού τιμή των ρωγμών είναι 10 % με βάση μετρήσεις της Environmental Agency το 2001.

Συστήματα ελέγχου (Engineered Controls)

Ο τομέας αυτός επιτρέπει τον καθορισμό των συστημάτων ελέγχου που εγκαταστάθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής του ΧΥΤΑ, για την αποφυγή των ανεξέλεγκτων εκπομπών του βιοαερίου. Αυτά είναι κυρίως η στεγάνωση του πυθμένα και των πλευρών του ΧΥΤΑ, 'Liner', και το εδαφικό κά-

λυμμα, 'Cap' τα οποία είναι σημαντικά δεδομένα, αφού το GasSim Lite θεωρεί πως η ποσότητα του βιοαερίου που δεν ανακτάται χάνεται ανεξέλεγκτα από τις παραπάνω διαδρομές.

Ο χρήστης καλείται να επιλέξει την εικόνα του εδαφικού καλύμματος και της στεγάνωσης του πυθμένα που ανταποκρίνεται στην περιοχή της προσομοίωσης. Το GasSim Lite θα απαιτήσει μετά το πάχος, 'Thickness', και την υδραυλική αγωγιμότητα, 'Hydraulic Conductivity' όλων των στρωμάτων που έχουν οριστεί. Η διαπερατότητα του εδαφικού καλύμματος και του συστήματος στεγάνωσης του πυθμένα εισάγονται σαν υδραυλικές αγωγιμότητες. Το GasSim Lite, στη συνέχεια, καθορίζει τη διαπερατότητα του βιοαερίου στο εδαφικό κάλυμμα και στο σύστημα στεγάνωσης του πυθμένα και θεωρεί πως ελέγχεται από τα λιγότερο διαπερατά στρώματα.

3. Δεδομένα εισαγωγής του όρου της πηγής (Source)

Ο όρος της πηγής έχει διαιρεθεί σε τρεις τομείς:

- Στην πηγή, 'Source'
- Στην υγρασία των απορριμμάτων, 'Waste Moisture Content'
- Στον κατάλογο των αερίων που βρίσκονται σε ίχνη, 'Trace gas Inventory'.

Το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων με το όνομα 'Source', απαιτεί την ποσότητα και τη σύσταση των απορριμμάτων που ενταφιάζονται για κάθε έτος λειτουργίας του ΧΥΤΑ. Ο ρυθμός εισαγωγής απορριμμάτων στο ΧΥΤΑ, 'Waste Input Rate' (τόνοι), απαιτείται για κάθε έτος λειτουργίας. Το είδος των απορριμμάτων (π.χ. οικιακά, βιομηχανικά, αδρανή), εισάγεται με την επιλογή του κουτιού που περιέχει τις τρεις κουκίδες δεξιά από το κουτί με το όνομα 'Breakdown'. Έτσι ανοίγει το παράθυρο 'Waste Breakdown' (εικόνα 10-17), στο οποίο εισάγεται το ποσοστό που αντιστοιχεί σε κάθε τύπο απορριμμάτων.

Source

Year	Waste Input (t)	Cumulative (t)	Breakdown	Composition	% waste in place capped
1992	SINGLE(51440)	51440	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
1993	SINGLE(54012)	105452	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
1994	SINGLE(56713)	162165	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
1995	SINGLE(59549)	221714	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
1996	SINGLE(62526)	284240	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
1997	SINGLE(65652)	349892	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
1998	SINGLE(68935)	418827	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
1999	SINGLE(72382)	491209	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
2000	SINGLE(76001)	567210	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
2001	SINGLE(79801)	647011	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
2002	SINGLE(83791)	730802	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
2003	SINGLE(86700)	817502	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)
2004	SINGLE(9100)	817502	Entered	1980's - 2010 waste streams	SINGLE(100)

Repeat Repeat Repeat Repeat

Composition Editor

100% cap at end of operational period ☒

Proportion to CO₂ [%] SINGLE(47)

Proportion to CH₄ [%] SINGLE(52)

Cellulose Decay Rates

	Dry	Default Average	Wet	Default Dry	Average	Default Wet
Slow	SINGLE(0,013)	SINGLE(0,046)	SINGLE(0,076)	SINGLE(0,013)	SINGLE(0,046)	SINGLE(0,076)
Moderate	SINGLE(0,033)	SINGLE(0,076)	SINGLE(0,116)	SINGLE(0,046)	SINGLE(0,076)	SINGLE(0,116)
Fast	SINGLE(0,04)	SINGLE(0,116)	SINGLE(0,694)	SINGLE(0,076)	SINGLE(0,116)	SINGLE(0,694)

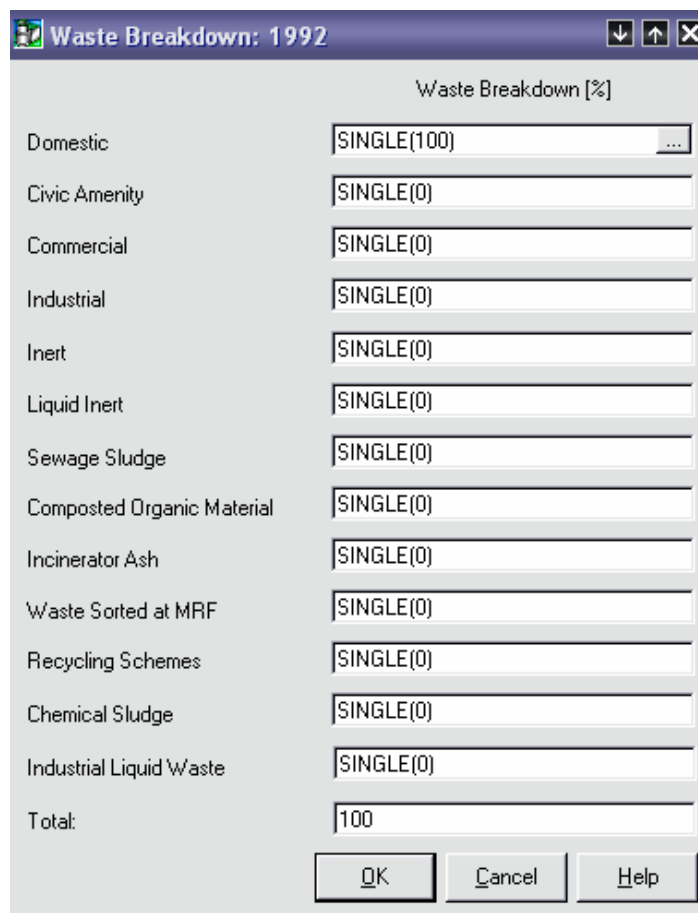
Default

Waste Moisture Content Trace Gas OK Cancel Help

Εικόνα 10-18: Το παράθυρο εισαγωγής των δεδομένων της πηγής, 'Source'

Η σύσταση του κάθε τύπου απορριμμάτων καθορίζεται από το κουμπί με το όνομα 'Composition'. Υπάρχει η επιλογή για την εισαγωγή προκαθορισμένων συστάσεων απορριμμάτων που έχουν εξαχθεί από μελέτες, ή της εισαγωγής της σύστασης των απορριμμάτων που δέχεται ο ΧΥΤΑ, αν αυτή είναι γνωστή. Η εισαγωγή της σύστασης των απορριμμάτων γίνεται στο παράθυρο 'Waste Composition' (Εικόνα 10-19). Στο παράθυρο αυτό εισάγονται ακόμα και άλλα χαρακτηριστικά των κλασμάτων των απορριμμάτων, όπως το ποσοστό υγρασίας, το περιεχόμενο σε κυτταρίνη και ο βαθμός αποσύνθεσης. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ποσότητας

του άνθρακα που είναι διαθέσιμος για αργή, μέτρια, γρήγορη αποδόμηση, άρα και της ποσότητας - ρυθμού παραγωγής του βιοαερίου.



Waste Breakdown [%]	
Domestic	SINGLE(100)
Civic Amenity	SINGLE(0)
Commercial	SINGLE(0)
Industrial	SINGLE(0)
Inert	SINGLE(0)
Liquid Inert	SINGLE(0)
Sewage Sludge	SINGLE(0)
Composted Organic Material	SINGLE(0)
Incinerator Ash	SINGLE(0)
Waste Sorted at MRF	SINGLE(0)
Recycling Schemes	SINGLE(0)
Chemical Sludge	SINGLE(0)
Industrial Liquid Waste	SINGLE(0)
Total:	100

OK Cancel Help

Εικόνα 10-19: Το παράθυρο 'Waste Breakdown'

Στη συνέχεια επιστρέφοντας στο παράθυρο 'Source' ο χρήστης καλείται να επιλέξει το ποσοστό των απορριμμάτων στα οποία τοποθετείται εδαφικό κάλυμμα μετά το πέρας του κάθε έτους λειτουργίας. Έτσι το GasSim Lite μπορεί να υπολογίσει την ποσότητα του βιοαερίου που είναι διαθέσιμη για χρήση, αφού κάνει την παραδοχή πως το βιοαέριο που παράγεται στην περιοχή χωρίς εδαφικό κάλυμμα δε θα συλλεχθεί αλλά θα απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα.

Το GasSim Lite ακόμα, μπορεί να προσομοιώσει ΧΥΤΑ χωρίς εδαφικό κάλυμμα πριν την τοποθέτηση του τελικού καλύμματος, αν ο χρήστης αυξήσει τα χρόνια λειτουργίας του και ορίζει μηδενικό ρυθμό απόθεσης απορριμμάτων.

Waste fraction	Waste fraction	Water Content (%)	Cellulose (%)	Hemi-cellulose (%)	Decomposition (%)
Textiles	Textiles	SINGLE(25)	SINGLE(20)	SINGLE(20)	SINGLE(50)
Miscellaneous combustible	Disposable nappies	SINGLE(20)	SINGLE(25)	SINGLE(25)	SINGLE(50)
	Other misc. combustibles	SINGLE(20)	SINGLE(25)	SINGLE(25)	SINGLE(50)
Putrescible	Garden waste	SINGLE(65)	SINGLE(25,7)	SINGLE(13)	SINGLE(62)
	Other putrescible	SINGLE(65)	SINGLE(55,4)	SINGLE(7,2)	SINGLE(76)
Fines	10mm fines	SINGLE(40)	SINGLE(25)	SINGLE(25)	SINGLE(50)
Sewage sludge	Sewage sludge	SINGLE(70)	SINGLE(14)	SINGLE(14)	SINGLE(75)
	Composted organic	SINGLE(30)	SINGLE(0,7)	SINGLE(0,5)	SINGLE(57)
	Incinerator ash	SINGLE(30)	SINGLE(8)	SINGLE(8)	SINGLE(57)
Non-Degradabl	Non degradable				

Εικόνα 10-20: Το παράθυρο 'Waste Composition'

Στα κουτιά 'Proportions of Methane' και 'Proportions of Carbon Dioxide', ο χρήστης εισάγει την αναμενόμενη σύσταση του βιοαερίου κατά τα χρόνια της προσομοίωσης.

Οι ρυθμοί αποδόμησης της κυτταρίνης 'Cellulose Decay Rates' , για ξηρά (<30%), μέσης υγρασίας (30% - 60%), υγρά απορρίμματα (> 60%), και για άνθρακα που αποδομείται αργά, με μέσο ρυθμό, γρήγορα καθορίζουν το ρυθμό αποδόμησης των απορριμμάτων. Υπάρχουν εξ ορισμού τιμές των ρυθμών αποδόμησης, ή ο χρήστης μπορεί να εισάγει τους ρυθμούς αποδόμησης των απορριμμάτων του συγκεκριμένου ΧΥΤΑ. Οι τιμές των ρυθμών αποδόμησης πρέπει να επιλέγονται με προσοχή καθώς ελέγχουν την αποδόμηση των απορριμμάτων και την παραγωγή του βιοαερίου.

Το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων 'Source', δίνει ακόμα τη δυνατότητα στο χρήστη του προγράμματος να εισάγει την υγρασία των απορριμμάτων (ξηρά, μέσης υγρασίας, υγρά), αν αυτή είναι γνωστή, ή να την υπολογίσει από το παράθυρο 'Waste Moisture Content' (Εικόνα 10-20).

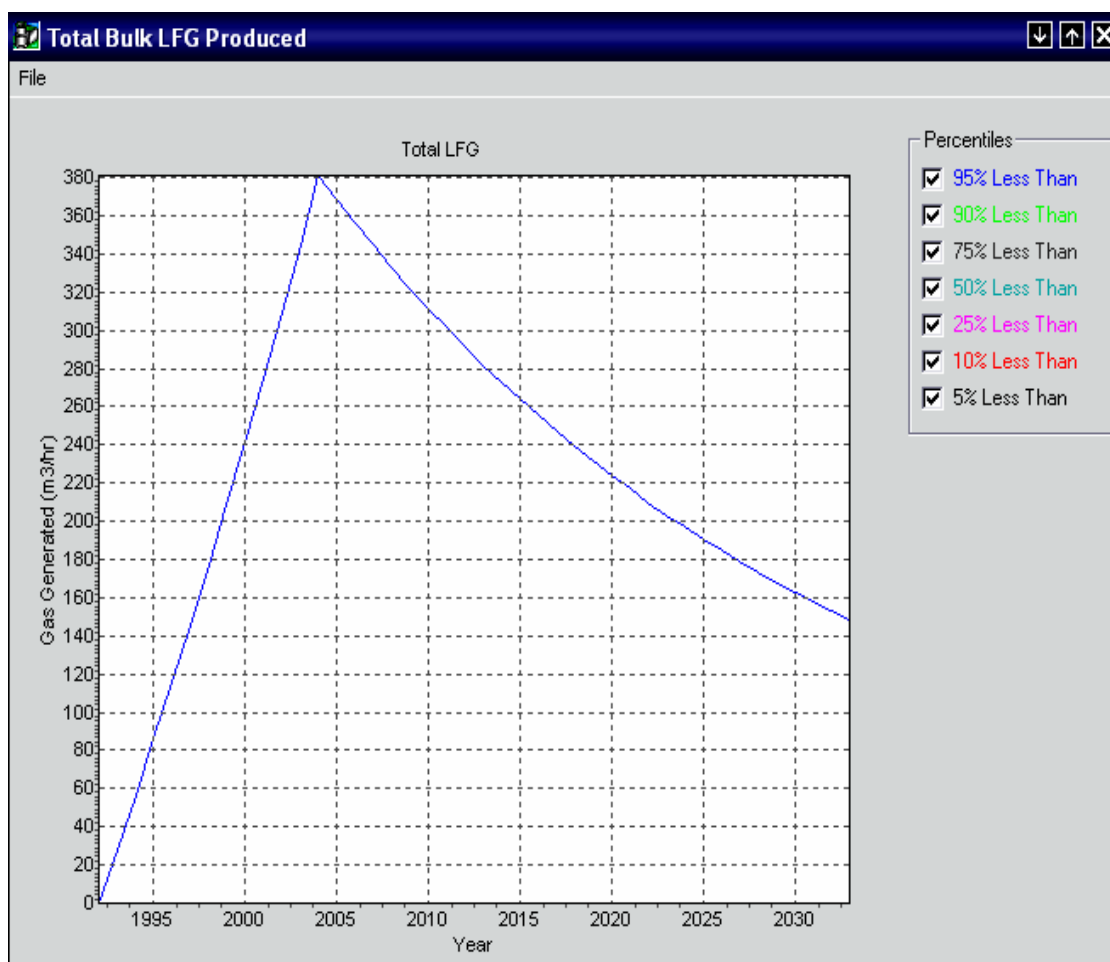
Εικόνα 10-21: Το παράθυρο 'Waste Moisture Content'

4. Μονάδα ανάκτησης ενέργειας ή / και καταστροφής βιοαερίου (Gas Plant)

Από το κύριο μενού (Εικόνα 10-15), ο χρήστης δύναται να επιλέξει το 'Gas Plant' για να προσομοιώσει την καύση του βιοαερίου σε πυρσούς ή / και την ανάκτηση ενέργειας. Στο παράθυρο 'Gas Plant' ο χρήστης εισάγει τον αριθμό των πυρσών και των μηχανών παραγωγής ενέργειας, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Αφού εισαχθούν όλα τα δεδομένα που απαιτεί το μοντέλο, επιλέγουμε από το κύριο μενού το "Simulate" και από εκεί το "Source Gases". Αν δεν υπάρχουν λάθη ή ελλείψεις στα δεδομένα εισαγωγής το μοντέλο τρέχει και από το "Results" επιλέγουμε "Plot bulk gas production".

Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τη συνολική παραγωγή του βιοαερίου από την οποία εξάγουμε την παραγωγή του CH₄, αφού είναι γνωστή η σύσταση του βιοαερίου (Γράφημα 10-2) . Τέλος, όπως έχουμε ήδη αναφέρει θεωρούμε πως όλη η ποσότητα του CH₄ που παράγεται εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα αφού στο ΧΔΑ στο Φόδελε δεν υπάρχει σύστημα συλλογής βιοαερίου, αλλά ούτε και τελικό εδαφικό κάλυμμα.



Γράφημα 10-2: Ο ετήσιος ρυθμός παραγωγής – εκπομπής βιοαερίου (m³ / h)

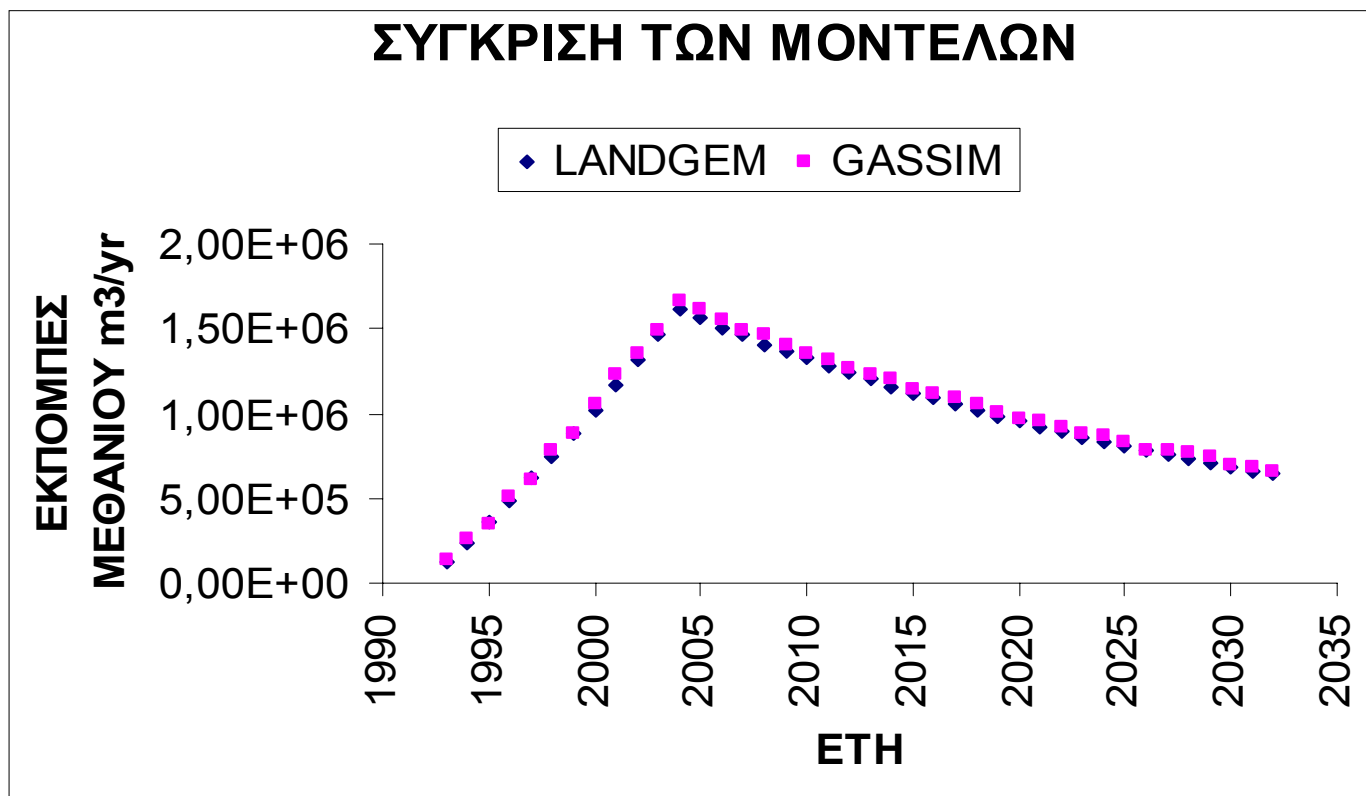
Στη συνέχεια με βάση τα αποτελέσματα που λάβαμε από τα δύο μοντέλα θα συγκρίνουμε τις ανεξέλεγκτες εκπομπές του CH₄.

10.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων

Επειδή η έκδοση του μοντέλου GasSim με την οποία δουλέψαμε δίνει δεδομένα για σαράντα χρόνια από το έτος της πρώτης απόρριψης απορριμμάτων, η σύγκριση των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ θα γίνει και αυτή για σαράντα χρόνια. Στον Πίνακα 10 -6 που ακολουθεί φαίνονται οι εκπομπές του CH₄, όπως εκτιμήθηκαν από τα δύο μοντέλα, καθώς και η ποσοστιαία διαφορά τους. Το μοντέλο GasSim δίνει περίπου 3% περισσότερες εκπομπές CH₄. Άρα τα δύο μοντέλα δίνουν τα ίδια αποτελέσματα. Επειδή το Landgem

Πίνακας 10-6: Σύγκριση των εκπαιδευτών του CH₄

είναι πιο απλό στη χρήση, και σκοπός της εργασίας είναι απλά ο υπολογισμός των εκπομπών του CH₄, θα δουλέψουμε μόνο με αυτό το μοντέλο στη συνέχεια της εργασίας μας. Η σύγκριση των δύο μοντέλων φαίνεται καλύτερα στο γράφημα 10 -3 που ακολουθεί.



Γράφημα 10-3: Σύγκριση των μοντέλων

Στη συνέχεια με τη χρήση του μοντέλου Landgem θα εξετάσουμε πόση θα ήταν μείωση των εκπομπών του CH₄ από το ΧΔΑ στο Φόδελε αν εφαρμόζοταν η μείωση της ποσότητας των βιοαπτοικοδομήσιμων υλικών (ζυμώσιμων, χαρτιού) που θάβονται σύμφωνα με την Οδηγία 99/31/EU.

11. ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CH₄ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΟΔΗΓΙΑ 99/31/EU

11.1 Γενικά στοιχεία

Για την εναρμόνιση με την Οδηγία 99/31/EK [29] πρέπει μέχρι το 2010 τα βιοαποικοδομήσιμα υλικά που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ να μειωθούν κατά 25 % με βάση τις ποσότητες του 1995, μέχρι το 2013 κατά 50 % και μέχρι το 2020 κατά 65%. Στην παρούσα μελέτη θα εξεταστεί πόσο διαφορετικές θα ήταν οι εκπομπές CH₄ από το ΧΔΑ στο Φόδελε αν κατέληγαν εκεί λιγότερα βιοαποικοδομήσιμα υλικά. Στο πρώτο σενάριο θα καταλήγουν 25% λιγότερα ζυμώσιμα, στο δεύτερο 50% λιγότερα, και στο τρίτο 65 % λιγότερα ζυμώσιμα. Με το να αλλάζουν οι ποσότητες των ζυμώσιμων, αλλάζει η % σύσταση των απορριμμάτων, άρα και η ειδική παραγωγή του CH₄, L₀. Αρχικά θα υπολογίσουμε πόσο αλλάζουν οι ποσότητες των απορριμμάτων που καταλήγουν στο ΧΔΑ για τα διάφορα σενάρια.

Στον Πίνακα 11-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι συνολικές ποσότητες των αστικών απορριμμάτων (σε τόνους) που κατέληξαν στο ΧΔΑ από το 1992 έως το 2003, οι ποσότητες των ζυμώσιμων και οι ποσότητες των υπολοίπων απορριμμάτων. Η ποσότητα των ζυμώσιμων, σε τόνους, υπολογίστηκε με βάση τη σύσταση των απορριμμάτων, στην οποία τα ζυμώσιμα αποτελούν το 35.95% [27].

	MSW	ΖΥΜΩΣΙΜΑ	ΥΠΟΛΟΙΠΑ
1992	51440,00	18492,68	32947,32
1993	54012,00	19417,31	34594,69
1994	56713,00	20388,32	36324,68
1995	59549,00	21407,87	38141,13
1996	62526,00	22478,10	40047,90
1997	65652,00	23601,89	42050,11
1998	68935,00	24782,13	44152,87
1999	72382,00	26021,33	46360,67
2000	76001,00	27322,36	48678,64
2001	79801,00	28688,46	51112,54
2002	83791,00	30122,86	53668,14
2003	86700,00	31168,65	55531,35

Πίνακας 11-1: Ποσότητες απορριμμάτων που κατέληξαν στο ΧΔΑ [24]

11.2 Σενάρια μείωσης ζυμώσιμων

11.2.1 Σενάριο 1^ο – Μείωση των ζυμώσιμων κατά 25 %

Στο σενάριο αυτό θα εξετάσουμε την περίπτωση που τα ζυμώσιμα που κατέληγαν στο ΧΔΑ στο Φόδελε ήταν 25% λιγότερα από τις ποσότητες του 1995. Το έτος αυτό τα ζυμώσιμα ήταν 21407,87 τόνοι. Με μείωση της τάξης του 25% οι ποσότητές τους είναι 16055,90 τόνοι. Άρα θεωρούμε πως από το 1995 και μετά τα ζυμώσιμα που κατέληγαν στο ΧΔΑ ήταν 16055,90 τόνοι. Στον Πίνακα 11-2 παρουσιάζονται οι ποσότητες των απορριμμάτων κατά το πρώτο σενάριο:

	ΥΠΟΛΟΙΠΑ	ΖΥΜΩΣΙΜΑ	ΣΥΝΟΛΟ
1992	32947,32	13869,51	46816,83
1993	34594,69	14562,99	49157,67
1994	36324,68	15291,24	51615,92
1995	38141,13	16055,90	54197,03
1996	40047,90	16055,90	56103,80
1997	42050,11	16055,90	58106,01
1998	44152,87	16055,90	60208,77
1999	46360,67	16055,90	62416,57
2000	48678,64	16055,90	64734,54
2001	51112,54	16055,90	67168,44
2002	53668,14	16055,90	69724,03
2003	55531,35	16055,90	71587,25

Πίνακας 11-2: Ποσότητες απορριμμάτων κατά το 1^ο Σενάριο

Εκτός, όμως, από τις ποσότητες των απορριμμάτων αλλάζει και η ποσοστιαία σύστασή τους. Επειδή η σύσταση των απορριμμάτων, και πιο συγκεκριμένα τα ζυμώσιμα, το χαρτί, και το ξύλο, υπεισέρχονται στον υπολογισμό της ειδικής παραγωγής του CH₄ με βάση την εξίσωση του IPCC, κρίνεται σκόπιμο ο υπολογισμός των νέων ποσοστών μόνο αυτών των τριών κλασμάτων. Έστω πως έχουμε 100 kg MSW και τα ζυμώσιμα μειώνονται κατά 25 %. Άρα θα θάβονται $100 - (35,95 \cdot 0,25) = 91,0125$ kg MSW. Σε αυτά τα ζυμώσιμα είναι $35,95 - (35,95 \cdot 0,25) = 29,96$ kg το οποίο είναι το 29,6251 %. Για τα άλλα κλάσματα δεν αλλάζουν οι ποσότητές τους αλλά μόνο τα ποσοστά τους.

Έτσι με τη μέθοδο των τριών εξάγονται τα νέα ποσοστά τους. Έχουμε λοιπόν τα ποσοστά:

ΚΛΑΣΜΑΤΑ	ΠΡΙΝ	ΜΕΤΑ
ΞΥΛΟ	0,01	0,011
ΧΑΡΤΙ	0,1896	0,208
ΖΥΜΩΣΙΜΑ	0,3595	0,2963

Πίνακας 11-3: Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων

Στη συνέχεια με βάση τη μεθοδολογία υπολογισμού του Lo που έχει ήδη παρουσιαστεί ($Lo = MCF * DOC * DOC_F * F * 16/12$) εξάγεται η τιμή του Lo μετά τη μείωση των ζυμώσιμων κατά 25% η οποία είναι 0,0479 tn CH₄ / tn MSW. Για τη μετατροπή των tn CH₄ σε m³ CH₄ πολλαπλασιάζουμε το 0,0479 με 22,4 / 0,016 και έτσι

$$Lo = 67 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{tn MSW}$$

Για τον υπολογισμό των μειωμένων εκπομπών εισάγουμε τα νέα δεδομένα (ποσότητες, Lo) στο LandGem και παίρνουμε το καινούριο output που παρατίθεται στο Παράρτημα 1 .

11.2.2 Σενάριο 2^ο – Μείωση των ζυμώσιμων κατά 50 %

Στο σενάριο αυτό θα εξετάσουμε την περίπτωση που τα ζυμώσιμα που κατέληγαν στο ΧΔΑ στο Φόδελε ήταν 50% λιγότερα από τις ποσότητες του 1995. Το έτος αυτό τα ζυμώσιμα ήταν 21407,87 τόνοι. Με μείωση της τάξης του 50% οι ποσότητές τους είναι 10703,93 τόνοι. Άρα θεωρούμε πως από το 1995 και μετά τα ζυμώσιμα που κατέληγαν στο ΧΔΑ ήταν 10703,93 τόνοι. Στον Πίνακα 11-4 παρουσιάζονται οι ποσότητες των απορριμμάτων κατά το δεύτερο σενάριο:

	ΥΠΟΛΟΙΠΑ	ΖΥΜΩΣΙΜΑ	MSW
1992	32947,32	9246,34	42193,66
1993	34594,69	9708,66	44303,34
1994	36324,68	10194,16	46518,84
1995	38141,13	10703,93	48845,07
1996	40047,90	10703,93	50751,84
1997	42050,11	10703,93	52754,04

	ΥΠΟΛΟΙΠΑ	ΖΥΜΩΣΙΜΑ	MSW
1998	44152,87	10703,93	54856,80
1999	46360,67	10703,93	57064,60
2000	48678,64	10703,93	59382,57
2001	51112,54	10703,93	61816,47
2002	53668,14	10703,93	64372,07
2003	55531,35	10703,93	66235,28

Πίνακας 11-4: Ποσότητες απορριμμάτων κατά το 2^ο Σενάριο

Με τον ίδιο τρόπο που δουλέψαμε στο 1^ο Σενάριο για τον υπολογισμό των νέων ποσοστών των κλασμάτων δουλεύουμε και σε αυτό το σενάριο. Έτσι τα νέα ποσοστά είναι:

ΚΛΑΣΜΑΤΑ	ΠΡΙΝ	ΜΕΤΑ
ΞΥΛΟ	0,01	0,012
ΧΑΡΤΙ	0,1896	0,2312
ΖΥΜΩΣΙΜΑ	0,3595	0,2192

Πίνακας 11-5: Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων

Όμοια και με το 1^ο Σενάριο υπολογίζουμε και το L_0 το οποίο είναι :

$$L_0 = 66 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{tn MSW}$$

Για τον υπολογισμό των μειωμένων εκπομπών εισάγουμε τα νέα δεδομένα (ποσότητες, L_0) στο LandGem και παίρνουμε το καινούριο output που παρατίθεται στο Παράρτημα 1.

11.2.3 Σενάριο 3^ο – Μείωση των ζυμώσιμων κατά 65 %

Στο σενάριο αυτό θα εξετάσουμε την περίπτωση που τα ζυμώσιμα που κατέληγαν στο ΧΔΑ στο Φόδελε ήταν 65% λιγότερα από τις ποσότητες του 1995. Το έτος αυτό τα ζυμώσιμα ήταν 21407,87 τόνοι. Με μείωση της τάξης του 65% οι ποσότητές τους είναι 7492,75 τόνοι. Άρα θεωρούμε πως από το 1995 και μετά τα ζυμώσιμα που κατέληγαν στο ΧΔΑ ήταν 7492,75 τόνοι. Στον Πίνακα 11-6 παρουσιάζονται οι ποσότητες των απορριμμάτων κατά το τρίτο σενάριο:

	ΥΠΟΛΟΙΠΑ	ΖΥΜΩΣΙΜΑ	MSW
1992	32947,32	6472,44	39419,76
1993	34594,69	6796,06	41390,75
1994	36324,68	7135,91	43460,59
1995	38141,13	7492,75	45633,89
1996	40047,90	7492,75	47540,66
1997	42050,11	7492,75	49542,86
1998	44152,87	7492,75	51645,62
1999	46360,67	7492,75	53853,42
2000	48678,64	7492,75	56171,39
2001	51112,54	7492,75	58605,29
2002	53668,14	7492,75	61160,89
2003	55531,35	7492,75	63024,10

Πίνακας 11-6: Ποσότητες απορριμμάτων κατά το 3^ο Σενάριο

Με τον ίδιο τρόπο που δουλέψαμε στο 1^ο Σενάριο για τον υπολογισμό των νέων ποσοστών των κλασμάτων δουλεύουμε και σε αυτό το σενάριο. Έτσι τα νέα ποσοστά είναι:

ΚΛΑΣΜΑΤΑ	ΠΡΙΝ	ΜΕΤΑ
ΞΥΛΟ	0,01	0,013
ΧΑΡΤΙ	0,1896	0,2474
ΖΥΜΩΣΙΜΑ	0,3595	0,1642

Πίνακας 11-7: Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων

Όμοια και με το 1^ο Σενάριο υπολογίζουμε και το L_0 το οποίο είναι :

$$L_0 = 65 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{tn MSW.}$$

Για τον υπολογισμό των μειωμένων εκπομπών εισάγουμε τα νέα δεδομένα (ποσότητες, L_0) στο LandGem και λαμβάνουμε το καινούριο output που παρατίθεται στο Παράρτημα 1. Με βάση όλα τα δεδομένα θα συγκρίνουμε τα σενάρια μείωσης των εκπομπών.

11.3 Σύγκριση των εκπομπών CH₄ πριν και μετά τη μείωση των ζυμώσιμων

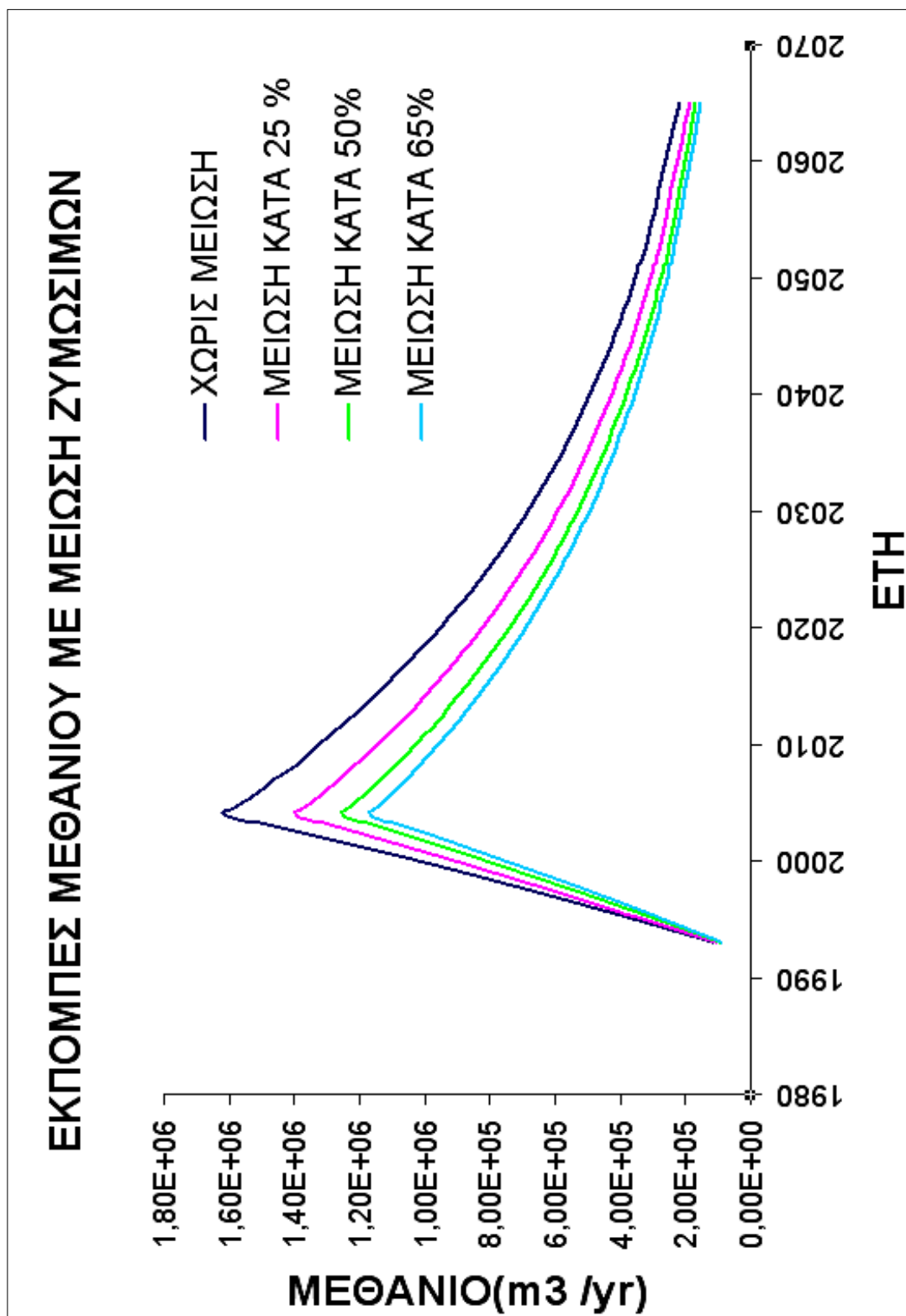
Στη συνέχεια από τα outputs του Landgem επεξεργαζόμαστε τις εκπομπές του CH₄, δηλαδή θα εξετάσουμε πόσο μειώθηκαν οι εκπομπές και θα τις παραστήσουμε γραφικά για χρονικό διάστημα 70 περίπου ετών από το έτος έναρξης λειτουργίας το ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους στο Φόδελε Ηρακλείου. Τα δεδομένα των εκπομπών είναι (Πίνακας 11-8):

	FINAL	(-)25%	ΜΕΙΩΣΗ %	(-)50%	ΜΕΙΩΣΗ %	(-)65%	ΜΕΙΩΣΗ %
1993	1,19E+05	1,08E+05	9,18	9,57E+04	19,48	8,83E+04	25,65
1994	2,40E+05	2,18E+05	9,22	1,93E+05	19,48	1,78E+05	25,66
1995	3,63E+05	3,29E+05	9,26	2,92E+05	19,50	2,70E+05	25,67
1996	4,89E+05	4,44E+05	9,23	3,93E+05	19,50	3,63E+05	25,66
1997	6,17E+05	5,58E+05	9,54	4,96E+05	19,70	4,58E+05	25,81
1998	7,49E+05	6,74E+05	9,99	5,99E+05	19,99	5,54E+05	26,00
1999	8,84E+05	7,91E+05	10,52	7,04E+05	20,33	6,52E+05	26,25
2000	1,02E+06	9,09E+05	11,06	8,11E+05	20,68	7,51E+05	26,48
2001	1,17E+06	1,03E+06	11,67	9,19E+05	21,12	8,53E+05	26,79
2002	1,31E+06	1,15E+06	12,28	1,03E+06	21,51	9,57E+05	27,04
2003	1,46E+06	1,27E+06	12,93	1,14E+06	21,89	1,06E+06	27,29
2004	1,62E+06	1,40E+06	13,50	1,26E+06	22,29	1,17E+06	27,62
2005	1,56E+06	1,35E+06	13,56	1,21E+06	22,33	1,13E+06	27,64
2006	1,51E+06	1,31E+06	13,15	1,18E+06	21,98	1,10E+06	27,29
2007	1,47E+06	1,27E+06	13,65	1,14E+06	22,39	1,06E+06	27,71
2008	1,41E+06	1,22E+06	12,88	1,10E+06	21,71	1,03E+06	27,05
2009	1,37E+06	1,18E+06	13,32	1,06E+06	22,11	9,91E+05	27,42
2010	1,33E+06	1,15E+06	13,77	1,03E+06	22,57	9,59E+05	27,83
2011	1,28E+06	1,11E+06	13,63	9,96E+05	22,42	9,28E+05	27,72
2012	1,24E+06	1,07E+06	13,54	9,64E+05	22,34	8,98E+05	27,65
2013	1,20E+06	1,04E+06	13,50	9,33E+05	22,29	8,69E+05	27,60
2014	1,16E+06	1,00E+06	13,45	9,02E+05	22,22	8,41E+05	27,53
2015	1,12E+06	9,72E+05	13,48	8,73E+05	22,27	8,13E+05	27,58
2016	1,09E+06	9,40E+05	13,52	8,45E+05	22,30	7,87E+05	27,61
2017	1,05E+06	9,10E+05	13,55	8,17E+05	22,33	7,61E+05	27,62
2018	1,02E+06	8,80E+05	13,56	7,91E+05	22,34	7,37E+05	27,64
2019	9,85E+05	8,51E+05	13,52	7,65E+05	22,30	7,13E+05	27,61
2020	9,53E+05	8,24E+05	13,51	7,40E+05	22,30	6,90E+05	27,60
2021	9,22E+05	7,97E+05	13,51	7,16E+05	22,30	6,67E+05	27,60
2022	8,92E+05	7,71E+05	13,51	6,93E+05	22,29	6,46E+05	27,60

	FINAL	(-)25%	ΜΕΙΩΣΗ %	(-)50%	ΜΕΙΩΣΗ %	(-)65%	ΜΕΙΩΣΗ %
2023	8,63E+05	7,46E+05	13,53	6,70E+05	22,30	6,25E+05	27,61
2024	8,35E+05	7,22E+05	13,52	6,49E+05	22,30	6,04E+05	27,61
2025	8,08E+05	6,99E+05	13,52	6,28E+05	22,31	5,85E+05	27,61
2026	7,81E+05	6,76E+05	13,51	6,07E+05	22,29	5,66E+05	27,60
2027	7,56E+05	6,54E+05	13,52	5,88E+05	22,30	5,47E+05	27,60
2028	7,32E+05	6,33E+05	13,51	5,68E+05	22,30	5,30E+05	27,60
2029	7,08E+05	6,12E+05	13,52	5,50E+05	22,31	5,12E+05	27,61
2030	6,85E+05	5,92E+05	13,52	5,32E+05	22,30	4,96E+05	27,60
2031	6,63E+05	5,73E+05	13,52	5,15E+05	22,31	4,80E+05	27,60
2032	6,41E+05	5,54E+05	13,52	4,98E+05	22,31	4,64E+05	27,61
2033	6,20E+05	5,36E+05	13,53	4,82E+05	22,31	4,49E+05	27,62
2034	6,00E+05	5,19E+05	13,51	4,66E+05	22,30	4,35E+05	27,60
2035	5,81E+05	5,02E+05	13,50	4,51E+05	22,29	4,20E+05	27,59
2036	5,62E+05	4,86E+05	13,51	4,37E+05	22,30	4,07E+05	27,61
2037	5,44E+05	4,70E+05	13,52	4,22E+05	22,31	3,94E+05	27,61
2038	5,26E+05	4,55E+05	13,52	4,09E+05	22,30	3,81E+05	27,61
2039	5,09E+05	4,40E+05	13,50	3,95E+05	22,29	3,68E+05	27,59
2040	4,92E+05	4,26E+05	13,51	3,83E+05	22,30	3,56E+05	27,61
2041	4,76E+05	4,12E+05	13,50	3,70E+05	22,30	3,45E+05	27,61
2042	4,61E+05	3,99E+05	13,52	3,58E+05	22,30	3,34E+05	27,60
2043	4,46E+05	3,86E+05	13,52	3,47E+05	22,29	3,23E+05	27,61
2044	4,31E+05	3,73E+05	13,51	3,35E+05	22,30	3,12E+05	27,61
2045	4,17E+05	3,61E+05	13,51	3,24E+05	22,30	3,02E+05	27,60
2046	4,04E+05	3,49E+05	13,52	3,14E+05	22,31	2,92E+05	27,61
2047	3,91E+05	3,38E+05	13,51	3,04E+05	22,31	2,83E+05	27,61
2048	3,78E+05	3,27E+05	13,51	2,94E+05	22,30	2,74E+05	27,61
2049	3,66E+05	3,16E+05	13,50	2,84E+05	22,31	2,65E+05	27,61
2050	3,54E+05	3,06E+05	13,51	2,75E+05	22,29	2,56E+05	27,61
2051	3,43E+05	2,96E+05	13,52	2,66E+05	22,31	2,48E+05	27,62
2052	3,31E+05	2,87E+05	13,49	2,57E+05	22,31	2,40E+05	27,59
2065	2,16E+05	1,87E+05	13,53	1,68E+05	22,34	1,56E+05	27,62

Πίνακας 11-8: Οι εκπομπές του CH₄ και η ποσοστιαία μείωσή τους

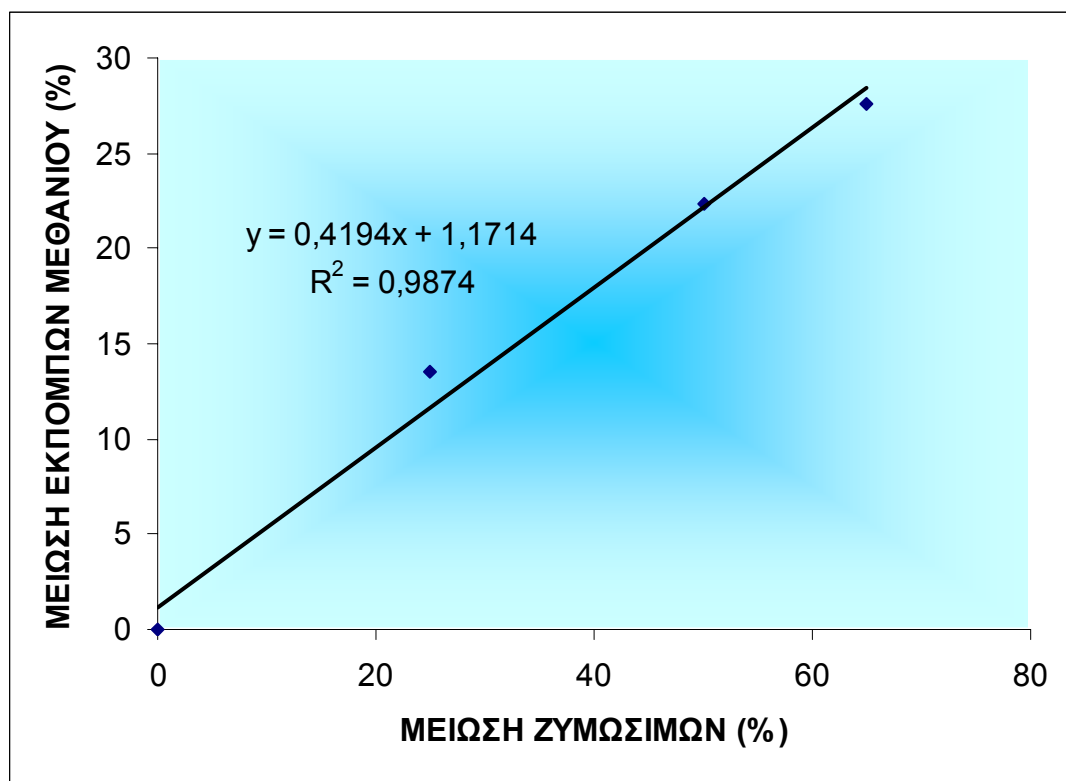
Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό πως για μείωση των ζυμώσιμων κατά 25 % οι εκπομπές CH₄ μειώνονται περίπου κατά 13,5 %, για μείωση των ζυμώσιμων κατά 50 % οι εκπομπές CH₄ μειώνονται περίπου κατά 22,3 % και τέλος για μείωση των ζυμώσιμων κατά 65 % οι εκπομπές CH₄ μειώνονται περίπου κατά 27,6 %. Στο γράφημα 11-1 που ακολουθεί παρουσιάζονται γραφικά οι εκπομπές του CH₄.



Γράφημα 11-1: Οι εκπομπές του CH₄ με βάση τα τρία σενάρια

Στη συνέχεια προσπαθήσαμε να συσχετίσουμε την ποσοστιαία μείωση των ζυμώσιμων με τη μείωση των εκπομπών του CH₄.

Έτσι κατασκευάσαμε το γράφημα 11-2 με τη βοήθεια του Excel και συμπεραίνουμε πως η σχέση τους είναι γραμμική αφού $R^2 = 0.9878$



Γράφημα 11-2: Συσχέτιση μείωσης ζυμώσιμων με μείωση εκπομπών CH₄

11.4 Μείωση της ποσότητας του χαρτιού που καταλήγει σε χώρους ταφής

Μετά τη μείωση των ποσοτήτων των ζυμώσιμων υλικών που καταλήγουν σε χώρους ταφής παρατηρήσαμε πως μειώθηκαν αρκετά οι εκπομπές του CH₄. Τώρα θα εξεταστεί και η μείωση του χαρτιού μια και αυτό είναι βιοαποικοδομήσιμο. Από την παρακάτω σχέση υπολογισμού του DOC, άρα και του Lo, φαίνεται πως ο μεγαλύτερος συντελεστής είναι το 0.4 και αναφέρεται στο χαρτί. Άρα αναμένουμε μεγάλη μείωση των εκπομπών CH₄ με την ταυτόχρονη μείωση των ζυμώσιμων και του χαρτιού.

Έχουμε:

$$\text{DOC} = 0.4 * (\text{A}) + 0.17 * (\text{B}) + 0.15 * (\text{Γ}) + 0,3 * (\text{Δ})$$

όπου:

Κλάσμα απορριμμάτων	DOC % κατά βάρος στα φρέσκα απορρίμματα
A. Χαρτί και ύφασμα (%)	40
B. Υπολείμματα κήπου (%)	17
Γ. Υπολείμματα τροφών (%)	15
Δ. Ξύλο (%)	30

Πίνακας 11-9: Τιμές του DOC στα κύρια κλάσματα των απορριμμάτων

11.4.1 Σενάριο 4^ο – Μείωση ζυμώσιμων κατά 65% και χαρτιού κατά 30%

Αρχικά υπολογίσαμε τη νέα σύσταση των απορριμμάτων αφού αλλάζουν οι ποσότητες του χαρτιού που θα καταλήγουν στο χώρο ταφής. Έτσι τα ποσοστά των κλασμάτων που μας ενδιαφέρουν πριν και μετά τη μείωση του χαρτιού κατά 30% είναι:

ΚΛΑΣΜΑΤΑ	ΠΡΙΝ	ΜΕΤΑ
ΞΥΛΟ	0,0130	0,0140
ΧΑΡΤΙ	0,2474	0,1871
ΖΥΜΩΣΙΜΑ	0,1642	0,1774

Πίνακας 11-10: Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων

Με βάση τα ποσοστά αυτά και τη γνωστή πια μεθοδολογία υπολογισμού της ειδικής παραγωγής CH₄, λαμβάνουμε :

$$L_o = 54 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{tn MSW}$$

Εισάγουμε στη συνέχεια τα νέα δεδομένα στο Landgem και λαμβάνουμε τα αποτελέσματα τα οποία παρατίθενται στο Παράρτημα 1.

11.4.2 Σενάριο 5^ο – Μείωση ζυμώσιμων κατά 65% και χαρτιού κατά 65%

Υπολογίσαμε πάλι τη νέα σύσταση των απορριμμάτων αφού αλλάζουν οι ποσότητες του χαρτιού που θα καταλήγουν στο χώρο ταφής. Έτσι τα ποσοστά των κλασμάτων που μας ενδιαφέρουν πριν και μετά τη μείωση του χαρτιού κατά 65% είναι:

ΚΛΑΣΜΑΤΑ	ΠΡΙΝ	ΜΕΤΑ
ΞΥΛΟ	0,0130	0,0155
ΧΑΡΤΙ	0,2474	0,1032
ΖΥΜΩΣΙΜΑ	0,1642	0,1957

Πίνακας 11-11: Τα νέα ποσοστά των κλασμάτων

Με βάση τα ποσοστά αυτά και τη γνωστή πια μεθοδολογία υπολογισμού της ειδικής παραγωγής CH₄, λαμβάνουμε :

$$L_o = 34.5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{tn MSW}$$

Εισάγουμε στη συνέχεια τα νέα δεδομένα στο Landgem και λαμβάνουμε τα αποτελέσματα τα οποία παρατίθενται στο Παράρτημα 1.

Έπειτα επεξεργαζόμαστε τα αποτελέσματα για να υπολογίσουμε τη μείωση των ανεξέλεγκτων εκπομπών του CH₄ που οφείλεται στη μείωση του χαρτιού. Στον πίνακα 11-11 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εκπομπές του CH₄ και η ποσοστιαία μείωσή τους.

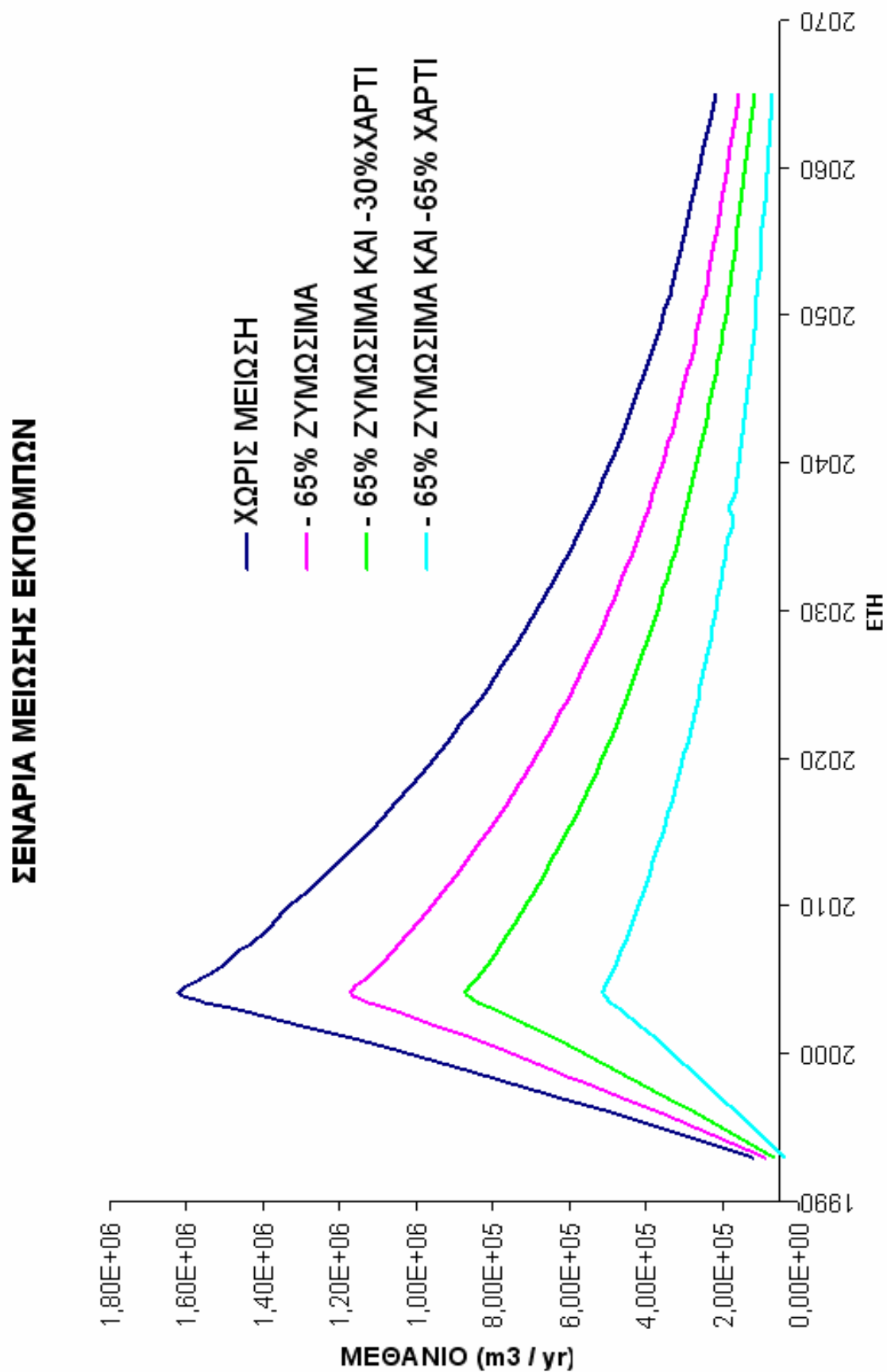
	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ	65% Ζυμώσι- μα και 30 % χαρτί	ΜΕΙΩΣΗ %	65% Ζυμώσι- μα και 65 % χαρτί	ΜΕΙΩΣΗ %
1993	1,19E+05	6,59E+04	44,54	3,89E+04	67,30
1994	2,40E+05	1,33E+05	44,56	7,84E+04	67,30
1995	3,63E+05	2,01E+05	44,55	1,19E+05	67,30
1996	4,89E+05	2,71E+05	44,55	1,60E+05	67,30
1997	6,17E+05	3,42E+05	44,66	2,01E+05	67,37
1998	7,49E+05	4,13E+05	44,81	2,44E+05	67,47
1999	8,84E+05	4,86E+05	45,02	2,86E+05	67,60
2000	1,02E+06	5,60E+05	45,20	3,30E+05	67,72
2001	1,17E+06	6,36E+05	45,44	3,74E+05	67,88
2002	1,31E+06	7,13E+05	45,64	4,19E+05	68,01
2003	1,46E+06	7,91E+05	45,87	4,66E+05	68,15
2004	1,62E+06	8,71E+05	46,09	5,12E+05	68,29
2005	1,56E+06	8,42E+05	46,10	4,95E+05	68,30
2006	1,51E+06	8,15E+05	45,88	4,79E+05	68,17
2007	1,47E+06	7,89E+05	46,17	4,64E+05	68,34
2008	1,41E+06	7,63E+05	45,69	4,49E+05	68,06
2009	1,37E+06	7,38E+05	45,96	4,34E+05	68,21
2010	1,33E+06	7,14E+05	46,25	4,20E+05	68,39
2011	1,28E+06	6,91E+05	46,18	4,07E+05	68,34
2012	1,24E+06	6,69E+05	46,12	3,93E+05	68,31
2013	1,20E+06	6,47E+05	46,09	3,81E+05	68,29
2014	1,16E+06	6,26E+05	46,04	3,68E+05	68,27
2015	1,12E+06	6,06E+05	46,07	3,56E+05	68,28
2016	1,09E+06	5,86E+05	46,09	3,45E+05	68,30
2017	1,05E+06	5,67E+05	46,11	3,33E+05	68,31
2018	1,02E+06	5,49E+05	46,12	3,23E+05	68,31
2019	9,85E+05	5,31E+05	46,09	3,12E+05	68,30
2020	9,53E+05	5,14E+05	46,09	3,02E+05	68,29
2021	9,22E+05	4,97E+05	46,09	2,92E+05	68,29
2022	8,92E+05	4,81E+05	46,09	2,83E+05	68,30
2023	8,63E+05	4,65E+05	46,09	2,74E+05	68,30
2024	8,35E+05	4,50E+05	46,09	2,65E+05	68,29
2025	8,08E+05	4,35E+05	46,09	2,56E+05	68,29
2026	7,81E+05	4,21E+05	46,08	2,48E+05	68,29
2027	7,56E+05	4,08E+05	46,09	2,40E+05	68,30
2028	7,32E+05	3,94E+05	46,10	2,32E+05	68,30
2029	7,08E+05	3,82E+05	46,10	2,24E+05	68,30
2030	6,85E+05	3,69E+05	46,09	2,17E+05	68,30
2031	6,63E+05	3,57E+05	46,09	2,10E+05	68,29

	ΑΡΧΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ	65% Ζυμώσι- μα και 30 % χαρτί	ΜΕΙΩΣΗ %	65% Ζυμώσι- μα και 65 % χαρτί	ΜΕΙΩΣΗ %
2032	6,41E+05	3,46E+05	46,09	2,03E+05	68,29
2033	6,20E+05	3,34E+05	46,09	1,97E+05	68,29
2034	6,00E+05	3,24E+05	46,09	1,90E+05	68,29
2035	5,81E+05	3,13E+05	46,09	1,84E+05	68,29
2036	5,62E+05	3,03E+05	46,08	1,72E+05	69,33
2037	5,44E+05	2,93E+05	46,10	1,78E+05	67,24
2038	5,26E+05	2,84E+05	46,09	1,67E+05	68,30
2039	5,09E+05	2,74E+05	46,09	1,61E+05	68,30
2040	4,92E+05	2,65E+05	46,09	1,56E+05	68,29
2041	4,76E+05	2,57E+05	46,08	1,51E+05	68,30
2042	4,61E+05	2,48E+05	46,11	1,46E+05	68,30
2043	4,46E+05	2,40E+05	46,09	1,41E+05	68,29
2044	4,31E+05	2,33E+05	46,08	1,37E+05	68,29
2045	4,17E+05	2,25E+05	46,09	1,32E+05	68,28
2046	4,04E+05	2,18E+05	46,10	1,28E+05	68,28
2047	3,91E+05	2,11E+05	46,08	1,24E+05	68,30
2048	3,78E+05	2,04E+05	46,10	1,20E+05	68,29
2049	3,66E+05	1,97E+05	46,09	1,16E+05	68,29
2050	3,54E+05	1,91E+05	46,09	1,12E+05	68,30
2051	3,43E+05	1,85E+05	46,10	1,09E+05	68,29
2052	3,31E+05	1,79E+05	46,09	1,05E+05	68,28
2065	2,16E+05	1,16E+05	46,11	6,84E+04	68,30

Πίνακας 11-11: Οι εκπομπές του CH₄ και η ποσοστιαία μείωσή τους

Παρατηρούμε πως η μείωση των εκπομπών του CH₄ που οφείλεται στην ταυτόχρονη μείωση των ζυμώσιμων κατά 65% και του χαρτιού κατά 30% είναι της τάξης του 46 % ενώ μόνο με μείωση των ζυμώσιμων κατά 65% ήταν περίπου 27.6 %. Ακόμη, για ταυτόχρονη μείωση των ζυμώσιμων κατά 65% και του χαρτιού κατά 65% , η μείωση των εκπομπών του CH₄ είναι της τάξης του 68,2 %.

Τέλος παραστήσαμε γραφικά τις εκπομπές του CH₄ χωρίς καμιά μείωση, με μείωση των ζυμώσιμων κατά 65% και με ταυτόχρονη μείωση των ζυμώσιμων κατά 65% και του χαρτιού κατά 30 και 65%. Από το γράφημα 11-3 που ακολουθεί είναι προφανής η μείωση των εκπομπών του CH₄ λόγω της μείωσης του χαρτιού.



Γράφημα 11-3: Οι εκπομπές του CH₄

Επειδή, όμως, τα παραπάνω σενάρια είναι υποθετικά, πρέπει να εξετάσουμε άλλους τρόπους μείωσης των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ από το ΧΔΑ των Πέρα Γαλήνων, όπως διαχείριση του βιοαερίου ή βιοεξυγίανση του χώρου.

12. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

12.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι συνήθεις τεχνολογίες ελέγχου του βιοαερίου. Αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν τα μέσα συλλογής του βιοαερίου, τον έλεγχο και την επεξεργασία των αερίων, και την αξιοποίηση των αερίων (π.χ. παραγωγή ενέργειας ή θέρμανση κτιρίων). Ένας ΧΥΤΑ μπορεί να χρειάζεται μέτρα ελέγχου του βιοαερίου για διάφορους λόγους, όπως τήρηση της νομοθεσίας, προβλήματα οσμών ή ανεξέλεγκτες εκπομπές αερίων, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν ανησυχία για θέματα ασφάλειας και υγείας. Γενικά, ο σκοπός του σχεδίου ελέγχου του βιοαερίου είναι να αποφευχθεί η έκθεση των ανθρώπων στις εκπομπές του βιοαερίου, αλλά και η προστασία του περιβάλλοντος.

Λόγοι εφαρμογής μέτρων ελέγχου σε ένα ΧΥΤΑ

Σε πολλούς ΧΥΤΑ εγκαθίστανται μέτρα ελέγχου του βιοαερίου, επειδή το απαιτεί η νομοθεσία. Οι κυβερνήσεις έχουν αναπτύξει νόμους και κανονισμούς που διέπουν τη λειτουργία και συντήρηση των ΧΥΤΑ. Αυτοί οι κανονισμοί έχουν αναπτυχθεί για τη μείωση της επίδρασης των πτητικών οργανικών υδρογονανθράκων (VOCs), του CH₄, των NMOCs, των NO_x, και των ενώσεων που προκαλούν οσμές, στο περιβάλλον και την υγεία.

Μέτρα ελέγχου του βιοαερίου μπορούν ακόμα να εγκατασταθούν μετά από παράπονα περιοίκων για οσμές, ή από την ανησυχία για την υγεία ή την ασφάλεια.

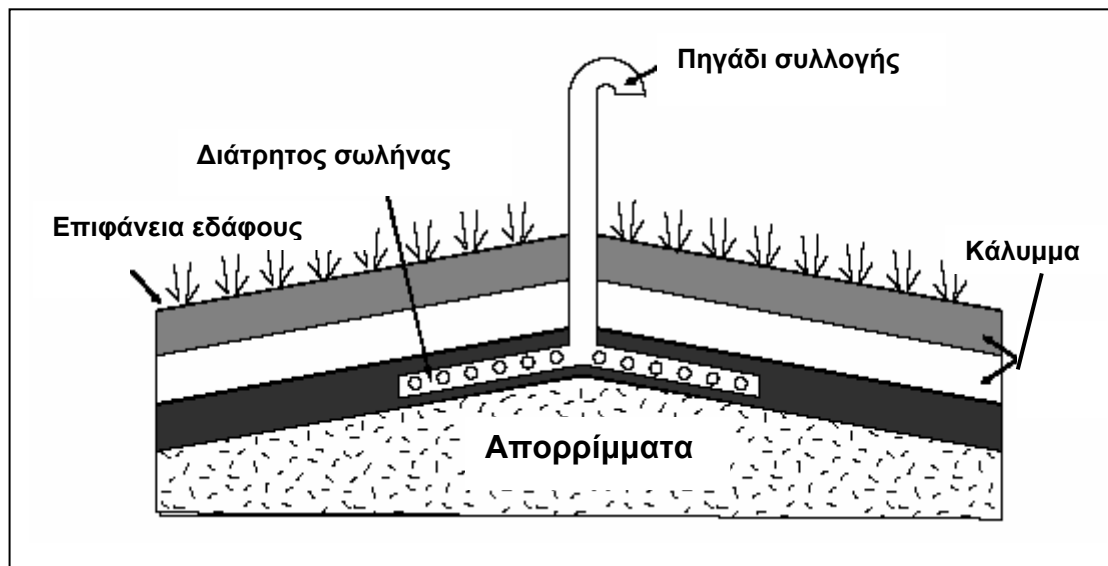
12.2 Μέθοδοι συλλογής του βιοαερίου

Το βιοαέριο μπορεί να συλλεχθεί είτε μέσω ενός παθητικού είτε ενός ενεργού συστήματος συλλογής. Ένα τυπικό σύστημα συλλογής, είτε παθητικό είτε ενεργό, αποτελείται από μια σειρά πηγαδιών συλλογής βιοαερίου τοποθετημένα σε όλο το ΧΥΤΑ. Ο αριθμός και η απόσταση των πηγαδιών εξαρτάται από τα ειδικά χαρακτηριστικά του ΧΥΤΑ, όπως τον όγκο των απορριμμάτων, την πυκνότητά τους, το βάθος τους και την έκταση που καταλαμβάνουν. Καθώς παράγεται το βιοαέριο, τα πηγάδια συλλογής προσφέρουν μονοπάτια ροής μικρότερης αντίστασης. Τα περισσότερα συστήματα συλλογής υπερδια-

στασιολογούνται για τη διασφάλιση της συνεχούς τους λειτουργίας, και για την αποφυγή της αστοχίας τους. Η υπερδιαστασιολόγηση σε ένα σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει την ύπαρξη επιπλέον πηγαδιών στην περίπτωση που κάποια αστοχήσουν. Τα συγκεκριμένα συστατικά των παθητικών και ενεργών συστημάτων συλλογής ακολουθούν [6]:

12.2.1 Παθητικά συστήματα συλλογής βιοαερίου.

Τα παθητικά συστήματα συλλογής βιοαερίου (Εικόνα 12-1) χρησιμοποιούν τις υπάρχουσες διαφορές στην πίεση στον ΧΥΤΑ και στις συγκεντρώσεις των αερίων για να δώσουν διέξοδο στο βιοαέριο προς την ατμόσφαιρα ή προς ένα σύστημα επεξεργασίας. Τα παθητικά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν κατά τη διάρκεια της ενεργής λειτουργίας ενός ΧΥΤΑ ή μετά το κλείσιμο του. Χρησιμοποιούν πηγάδια συλλογής, τα οποία αναφέρονται και ως πηγάδια εξαγωγής, για τη συλλογή του βιοαερίου. Κατασκευάζονται από διάτρητο πλαστικό και εγκαθίστανται κατακόρυφα σε όλη την έκταση του ΧΥΤΑ και σε βάθη που κυμαίνονται από το 50 % έως το 90 % του πάχους των απορριμμάτων.



Εικόνα 12-1: Παθητικό σύστημα συλλογής βιοαερίου [6]

Αν το υπόγειο νερό έχει φτάσει στον όγκο των απορριμμάτων, τα πηγάδια σταματούν στο ύψος του υπόγειου νερού. Τα κάθετα πηγάδια τυπικά εγκαθίστανται μετά από το κλείσιμο του ΧΥΤΑ ή ενός μέρους αυτού. Ένα παθητικό σύστημα συλλογής μπορεί ακόμα να περιλαμβάνει οριζόντια πηγάδια τοποθετημένα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους τα οποία βοηθούν την

κίνηση του βιοαερίου μέσα στον χώρο ταφής. Τα οριζόντια πηγάδια μπορεί να είναι κατάλληλα για ΧΥΤΑ όπου πρέπει να γίνει άμεση ανάκτηση του βιοαερίου, για ΧΥΤΑ μεγάλου βάθους, ή για ενεργούς ΧΥΤΑ. Ορισμένες φορές τα πηγάδια συλλογής οδηγούν τα αέρια απευθείας στην ατμόσφαιρα, αλλά συνήθως γίνεται χρήση συστημάτων επεξεργασίας ή ελέγχου (π.χ. πυρσοί καύσης).

Η απόδοση των παθητικών συστημάτων συλλογής εξαρτάται μερικώς από το πόσο καλά εγκλωβίζεται το βιοαέριο στον ΧΥΤΑ. Ο εγκλωβισμός μπορεί να ελεγχθεί και να μεταβληθεί ανάλογα με το σχεδιασμό του συστήματος συλλογής. Το αέριο μπορεί να εγκλωβιστεί με τη χρήση μεμβρανών στην κορυφή, στον πυθμένα, και στις πλευρές του ΧΥΤΑ. Η αδιαπέρατη μεμβράνη (αργιλική στρώση ή γεωσυνθετική μεμβράνη) θα παγιδεύσει το βιοαέριο και θα βοηθήσει στη δημιουργία των επιθυμητών μονοπατιών ροής του βιοαερίου. Για παράδειγμα, η τοποθέτηση μιας αδιαπέρατης μεμβράνης στην κορυφή του ΧΥΤΑ θα περιορίσει την ανεξέλεγκτη διαφυγή του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα, προκαλώντας την κίνηση του βιοαερίου διαμέσου των πηγαδιών συλλογής παρά διαμέσου του καλύμματος του ΧΥΤΑ.

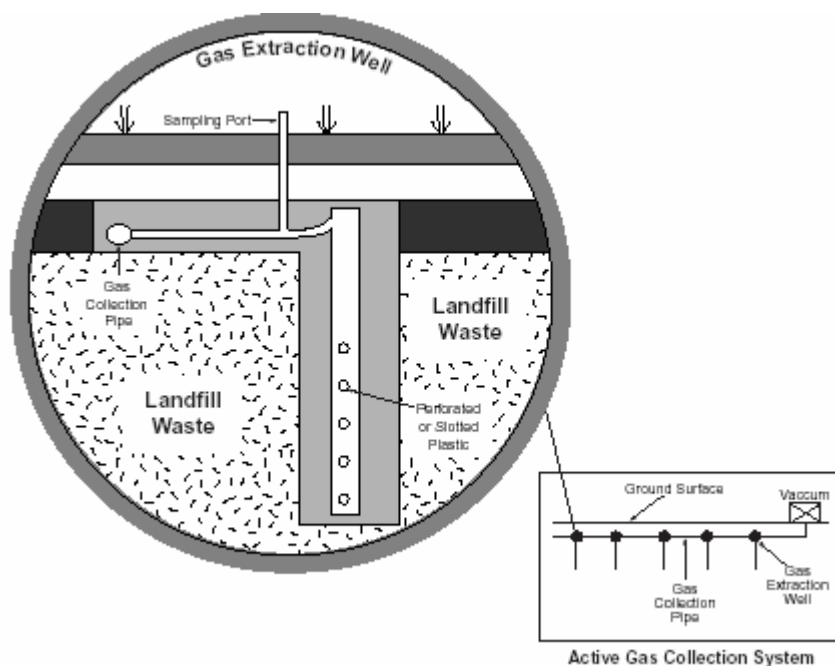
Η απόδοση των παθητικών συστημάτων συλλογής εξαρτάται ακόμα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες μπορεί να ελέγχονται ή όχι από το σύστημα ελέγχου. Όταν η πίεση μέσα στο ΧΥΤΑ δεν επαρκεί για να ωθήσει το βιοαέριο έξω από αυτόν, μέσω των συστημάτων ελέγχου, το παθητικό σύστημα αστοχεί. Η υψηλή βαρομετρική πίεση προκαλεί είσοδο του αέρα διαμέσου των παθητικών συστημάτων εξαερισμού και πάλι το σύστημα αστοχεί. Για αυτούς τους λόγους, τα παθητικά συστήματα συλλογής δεν θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα ώστε να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές με υψηλό κίνδυνο μετανάστευσης του βιοαερίου, ιδιαίτερα όπου το μεθάνιο μπορεί να συσσωρευτεί και να φτάσει εκρηκτικά επίπεδα μέσα σε κτίρια ή άλλες κλειστές εγκαταστάσεις.

12.2.2 Ενεργά συστήματα συλλογής βιοαερίου.

Τα ενεργά συστήματα συλλογής βιοαερίου που είναι σχεδιασμένα σαν πηγάδια (Εικόνα 12-2), θεωρούνται τα πιο αποτελεσματικά μέσα στη συλλογή του βιοαερίου με βάση την ΕΡΑ. Περιλαμβάνουν οριζόντια και κάθετα πηγάδια συλλογής του βιοαερίου, όπως και τα παθητικά συστήματα. Παρόλα αυ-

τά τα πηγάδια στα ενεργά συστήματα πρέπει να έχουν βαλβίδες για τη ρύθμιση της ροής των αερίων, και για να λειτουργούν ως σπές δειγματοληψίας. Η δειγματοληψία επιτρέπει στο διαχειριστή του συστήματος να μετρά την παραγωγή του βιοαερίου, την σύστασή του και την πίεσή του.

Τα ενεργά συστήματα συλλογής περιλαμβάνουν ακόμη αντλίες ή άλλες συσκευές αναρρόφησης για την εξαγωγή του βιοαερίου από το ΧΥΤΑ. και σωληνώσεις οι οποίες ενώνουν τα πηγάδια εξαγωγής με τις αντλίες. Οι αντλίες εξάγουν το βιοαέριο από το ΧΥΤΑ με τη δημιουργία χαμηλής πίεσης μέσα στα πηγάδια συλλογής του βιοαερίου. Η χαμηλή αυτή πίεση δημιουργεί ένα προτιμώμενο μονοπάτι ροής του βιοαερίου διαμέσου των πηγαδιών. Το μέγεθος, ο τύπος και ο αριθμός των αντλιών που απαιτούνται για την εξαγωγή του βιοαερίου εξαρτάται από την ποσότητα του βιοαερίου που παράγεται. Ο διαχειριστής του ΧΥΤΑ έχοντας πληροφορίες για το σχηματισμό του βιοαερίου, την σύστασή του και την πίεση, μπορεί να εκτιμήσει την παραγωγή του βιοαερίου και να τροποποιήσει το σύστημα της άντλησης και τις βαλβίδες των πηγαδιών συλλογής, για τη βέλτιστη λειτουργία του ενεργού συστήματος συλλογής του βιοαερίου. Το σχέδιο του συστήματος πρέπει να περιλαμβάνει και τις μελλοντικές ανάγκες διαχείρισης, όπως αυτές που σχετίζονται με την επέκταση του ΧΥΤΑ.



Εικόνα 12-2: Ενεργό σύστημα συλλογής βιοαερίου [6]

Ένα αποτελεσματικό ενεργό σύστημα συλλογής του βιοαερίου πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα σχεδιαστικά στοιχεία:

- Εξοπλισμό για την κίνηση του βιοαερίου, όπως αντλίες και σωληνώσεις, ικανό να χειριστεί το μέγιστο ρυθμό παραγωγής του βιοαερίου.
- Πηγάδια συλλογής του βιοαερίου εγκατεστημένα για τη συλλογή βιοαερίου από όλα τα τμήματα του ΧΥΤΑ. Ο αριθμός των πηγαδιών εξαγωγής και η μεταξύ τους απόσταση εξαρτάται από τον τύπο των απορριμμάτων, το βάθος, τη συμπίεση, τη διαφορά πίεσης που δημιουργείται από τις αντλίες, και το περιεχόμενο υγρασίας του βιοαερίου.
- Την ικανότητα παρακολούθησης και ρύθμισης της ροής από κάθε πηγάδι ξεχωριστά. Η ύπαρξη βαλβίδας, δείκτη πίεσης, συμπτωκνωτή και οπής δειγματοληψίας σε κάθε πηγάδι συλλογής, επιτρέπει στο χειριστή να παρακολουθεί και να ρυθμίζει την πίεση, και να μετρά την παραγωγή του βιοαερίου καθώς και τη σύστασή του.

12.3 Μέθοδοι επεξεργασίας του βιοαερίου μετά τη συλλογή του

Ορισμένα παθητικά συστήματα συλλογής του βιοαερίου απλά διοχετεύουν το βιοαέριο στην ατμόσφαιρα χωρίς καμία επεξεργασία πριν από την απελευθέρωσή του. Αυτό ίσως να είναι κατάλληλο σε περιπτώσεις που παράγονται μικρές ποσότητες βιοαερίου, και ο ΧΥΤΑ δεν βρίσκεται κοντά σε κατοικημένες περιοχές ή σε περιοχές όπου εργάζονται άνθρωποι. Συνήθως όμως το βιοαέριο που έχει συλλεχθεί επεξεργάζεται για τη μείωση πιθανών κινδύνων για την υγεία ή την ασφάλεια (αυτό ίσως το επιβάλει και η νομοθεσία). Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι για την επεξεργασία του βιοαερίου είναι οι τεχνολογίες καύσης (combustion technologies), οι τεχνολογίες μη καύσης (non combustion technologies), και οι τεχνολογίες ελέγχου οσμών (odor control technologies).

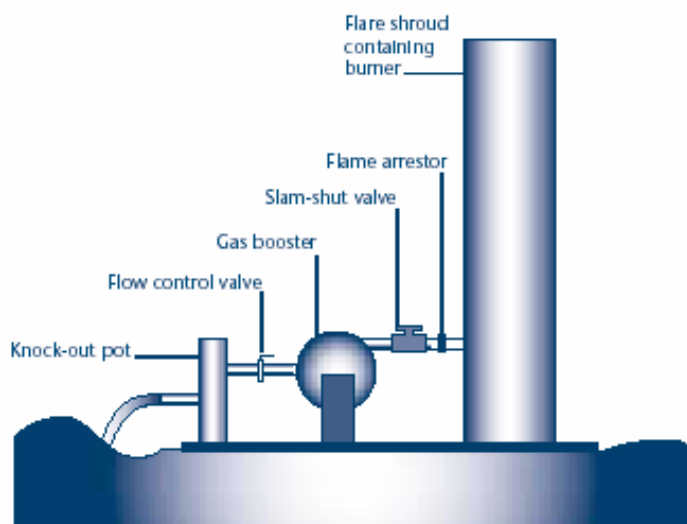
12.3.1 Τεχνολογίες καύσης

Η καύση είναι η πιο συνηθισμένη τεχνική για τον έλεγχο και την επεξεργασία του βιοαερίου. Οι τεχνολογίες καύσης όπως οι πυρσοί, οι αποτεφρωτές, οι λέβητες, οι τουρμπίνες, και οι μηχανές εσωτερικής καύσης καταστρέφουν τις ενώσεις που περιέχονται στο βιοαέριο. Συνήθως επιτυγχάνεται καταστροφή των οργανικών ενώσεων σε ποσοστό πάνω από 98 %. Το CH₄ μετατρέπεται σε CO₂, γεγονός που συμβάλει στη μείωση της συνεισφοράς των ΧΥΤΑ στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η καύση (combustion) ή η έντονη καύση (flaring) είναι πιο αποδοτική όταν το βιοαέριο περιέχει το λιγότερο 20 % κατ' όγκο CH₄. Σε αυτή τη συγκέντρωση CH₄ το βιοαέριο σχηματίζει εύφλεκτο μίγμα με τον αέρα, έτσι ώστε απαιτείται μόνο μια πηγή ανάφλεξης για να λειτουργήσει το σύστημα. Σε ΧΥΤΑ με συγκεντρώσεις CH₄ κάτω από 20 % κατ' όγκο, απαιτείται συμπληρωματικό καύσιμο (π.χ. φυσικό αέριο) για τη λειτουργία των πυρσών, γεγονός που αυξάνει κατά πολύ το κόστος.

Τα βασικά μέρη ενός συστήματος καύσης, ανοιχτού ή κλειστού πυρσού είναι [30]:

- **Ένα σύστημα καθαρισμού και φροντίδας** του βιοαερίου, πριν τον πυρσό, για την αφαίρεση της υγρασίας και άλλων προσμίξεων του βιοαερίου, όπως σωματίδια, H₂S για την προστασία του συστήματος.
- **Ένας φυσητήρας** για την ανάπτυξη του απαιτούμενου ύψους πίεσης για την τροφοδοσία του βιοαερίου στον πυρσό.
- **Ένας ή περισσότεροι παρεμποδιστές φλόγας (flame arrestors)** τοποθετημένοι στην τροφοδοσία του βιοαερίου για την αποφυγή μετάδοσης της φλόγας προς τα πίσω, δηλαδή προς τις σωληνώσεις.
- **Μια συσκευή ελέγχου της ροής** του βιοαερίου.
- **Ένας καυστήρας** σχεδιασμένος έτσι ώστε να διατηρεί τυρβώδη ανάμειξη ανάμεσα στον αέρα και το καύσιμο, και η ταχύτητα του βιοαερίου να είναι όσο υψηλή χρειάζεται για να μειωθεί ο κίνδυνος μετάδοσης της φλόγας προς τα πίσω, αλλά να μην σβήνει και η φλόγα.
- **Ένα σύστημα ανάφλεξης** στην αρχή της καύσης.

- Ένας **ανιχνευτής φλόγας** ο οποίος ελέγχει αν η ανάφλεξη είναι επιτυχημένη και αν επιτελείται καύση – συνήθως υπάρχει στα συστήματα κλειστής φλόγας αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και στα συστήματα ανοιχτής φλόγας παρότι η θέση της φλόγας είναι πολύ ασταθής.



Εικόνα 12-3: Βασικά μέρη ενός συστήματος καύσης [30]

Όταν εφαρμόζεται η καύση, μπορούν να επιλεγθούν δύο τύποι πυρσών : οι ανοιχτοί και οι κλειστοί:

➤ **Πυρσοί ανοιχτής φλόγας.**

Είναι η πιο απλή τεχνολογία πυρσών, που αποτελείται από μια σωλήνα διαμέσου της οποίας αντλείται το αέριο, ένα μέσο ανάφλεξης του βιοαερίου, και μια συσκευή που ελέγχει τη ροή του βιοαερίου (Εικόνα 12 -4α). Η απλότητα του σχεδιασμού και της λειτουργίας ενός πυρσού ανοιχτής φλόγας, είναι το σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής. Στα μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής περιλαμβάνονται η ατελής καύση του βιοαερίου, τα παράπονα για την αισθητική, και οι δυσκολίες στην παρακολούθηση. Μερικές φορές οι πυρσοί ανοιχτής φλόγας καλύπτονται μερικώς για να μην φαίνεται η φλόγα, και για τη βελτίωση της ακρίβειας της παρακολούθησης.

➤ **Πυρσοί κλειστής φλόγας.**

Η τεχνολογία αυτή είναι πιο πολύπλοκη και πιο ακριβή από τους πυρσούς ανοιχτής φλόγας. Παρόλα αυτά, οι περισσότεροι πυρσοί που σχεδιάζο-

νται σήμερα είναι κλειστής φλόγας, επειδή αυτός ο τύπος πυρσού περιορίζει τα μειονεκτήματα που σχετίζονται με τους πυρσούς ανοιχτής φλόγας (Εικόνα 12-4β). Οι πυρσοί αυτοί, αποτελούνται από πολλαπλούς καυστήρες που περικλείονται με αντιπυρικούς τοίχους οι οποίοι εκτείνονται πάνω από τη φλόγα. Σε αντίθεση με τους πυρσούς ανοιχτής φλόγας, η ποσότητα του αέρα που εισάγεται σε ένα πυρσό κλειστής φλόγας ελέγχεται, με αποτέλεσμα η καύση να είναι πιο αξιόπιστη και αποδοτική.



(α)



(β)

Εικόνα 12-4: Πυρσοί καύσης (α) Ανοικτός (β) Κλειστός [30]

➤ **Άλλες τεχνολογίες κλειστής καύσης.**

Οι λέβητες, οι θερμαντές, οι τουρμπίνες αερίων, και οι μηχανές εσωτερικής καύσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο για την αποτελεσματική καταστροφή των οργανικών υδρογονανθράκων του βιοαερίου, αλλά και για την παραγωγή ενέργειας ή ηλεκτρισμού.

Η καύση, όμως, του βιοαερίου έχει προκαλέσει ανησυχία στην κοινή γνώμη σε σχέση με το αν παράγονται τοξικά χημικά κατά την καύση. Είναι γνωστό ότι από την καύση παράγονται όξινα αέρια όπως SO_2 και NO_x , αλλά έχει παρατηρηθεί και η παραγωγή διοξινών και φουρανίων. Η ΕΡΑ έχει ερευνήσει το θέμα της παραγωγής των διοξινών και κατέληξε στο ότι τα δεδομένα από πολλούς ΧΥΤΑ δεν έδωσαν στοιχεία που να δείχνουν το σχηματισμό σημαντικών ποσοτήτων διοξινών κατά τη διάρκεια της καύσης του βιοαερίου.

Λόγω της πιθανής απειλής της υγείας από άλλα συστατικά του βιοαερίου, η καταστροφή του από μια ορθά σχεδιασμένη και διαχειρισμένη συσκευή ελέγχου, όπως από ένα πυρσό ή μια μονάδα ανάκτησης ενέργειας είναι προτιμώμενη από την ανεξέλεγκτη απελευθέρωση του βιοαερίου. Οι επιστήμονες συνεχίζουν να ερευνούν για τα παραπροϊόντα των συσκευών ελέγχου του βιοαερίου.

12.3.2 Τεχνολογίες μη καύσης

Αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1990 ως εναλλακτικές μέθοδοι διαχείρισης του βιοαερίου, οι οποίες δεν παράγουν ενώσεις που συνεισφέρουν στην αιθαλομίχλη, όπως οξείδια του αζώτου, οξείδια του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα και σωματιδιακή ύλη. Οι τεχνολογίες μη καύσης χωρίζονται σε δυο κατηγορίες : Στις κατηγορίες ανάκτησης ενέργειας, και στις τεχνολογίες μετατροπής του αερίου σε προϊόντα. Ανεξάρτητα από ποια τεχνολογία θα χρησιμοποιείται, το βιοαέριο πρέπει να προεπεξεργαστεί για την απομάκρυνση του νερού, των NMOCs και του διοξειδίου του άνθρακα. Για την επίτευξη των παραπάνω, εφαρμόζονται διάφορες τεχνολογίες προεπεξεργασίας. Μετά την προεπεξεργασία, το βιοαέριο επεξεργάζεται με μια από τις δυο εναλλακτικές τεχνολογίες μη καύσης.

Οι τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας, χρησιμοποιούν το βιοαέριο για την άμεση παραγωγή ενέργειας. Σήμερα, το κελί καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), είναι η μόνη εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία ανάκτησης ενέργειας. Άλλοι τύποι κελιών καυσίμου (στερεά πολυμερή, λιωμένων ανθρακικών) είναι ακόμα υπό ανάπτυξη. Το σύστημα PAFC περιλαμβάνει τη συλλογή του βιοαερίου και την προεπεξεργασία του, ένα σύστημα επεξεργασίας, τις καμινάδες του κελιού των καυσίμων, και ένα σύστημα ρύθμισης της ισχύος. Μέσα στο σύστημα αυτό συμβαίνουν διάφορες χημικές αντιδράσεις για την παραγωγή νερού, ενέργειας, θερμότητας, και απαερίων. Τα απαέρια καταστρέφονται σε ένα πυρσό.

Οι τεχνολογίες μετατροπής του αερίου σε προϊόντα, εστιάζουν στη μετατροπή του βιοαερίου σε εμπορικά προϊόντα, όπως συμπιεσμένο φυσικό αέριο, μεθάνολη, καθαρισμένο διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο, ή υγροποιημένο φυσικό αέριο. Οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγω-

γή του κάθε ενός από αυτά τα προϊόντα διαφέρουν μεταξύ τους, αλλά όλες περιλαμβάνουν τη συλλογή του βιοαερίου, την προεπεξεργασία, χημικές αντιδράσεις και / ή τεχνικές καθαρισμού. Ορισμένες από τις διεργασίες χρησιμοποιούν πυρσούς για την καταστροφή των αέριων αποβλήτων.

12.3.3 Τεχνολογίες ελέγχου των οσμών

Οι τεχνολογίες ελέγχου των οσμών εμποδίζουν τη διαφυγή από το ΧΥΤΑ των αερίων που προκαλούν οσμές. Με την εγκατάσταση ενός καλύμματος, περιορίζονται οι οσμές από απορρίμματα που έχουν ταφεί προσφάτως, και από τα αέρια που παράγονται κατά τη διάρκεια της βακτηριακής αποδόμησης. Η καθημερινή κάλυψη των απορριμμάτων με χώμα, βοηθά στην ελάττωση των οσμών που προέρχονται από τα φρέσκα απορρίμματα. Πιο αποτελεσματικά καλύμματα τοποθετούνται μετά το κλείσιμο των ΧΥΤΑ που εμποδίζουν τη διήθηση υγρών στη μάζα των απορριμμάτων άρα και την προώθηση της μικροβιακής δραστηριότητας. Η ανάπτυξη βλάστησης μειώνει και αυτή τις οσμές. Η καύση στους πυρσούς είναι και αυτή μια τεχνολογία εξάλειψης των οσμών μέσω της θερμικής καταστροφής των αερίων που παράγουν τις οσμές. Μια άλλη τεχνολογία μείωσης των οσμών είναι ο αερισμός του βιοαερίου μέσω ενός βιοφίλτρου. Καθώς υπάρχει οξυγόνο, τα βακτήρια θα αποδομήσουν το βιοαέριο κάτω από αερόβιες συνθήκες, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και νερό.

12.4 Βιωσιμότητα ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας

12.4.1 Γενικά στοιχεία

Η βιωσιμότητα της εγκατάστασης ενός συστήματος ανάκτησης βιοαερίου, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως από τους ρυθμούς παραγωγής βιοαερίου, τη διαθεσιμότητα των χρηστών, και από τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πολλοί διαφορετικοί τύποι ΧΥΤΑ., με διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής βιοαερίου και σύσταση απορριμμάτων, μπορούν να υποστηρίξουν προγράμματα ανάκτησης ενέργειας. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αρκετές κατευθυντήριες γραμμές που πρέπει να ληφθούν υπόψη στην εκτίμηση του αν είναι εφικτή η παραγωγή ενέργειας από το βιοαέριο.

Αν είναι εφικτό, η ανάκτηση της ενέργειας μπορεί να εφαρμοστεί με τη χρήση τεχνολογιών καύσης ή μη καύσης. Οι τεχνολογίες που στηρίζονται στην καύση, περιλαμβάνουν ατμολέβητες, τουρμπίνες αερίου, μηχανές εσωτερικής καύσης και θερμαντήρες. Για παράδειγμα το βιοαέριο μπορεί να μεταφερθεί με σωληνώσεις σε μια παρακείμενη βιομηχανία, ένα κυβερνητικό κτίριο ή ένα σχολείο, όπου θα καεί σε ένα λέβητα παράγοντας ατμό που χρησιμοποιείται για βιομηχανικές διεργασίες, ή θερμότητα για ένα κτίριο. Ακόμα μπορεί να καεί σε ένα θερμαντήρα βιομηχανικών διεργασιών παρέχοντας θερμότητα για μια χημική αντίδραση. Οι τουρμπίνες και οι μηχανές εσωτερικής καύσης καίγουν το βιοαέριο για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο ηλεκτρισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών ενέργειας του ΧΥΤΑ, ή να πουληθεί στο δίκτυο ενέργειας.

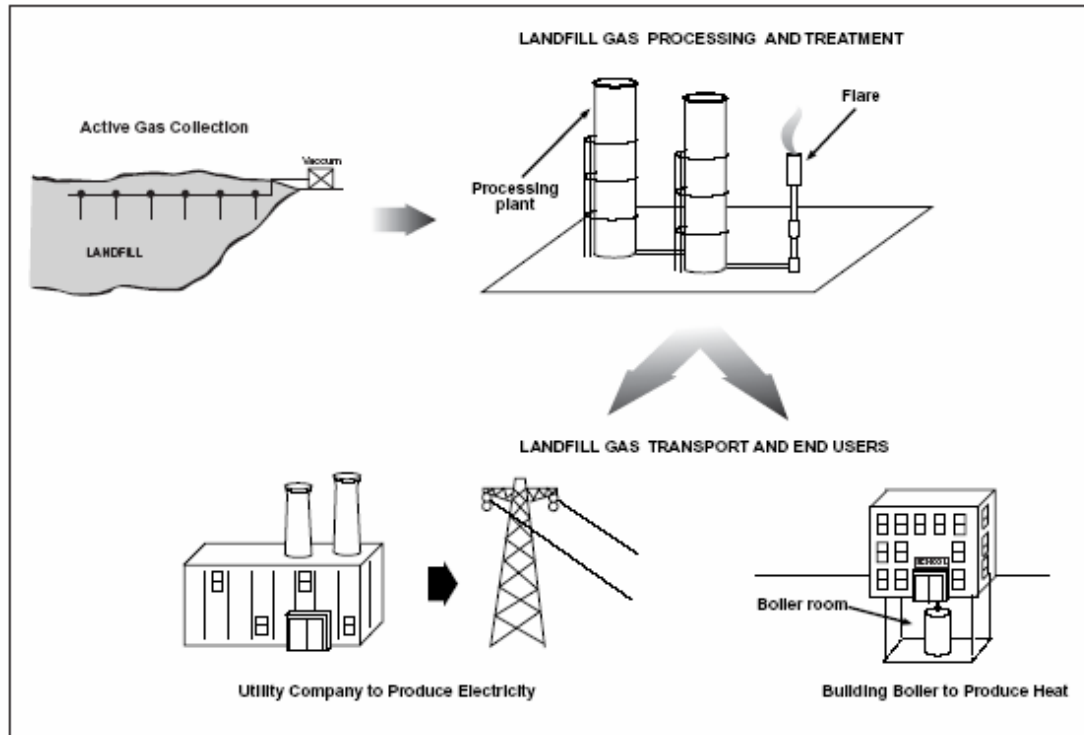
Η επιλογή της συσκευής καύσης που θα χρησιμοποιηθεί, εξαρτάται από το είδος των χρηστών που υπάρχουν κοντά στον ΧΥΤΑ, από τα χαρακτηριστικά του πεδίου, από οικονομικούς και τεχνικούς παράγοντες αλλά και από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, οι μηχανές εσωτερικής καύσης είναι συνήθως οικονομικότερες από τις τουρμπίνες αερίων για μικρούς ΧΥΤΑ. Παρόλα αυτά οι μηχανές αυτές εκπέμπουν περισσότερα ΝΟ_x, τα οποία συνεισφέρουν στο σχηματισμό όζοντος.

Υπάρχουν ακόμη διαθέσιμα συστήματα ανάκτησης ενέργειας μη – καύσης, αλλά δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα. Τα κελιά καυσίμων είναι μια υποσχόμενη νέα τεχνολογία για την παραγωγή ενέργειας από το βιοαέριο, η οποία δεν περιλαμβάνει διεργασίες καύσης. Αυτή η τεχνολογία είναι υπό ανάπτυξη και ίσως στο μέλλον να γίνει πιο ανταγωνιστική από οικονομική σκοπιά. Μια άλλη εναλλακτική λύση που δεν περιλαμβάνει καύση του βιοαερίου είναι ο καθαρισμός του ώστε να αφαιρεθούν τα συστατικά εκτός του μεθανίου, παράγοντας ένα αέριο με υψηλή θερμική ικανότητα (Btu) το οποίο μπορεί να πουληθεί σαν φυσικό αέριο. Όταν τελικά το αέριο αυτό καεί δε θα συνεισφέρει στις εκπομπές κοντά στον ΧΥΤΑ.

Και τα συστήματα καύσης, αλλά και τα συστήματα μη – καύσης αποτελούνται από τρία βασικά μέρη:

1. Ένα σύστημα συλλογής βιοαερίου

2. Ένα σύστημα επεξεργασίας και μετατροπής του βιοαερίου
3. Ένα μέσο μεταφοράς του βιοαερίου ή του τελικού προϊόντος στον χρήστη (Εικόνα 12-5)



Εικόνα 12-5: Σύστημα ανάκτησης βιοαερίου

Το βιοαέριο συλλέγεται από τον ΧΥΤΑ, με τη χρήση ενεργού συστήματος εξαγωγής και μεταφέρεται σε ένα κεντρικό σημείο για επεξεργασία. Οι απαιτήσεις επεξεργασίας διαφέρουν, ανάλογα με τη σύσταση του βιοαερίου και τη χρήση, αλλά τυπικά περιλαμβάνουν μια σειρά από χημικές αντιδράσεις ή φίλτρα για την απομάκρυνση των προσμίξεων. Για την άμεση χρήση του βιοαερίου σε λέβητες απαιτείται ελάχιστη προεπεξεργασία. Για την εισαγωγή του βιοαερίου στο δίκτυο του φυσικού αερίου απαιτείται εκτενής επεξεργασία για την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα. Η ελάχιστη επεξεργασία είναι το φιλτράρισμα του βιοαερίου για την απομάκρυνση των σωματιδίων και του νερού που τυχόν υπάρχουν στο ρεύμα του.

12.4.2 Σημαντικοί παράγοντες στην ανάκτηση ενέργειας από το βιοαέριο

Τα συστήματα ανάκτησης του βιοαερίου εφαρμόζουν τους παρακάτω παράγοντες ως κατευθυντήριες γραμμές, σημαντικές για την οικονομική βιωσιμότητα των προγραμμάτων ανάκτησης ενέργειας. Παρόλα αυτά, σήμερα υπάρχουν διαθέσιμες και άλλες νέες τεχνολογίες που εφαρμόζονται σε μικρότερους ΧΥΤΑ. Για παράδειγμα, οι μικρότεροι ΧΥΤΑ. μπορούν να παράγουν αρκετά βιοαέριο για τη θέρμανση ενός on - site θερμοκηπίου, ή να χρησιμοποιήσουν μικροτουρμπίνες για την παραγωγή μικρών ποσοτήτων ηλεκτρισμού.

Οι κατευθυντήριες γραμμές είναι:

1. Η ποσότητα των απορριμμάτων που έχει ταφεί πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1 εκατομμύριο τόνους.
2. Τα απορρίμματα πρέπει να έχουν βάθος μεγαλύτερο από 35 ft (10.7 m), και να είναι αρκετά σταθερά για την εγκατάσταση των πηγαδιών.
3. Η έκταση του ΧΥΤΑ. πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 35 acres (0,14 km²).
4. Ο ΧΥΤΑ. πρέπει να περιλαμβάνει απορρίμματα ικανά να παράγουν μεγάλες ποσότητες βιοαερίου το οποίο να περιέχει μεθάνιο 35 % κ.ό. η παραπάνω. Η ΕΡΑ λέει πως η ανάκτηση του βιοαερίου είναι οικονομικά βιώσιμη όταν ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου είναι 1 εκατομμύριο κυβικά πόδια τη μέρα (~ 28.000 m³/day).
5. Αν ο ΧΥΤΑ. είναι ακόμη ανοικτός, η ενεργή λειτουργία του να διαρκέσει ακόμα αρκετά χρόνια.
6. Αν ο ΧΥΤΑ. έχει ήδη κλείσει, να έχει περάσει μικρό χρονικό διάστημα από το κλείσιμό του.
7. Το κλίμα να βοηθά την παραγωγή του βιοαερίου (Πολύ ψυχρά ή πολύ ξηρά κλίματα παρεμποδίζουν την παραγωγή του βιοαερίου).
8. Ο χρήστης της ενέργειας να είναι κοντά ή σε περιοχή προσβάσιμη από τον ΧΥΤΑ.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν ορισμένες οδηγίες της ΕΡΑ για τη διαχείριση του βιοαερίου [31].

12.5 Οδηγίες διαχείρισης του βιοαερίου από την ΕΡΑ

Για τη σωστή διαχείριση του βιοαερίου και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων αλλά και των κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία, η ΕΡΑ προτείνει τα παρακάτω [31]:

- Τα συστήματα διαχείρισης του βιοαερίου χρειάζονται για την αποφυγή των ανεξέλεγκτων εκπομπών του βιοαερίου από τους ΧΥΤΑ. Τα συστήματα αυτά πρέπει να παρεμποδίζουν την μετακίνηση του βιοαερίου μέσω του εδάφους τόσο στην αέρια όσο και στη διαλυμένη φάση, και να εμποδίζουν την εκπομπή του CH₄ στην ατμόσφαιρα.
- Η οδηγία για τους ΧΥΤΑ (Landfill Directive), απαιτεί τη συλλογή όλου του βιοαερίου και τη χρήση του για παραγωγή ενέργειας. Όπου δεν είναι εφικτή η παραγωγή ενέργειας, το βιοαέριο πρέπει να καίγεται σε ένα κλειστό πυρσό με ελάχιστη θερμοκρασία 1000 °C και χρόνο παραμονής 0.3 sec. Στις περιοχές όπου θα εγκατασταθούν οι πυρσοί πρέπει να γίνουν μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα διασφαλίζουν ότι οι εκπομπές στην ατμόσφαιρα δεν θα αλλοιώσουν την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος.
- Η ποιότητα των εκπομπών στους ανοικτούς πυρσούς δεν μπορεί να ελεγχθεί, και είναι αμφίβολο αν τηρούν το όριο του χρόνου συγκράτησης του βιοαερίου, ακόμα και αν τηρούν το κριτήριο της θερμοκρασίας. Ακόμη, οι ανοιχτοί πυρσοί έχουν ορατή φλόγα που είναι συνήθως μια μη αποδεκτή αισθητική επίπτωση. Για αυτούς τους λόγους δεν συνιστώνται οι ανοιχτοί πυρσοί.
- Σημαντική είναι ακόμα η εφαρμογή διαδικασιών για τη διασφάλιση της συντήρησης των πυρσών, και του ότι η καύση γίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία. Επίσης πρέπει να υπάρχει πρόγραμμα παρακολούθησης του αερίου πριν από την καύση για την εκτίμηση της σύστασης του βιοαερίου που φτάνει στον πυρσό. Το εύρος της απαιτούμενης παρακολούθησης των αερίων που εκπέμπονται από τους πυρσούς καθορίζεται από τη σύσταση του αερίου πριν εισέλθει στον πυρσό.
- Οι ΧΥΤΑ πρέπει να σχεδιάζονται και να λειτουργούν έτσι ώστε το βιοαέριο να μπορεί να συλλεχθεί από τα απορρίμματα μόλις εδραιωθεί η φάση της μεθανογένεσης. Η δυνατότητα χρήσης του βιοαερίου σε ένα καινούριο ή μελλοντικό ΧΥΤΑ μπορεί να εκτιμηθεί με μαθηματική μοντελοποίηση για την

πρόβλεψη της συνολικής ποσότητας του βιοαερίου που θα παραχθεί. Για υπάρχοντες χώρους ταφής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαθηματική μοντελοποίηση, δοκιμές άντλησης, ή και συνδυασμός τους.

➤ Σημαντικό είναι ακόμη, να ληφθούν μέτρα για την αποφυγή συσσώρευσης συμπυκνωμένης υγρασίας στα συστήματα εξαγωγής του βιοαερίου. Η συμπύκνωση διαχειρίζεται με την τοποθέτηση των σωληνώσεων με τέτοιο τρόπο ώστε η υγρασία να οδηγείται σε ένα σημείο απομάκρυνσης, όπως ένα πηγάδι ή ένα σύστημα αφύγρανσης.

➤ Όταν τοποθετηθεί το τελικό κάλυμμα του ΧΥΤΑ, θα εγκλωβιστεί το βιοαέριο με αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της πίεσης. Για αυτό το λόγο το σύστημα εξαγωγής του βιοαερίου πρέπει να τοποθετηθεί πριν το κλείσιμο του ΧΥΤΑ. Τα πηγάδια εξαγωγής του βιοαερίου από τη μάζα των απορριμμάτων μπορεί να κατασκευαστούν κομμάτι κομμάτι ή να τοποθετηθούν με γεωτρή-πανο. Όσον αφορά την απόστασή τους, δεν υπάρχουν απόλυτοι κανόνες, αλλά η εμπειρία έχει δείξει ότι δεν πρέπει να είναι πάνω από 40 μέτρα. Η εξωτερική τους διάμετρος δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 300mm και η διάμετρος του περιβλήματος τους να μην είναι μικρότερη από 100 mm. Το κενό ανάμεσα στο περίβλημα και τα τοιχώματα της γεώτρησης πρέπει να γεμίζεται με χαλίκια διαμέτρου 10 - 40mm. Το υλικό κατασκευής του περιβλήματός μπορεί να είναι από HDPE ή από ανοξείδωτο χάλυβα με λεία επιφάνεια. Όπου το βάθος των απορριμμάτων ξεπερνά τα 20 μέτρα, ίσως πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλα είδη πηγαδιών κατάλληλα για βαθιά εξαγωγή.

➤ Οι φυσητήρες του βιοαερίου πρέπει να έχουν αρκετή ισχύ για το προβλεπόμενο φορτίο του βιοαερίου, και να είναι κατασκευασμένοι από υλικά κατάλληλα για τα χαρακτηριστικά του βιοαερίου. Ακόμα πρέπει να προστατεύονται με παρεμποδιστές φλόγας και στην είσοδο αλλά και στην έξοδο του βιοαερίου.

➤ Στην περίπτωση όπου το βιοαέριο χρησιμοποιείται σε προγράμματα ανάκτησης ενέργειας, το περιεχόμενο σε CH₄ πρέπει να είναι περίπου 40 % κατ' όγκο ώστε να παρέχεται αρκετή θερμογόνος δύναμη στο καύσιμο. Παρόλα αυτά υπάρχουν πυρσοί διαθέσιμοι, που λειτουργούν με CH₄ της τάξης του 20 %, ανάλογα με τον κατασκευαστή και τα επιβαλλόμενα όρια εκπομπών. Οι μονάδες ανάκτησης ενέργειας είναι εμπορικά διαθέσιμες με παραγωγή ενέρ-

γειας που κυμαίνεται από 30 kW έως 1 MW. Η δυναμικότητα μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση πολλών μονάδων. Η τελική επιλογή του μεγέθους και του είδους της μονάδας είναι πολλές φορές συνάρτηση της διαθεσιμότητας των τελικών χρήσεων. Οι μικρές μονάδες θα είναι εμπορικά βιώσιμες μόνο όταν χρησιμοποιείται η παραγόμενη θερμότητα και ισχύς.

- Εξαιτίας του υψηλού κόστους κεφαλαίου, οι μονάδες ανάκτησης ενέργειας είναι διαστασιολογημένες έτσι ώστε να έχουν ζωή λειτουργίας 5 με 10 χρόνια. Αυτό σημαίνει πως μια μονάδα δεν είναι ικανή να επεξεργαστεί όλο το βιοαέριο που παράγεται στα χρόνια της μέγιστης παραγωγής. Συνεπώς, απαιτείται ένας πυρσός για την επεξεργασία της επιπλέον ποσότητας του βιοαερίου, ο οποίος όμως πρέπει να έχει αρκετή δυναμικότητα για την επεξεργασία του βιοαερίου στην περίπτωση που το σύστημα ανάκτησης ενέργειας είναι εκτός λειτουργίας.
- Για μικρούς ΧΥΤΑ ή για ΧΥΤΑ που παράγουν μικρές ποσότητες βιοαερίου, υπάρχουν πολύ μικροί πυρσοί υψηλής θερμοκρασίας με δυναμικότητα μικρότερη των 100 m³/h
- Όταν το περιεχόμενο του βιοαερίου σε CH₄ είναι μικρότερο από 20 % κατ' όγκο περίπου, δεν είναι δυνατή η καύση σε ένα πυρσό χωρίς τη χρήση συμπληρωματικού καυσίμου. Όταν το μεθάνιο είναι της τάξεως του 3 % κατ' όγκο ή μικρότερο, είναι προτιμότερο να εφαρμοστεί θερμική οξειδωση.
- Οι σωληνώσεις μεταφοράς του βιοαερίου πρέπει να είναι διαστασιολογημένες έτσι ώστε οι ταχύτητες των αερίων σε τμήματα μακρύτερα των 5 μέτρων να μην ξεπερνούν τα 10 m/s.

Τώρα με βάση τις οδηγίες της ΕΡΑ, αλλά και με όλα τα στοιχεία ανάκτησης ενέργειας που έχουν παρουσιαστεί, θα εξετάσουμε τη δυνατότητα εκμετάλλευσης του βιοαερίου από το ΧΔΑ.

12.6 Ανάκτηση ενέργειας από το ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους Ηρακλείου

Σκοπός μας, τώρα, είναι να εξετάσουμε τη βιωσιμότητα ενός δεκαετούς προγράμματος ανάκτησης ενέργειας από το βιοαέριο. Η χρονική διάρκεια επιλέχθηκε με βάση τις οδηγίες της ΕΡΑ.

Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου LandGem, οι παραγόμενες ποσότητες CH₄ για τα δέκα χρόνια μετά το κλείσιμο του χώρου είναι (Πίνακας 12 -1):

ΕΤΟΣ	CH ₄ (m ³ / yr)	CH ₄ (m ³ / h)
2004	1,62E+06	184,36
2005	1,56E+06	178,42
2006	1,51E+06	172,60
2007	1,46E+06	167,01
2008	1,42E+06	161,53
2009	1,37E+06	156,28
2010	1,33E+06	151,26
2011	1,28E+06	146,35
2012	1,24E+06	141,55
2013	1,20E+06	136,99
2014	1,16E+06	132,53

Πίνακας 12-1: Οι παραγόμενες ποσότητες CH₄

Με βάση τη βιβλιογραφία η συλλογή του βιοαερίου επιτυγχάνεται σε ποσοστό περίπου 70%. Άρα οι ποσότητες του CH₄ που θα συλλεχθούν είναι (Πίνακας 12 -2):

ΕΤΟΣ	CH ₄ (m ³ / h)
2004	129,05
2005	124,90
2006	120,82
2007	116,91
2008	113,07
2009	109,39
2010	105,88
2011	102,44
2012	99,09
2013	95,89
2014	92,77

Πίνακας 12-2: Οι συλλεγόμενες ποσότητες του CH₄

Στη συνέχεια για να υπολογιστεί η θερμική αξία από την ωριαία ροή του CH₄ θα πολλαπλασιαστούν οι συλλεγόμενες ποσότητες του CH₄ με τη θερμογόνο δύναμη του CH₄ που είναι 33.810 kJ / m³ (Πίνακας 12 -3).

ΕΤΟΣ	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΞΙΑ (kJ)
2004	4,36E+06
2005	4,22E+06
2006	4,08E+06
2007	3,95E+06
2008	3,82E+06
2009	3,70E+06
2010	3,58E+06
2011	3,46E+06
2012	3,35E+06
2013	3,24E+06
2014	3,14E+06

Πίνακας 12-3: Η θερμική αξία του CH₄

Στη συνέχεια υποθέτουμε πως θα χρησιμοποιηθεί μια μηχανή εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η μηχανή αυτή απαιτεί περίπου 13.650 kJ για την παραγωγή ενός kW ηλεκτρισμού. Αυτό σημαίνει πως η ικανότητα παραγωγής kW του ΧΔΑ είναι :

ΕΤΟΣ	ΙΣΧΥΣ (kW)
2004	320
2005	309
2006	299
2007	290
2008	280
2009	271
2010	262
2011	254
2012	245
2013	238
2014	230

Πίνακας 12-4: Παραγόμενη ισχύς

Τέλος, οι ετήσιες kWh που παράγονται είναι (Πίνακας 12-5):

ΕΤΟΣ	kWh ΕΤΗΣΙΩΣ
2004	2,80E+06
2005	2,71E+06
2006	2,62E+06
2007	2,54E+06
2008	2,45E+06
2009	2,37E+06
2010	2,30E+06
2011	2,22E+06
2012	2,15E+06
2013	2,08E+06
2014	2,01E+06

Πίνακας 12-5: Η ενέργεια που παράγεται ετησίως

Αν η ηλεκτρική ενέργεια πουληθεί 0.07 ή 0.05 EURO / kWh τότε η αξία της είναι:

ΕΤΟΣ	kWh ΕΤΗΣΙΩΣ	ΑΞΙΑ (euro) 0.07 euro / kWh	ΑΞΙΑ (euro) 0.05 euro / kWh
2004	2,80E+06	1,96E+05	1,40E+05
2005	2,71E+06	1,90E+05	1,36E+05
2006	2,62E+06	1,84E+05	1,31E+05
2007	2,54E+06	1,78E+05	1,27E+05
2008	2,45E+06	1,72E+05	1,23E+05
2009	2,37E+06	1,66E+05	1,19E+05
2010	2,30E+06	1,61E+05	1,15E+05
2011	2,22E+06	1,56E+05	1,11E+05
2012	2,15E+06	1,50E+05	1,07E+05
2013	2,08E+06	1,46E+05	1,04E+05
2014	2,01E+06	1,41E+05	1,01E+05

Πίνακας 12-6: Η αξία της παραγόμενης ενέργειας

Το σύστημα ανάκτησης ενέργειας μπορεί όμως να μην είναι βιώσιμο για αυτές τις ποσότητες παραγόμενου CH₄. Για αυτό το λόγο χρειάζεται μελέ-

τη για το κόστος των πηγαδιών άντλησης, του συστήματος επεξεργασίας του βιοαερίου αλλά και της μηχανής εσωτερικής καύσης.

Με βάση τα κριτήρια που καθιστούν ένα χώρο ικανό για την εγκατάσταση ενός συστήματος ανάκτησης ενέργειας [6], στο ΧΔΑ που εξετάζουμε δεν συμφέρει η ανάκτηση ενέργειας. Αυτό γιατί η ημερήσια παραγωγή CH₄ φτάνει μέχρι τα 4425 m³ (το 2004) ενώ θα έπρεπε να είναι κοντά στα 14000 m³, και τα απορρίμματα που έχουν ταφεί δεν είναι περισσότερα από 1.000.000 τόνους (είναι 817.500 τόνοι).

Βέβαια για τον αν συμφέρει η επένδυση αυτή ή όχι πρέπει να γίνει ανάλυση κόστους οφέλους, το οποίο δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Στον πίνακα 12-7 που ακολουθεί παρατίθενται ορισμένα γενικά στοιχεία για το κόστος της επένδυσης [32].

ΤΜΗΜΑ	ΚΟΣΤΟΣ EURO / kW
Σύστημα συλλογής βιοαερίου	200 – 400
Σύστημα αναρρόφησης	200 – 300
Σύστημα ανάκτησης	850 – 1200
Σχεδιασμός	250 – 350
ΣΥΝΟΛΟ	1500 – 2250

Πίνακας 12-7: Μέσο κόστος επένδυσης ανά εγκατεστημένο kW [32]

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς μας πρέπει να εγκατασταθεί μηχανή εσωτερικής καύσης 350 kW. Με μέσο κόστος επένδυσης 1900 Euro / kW το συνολικό κόστος επένδυσης αγγίζει τα 665.000 Euro. Με βάση μελέτες [33] , για αυτής της τάξης μηχανές τα ετήσια κόστη λειτουργίας και συντήρησης φτάνουν τα 100.000 Euro.

Άρα για το δεκαετές πρόγραμμα ανάκτησης ενέργειας τα λειτουργικά κόστη φτάνουν τα 1.000.000 Euro και το συνολικό κόστος τα 1.665.000 Euro περίπου. Αν η ηλεκτρική ενέργεια πουληθεί 0,07 Euro / kWh τότε τα έσοδα είναι 1.840.000 Euro , ενώ αν πουληθεί 0.05 τα έσοδα είναι 1.310.000 Euro. Βέβαια στους υπολογισμούς αυτούς δε λάβαμε υπόψη μας την αλλαγή της αξίας του χρήματος με την πάροδο των ετών. Φαίνεται όμως, πως η βιωσιμότητα

τητα της επένδυσης είναι αμφίβολη, μια και εξαρτάται άμεσα από την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς το κόστος της είναι πολύ υψηλό σε σύγκριση με τα ετήσια έσοδα από την πώληση της ενέργειας.

Στην περίπτωση που η ανάκτηση ενέργειας δεν είναι συμφέρουσα, τότε κρίνεται απαραίτητη η συλλογή του βιοαερίου και η καύση του σε κατάλληλο πυρσό.

Και στις δύο τις περιπτώσεις όμως, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η αποκατάσταση του χώρου και η τοποθέτηση του τελικού καλύμματος.

12.7 Τελική κάλυψη του ΧΔΑ – Αποκατάσταση

Σκοπός του συστήματος της τελικής κάλυψης είναι η αποτροπή οποιοδήποτε αρνητικών επιπτώσεων από στερεά, υγρά και αέρια απόβλητα μιας ελεγχόμενης εναπόθεσης.

Ως προς τις μηχανικές, χημικές και βιολογικές προϋποθέσεις της επιφανειακής μόνωσης ισχύει ότι και για την μόνωση της βάσης.

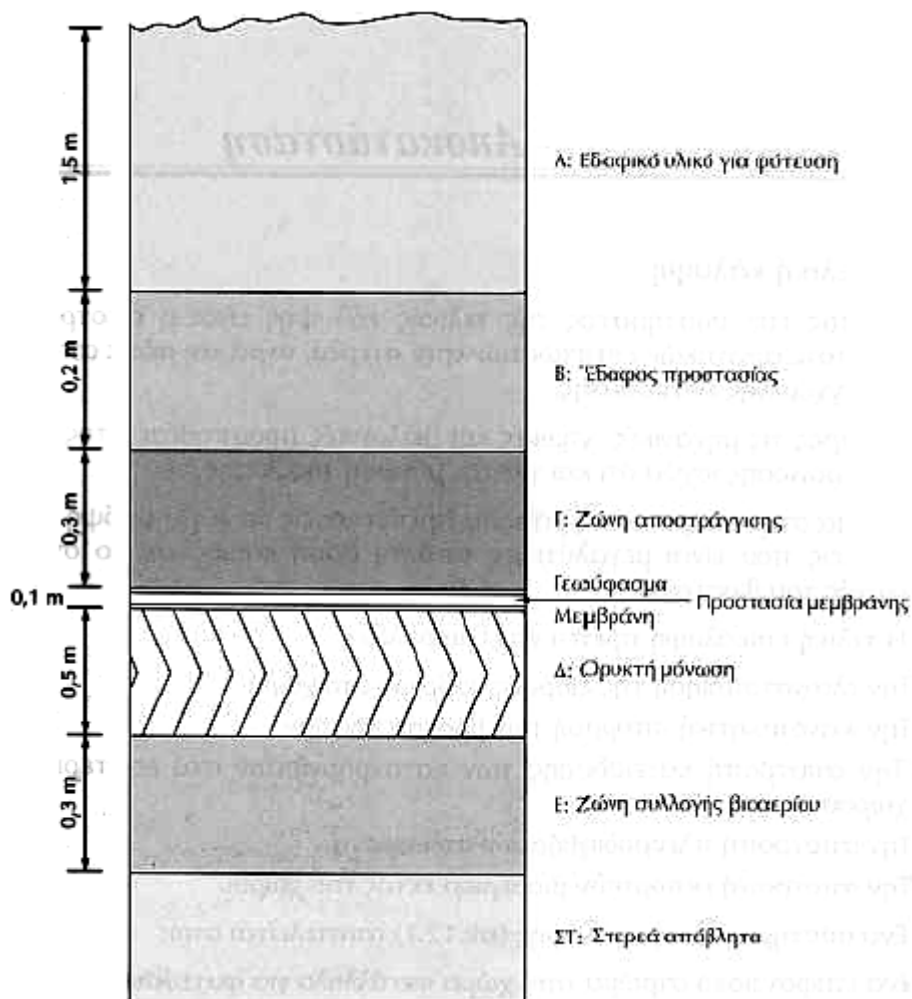
Βέβαια στην επιφανειακή μόνωση πρέπει κανείς να λάβει υπόψη τις καθιζήσεις που είναι μεγαλύτερες από τη βάση καθώς και το σύστημα συλλογής του βιοαερίου.

Η τελική επικάλυψη πρέπει να εξασφαλίζει:

- 1) Την ελαχιστοποίηση της εισροής ομβρίων στο χώρο
- 2) Την ικανοποιητική απορροή των βροχοπτώσεων
- 3) Την αποτροπή κατείσδυσης των κατακρημνίσεων στο εσωτερικό του χώρου
- 4) Την αποτροπή πλευροδιηθήσεων στα πρανή
- 5) Την αποτροπή εκπομπών βιοαερίου εκτός του χώρου

Ένα σύστημα τελικής κάλυψης (Εικόνα 12 -6) αποτελείται από [5]:

- A) ένα επιφανειακό στρώμα από χώμα κατάλληλο για φυτεύσεις
- B) τη ζώνη προστασίας
- Γ) τη ζώνη αποστράγγισης
- Δ) τη μόνωση και
- Ε) τη ζώνη συλλογής βιοαερίου



Εικόνα 12-6: Δομή ενός συστήματος τελικής κάλυψης [5]

Το βιοαέριο που παράγεται κατά την ελεγχόμενη εναπόθεση πρέπει οπωσδήποτε να συλλεχθεί και να οδηγηθεί είτε σε πυρσό για καύση είτε σε μονάδα καθαρισμού για περαιτέρω χρήση του. Το πάχος της ζώνης συλλογής βιοαερίου είναι 0,3m και κατασκευάζεται από υλικό διαμέτρου 4/1 mm, με μέγιστη περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο 10% ανά βάρος

Ο έλεγχος της ζώνης συλλογής του βιοαερίου έγκειται στη μέτρηση

- α) του πάχους σε κάναβο 20x20 m ,
- β) του μεγέθους του υλικού και
- γ) της περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο ανά 5 στρέμματα.

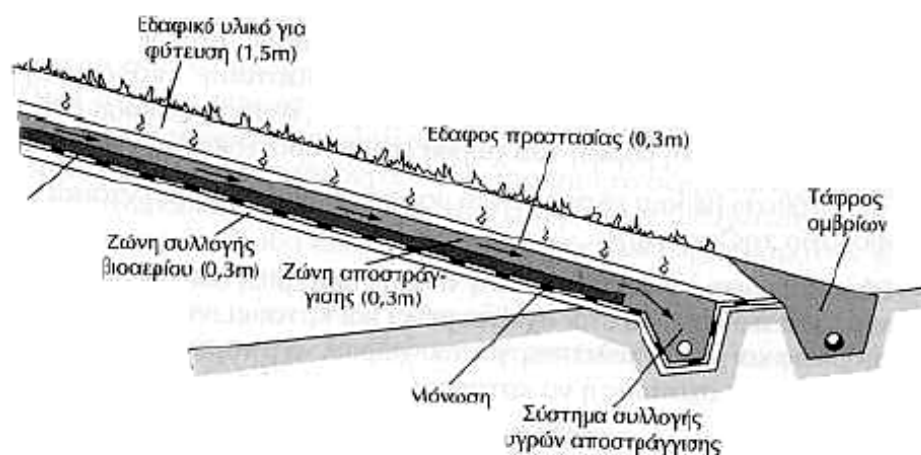
Η ορυκτή μόνωση (0,5m) αποτελείται από άργιλο κατά τουλάχιστον 50%. Το λεπτόκοκκο υλικό (μm) να είναι πάνω από 20%, η περιεκτικότητα σε ανθρακικό ασβέστιο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% και ο οργανικός άνθρακας να αντιστοιχεί σε 10% ανά βάρος. Η ορυκτή μόνωση πρέπει να είναι ομο-

γενής, η διάμετρος των σβόλων να μην ξεπερνά τα 32mm και να παρουσιάζει μια συνεχή πλαστικότητα. Η τοποθέτησή της πρέπει να γίνεται σε δύο φάσεις (ανά 0,25m). Ο βαθμός συμπίεσης κατά Proctor πρέπει να είναι ($>$) 95% και ο συντελεστής περατότητας $K=10^{-9}$ m / s. Δεν τοποθετείται όταν υπάρχουν βροχοπτώσεις ή υψηλές θερμοκρασίες. Για την ομογενοποίησή της χρησιμοποιούνται ειδικοί αναμίκτες ή φρέσσες.

Η περιεκτικότητα σε νερό κατά την τοποθέτηση είναι κατά τι μεγαλύτερη της απαιτούμενης, ώστε να μην δημιουργηθούν κενά αέρα. Στα πρανή οι στρώσεις πρέπει, όπου αυτό είναι εφικτό, να είναι παράλληλες. Όπου είναι αδύνατο τότε πρέπει να χρησιμοποιούνται οριζόντιες στρώσεις. Η επιφάνεια της ορυκτής μόνωσης δεν πρέπει να έχει ανωμαλίες ή παραμορφώσεις και η διάμετρος των υλικών να μην ξεπερνά τα 10mm. Η απόκλιση στην επίπεδη επιφάνεια δεν πρέπει να ξεπερνά τα ± 2 cm για μήκος 4m.

Ως προς την μεμβράνη και το γεωύφασμα ισχύει ότι και στην μόνωση της βάσης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα πρανή. Η μεμβράνη και το γεωύφασμα πρέπει να μην έχουν παραμορφώσεις, κύματα ή πτυχές.

Οι κατακρημνίσεις στην κάλυψη του χώρου πρέπει να συλλέγονται και να απομακρύνονται. Αυτό επιτυγχάνεται με τη ζώνη αποστράγγισης. Όλα αυτά τα νερά οδηγούνται στην τάφρο ομβρίων, που έχει συνήθως πάχος 0.3 m και συντελεστή περατότητας $> 10^{-3}$ m / sec. Τέλος, το εδαφικό υλικό για φύτευση πρέπει να έχει πάχος 1.5 m και να είναι κατάλληλο για την καλλιέργεια φυτών που αναπτύσσονται στην περιοχή.



Εικόνα 12-7: Η τελική κάλυψη ενός ΧΔΑ ή ΧΥΤΑ

Το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης του παραπάνω τελικού καλύμματος είναι περίπου 180 Euro / m² [34].

12.8 Βιοαποκατάσταση του ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους

12.8.1 Γενικά στοιχεία

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί εναλλακτικές μέθοδοι αποκατάστασης ΧΔΑ και ΧΥΤΑ που βασίζονται στις αρχές της βιολογικής αποδόμησης των απορριμμάτων.

Ενεργητικές διαδικασίες αερόβιας βιοαποικοδόμησης, για παράδειγμα κομποστοποίηση, έχουν αποδείξει εδώ και χρόνια ότι το βιοαποικοδομήσιμο τμήμα των απορριμμάτων μπορεί να σταθεροποιηθεί σε αξιοσημείωτα συντομότερο χρονικό διάστημα (σε σύγκριση με τις αναερόβιες συνθήκες), παρέχοντας στα οργανικά κλάσματα των απορριμμάτων τις κατάλληλες αναλογίες αέρα και υγρασίας. Αυτό οδηγεί στη διαπίστωση ότι, στο περιβάλλον ενός χώρου διάθεσης, η έννοια της *in situ* (στο φυσικό χώρο) αερόβιας βιοαποικοδόμησης των απορριμμάτων πρέπει να αποτιμηθεί παγκοσμίως [35].

Για την πλήρη μετατροπή των αναερόβιων συνθηκών ενός ΧΔΑ ή ΧΥΤΑ σε αερόβιες, απαιτείται ένας αριθμός ενεργειών. Αυτά είναι :

- Αύξηση και διατήρηση της **υγρασίας** στον ΧΥΤΑ σε επίπεδο **40 – 70%**.
- Επικάλυψη της μάζας των απορριμμάτων.
- Εγκατάσταση μιας πηγής οξυγόνου στον ΧΥΤΑ έτσι ώστε η μικροβιακή δραστηριότητα να γίνεται κάτω από αερόβιες συνθήκες.
- Αύξηση της θερμοκρασίας στο σώμα των απορριμμάτων σε τέτοιο επίπεδο και για χρονικό διάστημα ώστε να εξολοθρευτούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί.
- Η διατήρηση της **θερμοκρασίας σε τιμές 130 -150 °F (55-65 °C)**, για την υποστήριξη της αερόβιας αποδόμησης.
- Η παρακολούθηση των διαφόρων συνδυασμών του ποσοστού οξυγόνου, της υγρασίας και της θερμοκρασίας, και η αλλαγή των συνδυασμών για τη διατήρηση της αερόβιας αποδόμησης.

Εργαστηριακά πειράματα, περιλαμβάνοντας και αυτά που διεξήχθησαν στο University of South Florida [35], έχουν αποδείξει ότι σε αερόβιο περιβάλλον, βακτήρια μετατρέπουν τη βιοαποικοδομήσιμη μάζα των απορριμμάτων και των άλλων οργανικών συστατικών σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό κυρίως, αντί για μεθάνιο, με ένα οργανικό υλικό να παραμένει υπόλοιπο (χούμος). Επιπλέον, η ανακυκλοφορία των στραγγισμάτων μέσα από τη μάζα των απορριμμάτων βελτιώνει την αποικοδόμησή τους, μέσω της ανακύκλωσης της υγρασίας, ενώ θρεπτικά στοιχεία είναι συνεχώς διαθέσιμα στους αερόβιους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται στα απορρίμματα. Έτσι, οι συγκεντρώσεις των οργανικών ρυπαντών που συναντώνται συνήθως στα ώριμα στραγγίσματα (VOCs), όπως για παράδειγμα το τολουόλιο, το μεθυλιωμένο χλωρίδιο, η μέθυλαίθυλκετόνη (ΜΕΚ) και το BOD (δείκτης ισχύος των στραγγισμάτων), μπορούν να μειωθούν πολύ γρήγορα σε σύγκριση με τις αναερόβιες συνθήκες. Επιπροσθέτως, μπορεί να μειωθεί ο συνολικός όγκος των στραγγισμάτων που θα επεξεργαστεί .

Πιο συγκεκριμένα στα πειράματα του University of South Florida, διαπιστώθηκε ότι τα αερόβια συστήματα παρουσίασαν κατά ένα ποσοστό 45% μεγαλύτερη μείωση όγκου σε σχέση με τα αναερόβια συστήματα. Σύμφωνα με αναφορές, πολλές ευρωπαϊκές και ασιατικές χώρες αξιολογούν αυτή την προσέγγιση και έχουν ξεκινήσει τις δικές τους μελέτες σχετικά με αερόβιους χώρους διάθεσης απορριμμάτων. Υπό αυτές τις συνθήκες, ο χώρος διάθεσης αποτελεί ο ίδιος ως ένα μεγάλο, κλειστό δοχείο ή αερόβιο σύστημα, και μπορεί να λειτουργήσει ως ένα κελί που επιτρέπει τη διαχείριση των στραγγισμάτων και του αερίου του χώρου διάθεσης (LFG-Landfill Gas) ενώ παρέχει τη δυνατότητα ανακύκλωσης υλικών των ενταφιασμένων απορριμμάτων.

Τα σημαντικότερα οφέλη είναι:

- Η ποιότητα των στραγγισμάτων βελτιώνεται θεαματικά και πιο γρήγορα σε σχέση με τις αναερόβιες συνθήκες, προσφέροντας αξιοσημείωτα οικονομικά οφέλη αφού δεν απαιτεί δευτερεύουσα επεξεργασία
- Η παραγωγή μεθανίου μειώνεται και επομένως περιορίζεται το φαινόμενο αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη
- Επιτυγχάνεται σταθεροποίηση των απορριμμάτων, καθιστώντας δυνατή την

επιστροφή τους σε ολοκληρωμένους χώρους διάθεσης για άλλες χρήσεις σε πιο σύντομη περίοδο

- Η τεχνολογία είναι αποδοτική από άποψη κόστους, απλή στην κατασκευή και στη λειτουργία, επιτρέποντας μία πληθώρα επιλογών όσον αφορά τα υλικά των σωληνώσεων και των εξαρτημάτων

12.8.2 Λεπτομέρειες των αερόβιων συστημάτων

Η διαδικασία της αερόβιας ελεγχόμενης εναπόθεσης ή αποκατάστασης απορριμμάτων περιλαμβάνει την εγκατάσταση ενός πλέγματος πηγαδιών εισαγωγής αέρα, και πηγαδιών εισαγωγής νερού ή υγρασίας σε όλη την έκταση του ΧΥΤΑ. Η ποσότητα του νερού και του οξυγόνου (σε μορφή συμπιεσμένου αέρα) που εισάγονται στη μάζα των απορριμμάτων, ελέγχεται από ένα εξελιγμένο αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου, το οποίο δίνει εντολές με βάση τις τιμές θερμοκρασίας, ποσοστού οξυγόνου, ποσοστού υγρασίας που λαμβάνει από το σύστημα παρακολούθησης. Το σύστημα παρακολούθησης μπορεί εκτός των άλλων να παρακολουθεί τη δημιουργία ή την παραγωγή αερίων μέσα στο σώμα του ΧΥΤΑ, ως μια ένδειξη του τύπου της αποδόμησης που πραγματοποιείται. Για παράδειγμα, η παρουσία και οι υψηλές συγκεντρώσεις μεθανίου στη μάζα των απορριμμάτων είναι μια ισχυρή ένδειξη του τύπου της μικροβιακής δραστηριότητας.

Είναι αναγκαίο βέβαια να καθοριστούν οι συνθήκες μέσα στον ΧΥΤΑ, οι οποίες προωθούν και διατηρούν κυρίως την αερόβια αποδόμηση των απορριμμάτων [35].

Το ποσοστό υγρασίας στα απορρίμματα παρακολουθείται και διατηρείται σε ποσοστό **40 έως 70 %**, προσθέτοντας επιπλέον νερό στη μάζα τους. Κατά προτίμηση, το νερό που προστίθεται περιλαμβάνει στραγγίσματα που συλλέγονται από το ΧΥΤΑ. Τα στραγγίσματα που δεν χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της αερόβιας αποδόμησης κινούνται κατάντη προς το σύστημα συλλογής των στραγγισμάτων ή τα πηγάδια ανάκτησης στραγγισμάτων, αντλούνται στην δεξαμενή αποθήκευσης και ανακυκλοφορούνται στη μάζα των απορριμμάτων. Ένα επιπλέον όφελος της ανακυκλοφορίας είναι το ότι ελαττώνεται σημαντικά το κόστος επεξεργασίας ή διάθεσης των συλλεγόμενων στραγγισμάτων. Για ΧΥΤΑ που δε διαθέτουν σύστημα συλλογής των στραγγι-

σμάτων μπορούν να τοποθετηθούν οριζόντια ή κάθετα πηγάδια ανάκτησης στραγγισμάτων, σε σημεία όπου αναμένεται η συσσώρευση των στραγγισμάτων. Μια επιπλέον ποσότητα νερού πρέπει να είναι διαθέσιμη έτσι ώστε να διατηρείται η απαιτούμενη υγρασία στη μάζα του ΧΥΤΑ.

Ένα παράδειγμα συστήματος εισαγωγής υγρασίας είναι αυτό στο οποίο η πηγή της υγρασίας είναι τα στραγγίσματα που συλλέγονται από το σύστημα συλλογής στραγγισμάτων και οδηγούνται σε μια δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης μέσω μιας γραμμής παροχής. Οι συσκευές ελέγχου, όπως οι ηλεκτρικές σωληνοειδείς βαλβίδες, μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτή τη γραμμή έτσι ώστε να γεμίζει αυτόματα η δεξαμενή όποτε χρειάζεται. Ακόμα και η δεξαμενή όμως μπορεί να έχει αισθητήρες κατώτερου και / ή ανώτερου επιπέδου στάθμης, έτσι ώστε να ξεκινά και να σταματά αυτόματα το γέμισμά της. Στη δεξαμενή εγκαθίσταται και μια γραμμή προσθήκης, έτσι ώστε να προστίθονται στο σύστημα και άλλα υγρά όπως θρεπτικά σε υγρή μορφή, διαμέσου της δεξαμενής προσωρινής αποθήκευσης. Ακόμη, μια παροχή νερού μπορεί να συνδεθεί στο σύστημα στην περίπτωση που το σύστημα συλλογής των στραγγισμάτων δεν παρέχει αρκετή ποσότητα στραγγισμάτων για τη διατήρηση της υγρασίας στα επιθυμητά επίπεδα. Είναι προτιμότερο η εναλλακτική παροχή νερού να περιλαμβάνει έναν ταμιευτήρα ή μια λίμνη ειδικά για αυτό τον σκοπό. Η προσθήκη του νερού στη δεξαμενή ελέγχεται και αυτή ηλεκτρονικά μέσω σωληνοειδών βαλβίδων και αντλιών

Το ποσοστό του οξυγόνου στη μάζα των απορριμμάτων παρακολουθείται και αυτό, και οξυγόνο εισάγεται για να προωθήσει και να διατηρήσει κυρίως την αερόβια αποδόμηση. Το οξυγόνο συνήθως εισάγεται στη μάζα των απορριμμάτων υπό τη μορφή συμπιεσμένου αέρα, μέσω ειδικών πηγαδιών εισαγωγής (air injection wells), έτσι ώστε το ποσοστό του οξυγόνου να διατηρείται πάνω από 0 %. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι παρέχεται αρκετό οξυγόνο για τη διατήρηση της αερόβιας αποδόμησης.

Τα πηγάδια εισαγωγής αέρα μπορεί να είναι οριζόντια ή κάθετα. Τα οριζόντια πηγάδια είναι πολλές φορές προτιμότερα από τα κάθετα, επειδή προσεγγίζουν καλύτερα τη ρύπανση που κινείται οριζόντια, ή επειδή φτάνουν σε υπεδάφειες περιοχές χωρίς να καταστρέφουν επίγειες κατασκευές. Όταν μάλιστα πρόκειται να επαναχρησιμοποιηθεί η γη, τα οριζόντια πηγάδια μειώ-

νουν τους περιορισμούς με το να ελαχιστοποιούν τα ίχνη της εξυγίανσης. Η διάνοιξη οριζοντίων πηγαδιών αναπτύχθηκε αρχικά για την ανάκτηση πετρελαίου, την τοποθέτηση μηχανισμών, την εξόρυξη και την αφαίρεση του νερού κατά τη διάρκεια κατασκευών. Τροποποιήθηκε για τη βιομηχανία εξυγίανσης περιβάλλοντος στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και αρχές του 1990. Το μήκος των οριζοντίων πηγαδιών μπορεί να φτάσει και τα 300 m.

Σε αντίθεση όμως από τα κάθετα πηγάδια, τα οριζόντια πηγάδια ίσως είναι πιθανότερο να καταρρεύσουν αφού θα χρειαστεί σταθεροποίηση του εδάφους αν αυτό είναι υγρό. Επιπροσθέτως, τα οριζόντια πηγάδια περιορίζονται από το βάθος. Αυτό συμβαίνει επειδή ο μηχανισμός εντοπισμού της κατεύθυνσης συνήθως μειώνεται με την αύξηση του βάθους εγκατάστασης, και μπορεί να επηρεαστεί από τις υδρογεωλογικές συνθήκες. Τα περισσότερα εγκατεστημένα οριζόντια πηγάδια βρίσκονται σε βάθος μικρότερο των 15 m. Παρόλα αυτά υπάρχουν ορισμένα πηγάδια που έχουν κατασκευαστεί βαθύτερα (το βαθύτερο στα 70 m)

Για ΧΥΤΑ που διαθέτουν σύστημα συλλογής στραγγισμάτων (LCS), είναι δυνατόν να τροποποιηθεί το υπάρχον σύστημα έτσι ώστε να παρέχει και οξυγόνο στη μάζα των απορριμμάτων.

Κάποιος θα περίμενε ότι τα συστήματα εισαγωγής οξυγόνου στους χώρους υγειονομικής ταφής θα αντιμετώπιζαν συχνά προβλήματα εξαιτίας της πυκνής φύσης των υλικών που εναποθέτονται (MSW) και του ποσοστού του χώματος που περιέχεται σε όλους τους χώρους ταφής. Και οι δύο αυτοί παράγοντες δεν δημιουργούν και τις ιδανικότερες συνθήκες για τη ροή του αέρα. Στην πραγματικότητα, όμως, αυτό δεν συμβαίνει γιατί χρησιμοποιούνται οι τεχνολογίες του “Bioventing” που εδώ και χρόνια εφαρμόζονται για την εισαγωγή αέρα σε αμμώδη και αργιλώδη εδάφη με σχετικά μικρό κόστος. Γενικά, τα αστικά απορρίμματα είναι πιο διαπερατά από αμμώδη και αργιλώδη εδάφη εξαιτίας της ανάμιξης των διαφόρων υλικών που περιέχουν και του ακανόνιστου σχήματος τους ακόμη και μετά τη συμπίεση. Πράγματι όμως, οι ΧΥΤΑ μπορούν να θεωρηθούν ως “δύσκολοι αντιδραστήρες” με δυσκολία στην ανάδευση έτσι ώστε να ενισχυθούν ομογενείς συνθήκες σε όλο τον όγκο τους. Άρα χρειάζονται συνήθως αρκετά πηγάδια και σωληνώσεις για τον έλεγχο των συνθηκών σε όλο το χώρο.

Η ικανότητα μεταφοράς αέρα σε μεμονωμένες ζώνες μέσα στον ΧΥΤΑ είναι ένας σημαντικός μηχανισμός ελέγχου της διεργασίας της αερόβιας αποδόμησης. Γι' αυτό το λόγο, η εισαγωγή αέρα περιβάλλοντος εξυπηρετεί δύο σκοπούς. **Πρώτον**, ο αέρας παρέχει οξυγόνο στη μάζα των απορριμμάτων, σε τέτοιες συγκεντρώσεις ώστε να διατηρείται η αερόβια αποδόμηση. **Δεύτερον**, ο έλεγχος του ρυθμού εισαγωγής αέρα στον ΧΥΤΑ είναι μια καλή μέθοδος για τον έλεγχο της θερμοκρασίας στον ΧΥΤΑ. Ο αέρας έχει διπλή επίδραση στη θερμοκρασία. Η ροή αέρα στη μάζα των απορριμμάτων ενεργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας που παράγεται μέσα στον ΧΥΤΑ, έξω από αυτόν. Η θερμότητα αυτή παράγεται κυρίως από τη μικροβιακή δραστηριότητα στα υλικά των απορριμμάτων. Έτσι, περισσότερος αέρας εισάγεται στα απορρίμματα για την ελάττωση της θερμοκρασίας.

Ακόμη, το επιπλέον οξυγόνο που εισάγεται τείνει να εξολοθρεύσει τα εναπομείναντα μικρόβια, μια και δεν επιζούν κάτω από αερόβιες συνθήκες. Αφού εξοντώνονται τα αερόβια μικρόβια, δε θα παράγουν επιπλέον θερμότητα, γεγονός που συντελεί και αυτό στην ελάττωση της θερμοκρασίας.

Η ικανότητα μεταφοράς υγρασίας σε μεμονωμένες ζώνες μέσα στον ΧΥΤΑ είναι και αυτός ένας σημαντικός μηχανισμός ελέγχου της διεργασίας της αερόβιας αποδόμησης. Ένα ποσοστό υγρασίας της τάξεως του 40 %, είναι απαραίτητο για γρήγορη αερόβια αποδόμηση. Η μικροβιακή δραστηριότητα, και κατά συνέπεια η βιοαποικοδόμηση, επιβραδύνεται κατά πολλές τάξεις μεγέθους αν η υγρασία είναι κάτω από 40 %. Αν κατέβει κάτω από 20 %, η αποδόμηση σταματάει. Η ECS (Environmental Control Systems) υποστηρίζει πως το ιδανικό ποσοστό υγρασίας για την αερόβια αποδόμηση είναι 60 %. Αυτό το ποσοστό υγρασίας επιτρέπει την επαρκή διάχυση του οξυγόνου διαμέσου των απορριμμάτων για την ενίσχυση της γρήγορης αερόβιας αποδόμησης. Συμπερασματικά, αν το ποσοστό υγρασίας είναι πολύ χαμηλό, ο ΧΥΤΑ είναι ξηρός και υπερισχύει η αναερόβια αποδόμηση. Αντιθέτως, αν το ποσοστό υγρασίας είναι πολύ υψηλό, παρεμποδίζεται η διάχυση του οξυγόνου και περιορίζεται η αερόβια αποδόμηση.

Οι μετρήσεις της υγρασίας μπορεί να γίνουν με απευθείας δειγματοληψία του υλικού του χώρου ταφής, μέσω πηγαδιών δειγματοληψίας, και βάση υπολογισμών καθορίζεται η ποσότητα του νερού και των στραγγισμάτων που

πρέπει να προστεθεί, ώστε να διατηρηθεί το ποσοστό υγρασίας στα επιθυμητά επίπεδα. Ένας άλλος τρόπος εκτίμησης του ποσοστού υγρασίας στα απορρίμματα είναι η παρακολούθηση του ρυθμού παραγωγής στραγγισμάτων και του ποσοστού υγρασίας των αερίων.

Τα πηγάδια εισαγωγής υγρασίας δεν εκτείνονται βαθιά μέσα στον ΧΥΤΑ και έχουν ένα σχετικά μακρύ τμήμα διαχυτήρων, έτσι ώστε η υγρασία ή το νερό που εισάγονται μέσω αυτών, να διηθούνται κυρίως ομοιόμορφα διαμέσου της μάζας των απορριμμάτων. Από την άλλη μεριά, τα πηγάδια εισαγωγής αέρα είναι μακριά, εκτείνονται σχεδόν μέχρι τον πυθμένα του ΧΥΤΑ, και περιλαμβάνουν ένα σχετικά μικρό τμήμα διαχυτήρων έτσι ώστε ο αέρας που αρχικά εισάγεται κοντά στον πυθμένα να διαχέεται ομοιόμορφα στα απορρίμματα και τελικά να απομακρύνεται από την κορυφή του ΧΥΤΑ. (Εικόνα 12-8). Αυτή η κίνηση του αέρα, όπως προαναφέρθηκε, απομακρύνει τη θερμότητα που παράγεται στο χώρο.

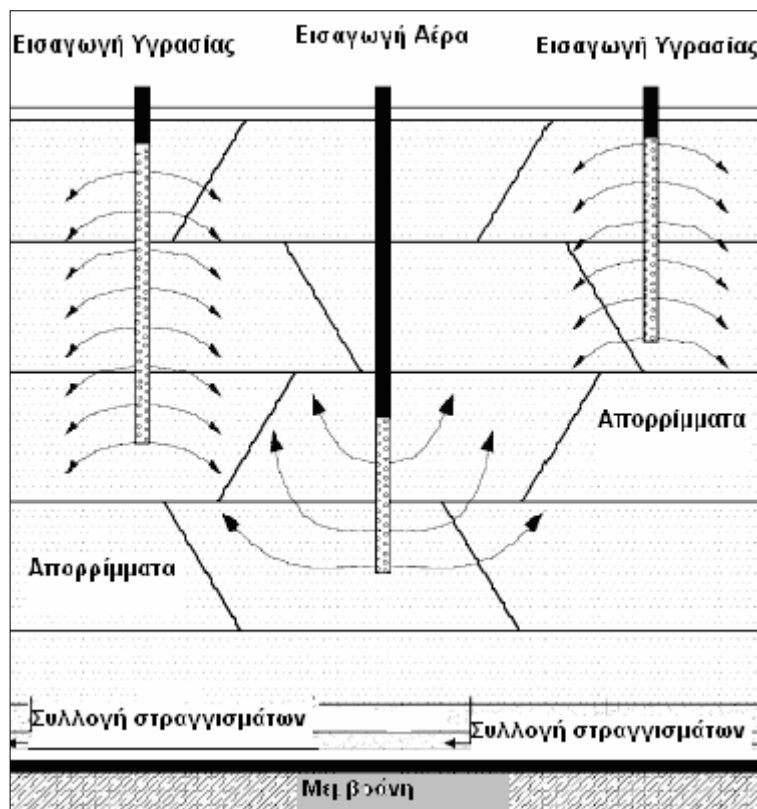
Τα πηγάδια αυτά, κατασκευάζονται συνήθως από υλικά χαμηλού βάρους, όπως το PVC και είναι κυρίως κούφια. Σκεπάζονται με ειδικά πώματα, και μπορούν να τους προσαρμοστούν μετρητές (κυρίως στα πηγάδια εισαγωγής υγρασίας), για παράδειγμα θερμότητας. Με την ίδια λογική, συμβατικοί αισθητήρες αερίων μπορούν να τοποθετηθούν στα πηγάδια εισαγωγής αέρα, για την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων συγκεκριμένων αερίων στη μάζα των απορριμμάτων.

Για τα πηγάδια εισαγωγής δεν υπάρχει κανένας περιορισμός για το υλικό τους, το σχήμα ή τη διάταξη τους. Για παράδειγμα, και τα μεταλλικά πηγάδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αερόβια αποδόμηση.

Η θερμοκρασία που επικρατεί στη μάζα των απορριμμάτων είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην ενίσχυση και τη διατήρηση της αερόβιας αποδόμησης. Το ιδανικό εύρος είναι από **130 – 150 °F ή 55 – 65 °C** και μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους, αλλά κυρίως ελέγχεται από την εισαγωγή αέρα στον ΧΥΤΑ. Η θερμοκρασία μπορεί ακόμα να ελεγχθεί από ποσοστό υγρασίας.

Παρόλα αυτά, το σύστημα αντιδρά πολύ γρηγορότερα στις αλλαγές του ποσοστού του οξυγόνου ή του αέρα. Είναι ακόμα επιθυμητό να ανυψωθεί και να διατηρηθεί η θερμοκρασία στον ΧΥΤΑ σε επίπεδα ικανά να εξολοθρεύσουν

τους επιβλαβείς παθογόνους μικροοργανισμούς που υπάρχουν στα απορρίμματα.



Εικόνα 12-8: Αερόβια αποκατάσταση ΧΥΤΑ [35]

Για παράδειγμα, για την εξολόθρευση των παθογόνων απαιτούνται θερμοκρασίες πάνω από τους 135 °F ή 57 °C, ενώ στη θερμοκρασία των 155 °F ή 68 °C οι παθογόνοι μικροοργανισμοί πεθαίνουν σε διάστημα λίγων ημερών.

Όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος του ρυθμού εισαγωγής αέρα στον ΧΥΤΑ είναι μια καλή μέθοδος για τον έλεγχο της θερμοκρασίας στον ΧΥΤΑ. Ο αέρας έχει διπλή επίδραση στη θερμοκρασία. Η ροή αέρα στη μάζα των απορριμμάτων ενεργεί ως μέσο μεταφοράς της θερμότητας που παράγεται μέσα στον ΧΥΤΑ, έξω από αυτόν. Η θερμότητα αυτή παράγεται κυρίως από τη μικροβιακή δραστηριότητα στα υλικά των απορριμμάτων. Έτσι, περισσότερος αέρας εισάγεται στα απορρίμματα για την ελάττωση της θερμοκρασίας.

Ακόμη, το επιπλέον οξυγόνο που εισάγεται τείνει να εξολοθρεύσει τα εναπομείναντα μικρόβια, μια και δεν επιζούν κάτω από αερόβιες συνθήκες. Αφού εξοντώνονται τα αερόβια μικρόβια, δε θα παράγουν επιπλέον θερμότητα, γεγονός που συντελεί και αυτό στην ελάττωση της θερμοκρασίας. Αν η θερμοκρασία του συστήματος είναι πολύ χαμηλή, μειώνεται η ποσότητα του

αέρα που εισάγεται στο σύστημα, έτσι ώστε η θερμότητα που παράγεται από τη μικροβιακή δραστηριότητα (αερόβια ή αναερόβια) να μην εξανεμιστεί γρήγορα, και τελικά να αυξηθεί η θερμοκρασία στη μάζα των απορριμμάτων.

Η θερμοκρασία ακόμη παρακολουθείται επειδή αποτελεί μια ένδειξη ολοκληρωμένης ή σταθεροποιημένης βιοαποικοδόμησης. Μείωση στη θερμοκρασία του ΧΥΤΑ παρά την αύξηση των επιπέδων οξυγόνου είναι ένδειξη ότι η διαδικασία της αποδόμησης έχει σχεδόν τελειώσει και ότι το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των απορριμμάτων έχει σταθεροποιηθεί. Στο σημείο αυτό, τα απορρίμματα έχουν λιπασματοποιηθεί και ο ΧΥΤΑ έχει σταθεροποιηθεί. Περαιτέρω παρακολούθηση του ΧΥΤΑ μπορεί να μην χρειαστεί.

Το CH₄ είναι ένα βασικό παραπροϊόν της αναερόβιας αποδόμησης. Αν η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο διατηρείται σε επίπεδα του 10 % κατ' όγκο και δεν εντοπιστούν έντονες οσμές από τα παραπροϊόντα, τότε αυτό δείχνει πως επικρατεί αερόβια αποδόμηση, ιδιαίτερα αν αέρας ή οξυγόνο τροφοδοτείται στο σύστημα και η συγκέντρωση του οξυγόνου είναι πάνω από 0 % κατ' όγκο. Αν όμως οι συγκεντρώσεις του μεθανίου πλησιάζουν το 50 % κατ' όγκο, τότε η μικροβιακή δραστηριότητα είναι κυρίως αναερόβια.

Η διαδικασία της αερόβιας ταφής ή αποκατάστασης των απορριμμάτων περιλαμβάνει ακόμα και **την προσθήκη θρεπτικών** μέσω πηγαδιών εισαγωγής για την ενίσχυση της αερόβιας αποδόμησης. Για παράδειγμα κάθε συνδυασμός αζώτου, φωσφόρου και πηγών άνθρακα μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα για τη διατήρηση των βέλτιστων επιπέδων μικροβιακής ανάπτυξης για την αερόβια αποδόμηση. Βέβαια, και τα αερόβια μικρόβια δύναται να προστεθούν μέσω του συστήματος των πηγαδιών. Έχει βρεθεί πως ο επιθυμητός λόγος συγκεντρώσεων άνθρακα προς άζωτο κυμαίνεται από **C/N = 20:1 – 50:1**. Γενικότερα όμως στην βιοαποικοδόμηση η απαιτούμενη αναλογία άνθρακα / αζώτου / φωσφόρου είναι **C / N / P = 100 / 10 / 1** [9].

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας των αερόβιων συστημάτων πρέπει να μετρούνται στο πεδίο η υγρασία των απορριμμάτων, η θερμοκρασία και οι συγκεντρώσεις των αερίων που εξέρχονται (VOCs, CO₂, O₂, και CH₄), για να είναι βέβαιο πως οι αερόβιες λειτουργίες είναι επαρκείς και ασφαλείς. Απαραίτητες είναι και αναλύσεις των στραγγισμάτων συμπεριλαμβανομένων του pH, την ειδικής αγωγιμότητας, του BOD, των μετάλλων και των VOCs.

Πρέπει να σημειωθεί, όμως, πως δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν πλήρως αερόβιες συνθήκες σε όλο τον ΧΥΤΑ, αλλά είναι σημαντικό οι επικρατούσες συνθήκες να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις ιδανικές συνθήκες. Χωρίς αμφιβολία, ορισμένες από τις διεργασίες θα παραμένουν αναερόβιες, αλλά αυτό μπορεί να περιοριστεί σε μέγεθος και έκταση με την συνεχή παρακολούθηση των αερόβιων συνθηκών.

12.8.3 Αερόβια βιοεξυγίανση σε συνδυασμό με εξαγωγή ατμών (Bioventing και SVE)

12.8.3.1 Γενική περιγραφή της τεχνολογίας SVE

Στη μέθοδο αυτή ισχύουν όλες οι αρχές των αερόβιων συστημάτων που συζητήθηκαν παραπάνω αλλά επιπλέον εφαρμόζεται και η τεχνολογία της άντλησης των ατμών του εδάφους (**Soil Vapor Extraction – SVE**), για την απομάκρυνση των πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) που συναντώνται στη μάζα των απορριμμάτων.

Η εξαγωγή των ατμών του εδάφους, είναι μια *in situ* τεχνολογία εξυγίανσης της ακόρεστης ζώνης ρυπασμένων εδαφών, στην οποία χρησιμοποιείται κενό το οποίο προκαλεί ελεγχόμενη ροή αέρα για την απομάκρυνση πτητικών και ορισμένων ημιπτητικών ρυπαντών από το έδαφος. Το αέριο που απομακρύνεται από το έδαφος μπορεί να επεξεργαστεί ή να καταστραφεί ανάλογα με τις ισχύουσες διατάξεις εκπομπών αερίων. Συνήθως η επεξεργασία του αέρα που αντλείται γίνεται με φίλτρα ενεργού άνθρακα [36].

Για την άντληση των ατμών χρησιμοποιούνται συνήθως κάθετα πηγάδια με βάθος 1,5 μέτρο ή και μεγαλύτερο (έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς και σε βάθη 91 μέτρων). Εκτός από τα κάθετα πηγάδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οριζόντια πηγάδια εγκατεστημένα σε τάφρους ή σε οριζόντια ορύγματα, αν το επιβάλουν οι συνθήκες της περιοχής.

Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν καταθλιπτικές αντλίες υπογείου νερού, για την αποφυγή ή την ελάττωση της ανόδου του υπογείου νερού που προκαλείται από κενό ή ακόμα και για την αύξηση του βάθους της ακόρεστης ζώνης.

Οι ομάδες των ρυπαντών στις οποίες στοχεύει η *in situ* SVE είναι οι VOCs και ορισμένα καύσιμα. Η τεχνολογία συνήθως εφαρμόζεται μόνο σε

πτητικές ενώσεις με σταθερά του νόμου του Henry μεγαλύτερη από 0,01 ή τάση ατμών μεγαλύτερη από 0,5 mm Hg.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την τεχνολογία αυτή είναι :

- Ύπαρξη ρυπαντών με χαμηλή τάση ατμών.
- Εδάφη με υψηλά ποσοστά λεπτόκοκκων υλικών και υψηλό βαθμό κορεσμού, απαιτούν υψηλότερη πίεση κενού και παρεμποδίζουν τη λειτουργία του συστήματος.
- Εδάφη με μεταβλητή διαπερατότητα και διαστρωμάτωση, προκαλούν ακανόνιστη ροή των αερίων από τη ρυπασμένη περιοχή.
- Εδάφη με υψηλό ποσοστό οργανικών ή πολύ ξηρά, έχουν ισχυρή ροφητική ικανότητα των VOCs, γεγονός που μειώνει τους ρυθμούς απομάκρυνσης.
- Η τεχνολογία SVE δεν είναι αποτελεσματική στην κορεσμένη ζώνη, και σε εδάφη με χαμηλή διαπερατότητα.
- Η τεχνολογία SVE δεν είναι αποτελεσματική στην απομάκρυνση μετάλλων, PCBs και διοξινών.

Μια εφαρμογή αερόβιας βιοεξυγίανσης σε συνδυασμό με εξαγωγή ατμών είναι το σύστημα **BIOPUSTER**.

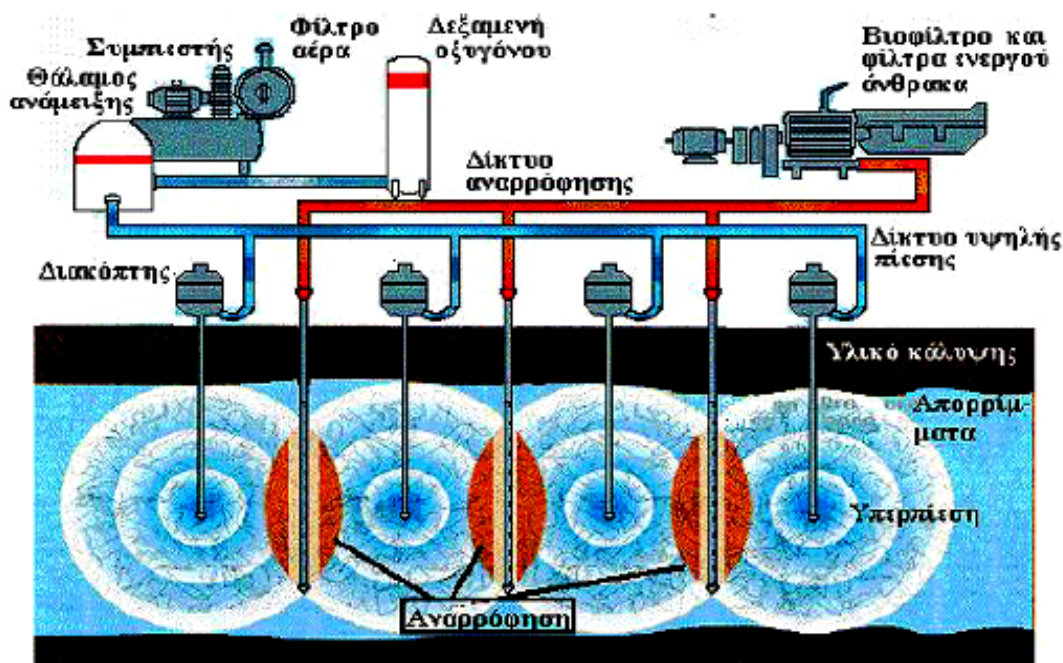
12.8.3.2 Η μέθοδος BIOPUSTER

Για όλα σχεδόν τα οργανικά συστατικά η φυσική αποσύνθεση απαιτεί οξυγόνο. Το πρόβλημα είναι να ρυθμιστεί η διαθεσιμότητα του οξυγόνου όπου είναι αυτό απαραίτητο για αποσύνθεση ή αποικοδόμηση. Πολλοί μικροοργανισμοί εξειδικεύονται στην αποσύνθεση υλικών που βιοδιασπώνται. Για αυτό το λόγο διαδικασίες αποσύνθεσης λαμβάνουν χώρα μόνο υπό αερόβιες συνθήκες, όταν δηλαδή υπάρχει οξυγόνο. Όταν οξυγόνο προστίθεται στο περιβάλλον αυτοί οι μικροοργανισμοί μπορούν να διασπάσουν τα βιοδιασπώμενα υλικά στα φυσικά τους στοιχειώδη τμήματα, που είναι βασικά διοξείδιο του άνθρακα και νερό [3].

Ακόμα και χρόνια έπειτα από το κλείσιμο τους, στους χώρους διάθεσης απορριμμάτων παράγονται δύσοσμα, μερικές φορές τοξικά και εκρηκτικά αέρια. Επιπροσθέτως, παράγονται στραγγίσματα ρυπασμένα σε μεγάλο βαθμό με οργανικές μολυσματικές ουσίες θέτοντας κινδύνους για τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Αυτό συμβαίνει επειδή οργανικά απορρίμματα διασπώνται στο χώρο διάθεσης από αναερόβιους μικροοργανισμούς. Η διαδικασία πραγματοποιείται πολύ αργά και απελευθερώνει τα ανεπιθύμητα συστατικά που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της αναερόβιας αποσύνθεσης είναι το μεθάνιο - ένα αέριο που εκτός του ότι είναι εκρηκτικό, είναι και εξαιρετικά επιβλαβές για την ατμόσφαιρα από τη στιγμή που συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αντιθέτως, αποσύνθεση από αερόβιους μικροοργανισμούς πραγματοποιείται αισθητά πιο γρήγορα και είναι πολύ λιγότερο επιβλαβής για το περιβάλλον αφού παράγονται μόνο διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Για τη δημιουργία αερόβιων συνθηκών στο σώμα του χώρου διάθεσης, αέρας ή οξυγόνο πρέπει να εισαχθούν τεχνητά. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η διανομή αέρα/ οξυγόνου πρέπει να γίνει ομοιόμορφα.

Η μέθοδος **BIOPUSTER** (<http://www.ag.com>) είναι ένα σύστημα ελεγχόμενου αερισμού που έχει αναπτυχθεί για εμπλουτισμό με οξυγόνο απορριμμάτων ή ρυπασμένων εδαφών, έτσι ώστε να υποστούν βιολογική επεξεργασία. Στον εισαγόμενο αέρα εκτός από το οξυγόνο, προστίθεται υγρασία και θρεπτικά αν αυτό κριθεί αναγκαίο. Παρέχοντας στους μικροοργανισμούς που βρίσκονται οπουδήποτε στη φύση, οξυγόνο, νερό και θρεπτικές ουσίες, μπορεί να υπάρξει εγγύηση για φυσική αποσύνθεση. Η μέθοδος **BIOPUSTER** προκαλεί φυσική, και με εξαιρετική επιτάχυνση αποσύνθεση του οργανικού υλικού παρέχοντας την απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου.



Εικόνα 12-9: Το σύστημα BIOPUSTER [3]

Τα πολλά πλεονεκτήματα της μεθόδου **BIOPUSTER** καταδεικνύονται σε έναν αριθμό διαφορετικών σταδίων. Τα ακόλουθα πλεονεκτήματα παρέχουν σημαντικά οικονομικά οφέλη:

- Σύντομοι χρόνοι επεξεργασίας εξαιτίας της εισαγωγής οξυγόνου με τεχνητό τρόπο
- Η μάζα μειώνεται με μείωση της περιεχόμενης εργασίας
- Ανακυκλώσιμα υλικά ανακτώνται με ταξινόμηση
- Μείωση του χώρου διάθεσης
- Επέκταση του χρόνου λειτουργίας του χώρου διάθεσης
- Απαιτούνται ελάχιστα μέτρα ασφαλείας

Η μέθοδος αυτή της αερόβιας σταθεροποίησης εξασφαλίζει την πλήρη αδρανοποίηση των αποβλήτων με μικρή κατανάλωση ενέργειας. Η ανταλλαγή των αερίων εξασφαλίζεται μέσω πηγαδιών αερισμού, τα οποία είναι εφοδιασμένα με αεραντλίες. Η επιπλέον ποσότητα αέρα διατρυπά και αφυγραίνει το χώρο.

Τα εκπεμπόμενα αέρια συλλέγονται και επεξεργάζονται με σύστημα ελέγχου της αέριας ρύπανσης. Τα επιβλαβή αέρια απομακρύνονται με τη χρήση βιοφίλτρων, φίλτρων ενεργού άνθρακα ή καταλυτικές μεθόδους. Τα όρια των πε-

ριοχών που υφίστανται επεξεργασία και το υπέδαφος, προστατεύονται από τις ανεξέλεγκτες εκπομπές βιοαερίου με οπές απορρόφησης. Οι οπές τοποθετούνται ή μια δίπλα στην άλλη σε σημεία που αποτελούν φυσικά σύνορα μεταξύ του χώρου που υφίσταται επεξεργασία και του υπόλοιπου χώρου της χωματερής. Τέλος ο αερισμός αυτής της ζώνης συμπεριφέρεται ως ένα φυσικό φίλτρο που προστατεύει τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα από το χώρο επεξεργασίας.

12.8.4 Εφαρμογή αερόβιας βιοαποκατάστασης στο ΧΔΑ Πέρα Γαλήνων

Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί πιλοτικά σε πολλούς ΧΔΑ με εντυπωσιακά αποτελέσματα, γεγονός που την καθιστά μια ελπιδοφόρο και συμφέρουσα μέθοδο αποκατάστασης [35]. Για να εφαρμοστεί, όμως, η μέθοδος αυτή στους Πέρα Γαλήνους είναι απαραίτητη αρχικά η εργαστηριακή και στη συνέχεια η πιλοτική εφαρμογή της, ώστε να οριστούν οι παράμετροι της αποδοτικής της λειτουργίας, γεγονός που απαιτεί χρήμα και χρόνο. Ακόμα, η έλλειψη τεχνογνωσίας, οι απαιτήσεις της νομοθεσίας, αλλά και η δυσπιστία σε κάθε τι καινούριο καθιστούν την εφαρμογή της σχεδόν ουτοπική.

Το Εργαστήριο Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων του Πολυτεχνείου Κρήτης προχωρά στην κατασκευή ενός ΧΥΤΑ εργαστηριακής κλίμακας, για την προσομοίωση και μελέτη της αποδόμησης των απορριμμάτων κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες εισαγωγής αέρα και υγρασίας στη μάζα των απορριμμάτων, με σκοπό την απόκτηση της απαραίτητης τεχνογνωσίας για την προώθηση καινοτόμων τεχνολογιών αποκατάστασης ΧΔΑ και ΧΥΤΑ.

13. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η *in – situ* μέτρηση του βιοαερίου σε ΧΔΑ και ΧΥΤΑ και η εκτίμηση των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄. Για τις μετρήσεις επιλέχθηκε ο ΧΔΑ στο Φόδελε Ηρακλείου, ένας από τους χιλιάδες ανεξέλεγκτους ή ημιελεγχόμενους χώρους διάθεσης απορριμμάτων στην Ελλάδα, σε μια προσπάθεια εύρεσης τρόπων μείωσης των δυσμενών επιπτώσεων του σημερινού τρόπου διαχείρισης των απορριμμάτων στον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Αρχικά, μετρήθηκε η σύσταση του βιοαερίου στο ΧΔΑ με τη χρήση του φορητού αναλυτή αερίων BE - DGA 3 και της δειγματοληπτικής συσκευής Draeger. Το βιοαέριο βρέθηκε να αποτελείται από CH₄ σε ποσοστό 52 % κ.ό, από CO₂ σε ποσοστό 47%, και από άλλα αέρια σε ποσοστό 1%.

Στη συνέχεια με βάση τις μετρήσεις του βιοαερίου εκτιμήθηκαν οι ανεξέλεγκτες εκπομπές του CH₄ με τη χρήση των μοντέλων LandGem και Gas-Sim. Τα μοντέλα έδωσαν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα, με το μοντέλο Gas-Sim να δίνει περίπου 3% περισσότερες εκπομπές. Έπειτα, με τη χρήση του μοντέλου Landgem, υπολογίστηκε η υποθετική μείωση των εκπομπών CH₄ με βάση τα όσα περιλαμβάνει η Οδηγία 99 / 31/ EU.

Τα σενάρια που μελετήθηκαν και τα αποτελέσματά τους ήταν :

1. Η μείωση των ζυμώσιμων κατά 25 % προκάλεσε μείωση των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ της τάξεως του 13,5 %
2. Η μείωση των ζυμώσιμων κατά 50 % προκάλεσε μείωση των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ της τάξεως του 22,3 %
3. Η μείωση των ζυμώσιμων κατά 65 % προκάλεσε μείωση των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ της τάξεως του 27,6 %
4. Η ταυτόχρονη μείωση των ζυμώσιμων κατά 65 % και του χαρτιού κατά 30 % προκάλεσαν μείωση των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ της τάξεως του 46%
5. Η ταυτόχρονη μείωση των ζυμώσιμων κατά 65 % και του χαρτιού κατά 65 % προκάλεσαν μείωση των ανεξέλεγκτων εκπομπών CH₄ της τάξεως του 68,2%

Ακόμα αποδείχθηκε πως η σχέση ανάμεσα στη μείωση της ποσότητας των ζυμώσιμων και στη μείωση των εκπομπών CH₄ είναι γραμμική.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω είναι πως η εφαρμογή της οδηγίας αυτής, θα μειώσει αρκετά τις εκπομπές του CH₄, μειώνοντας τη συνεισφορά της ταφής των απορριμμάτων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Εκτός, όμως, από τα υποθετικά σενάρια μείωσης των εκπομπών, εξετάσαμε και τη δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας από το ΧΔΑ με τη χρήση μιας μηχανής εσωτερικής καύσης. Τα αποτελέσματα δεν ήταν θετικά, αφού η παραγωγή του βιοαερίου δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να είναι η επένδυση βιώσιμη. Άρα η ιδανικότερη λύση είναι η αποκατάσταση του ΧΔΑ, που μεταξύ των άλλων περιλαμβάνει την τελική του κάλυψη, την εγκατάσταση συστήματος συλλογής του βιοαερίου και την καύση του σε πυρσό. Δεν εξετάστηκε καθόλου το σενάριο της παραγωγής θερμότητας από το βιοαέριο αφού στην περιοχή δεν υπάρχουν πιθανοί χρήστες της.

Παρουσιάστηκε, βέβαια, και η καινοτόμος τεχνική της βιολογικής αποκατάστασης των ΧΔΑ, αλλά η έλλειψη τεχνογνωσίας, οι απαιτήσεις της νομοθεσίας, αλλά και η δυσπιστία σε κάθε τι καινούριο καθιστούν την εφαρμογή της σχεδόν ουτοπική. Για να εφαρμοστεί εμπορικά η τεχνική αυτή, πρέπει να γίνουν πολλές εργαστηριακές και πιλοτικές μελέτες, ώστε να οριστούν επακριβώς οι βέλτιστες συνθήκες εφαρμογής της και να αποδειχθεί, χωρίς αμφισβήτηση, η αποδοτικότητά της. Μέχρι τότε όμως, ως εφαρμοστούν τουλάχιστον οι καταξιωμένες τεχνικές αποκατάστασης των ΧΔΑ και ΧΥΤΑ, για την ελαχιστοποίηση των δυσμενών επιπτώσεων τους στον άνθρωπο και το περιβάλλον.

14. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μανιός, Θ., 2001. “Σημειώσεις στο μάθημα Διαχείριση και Επεξεργασία Αστικών Απορριμμάτων.”
- [2] Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος και Αειφόρου Ανάπτυξης, 2003. “Σχέδιο έκθεσης δεικτών αειφορίας”.
- [3] Μουσιόπουλος, Ν., 2002. “Σημειώσεις στο μάθημα Διαχείριση Απορριμμάτων.”
- [4] Βατάλης, Κ., Μανωλιάδης Ο., Δεσινιώτης Η., 2002. “Περιβαλλοντική Γεωτεχνολογία.”
- [5] Σκορδίλης, Α.Δ., 2001. “Ελεγχόμενη Εναπόθεση Στερεών μη Επικινδύνων Αποβλήτων”
- [6] ATSDR, 2001. “Landfill Gas Primer- An overview for environmental health professionals”.
- [7] Fischer C., Maurice C. Lagerkvist A., 1999. “Gas Emission from Landfills”
- [8] Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S.A., 1992. “Integrated Solid Waste Management”
- [9] Rolland C. Scheibengraf M., 2003. BIOLOGISCH ABBAUBARER KOHLENSTOFF IM RESTMÜLL”
- [10] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 1996. Revised IPCC guidelines for national Greenhouse Gas Inventories, Vol 2 – 3.
- [11] www.greenhouse.gov.au
- [12] Puchajda B., 2004. “Landfill gas – production, composition, prediction”
- [13] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2000. Good practice Guidance and Uncertainty management in Greenhouse Gas Inventories.
- [14] U.S Army Corps of Engineers, 1995. “Landfill off-gas collection and treatment systems”.
- [15] www.epa.gov/swrust1/pubs
- [16] Danish Environmental protection Agency, 2000.” Guidelines on remediation of contaminated sites”.
- [17] Lowry E., Dickerson D., 2003. “Advisory – Active Soil Gas Investigations”.

- [18] Hamideh S, 2000. “A Review of the Literature Regarding Non – Methane and Volatile Organic Compounds In Municipal Solid Waste Landfill Gas “
- [19] Prosser R., 1998. “Reviewing and interpreting landfill gas monitoring data”
- [20] Fischer C., Maurice C., Lagerkvist A, 1999. “Gas Emission from Landfills”
- [21] www.ipcc-nggip.iges.or.jp
- [22] Smith K.A., Bogner J.,1997.” Measurement and Modelling of Methane fluxes from landfills “.
- [23] Bates J., Haworth A., 2001. “Economic Evaluation of Emission Reductions of Methane in the Waste Sector in the EU, Bottom-up Analysis”
- [24] ΠΕΡ.ΜΕΛ. , 2001. “ Μελέτη Περιβαλλοντικών επιπτώσεων για το έργο « Αποκατάσταση ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους του Δήμου Γαζίου»”.
- [25] www.berntgmbh.de
- [26] U.S EPA, 1998. “User’s Manual, Landfill Gas Emissions Model, Version 2.0”
- [27] Ντζαμίλης Π., Χάβας Γ., 2004. “Ποιοτική και ποσοτική ανάλυση απορριμμάτων Περιφέρειας Κρήτης”, Μεταπτυχιακή διατριβή.
- [28] Environmental Agency, 2003. “GasSim Lite User Manual, Release 1.01”
- [29] www.europa.int.com
- [30] Environment Agency, 1997. “Guidance on landfill gas flaring Version 2.1”.
- [31] EPA, April 2003. ”BAT Guidance Notes for the Waste Sector : Landfill Activities”.
- [32] Willumsen H., 2001. “Energy recovery from landfill gas in Denmark and worldwide”.
- [33] EMCON, 2002. “Landfill gas utilization feasibility study at Rocky Face landfill Dalton, Georgia”.
- [34] www.enviro.nfesc.navy.mil
- [35] Read, A..D., M. Hudgins, S. Harper, P. Phillips and J. Morris, 2001. “ The successful demonstration of aerobic landfilling. The potential for a more sustainable solid waste management approach? ” Resources, Conservation and Recycling 32, 115-146.
- [36] www.frtr.gov/matrix2/section3/3_2.html

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1
ΤΑ OUTPUTS ΤΟΥ LANDGEM

Οι εκπομπές CH₄ από το ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους

Model Parameters

Lo : 68.00 m³ / Mg ***** User Mode Selection *****
 k : 0.0330 1/yr ***** User Mode Selection *****
 NMOC : 4000.00 ppmv ***** User Mode Selection *****
 Methane : 52.0000 % volume
 Carbon Dioxide : 48.0000 % volume

Landfill Parameters

Landfill type : No Co-Disposal
 Year Opened : 1992 Current Year : 2004 Closure Year: 2004
 Capacity : 1000000 Mg
 Average Acceptance Rate Required from
 Current Year to Closure Year : 0.00 Mg/year

Model Results

Methane Emission Rate

Year	Refuse In Place (Mg)	(Mg/yr)	(Cubic m/yr)
1993	5.144E+04	7.927E+01	1.188E+05
1994	1.055E+05	1.599E+02	2.397E+05
1995	1.622E+05	2.421E+02	3.630E+05
1996	2.217E+05	3.261E+02	4.887E+05
1997	2.842E+05	4.118E+02	6.173E+05
1998	3.499E+05	4.996E+02	7.489E+05
1999	4.188E+05	5.897E+02	8.839E+05
2000	4.912E+05	6.821E+02	1.022E+06
2001	5.672E+05	7.771E+02	1.165E+06
2002	6.470E+05	8.748E+02	1.311E+06
2003	7.308E+05	9.755E+02	1.462E+06
2004	8.175E+05	1.077E+03	1.615E+06
2005	8.175E+05	1.043E+03	1.563E+06
2006	8.175E+05	1.009E+03	1.512E+06
2007	8.175E+05	9.759E+02	1.463E+06
2008	8.175E+05	9.443E+02	1.415E+06
2009	8.175E+05	9.136E+02	1.369E+06
2010	8.175E+05	8.839E+02	1.325E+06
2011	8.175E+05	8.552E+02	1.282E+06
2012	8.175E+05	8.275E+02	1.240E+06
2013	8.175E+05	8.006E+02	1.200E+06
2014	8.175E+05	7.746E+02	1.161E+06
2015	8.175E+05	7.495E+02	1.123E+06

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2016	8.175E+05	7.252E+02	1.087E+06
2017	8.175E+05	7.016E+02	1.052E+06
2018	8.175E+05	6.788E+02	1.018E+06
2019	8.175E+05	6.568E+02	9.845E+05
2020	8.175E+05	6.355E+02	9.525E+05
2021	8.175E+05	6.149E+02	9.216E+05
2022	8.175E+05	5.949E+02	8.917E+05
2023	8.175E+05	5.756E+02	8.628E+05
2024	8.175E+05	5.569E+02	8.348E+05
2025	8.175E+05	5.388E+02	8.077E+05
2026	8.175E+05	5.213E+02	7.814E+05
2027	8.175E+05	5.044E+02	7.561E+05
2028	8.175E+05	4.880E+02	7.315E+05
2029	8.175E+05	4.722E+02	7.078E+05
2030	8.175E+05	4.569E+02	6.848E+05
2031	8.175E+05	4.420E+02	6.626E+05
2032	8.175E+05	4.277E+02	6.411E+05
2033	8.175E+05	4.138E+02	6.203E+05
2034	8.175E+05	4.004E+02	6.001E+05
2035	8.175E+05	3.874E+02	5.806E+05
2036	8.175E+05	3.748E+02	5.618E+05
2037	8.175E+05	3.626E+02	5.436E+05
2038	8.175E+05	3.509E+02	5.259E+05
2039	8.175E+05	3.395E+02	5.088E+05
2040	8.175E+05	3.285E+02	4.923E+05
2041	8.175E+05	3.178E+02	4.763E+05
2042	8.175E+05	3.075E+02	4.609E+05
2043	8.175E+05	2.975E+02	4.459E+05
2044	8.175E+05	2.878E+02	4.314E+05
2045	8.175E+05	2.785E+02	4.174E+05
2046	8.175E+05	2.695E+02	4.039E+05
2047	8.175E+05	2.607E+02	3.908E+05
2048	8.175E+05	2.522E+02	3.781E+05
2049	8.175E+05	2.441E+02	3.658E+05
2050	8.175E+05	2.361E+02	3.539E+05
2051	8.175E+05	2.285E+02	3.425E+05
2052	8.175E+05	2.211E+02	3.313E+05
2053	8.175E+05	2.139E+02	3.206E+05
2054	8.175E+05	2.069E+02	3.102E+05
2055	8.175E+05	2.002E+02	3.001E+05
2056	8.175E+05	1.937E+02	2.904E+05
2057	8.175E+05	1.874E+02	2.809E+05
2058	8.175E+05	1.813E+02	2.718E+05
2059	8.175E+05	1.755E+02	2.630E+05
2060	8.175E+05	1.698E+02	2.545E+05
2061	8.175E+05	1.643E+02	2.462E+05
2062	8.175E+05	1.589E+02	2.382E+05
2063	8.175E+05	1.538E+02	2.305E+05
2064	8.175E+05	1.488E+02	2.230E+05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2065	8.175E+05	1.439E+02	2.158E+05
2066	8.175E+05	1.393E+02	2.087E+05
2067	8.175E+05	1.347E+02	2.020E+05
2068	8.175E+05	1.304E+02	1.954E+05
2069	8.175E+05	1.261E+02	1.891E+05
2070	8.175E+05	1.220E+02	1.829E+05
2071	8.175E+05	1.181E+02	1.770E+05
2072	8.175E+05	1.143E+02	1.713E+05
2073	8.175E+05	1.105E+02	1.657E+05
2074	8.175E+05	1.070E+02	1.603E+05
2075	8.175E+05	1.035E+02	1.551E+05
2076	8.175E+05	1.001E+02	1.501E+05
2077	8.175E+05	9.687E+01	1.452E+05
2078	8.175E+05	9.373E+01	1.405E+05
2079	8.175E+05	9.069E+01	1.359E+05
2080	8.175E+05	8.774E+01	1.315E+05
2081	8.175E+05	8.489E+01	1.272E+05
2082	8.175E+05	8.214E+01	1.231E+05
2083	8.175E+05	7.947E+01	1.191E+05
2084	8.175E+05	7.689E+01	1.153E+05
2085	8.175E+05	7.440E+01	1.115E+05
2086	8.175E+05	7.198E+01	1.079E+05
2087	8.175E+05	6.964E+01	1.044E+05
2088	8.175E+05	6.738E+01	1.010E+05
2089	8.175E+05	6.520E+01	9.772E+04
2090	8.175E+05	6.308E+01	9.455E+04
2091	8.175E+05	6.103E+01	9.148E+04
2092	8.175E+05	5.905E+01	8.851E+04
2093	8.175E+05	5.713E+01	8.564E+04
2094	8.175E+05	5.528E+01	8.286E+04
2095	8.175E+05	5.348E+01	8.017E+04
2096	8.175E+05	5.175E+01	7.757E+04
2097	8.175E+05	5.007E+01	7.505E+04
2098	8.175E+05	4.844E+01	7.261E+04
2099	8.175E+05	4.687E+01	7.026E+04
2100	8.175E+05	4.535E+01	6.797E+04
2101	8.175E+05	4.388E+01	6.577E+04
2102	8.175E+05	4.245E+01	6.363E+04
2103	8.175E+05	4.107E+01	6.157E+04
2104	8.175E+05	3.974E+01	5.957E+04
2105	8.175E+05	3.845E+01	5.764E+04
2106	8.175E+05	3.720E+01	5.576E+04
2107	8.175E+05	3.600E+01	5.395E+04
2108	8.175E+05	3.483E+01	5.220E+04
2109	8.175E+05	3.370E+01	5.051E+04
2110	8.175E+05	3.260E+01	4.887E+04
2111	8.175E+05	3.154E+01	4.728E+04
2112	8.175E+05	3.052E+01	4.575E+04
2113	8.175E+05	2.953E+01	4.426E+04

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2114	8.175E+05	2.857E+01	4.283E+04
2115	8.175E+05	2.764E+01	4.144E+04
2116	8.175E+05	2.675E+01	4.009E+04
2117	8.175E+05	2.588E+01	3.879E+04
2118	8.175E+05	2.504E+01	3.753E+04
2119	8.175E+05	2.423E+01	3.631E+04
2120	8.175E+05	2.344E+01	3.513E+04
2121	8.175E+05	2.268E+01	3.399E+04
2122	8.175E+05	2.194E+01	3.289E+04
2123	8.175E+05	2.123E+01	3.182E+04
2124	8.175E+05	2.054E+01	3.079E+04
2125	8.175E+05	1.987E+01	2.979E+04
2126	8.175E+05	1.923E+01	2.882E+04
2127	8.175E+05	1.860E+01	2.789E+04
2128	8.175E+05	1.800E+01	2.698E+04
2129	8.175E+05	1.742E+01	2.611E+04
2130	8.175E+05	1.685E+01	2.526E+04
2131	8.175E+05	1.630E+01	2.444E+04
2132	8.175E+05	1.577E+01	2.364E+04
2133	8.175E+05	1.526E+01	2.288E+04
2134	8.175E+05	1.477E+01	2.213E+04
2135	8.175E+05	1.429E+01	2.142E+04
2136	8.175E+05	1.382E+01	2.072E+04
2137	8.175E+05	1.338E+01	2.005E+04
2138	8.175E+05	1.294E+01	1.940E+04
2139	8.175E+05	1.252E+01	1.877E+04
2140	8.175E+05	1.211E+01	1.816E+04
2141	8.175E+05	1.172E+01	1.757E+04
2142	8.175E+05	1.134E+01	1.700E+04
2143	8.175E+05	1.097E+01	1.645E+04
2144	8.175E+05	1.062E+01	1.591E+04
2145	8.175E+05	1.027E+01	1.540E+04
2146	8.175E+05	9.938E+00	1.490E+04
2147	8.175E+05	9.616E+00	1.441E+04
2148	8.175E+05	9.304E+00	1.395E+04
2149	8.175E+05	9.002E+00	1.349E+04
2150	8.175E+05	8.709E+00	1.305E+04
2151	8.175E+05	8.427E+00	1.263E+04
2152	8.175E+05	8.153E+00	1.222E+04
2153	8.175E+05	7.888E+00	1.182E+04
2154	8.175E+05	7.632E+00	1.144E+04
2155	8.175E+05	7.385E+00	1.107E+04
2156	8.175E+05	7.145E+00	1.071E+04
2157	8.175E+05	6.913E+00	1.036E+04
2158	8.175E+05	6.689E+00	1.003E+04
2159	8.175E+05	6.471E+00	9.700E+03
2160	8.175E+05	6.261E+00	9.385E+03
2161	8.175E+05	6.058E+00	9.081E+03
2162	8.175E+05	5.861E+00	8.786E+03

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2163	8.175E+05	5.671E+00	8.501E+03
2164	8.175E+05	5.487E+00	8.225E+03
2165	8.175E+05	5.309E+00	7.958E+03
2166	8.175E+05	5.137E+00	7.699E+03
2167	8.175E+05	4.970E+00	7.449E+03
2168	8.175E+05	4.809E+00	7.208E+03
2169	8.175E+05	4.652E+00	6.974E+03
2170	8.175E+05	4.501E+00	6.747E+03
2171	8.175E+05	4.355E+00	6.528E+03
2172	8.175E+05	4.214E+00	6.316E+03
2173	8.175E+05	4.077E+00	6.111E+03
2174	8.175E+05	3.945E+00	5.913E+03
2175	8.175E+05	3.817E+00	5.721E+03
2176	8.175E+05	3.693E+00	5.535E+03
2177	8.175E+05	3.573E+00	5.356E+03
2178	8.175E+05	3.457E+00	5.182E+03
2179	8.175E+05	3.345E+00	5.014E+03
2180	8.175E+05	3.236E+00	4.851E+03
2181	8.175E+05	3.131E+00	4.693E+03
2182	8.175E+05	3.029E+00	4.541E+03
2183	8.175E+05	2.931E+00	4.394E+03
2184	8.175E+05	2.836E+00	4.251E+03
2185	8.175E+05	2.744E+00	4.113E+03
2186	8.175E+05	2.655E+00	3.979E+03
2187	8.175E+05	2.569E+00	3.850E+03
2188	8.175E+05	2.485E+00	3.725E+03
2189	8.175E+05	2.405E+00	3.604E+03
2190	8.175E+05	2.327E+00	3.487E+03
2191	8.175E+05	2.251E+00	3.374E+03
2192	8.175E+05	2.178E+00	3.265E+03
2193	8.175E+05	2.107E+00	3.159E+03
2194	8.175E+05	2.039E+00	3.056E+03
2195	8.175E+05	1.973E+00	2.957E+03
2196	8.175E+05	1.909E+00	2.861E+03
2197	8.175E+05	1.847E+00	2.768E+03
2198	8.175E+05	1.787E+00	2.678E+03
2199	8.175E+05	1.729E+00	2.591E+03
2200	8.175E+05	1.673E+00	2.507E+03
2201	8.175E+05	1.618E+00	2.426E+03
2202	8.175E+05	1.566E+00	2.347E+03
2203	8.175E+05	1.515E+00	2.271E+03

**Οι εκπομπές CH₄ από το ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους με βάση το
1^ο Σενάριο μείωσης των ζυμώσιμων**

=====

Model Parameters

=====

Lo : 67 m³ / Mg ***** User Mode Selection *****
 k : 0.0330 1/yr ***** User Mode Selection *****
 NMOC : 4000.00 ppmv ***** User Mode Selection *****
 Methane : 52.0000 % volume
 Carbon Dioxide : 48.0000 % volume

=====

Landfill Parameters

=====

Landfill type : No Co-Disposal
 Year Opened : 1992 Current Year : 2004 Closure Year: 2004
 Capacity : 1000000 Mg
 Average Acceptance Rate Required from
 Current Year to Closure Year : 0.00 Mg/year

=====

Model Results

=====

Methane Emission Rate

Year	Refuse In Place (Mg)	(Mg/yr)	(Cubic m/yr)
1993	4.683E+04	7.196E+01	1.079E+05
1994	9.598E+04	1.452E+02	2.176E+05
1995	1.476E+05	2.198E+02	3.294E+05
1996	2.018E+05	2.959E+02	4.436E+05
1997	2.579E+05	3.725E+02	5.584E+05
1998	3.160E+05	4.497E+02	6.741E+05
1999	3.762E+05	5.277E+02	7.909E+05
2000	4.386E+05	6.064E+02	9.090E+05
2001	5.034E+05	6.862E+02	1.029E+06
2002	5.705E+05	7.672E+02	1.150E+06
2003	6.403E+05	8.494E+02	1.273E+06
2004	7.118E+05	9.319E+02	1.397E+06
2005	7.118E+05	9.016E+02	1.351E+06
2006	7.118E+05	8.723E+02	1.308E+06
2007	7.118E+05	8.440E+02	1.265E+06
2008	7.118E+05	8.166E+02	1.224E+06
2009	7.118E+05	7.901E+02	1.184E+06
2010	7.118E+05	7.645E+02	1.146E+06
2011	7.118E+05	7.396E+02	1.109E+06
2012	7.118E+05	7.156E+02	1.073E+06
2013	7.118E+05	6.924E+02	1.038E+06
2014	7.118E+05	6.699E+02	1.004E+06
2015	7.118E+05	6.482E+02	9.716E+05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2016	7.118E+05	6.271E+02	9.400E+05
2017	7.118E+05	6.068E+02	9.095E+05
2018	7.118E+05	5.871E+02	8.800E+05
2019	7.118E+05	5.680E+02	8.514E+05
2020	7.118E+05	5.496E+02	8.238E+05
2021	7.118E+05	5.318E+02	7.971E+05
2022	7.118E+05	5.145E+02	7.712E+05
2023	7.118E+05	4.978E+02	7.461E+05
2024	7.118E+05	4.816E+02	7.219E+05
2025	7.118E+05	4.660E+02	6.985E+05
2026	7.118E+05	4.509E+02	6.758E+05
2027	7.118E+05	4.362E+02	6.539E+05
2028	7.118E+05	4.221E+02	6.327E+05
2029	7.118E+05	4.084E+02	6.121E+05
2030	7.118E+05	3.951E+02	5.922E+05
2031	7.118E+05	3.823E+02	5.730E+05
2032	7.118E+05	3.699E+02	5.544E+05
2033	7.118E+05	3.579E+02	5.364E+05
2034	7.118E+05	3.463E+02	5.190E+05
2035	7.118E+05	3.350E+02	5.022E+05
2036	7.118E+05	3.241E+02	4.859E+05
2037	7.118E+05	3.136E+02	4.701E+05
2038	7.118E+05	3.034E+02	4.548E+05
2039	7.118E+05	2.936E+02	4.401E+05
2040	7.118E+05	2.841E+02	4.258E+05
2041	7.118E+05	2.748E+02	4.120E+05
2042	7.118E+05	2.659E+02	3.986E+05
2043	7.118E+05	2.573E+02	3.856E+05
2044	7.118E+05	2.489E+02	3.731E+05
2045	7.118E+05	2.409E+02	3.610E+05
2046	7.118E+05	2.330E+02	3.493E+05
2047	7.118E+05	2.255E+02	3.380E+05
2048	7.118E+05	2.181E+02	3.270E+05
2049	7.118E+05	2.111E+02	3.164E+05
2050	7.118E+05	2.042E+02	3.061E+05
2051	7.118E+05	1.976E+02	2.962E+05
2052	7.118E+05	1.912E+02	2.866E+05
2053	7.118E+05	1.850E+02	2.772E+05
2054	7.118E+05	1.790E+02	2.682E+05
2055	7.118E+05	1.732E+02	2.595E+05
2056	7.118E+05	1.675E+02	2.511E+05
2057	7.118E+05	1.621E+02	2.430E+05
2058	7.118E+05	1.568E+02	2.351E+05
2059	7.118E+05	1.517E+02	2.274E+05
2060	7.118E+05	1.468E+02	2.201E+05
2061	7.118E+05	1.420E+02	2.129E+05
2062	7.118E+05	1.374E+02	2.060E+05
2063	7.118E+05	1.330E+02	1.993E+05
2064	7.118E+05	1.287E+02	1.929E+05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2065	7.118E+05	1.245E+02	1.866E+05
2066	7.118E+05	1.204E+02	1.805E+05
2067	7.118E+05	1.165E+02	1.747E+05
2068	7.118E+05	1.128E+02	1.690E+05
2069	7.118E+05	1.091E+02	1.635E+05
2070	7.118E+05	1.055E+02	1.582E+05
2071	7.118E+05	1.021E+02	1.531E+05
2072	7.118E+05	9.881E+01	1.481E+05
2073	7.118E+05	9.560E+01	1.433E+05
2074	7.118E+05	9.250E+01	1.386E+05
2075	7.118E+05	8.949E+01	1.341E+05
2076	7.118E+05	8.659E+01	1.298E+05
2077	7.118E+05	8.378E+01	1.256E+05
2078	7.118E+05	8.106E+01	1.215E+05
2079	7.118E+05	7.843E+01	1.176E+05
2080	7.118E+05	7.588E+01	1.137E+05
2081	7.118E+05	7.342E+01	1.100E+05
2082	7.118E+05	7.104E+01	1.065E+05
2083	7.118E+05	6.873E+01	1.030E+05
2084	7.118E+05	6.650E+01	9.968E+04
2085	7.118E+05	6.434E+01	9.644E+04
2086	7.118E+05	6.225E+01	9.331E+04
2087	7.118E+05	6.023E+01	9.028E+04
2088	7.118E+05	5.828E+01	8.735E+04
2089	7.118E+05	5.638E+01	8.451E+04
2090	7.118E+05	5.455E+01	8.177E+04
2091	7.118E+05	5.278E+01	7.912E+04
2092	7.118E+05	5.107E+01	7.655E+04
2093	7.118E+05	4.941E+01	7.406E+04
2094	7.118E+05	4.781E+01	7.166E+04
2095	7.118E+05	4.626E+01	6.933E+04
2096	7.118E+05	4.475E+01	6.708E+04
2097	7.118E+05	4.330E+01	6.490E+04
2098	7.118E+05	4.190E+01	6.280E+04
2099	7.118E+05	4.054E+01	6.076E+04
2100	7.118E+05	3.922E+01	5.879E+04
2101	7.118E+05	3.795E+01	5.688E+04
2102	7.118E+05	3.671E+01	5.503E+04
2103	7.118E+05	3.552E+01	5.325E+04
2104	7.118E+05	3.437E+01	5.152E+04
2105	7.118E+05	3.325E+01	4.985E+04
2106	7.118E+05	3.217E+01	4.823E+04
2107	7.118E+05	3.113E+01	4.666E+04
2108	7.118E+05	3.012E+01	4.515E+04
2109	7.118E+05	2.914E+01	4.368E+04
2110	7.118E+05	2.820E+01	4.226E+04
2111	7.118E+05	2.728E+01	4.089E+04
2112	7.118E+05	2.640E+01	3.956E+04
2113	7.118E+05	2.554E+01	3.828E+04

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2114	7.118E+05	2.471E+01	3.704E+04
2115	7.118E+05	2.391E+01	3.583E+04
2116	7.118E+05	2.313E+01	3.467E+04
2117	7.118E+05	2.238E+01	3.355E+04
2118	7.118E+05	2.165E+01	3.246E+04
2119	7.118E+05	2.095E+01	3.140E+04
2120	7.118E+05	2.027E+01	3.038E+04
2121	7.118E+05	1.961E+01	2.940E+04
2122	7.118E+05	1.898E+01	2.844E+04
2123	7.118E+05	1.836E+01	2.752E+04
2124	7.118E+05	1.776E+01	2.663E+04
2125	7.118E+05	1.719E+01	2.576E+04
2126	7.118E+05	1.663E+01	2.493E+04
2127	7.118E+05	1.609E+01	2.412E+04
2128	7.118E+05	1.557E+01	2.333E+04
2129	7.118E+05	1.506E+01	2.258E+04
2130	7.118E+05	1.457E+01	2.184E+04
2131	7.118E+05	1.410E+01	2.113E+04
2132	7.118E+05	1.364E+01	2.045E+04
2133	7.118E+05	1.320E+01	1.978E+04
2134	7.118E+05	1.277E+01	1.914E+04
2135	7.118E+05	1.236E+01	1.852E+04
2136	7.118E+05	1.196E+01	1.792E+04
2137	7.118E+05	1.157E+01	1.734E+04
2138	7.118E+05	1.119E+01	1.678E+04
2139	7.118E+05	1.083E+01	1.623E+04
2140	7.118E+05	1.048E+01	1.570E+04
2141	7.118E+05	1.014E+01	1.519E+04
2142	7.118E+05	9.808E+00	1.470E+04
2143	7.118E+05	9.489E+00	1.422E+04
2144	7.118E+05	9.181E+00	1.376E+04
2145	7.118E+05	8.883E+00	1.332E+04
2146	7.118E+05	8.595E+00	1.288E+04
2147	7.118E+05	8.316E+00	1.246E+04
2148	7.118E+05	8.046E+00	1.206E+04
2149	7.118E+05	7.785E+00	1.167E+04
2150	7.118E+05	7.532E+00	1.129E+04
2151	7.118E+05	7.288E+00	1.092E+04
2152	7.118E+05	7.051E+00	1.057E+04
2153	7.118E+05	6.822E+00	1.023E+04
2154	7.118E+05	6.601E+00	9.894E+03
2155	7.118E+05	6.386E+00	9.573E+03
2156	7.118E+05	6.179E+00	9.262E+03
2157	7.118E+05	5.979E+00	8.961E+03
2158	7.118E+05	5.784E+00	8.670E+03
2159	7.118E+05	5.597E+00	8.389E+03
2160	7.118E+05	5.415E+00	8.117E+03
2161	7.118E+05	5.239E+00	7.853E+03
2162	7.118E+05	5.069E+00	7.598E+03

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2163	7.118E+05	4.905E+00	7.352E+03
2164	7.118E+05	4.745E+00	7.113E+03
2165	7.118E+05	4.591E+00	6.882E+03
2166	7.118E+05	4.442E+00	6.659E+03
2167	7.118E+05	4.298E+00	6.443E+03
2168	7.118E+05	4.159E+00	6.233E+03
2169	7.118E+05	4.024E+00	6.031E+03
2170	7.118E+05	3.893E+00	5.835E+03
2171	7.118E+05	3.767E+00	5.646E+03
2172	7.118E+05	3.644E+00	5.463E+03
2173	7.118E+05	3.526E+00	5.285E+03
2174	7.118E+05	3.412E+00	5.114E+03
2175	7.118E+05	3.301E+00	4.948E+03
2176	7.118E+05	3.194E+00	4.787E+03
2177	7.118E+05	3.090E+00	4.632E+03
2178	7.118E+05	2.990E+00	4.481E+03
2179	7.118E+05	2.893E+00	4.336E+03
2180	7.118E+05	2.799E+00	4.195E+03
2181	7.118E+05	2.708E+00	4.059E+03
2182	7.118E+05	2.620E+00	3.927E+03
2183	7.118E+05	2.535E+00	3.800E+03
2184	7.118E+05	2.453E+00	3.676E+03
2185	7.118E+05	2.373E+00	3.557E+03
2186	7.118E+05	2.296E+00	3.442E+03
2187	7.118E+05	2.221E+00	3.330E+03
2188	7.118E+05	2.149E+00	3.222E+03
2189	7.118E+05	2.080E+00	3.117E+03
2190	7.118E+05	2.012E+00	3.016E+03
2191	7.118E+05	1.947E+00	2.918E+03
2192	7.118E+05	1.884E+00	2.823E+03
2193	7.118E+05	1.822E+00	2.732E+03
2194	7.118E+05	1.763E+00	2.643E+03
2195	7.118E+05	1.706E+00	2.557E+03
2196	7.118E+05	1.651E+00	2.474E+03
2197	7.118E+05	1.597E+00	2.394E+03
2198	7.118E+05	1.545E+00	2.316E+03
2199	7.118E+05	1.495E+00	2.241E+03
2200	7.118E+05	1.447E+00	2.168E+03
2201	7.118E+05	1.400E+00	2.098E+03
2202	7.118E+05	1.354E+00	2.030E+03
2203	7.118E+05	1.310E+00	1.964E+03

**Οι εκπομπές CH₄ από το ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους με βάση το
2^ο Σενάριο μείωσης των ζυμώσιμων**

=====

Model Parameters

=====

Lo : 66 m³ / Mg ***** User Mode Selection *****
 k : 0.0330 1/yr ***** User Mode Selection *****
 NMOC : 4000.00 ppmv ***** User Mode Selection *****
 Methane : 52.0000 % volume
 Carbon Dioxide : 48.0000 % volume

=====

Landfill Parameters

=====

Landfill type : No Co-Disposal
 Year Opened : 1992 Current Year : 2004 Closure Year: 2004
 Capacity : 1000000 Mg
 Average Acceptance Rate Required from
 Current Year to Closure Year : 0.00 Mg/year

=====

Model Results

=====

Methane Emission Rate

Year	Refuse In Place (Mg)	(Mg/yr)	(Cubic m/yr)
1993	4.219E+04	6.382E+01	9.566E+04
1994	8.650E+04	1.288E+02	1.930E+05
1995	1.330E+05	1.949E+02	2.922E+05
1996	1.819E+05	2.625E+02	3.934E+05
1997	2.326E+05	3.307E+02	4.957E+05
1998	2.854E+05	3.998E+02	5.992E+05
1999	3.402E+05	4.698E+02	7.042E+05
2000	3.973E+05	5.408E+02	8.107E+05
2001	4.567E+05	6.131E+02	9.190E+05
2002	5.185E+05	6.867E+02	1.029E+06
2003	5.829E+05	7.618E+02	1.142E+06
2004	6.491E+05	8.372E+02	1.255E+06
2005	6.491E+05	8.100E+02	1.214E+06
2006	6.491E+05	7.837E+02	1.175E+06
2007	6.491E+05	7.583E+02	1.137E+06
2008	6.491E+05	7.337E+02	1.100E+06
2009	6.491E+05	7.099E+02	1.064E+06
2010	6.491E+05	6.868E+02	1.029E+06
2011	6.491E+05	6.645E+02	9.961E+05
2012	6.491E+05	6.430E+02	9.637E+05
2013	6.491E+05	6.221E+02	9.325E+05
2014	6.491E+05	6.019E+02	9.022E+05
2015	6.491E+05	5.824E+02	8.729E+05
2016	6.491E+05	5.634E+02	8.446E+05
2017	6.491E+05	5.452E+02	8.171E+05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2018	6.491E+05	5.275E+02	7.906E+05
2019	6.491E+05	5.103E+02	7.650E+05
2020	6.491E+05	4.938E+02	7.401E+05
2021	6.491E+05	4.777E+02	7.161E+05
2022	6.491E+05	4.622E+02	6.929E+05
2023	6.491E+05	4.472E+02	6.704E+05
2024	6.491E+05	4.327E+02	6.486E+05
2025	6.491E+05	4.187E+02	6.275E+05
2026	6.491E+05	4.051E+02	6.072E+05
2027	6.491E+05	3.919E+02	5.875E+05
2028	6.491E+05	3.792E+02	5.684E+05
2029	6.491E+05	3.669E+02	5.499E+05
2030	6.491E+05	3.550E+02	5.321E+05
2031	6.491E+05	3.435E+02	5.148E+05
2032	6.491E+05	3.323E+02	4.981E+05
2033	6.491E+05	3.215E+02	4.819E+05
2034	6.491E+05	3.111E+02	4.663E+05
2035	6.491E+05	3.010E+02	4.512E+05
2036	6.491E+05	2.912E+02	4.365E+05
2037	6.491E+05	2.818E+02	4.223E+05
2038	6.491E+05	2.726E+02	4.086E+05
2039	6.491E+05	2.638E+02	3.954E+05
2040	6.491E+05	2.552E+02	3.825E+05
2041	6.491E+05	2.469E+02	3.701E+05
2042	6.491E+05	2.389E+02	3.581E+05
2043	6.491E+05	2.312E+02	3.465E+05
2044	6.491E+05	2.236E+02	3.352E+05
2045	6.491E+05	2.164E+02	3.243E+05
2046	6.491E+05	2.094E+02	3.138E+05
2047	6.491E+05	2.026E+02	3.036E+05
2048	6.491E+05	1.960E+02	2.938E+05
2049	6.491E+05	1.896E+02	2.842E+05
2050	6.491E+05	1.835E+02	2.750E+05
2051	6.491E+05	1.775E+02	2.661E+05
2052	6.491E+05	1.718E+02	2.574E+05
2053	6.491E+05	1.662E+02	2.491E+05
2054	6.491E+05	1.608E+02	2.410E+05
2055	6.491E+05	1.556E+02	2.332E+05
2056	6.491E+05	1.505E+02	2.256E+05
2057	6.491E+05	1.456E+02	2.183E+05
2058	6.491E+05	1.409E+02	2.112E+05
2059	6.491E+05	1.363E+02	2.043E+05
2060	6.491E+05	1.319E+02	1.977E+05
2061	6.491E+05	1.276E+02	1.913E+05
2062	6.491E+05	1.235E+02	1.851E+05
2063	6.491E+05	1.195E+02	1.791E+05
2064	6.491E+05	1.156E+02	1.733E+05
2065	6.491E+05	1.118E+02	1.676E+05
2066	6.491E+05	1.082E+02	1.622E+05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2067	6.491E+05	1.047E+02	1.569E+05
2068	6.491E+05	1.013E+02	1.518E+05
2069	6.491E+05	9.801E+01	1.469E+05
2070	6.491E+05	9.483E+01	1.421E+05
2071	6.491E+05	9.175E+01	1.375E+05
2072	6.491E+05	8.877E+01	1.331E+05
2073	6.491E+05	8.589E+01	1.287E+05
2074	6.491E+05	8.310E+01	1.246E+05
2075	6.491E+05	8.041E+01	1.205E+05
2076	6.491E+05	7.779E+01	1.166E+05
2077	6.491E+05	7.527E+01	1.128E+05
2078	6.491E+05	7.283E+01	1.092E+05
2079	6.491E+05	7.046E+01	1.056E+05
2080	6.491E+05	6.817E+01	1.022E+05
2081	6.491E+05	6.596E+01	9.887E+04
2082	6.491E+05	6.382E+01	9.566E+04
2083	6.491E+05	6.175E+01	9.256E+04
2084	6.491E+05	5.974E+01	8.955E+04
2085	6.491E+05	5.781E+01	8.665E+04
2086	6.491E+05	5.593E+01	8.383E+04
2087	6.491E+05	5.411E+01	8.111E+04
2088	6.491E+05	5.236E+01	7.848E+04
2089	6.491E+05	5.066E+01	7.593E+04
2090	6.491E+05	4.901E+01	7.347E+04
2091	6.491E+05	4.742E+01	7.108E+04
2092	6.491E+05	4.588E+01	6.877E+04
2093	6.491E+05	4.439E+01	6.654E+04
2094	6.491E+05	4.295E+01	6.438E+04
2095	6.491E+05	4.156E+01	6.229E+04
2096	6.491E+05	4.021E+01	6.027E+04
2097	6.491E+05	3.890E+01	5.831E+04
2098	6.491E+05	3.764E+01	5.642E+04
2099	6.491E+05	3.642E+01	5.459E+04
2100	6.491E+05	3.524E+01	5.282E+04
2101	6.491E+05	3.409E+01	5.110E+04
2102	6.491E+05	3.299E+01	4.944E+04
2103	6.491E+05	3.192E+01	4.784E+04
2104	6.491E+05	3.088E+01	4.629E+04
2105	6.491E+05	2.988E+01	4.478E+04
2106	6.491E+05	2.891E+01	4.333E+04
2107	6.491E+05	2.797E+01	4.192E+04
2108	6.491E+05	2.706E+01	4.056E+04
2109	6.491E+05	2.618E+01	3.924E+04
2110	6.491E+05	2.533E+01	3.797E+04
2111	6.491E+05	2.451E+01	3.674E+04
2112	6.491E+05	2.371E+01	3.555E+04
2113	6.491E+05	2.294E+01	3.439E+04
2114	6.491E+05	2.220E+01	3.328E+04
2115	6.491E+05	2.148E+01	3.220E+04

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2116	6.491E+05	2.078E+01	3.115E+04
2117	6.491E+05	2.011E+01	3.014E+04
2118	6.491E+05	1.945E+01	2.916E+04
2119	6.491E+05	1.882E+01	2.821E+04
2120	6.491E+05	1.821E+01	2.730E+04
2121	6.491E+05	1.762E+01	2.641E+04
2122	6.491E+05	1.705E+01	2.555E+04
2123	6.491E+05	1.650E+01	2.473E+04
2124	6.491E+05	1.596E+01	2.392E+04
2125	6.491E+05	1.544E+01	2.315E+04
2126	6.491E+05	1.494E+01	2.239E+04
2127	6.491E+05	1.446E+01	2.167E+04
2128	6.491E+05	1.399E+01	2.096E+04
2129	6.491E+05	1.353E+01	2.028E+04
2130	6.491E+05	1.309E+01	1.963E+04
2131	6.491E+05	1.267E+01	1.899E+04
2132	6.491E+05	1.226E+01	1.837E+04
2133	6.491E+05	1.186E+01	1.778E+04
2134	6.491E+05	1.147E+01	1.720E+04
2135	6.491E+05	1.110E+01	1.664E+04
2136	6.491E+05	1.074E+01	1.610E+04
2137	6.491E+05	1.039E+01	1.558E+04
2138	6.491E+05	1.006E+01	1.507E+04
2139	6.491E+05	9.729E+00	1.458E+04
2140	6.491E+05	9.413E+00	1.411E+04
2141	6.491E+05	9.107E+00	1.365E+04
2142	6.491E+05	8.812E+00	1.321E+04
2143	6.491E+05	8.526E+00	1.278E+04
2144	6.491E+05	8.249E+00	1.236E+04
2145	6.491E+05	7.981E+00	1.196E+04
2146	6.491E+05	7.722E+00	1.157E+04
2147	6.491E+05	7.471E+00	1.120E+04
2148	6.491E+05	7.229E+00	1.084E+04
2149	6.491E+05	6.994E+00	1.048E+04
2150	6.491E+05	6.767E+00	1.014E+04
2151	6.491E+05	6.547E+00	9.814E+03
2152	6.491E+05	6.335E+00	9.496E+03
2153	6.491E+05	6.129E+00	9.187E+03
2154	6.491E+05	5.930E+00	8.889E+03
2155	6.491E+05	5.738E+00	8.600E+03
2156	6.491E+05	5.552E+00	8.321E+03
2157	6.491E+05	5.371E+00	8.051E+03
2158	6.491E+05	5.197E+00	7.790E+03
2159	6.491E+05	5.028E+00	7.537E+03
2160	6.491E+05	4.865E+00	7.292E+03
2161	6.491E+05	4.707E+00	7.056E+03
2162	6.491E+05	4.554E+00	6.827E+03
2163	6.491E+05	4.406E+00	6.605E+03
2164	6.491E+05	4.263E+00	6.391E+03

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2165	6.491E+05	4.125E+00	6.183E+03
2166	6.491E+05	3.991E+00	5.982E+03
2167	6.491E+05	3.862E+00	5.788E+03
2168	6.491E+05	3.736E+00	5.600E+03
2169	6.491E+05	3.615E+00	5.419E+03
2170	6.491E+05	3.498E+00	5.243E+03
2171	6.491E+05	3.384E+00	5.072E+03
2172	6.491E+05	3.274E+00	4.908E+03
2173	6.491E+05	3.168E+00	4.748E+03
2174	6.491E+05	3.065E+00	4.594E+03
2175	6.491E+05	2.966E+00	4.445E+03
2176	6.491E+05	2.869E+00	4.301E+03
2177	6.491E+05	2.776E+00	4.161E+03
2178	6.491E+05	2.686E+00	4.026E+03
2179	6.491E+05	2.599E+00	3.895E+03
2180	6.491E+05	2.515E+00	3.769E+03
2181	6.491E+05	2.433E+00	3.647E+03
2182	6.491E+05	2.354E+00	3.528E+03
2183	6.491E+05	2.277E+00	3.414E+03
2184	6.491E+05	2.204E+00	3.303E+03
2185	6.491E+05	2.132E+00	3.196E+03
2186	6.491E+05	2.063E+00	3.092E+03
2187	6.491E+05	1.996E+00	2.992E+03
2188	6.491E+05	1.931E+00	2.895E+03
2189	6.491E+05	1.868E+00	2.801E+03
2190	6.491E+05	1.808E+00	2.710E+03
2191	6.491E+05	1.749E+00	2.622E+03
2192	6.491E+05	1.692E+00	2.537E+03
2193	6.491E+05	1.637E+00	2.454E+03
2194	6.491E+05	1.584E+00	2.375E+03
2195	6.491E+05	1.533E+00	2.297E+03
2196	6.491E+05	1.483E+00	2.223E+03
2197	6.491E+05	1.435E+00	2.151E+03
2198	6.491E+05	1.388E+00	2.081E+03
2199	6.491E+05	1.343E+00	2.013E+03
2200	6.491E+05	1.300E+00	1.948E+03
2201	6.491E+05	1.257E+00	1.885E+03
2202	6.491E+05	1.217E+00	1.824E+03
2203	6.491E+05	1.177E+00	1.764E+03

**Οι εκπομπές CH₄ από το ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους με βάση το
3^ο Σενάριο μείωσης των ζυμώσιμων**

=====

Model Parameters

=====

Lo : 65 m³ / Mg ***** User Mode Selection *****
 k : 0.0330 1/yr ***** User Mode Selection *****
 NMOC : 4000.00 ppmv ***** User Mode Selection *****
 Methane : 52.0000 % volume
 Carbon Dioxide : 48.0000 % volume

=====

Landfill Parameters

=====

Landfill type : No Co-Disposal
 Year Opened : 1992 Current Year : 2004 Closure Year: 2004
 Capacity : 1000000 Mg
 Average Acceptance Rate Required from
 Current Year to Closure Year : 0.00 Mg/year

=====

Model Results

=====

Methane Emission Rate

Year	Refuse In Place (Mg)	(Mg/yr)	(Cubic m/yr)
1993	3.942E+04	5.893E+01	8.833E+04
1994	8.081E+04	1.189E+02	1.782E+05
1995	1.243E+05	1.800E+02	2.698E+05
1996	1.699E+05	2.424E+02	3.633E+05
1997	2.174E+05	3.056E+02	4.580E+05
1998	2.670E+05	3.697E+02	5.542E+05
1999	3.186E+05	4.349E+02	6.519E+05
2000	3.725E+05	5.013E+02	7.514E+05
2001	4.287E+05	5.690E+02	8.529E+05
2002	4.873E+05	6.381E+02	9.565E+05
2003	5.484E+05	7.088E+02	1.063E+06
2004	6.114E+05	7.801E+02	1.169E+06
2005	6.114E+05	7.547E+02	1.131E+06
2006	6.114E+05	7.302E+02	1.095E+06
2007	6.114E+05	7.065E+02	1.059E+06
2008	6.114E+05	6.836E+02	1.025E+06
2009	6.114E+05	6.614E+02	9.914E+05
2010	6.114E+05	6.399E+02	9.592E+05
2011	6.114E+05	6.192E+02	9.281E+05
2012	6.114E+05	5.991E+02	8.979E+05
2013	6.114E+05	5.796E+02	8.688E+05
2014	6.114E+05	5.608E+02	8.406E+05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2015	6.114E+05	5.426E+02	8.133E+05
2016	6.114E+05	5.250E+02	7.869E+05
2017	6.114E+05	5.079E+02	7.614E+05
2018	6.114E+05	4.915E+02	7.366E+05
2019	6.114E+05	4.755E+02	7.127E+05
2020	6.114E+05	4.601E+02	6.896E+05
2021	6.114E+05	4.451E+02	6.672E+05
2022	6.114E+05	4.307E+02	6.456E+05
2023	6.114E+05	4.167E+02	6.246E+05
2024	6.114E+05	4.032E+02	6.043E+05
2025	6.114E+05	3.901E+02	5.847E+05
2026	6.114E+05	3.774E+02	5.657E+05
2027	6.114E+05	3.652E+02	5.474E+05
2028	6.114E+05	3.533E+02	5.296E+05
2029	6.114E+05	3.418E+02	5.124E+05
2030	6.114E+05	3.307E+02	4.958E+05
2031	6.114E+05	3.200E+02	4.797E+05
2032	6.114E+05	3.096E+02	4.641E+05
2033	6.114E+05	2.996E+02	4.490E+05
2034	6.114E+05	2.898E+02	4.345E+05
2035	6.114E+05	2.804E+02	4.204E+05
2036	6.114E+05	2.713E+02	4.067E+05
2037	6.114E+05	2.625E+02	3.935E+05
2038	6.114E+05	2.540E+02	3.807E+05
2039	6.114E+05	2.458E+02	3.684E+05
2040	6.114E+05	2.378E+02	3.564E+05
2041	6.114E+05	2.301E+02	3.448E+05
2042	6.114E+05	2.226E+02	3.337E+05
2043	6.114E+05	2.154E+02	3.228E+05
2044	6.114E+05	2.084E+02	3.123E+05
2045	6.114E+05	2.016E+02	3.022E+05
2046	6.114E+05	1.951E+02	2.924E+05
2047	6.114E+05	1.887E+02	2.829E+05
2048	6.114E+05	1.826E+02	2.737E+05
2049	6.114E+05	1.767E+02	2.648E+05
2050	6.114E+05	1.709E+02	2.562E+05
2051	6.114E+05	1.654E+02	2.479E+05
2052	6.114E+05	1.600E+02	2.399E+05
2053	6.114E+05	1.548E+02	2.321E+05
2054	6.114E+05	1.498E+02	2.246E+05
2055	6.114E+05	1.449E+02	2.173E+05
2056	6.114E+05	1.402E+02	2.102E+05
2057	6.114E+05	1.357E+02	2.034E+05
2058	6.114E+05	1.313E+02	1.968E+05
2059	6.114E+05	1.270E+02	1.904E+05
2060	6.114E+05	1.229E+02	1.842E+05
2061	6.114E+05	1.189E+02	1.782E+05
2062	6.114E+05	1.150E+02	1.724E+05
2063	6.114E+05	1.113E+02	1.669E+05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2064	6.114E+05	1.077E+02	1.614E+05
2065	6.114E+05	1.042E+02	1.562E+05
2066	6.114E+05	1.008E+02	1.511E+05
2067	6.114E+05	9.755E+01	1.462E+05
2068	6.114E+05	9.438E+01	1.415E+05
2069	6.114E+05	9.132E+01	1.369E+05
2070	6.114E+05	8.835E+01	1.324E+05
2071	6.114E+05	8.549E+01	1.281E+05
2072	6.114E+05	8.271E+01	1.240E+05
2073	6.114E+05	8.003E+01	1.200E+05
2074	6.114E+05	7.743E+01	1.161E+05
2075	6.114E+05	7.492E+01	1.123E+05
2076	6.114E+05	7.248E+01	1.086E+05
2077	6.114E+05	7.013E+01	1.051E+05
2078	6.114E+05	6.785E+01	1.017E+05
2079	6.114E+05	6.565E+01	9.841E+04
2080	6.114E+05	6.352E+01	9.521E+04
2081	6.114E+05	6.146E+01	9.212E+04
2082	6.114E+05	5.946E+01	8.913E+04
2083	6.114E+05	5.753E+01	8.624E+04
2084	6.114E+05	5.567E+01	8.344E+04
2085	6.114E+05	5.386E+01	8.073E+04
2086	6.114E+05	5.211E+01	7.811E+04
2087	6.114E+05	5.042E+01	7.557E+04
2088	6.114E+05	4.878E+01	7.312E+04
2089	6.114E+05	4.720E+01	7.075E+04
2090	6.114E+05	4.567E+01	6.845E+04
2091	6.114E+05	4.418E+01	6.623E+04
2092	6.114E+05	4.275E+01	6.408E+04
2093	6.114E+05	4.136E+01	6.200E+04
2094	6.114E+05	4.002E+01	5.999E+04
2095	6.114E+05	3.872E+01	5.804E+04
2096	6.114E+05	3.746E+01	5.615E+04
2097	6.114E+05	3.625E+01	5.433E+04
2098	6.114E+05	3.507E+01	5.257E+04
2099	6.114E+05	3.393E+01	5.086E+04
2100	6.114E+05	3.283E+01	4.921E+04
2101	6.114E+05	3.176E+01	4.761E+04
2102	6.114E+05	3.073E+01	4.607E+04
2103	6.114E+05	2.974E+01	4.457E+04
2104	6.114E+05	2.877E+01	4.313E+04
2105	6.114E+05	2.784E+01	4.173E+04
2106	6.114E+05	2.693E+01	4.037E+04
2107	6.114E+05	2.606E+01	3.906E+04
2108	6.114E+05	2.521E+01	3.779E+04
2109	6.114E+05	2.439E+01	3.657E+04
2110	6.114E+05	2.360E+01	3.538E+04
2111	6.114E+05	2.284E+01	3.423E+04
2112	6.114E+05	2.210E+01	3.312E+04

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2113	6.114E+05	2.138E+01	3.204E+04
2114	6.114E+05	2.068E+01	3.100E+04
2115	6.114E+05	2.001E+01	3.000E+04
2116	6.114E+05	1.936E+01	2.902E+04
2117	6.114E+05	1.873E+01	2.808E+04
2118	6.114E+05	1.813E+01	2.717E+04
2119	6.114E+05	1.754E+01	2.629E+04
2120	6.114E+05	1.697E+01	2.543E+04
2121	6.114E+05	1.642E+01	2.461E+04
2122	6.114E+05	1.588E+01	2.381E+04
2123	6.114E+05	1.537E+01	2.304E+04
2124	6.114E+05	1.487E+01	2.229E+04
2125	6.114E+05	1.439E+01	2.157E+04
2126	6.114E+05	1.392E+01	2.087E+04
2127	6.114E+05	1.347E+01	2.019E+04
2128	6.114E+05	1.303E+01	1.953E+04
2129	6.114E+05	1.261E+01	1.890E+04
2130	6.114E+05	1.220E+01	1.829E+04
2131	6.114E+05	1.180E+01	1.769E+04
2132	6.114E+05	1.142E+01	1.712E+04
2133	6.114E+05	1.105E+01	1.656E+04
2134	6.114E+05	1.069E+01	1.602E+04
2135	6.114E+05	1.034E+01	1.550E+04
2136	6.114E+05	1.001E+01	1.500E+04
2137	6.114E+05	9.683E+00	1.451E+04
2138	6.114E+05	9.369E+00	1.404E+04
2139	6.114E+05	9.064E+00	1.359E+04
2140	6.114E+05	8.770E+00	1.315E+04
2141	6.114E+05	8.486E+00	1.272E+04
2142	6.114E+05	8.210E+00	1.231E+04
2143	6.114E+05	7.944E+00	1.191E+04
2144	6.114E+05	7.686E+00	1.152E+04
2145	6.114E+05	7.436E+00	1.115E+04
2146	6.114E+05	7.195E+00	1.078E+04
2147	6.114E+05	6.961E+00	1.043E+04
2148	6.114E+05	6.735E+00	1.010E+04
2149	6.114E+05	6.517E+00	9.768E+03
2150	6.114E+05	6.305E+00	9.451E+03
2151	6.114E+05	6.100E+00	9.144E+03
2152	6.114E+05	5.902E+00	8.847E+03
2153	6.114E+05	5.711E+00	8.560E+03
2154	6.114E+05	5.525E+00	8.282E+03
2155	6.114E+05	5.346E+00	8.013E+03
2156	6.114E+05	5.173E+00	7.753E+03
2157	6.114E+05	5.005E+00	7.502E+03
2158	6.114E+05	4.842E+00	7.258E+03
2159	6.114E+05	4.685E+00	7.022E+03
2160	6.114E+05	4.533E+00	6.794E+03
2161	6.114E+05	4.386E+00	6.574E+03

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2162	6.114E+05	4.243E+00	6.360E+03
2163	6.114E+05	4.106E+00	6.154E+03
2164	6.114E+05	3.972E+00	5.954E+03
2165	6.114E+05	3.843E+00	5.761E+03
2166	6.114E+05	3.719E+00	5.574E+03
2167	6.114E+05	3.598E+00	5.393E+03
2168	6.114E+05	3.481E+00	5.218E+03
2169	6.114E+05	3.368E+00	5.049E+03
2170	6.114E+05	3.259E+00	4.885E+03
2171	6.114E+05	3.153E+00	4.726E+03
2172	6.114E+05	3.051E+00	4.573E+03
2173	6.114E+05	2.952E+00	4.424E+03
2174	6.114E+05	2.856E+00	4.281E+03
2175	6.114E+05	2.763E+00	4.142E+03
2176	6.114E+05	2.673E+00	4.007E+03
2177	6.114E+05	2.587E+00	3.877E+03
2178	6.114E+05	2.503E+00	3.751E+03
2179	6.114E+05	2.421E+00	3.630E+03
2180	6.114E+05	2.343E+00	3.512E+03
2181	6.114E+05	2.267E+00	3.398E+03
2182	6.114E+05	2.193E+00	3.287E+03
2183	6.114E+05	2.122E+00	3.181E+03
2184	6.114E+05	2.053E+00	3.077E+03
2185	6.114E+05	1.986E+00	2.978E+03
2186	6.114E+05	1.922E+00	2.881E+03
2187	6.114E+05	1.860E+00	2.787E+03
2188	6.114E+05	1.799E+00	2.697E+03
2189	6.114E+05	1.741E+00	2.609E+03
2190	6.114E+05	1.684E+00	2.525E+03
2191	6.114E+05	1.630E+00	2.443E+03
2192	6.114E+05	1.577E+00	2.363E+03
2193	6.114E+05	1.526E+00	2.287E+03
2194	6.114E+05	1.476E+00	2.212E+03
2195	6.114E+05	1.428E+00	2.141E+03
2196	6.114E+05	1.382E+00	2.071E+03
2197	6.114E+05	1.337E+00	2.004E+03
2198	6.114E+05	1.294E+00	1.939E+03
2199	6.114E+05	1.252E+00	1.876E+03
2200	6.114E+05	1.211E+00	1.815E+03
2201	6.114E+05	1.172E+00	1.756E+03
2202	6.114E+05	1.134E+00	1.699E+03
2203	6.114E+05	1.097E+00	1.644E+03

**Οι εκπομπές CH₄ από το ΧΔΑ στους Πέρα Γαλήνους με βάση το
Σενάριο μείωσης των ζυμώσιμων και του χαρτιού**

=====

Model Parameters

=====

Lo : 54.00 m³ / Mg ***** User Mode Selection *****
 k : 0.0330 1/yr ***** User Mode Selection *****
 NMOC : 4000.00 ppmv ***** User Mode Selection *****
 Methane : 52.0000 % volume
 Carbon Dioxide : 48.0000 % volume

=====

Landfill Parameters

=====

Landfill type : No Co-Disposal
 Year Opened : 1992 Current Year : 2004 Closure Year: 2004
 Capacity : 1000000 Mg
 Average Acceptance Rate Required from
 Current Year to Closure Year : 0.00 Mg/year

=====

Model Results

=====

Methane Emission Rate

Year	Refuse In Place (Mg)	(Mg/yr)	(Cubic m/yr)
1993	3.697E+04	4.396E+01	6.589E+04
1994	7.580E+04	8.869E+01	1.329E+05
1995	1.166E+05	1.343E+02	2.013E+05
1996	1.594E+05	1.808E+02	2.710E+05
1997	2.039E+05	2.279E+02	3.416E+05
1998	2.504E+05	2.757E+02	4.133E+05
1999	2.987E+05	3.243E+02	4.860E+05
2000	3.491E+05	3.737E+02	5.601E+05
2001	4.017E+05	4.240E+02	6.356E+05
2002	4.565E+05	4.754E+02	7.126E+05
2003	5.137E+05	5.280E+02	7.914E+05
2004	5.726E+05	5.809E+02	8.706E+05
2005	5.726E+05	5.620E+02	8.424E+05
2006	5.726E+05	5.438E+02	8.150E+05
2007	5.726E+05	5.261E+02	7.886E+05
2008	5.726E+05	5.090E+02	7.630E+05
2009	5.726E+05	4.925E+02	7.382E+05
2010	5.726E+05	4.765E+02	7.143E+05
2011	5.726E+05	4.610E+02	6.911E+05
2012	5.726E+05	4.461E+02	6.686E+05
2013	5.726E+05	4.316E+02	6.469E+05
2014	5.726E+05	4.176E+02	6.259E+05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2015	5.726E+05	4.040E+02	6.056E+05
2016	5.726E+05	3.909E+02	5.860E+05
2017	5.726E+05	3.782E+02	5.669E+05
2018	5.726E+05	3.659E+02	5.485E+05
2019	5.726E+05	3.541E+02	5.307E+05
2020	5.726E+05	3.426E+02	5.135E+05
2021	5.726E+05	3.315E+02	4.968E+05
2022	5.726E+05	3.207E+02	4.807E+05
2023	5.726E+05	3.103E+02	4.651E+05
2024	5.726E+05	3.002E+02	4.500E+05
2025	5.726E+05	2.905E+02	4.354E+05
2026	5.726E+05	2.810E+02	4.213E+05
2027	5.726E+05	2.719E+02	4.076E+05
2028	5.726E+05	2.631E+02	3.943E+05
2029	5.726E+05	2.545E+02	3.815E+05
2030	5.726E+05	2.463E+02	3.692E+05
2031	5.726E+05	2.383E+02	3.572E+05
2032	5.726E+05	2.306E+02	3.456E+05
2033	5.726E+05	2.231E+02	3.344E+05
2034	5.726E+05	2.158E+02	3.235E+05
2035	5.726E+05	2.088E+02	3.130E+05
2036	5.726E+05	2.020E+02	3.029E+05
2037	5.726E+05	1.955E+02	2.930E+05
2038	5.726E+05	1.891E+02	2.835E+05
2039	5.726E+05	1.830E+02	2.743E+05
2040	5.726E+05	1.771E+02	2.654E+05
2041	5.726E+05	1.713E+02	2.568E+05
2042	5.726E+05	1.658E+02	2.484E+05
2043	5.726E+05	1.604E+02	2.404E+05
2044	5.726E+05	1.552E+02	2.326E+05
2045	5.726E+05	1.501E+02	2.250E+05
2046	5.726E+05	1.453E+02	2.177E+05
2047	5.726E+05	1.405E+02	2.107E+05
2048	5.726E+05	1.360E+02	2.038E+05
2049	5.726E+05	1.316E+02	1.972E+05
2050	5.726E+05	1.273E+02	1.908E+05
2051	5.726E+05	1.232E+02	1.846E+05
2052	5.726E+05	1.192E+02	1.786E+05
2053	5.726E+05	1.153E+02	1.728E+05
2054	5.726E+05	1.116E+02	1.672E+05
2055	5.726E+05	1.079E+02	1.618E+05
2056	5.726E+05	1.044E+02	1.565E+05
2057	5.726E+05	1.010E+02	1.514E+05
2058	5.726E+05	9.776E+01	1.465E+05
2059	5.726E+05	9.458E+01	1.418E+05
2060	5.726E+05	9.151E+01	1.372E+05
2061	5.726E+05	8.854E+01	1.327E+05
2062	5.726E+05	8.567E+01	1.284E+05
2063	5.726E+05	8.289E+01	1.242E+05

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2064	5.726E+05	8.020E+01	1.202E+05
2065	5.726E+05	7.759E+01	1.163E+05
2066	5.726E+05	7.508E+01	1.125E+05
2067	5.726E+05	7.264E+01	1.089E+05
2068	5.726E+05	7.028E+01	1.053E+05
2069	5.726E+05	6.800E+01	1.019E+05
2070	5.726E+05	6.579E+01	9.862E+04
2071	5.726E+05	6.366E+01	9.542E+04
2072	5.726E+05	6.159E+01	9.232E+04
2073	5.726E+05	5.959E+01	8.932E+04
2074	5.726E+05	5.766E+01	8.642E+04
2075	5.726E+05	5.578E+01	8.362E+04
2076	5.726E+05	5.397E+01	8.090E+04
2077	5.726E+05	5.222E+01	7.828E+04
2078	5.726E+05	5.053E+01	7.573E+04
2079	5.726E+05	4.889E+01	7.328E+04
2080	5.726E+05	4.730E+01	7.090E+04
2081	5.726E+05	4.576E+01	6.860E+04
2082	5.726E+05	4.428E+01	6.637E+04
2083	5.726E+05	4.284E+01	6.422E+04
2084	5.726E+05	4.145E+01	6.213E+04
2085	5.726E+05	4.010E+01	6.011E+04
2086	5.726E+05	3.880E+01	5.816E+04
2087	5.726E+05	3.754E+01	5.627E+04
2088	5.726E+05	3.632E+01	5.445E+04
2089	5.726E+05	3.515E+01	5.268E+04
2090	5.726E+05	3.400E+01	5.097E+04
2091	5.726E+05	3.290E+01	4.932E+04
2092	5.726E+05	3.183E+01	4.771E+04
2093	5.726E+05	3.080E+01	4.617E+04
2094	5.726E+05	2.980E+01	4.467E+04
2095	5.726E+05	2.883E+01	4.322E+04
2096	5.726E+05	2.790E+01	4.181E+04
2097	5.726E+05	2.699E+01	4.046E+04
2098	5.726E+05	2.611E+01	3.914E+04
2099	5.726E+05	2.527E+01	3.787E+04
2100	5.726E+05	2.445E+01	3.664E+04
2101	5.726E+05	2.365E+01	3.545E+04
2102	5.726E+05	2.289E+01	3.430E+04
2103	5.726E+05	2.214E+01	3.319E+04
2104	5.726E+05	2.142E+01	3.211E+04
2105	5.726E+05	2.073E+01	3.107E+04
2106	5.726E+05	2.006E+01	3.006E+04
2107	5.726E+05	1.940E+01	2.909E+04
2108	5.726E+05	1.877E+01	2.814E+04
2109	5.726E+05	1.816E+01	2.723E+04
2110	5.726E+05	1.758E+01	2.634E+04
2111	5.726E+05	1.700E+01	2.549E+04
2112	5.726E+05	1.645E+01	2.466E+04

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2113	5.726E+05	1.592E+01	2.386E+04
2114	5.726E+05	1.540E+01	2.309E+04
2115	5.726E+05	1.490E+01	2.234E+04
2116	5.726E+05	1.442E+01	2.161E+04
2117	5.726E+05	1.395E+01	2.091E+04
2118	5.726E+05	1.350E+01	2.023E+04
2119	5.726E+05	1.306E+01	1.957E+04
2120	5.726E+05	1.264E+01	1.894E+04
2121	5.726E+05	1.223E+01	1.832E+04
2122	5.726E+05	1.183E+01	1.773E+04
2123	5.726E+05	1.144E+01	1.715E+04
2124	5.726E+05	1.107E+01	1.660E+04
2125	5.726E+05	1.071E+01	1.606E+04
2126	5.726E+05	1.037E+01	1.554E+04
2127	5.726E+05	1.003E+01	1.503E+04
2128	5.726E+05	9.704E+00	1.454E+04
2129	5.726E+05	9.389E+00	1.407E+04
2130	5.726E+05	9.084E+00	1.362E+04
2131	5.726E+05	8.789E+00	1.317E+04
2132	5.726E+05	8.504E+00	1.275E+04
2133	5.726E+05	8.228E+00	1.233E+04
2134	5.726E+05	7.961E+00	1.193E+04
2135	5.726E+05	7.702E+00	1.154E+04
2136	5.726E+05	7.452E+00	1.117E+04
2137	5.726E+05	7.210E+00	1.081E+04
2138	5.726E+05	6.976E+00	1.046E+04
2139	5.726E+05	6.750E+00	1.012E+04
2140	5.726E+05	6.531E+00	9.789E+03
2141	5.726E+05	6.319E+00	9.471E+03
2142	5.726E+05	6.113E+00	9.164E+03
2143	5.726E+05	5.915E+00	8.866E+03
2144	5.726E+05	5.723E+00	8.578E+03
2145	5.726E+05	5.537E+00	8.300E+03
2146	5.726E+05	5.357E+00	8.030E+03
2147	5.726E+05	5.184E+00	7.770E+03
2148	5.726E+05	5.015E+00	7.518E+03
2149	5.726E+05	4.853E+00	7.274E+03
2150	5.726E+05	4.695E+00	7.037E+03
2151	5.726E+05	4.543E+00	6.809E+03
2152	5.726E+05	4.395E+00	6.588E+03
2153	5.726E+05	4.252E+00	6.374E+03
2154	5.726E+05	4.114E+00	6.167E+03
2155	5.726E+05	3.981E+00	5.967E+03
2156	5.726E+05	3.852E+00	5.773E+03
2157	5.726E+05	3.727E+00	5.586E+03
2158	5.726E+05	3.606E+00	5.405E+03
2159	5.726E+05	3.489E+00	5.229E+03
2160	5.726E+05	3.375E+00	5.059E+03
2161	5.726E+05	3.266E+00	4.895E+03

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

2162	5.726E+05	3.160E+00	4.736E+03
2163	5.726E+05	3.057E+00	4.582E+03
2164	5.726E+05	2.958E+00	4.434E+03
2165	5.726E+05	2.862E+00	4.290E+03
2166	5.726E+05	2.769E+00	4.151E+03
2167	5.726E+05	2.679E+00	4.016E+03
2168	5.726E+05	2.592E+00	3.885E+03
2169	5.726E+05	2.508E+00	3.759E+03
2170	5.726E+05	2.427E+00	3.637E+03
2171	5.726E+05	2.348E+00	3.519E+03
2172	5.726E+05	2.272E+00	3.405E+03
2173	5.726E+05	2.198E+00	3.294E+03
2174	5.726E+05	2.127E+00	3.188E+03
2175	5.726E+05	2.058E+00	3.084E+03
2176	5.726E+05	1.991E+00	2.984E+03
2177	5.726E+05	1.926E+00	2.887E+03
2178	5.726E+05	1.864E+00	2.793E+03
2179	5.726E+05	1.803E+00	2.703E+03
2180	5.726E+05	1.745E+00	2.615E+03
2181	5.726E+05	1.688E+00	2.530E+03
2182	5.726E+05	1.633E+00	2.448E+03
2183	5.726E+05	1.580E+00	2.368E+03
2184	5.726E+05	1.529E+00	2.292E+03
2185	5.726E+05	1.479E+00	2.217E+03
2186	5.726E+05	1.431E+00	2.145E+03
2187	5.726E+05	1.385E+00	2.076E+03
2188	5.726E+05	1.340E+00	2.008E+03
2189	5.726E+05	1.296E+00	1.943E+03
2190	5.726E+05	1.254E+00	1.880E+03
2191	5.726E+05	1.213E+00	1.819E+03
2192	5.726E+05	1.174E+00	1.760E+03
2193	5.726E+05	1.136E+00	1.703E+03
2194	5.726E+05	1.099E+00	1.647E+03
2195	5.726E+05	1.063E+00	1.594E+03
2196	5.726E+05	1.029E+00	1.542E+03
2197	5.726E+05	9.955E-01	1.492E+03
2198	5.726E+05	9.632E-01	1.444E+03
2199	5.726E+05	9.319E-01	1.397E+03
2200	5.726E+05	9.017E-01	1.352E+03
2201	5.726E+05	8.724E-01	1.308E+03
2202	5.726E+05	8.441E-01	1.265E+03
2203	5.726E+05	8.167E-01	1.224E+03