



Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
Μ.Π.Σ. Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών
Ενέργειας (Α.Π.Ε.)**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

«Εφαρμογή του μοντέλου, LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) για τον υπολογισμό της ποσότητας των οργανικών ενώσεων, εκτός μεθανίου (NMOCs-Non Methane Organic Compounds) που παράγονται σε έναν Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ)»

Γεράσιμος Σ. Καβαλιεράτος

Υπεύθυνος Καθηγητής : Δρ. Διονύσιος Παναγιωτάρας

Πάτρα 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου οι οποίοι με προετοίμασαν για την διατριβή μου με σημαντικές γνώσεις το χρόνο φοίτησής μου στο πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών, τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Διονύσιο Παναγιωτάρα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στη ανάθεση του θέματος, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία μας καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, και τέλος την οικογένειά μου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μελέτη, η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο «Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας» (Α.Π.Ε.), έχει σκοπό τον υπολογισμό της ποσότητας των οργανικών ενώσεων εκτός μεθανίου (NMOCs-Non Methane Organic Compounds) που παράγονται σε έναν Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Η μελέτη χρησιμοποίησε για την προσομοίωση της παραγωγής στοιχεία από την οριστική μελέτη της Τεχνικής Υπηρεσίας του Δήμου Αριδαίας (Μάρτιος 2009) για το ΧΥΤΑ της Διαχειριστικής ενότητας Αλμωπίας, εφαρμόζοντας το μοντέλο LandGEM (Landfill Gas Emissions Model).

Συγκεκριμένα, στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται πλήρης περιγραφή των διαφόρων τύπων Χ.Υ.Τ.Α., των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν και των κριτηρίων με τα οποία γίνεται η αποδοχή των στερεών αποβλήτων. Επιπλέον περιγράφεται η διαδικασία της παραγωγής του βιοαερίου καθώς και των εξωτερικών, εσωτερικών αλλά και διαχειριστικών παραγόντων που συντελούν στη μεθανογένεση. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη σύσταση, παραγωγή, ανάκτηση αλλά και στους τρόπους διαχείρισης και εκμετάλλευσής του βιοαερίου. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το περιβάλλον της προσομοίωσης και οι φυσικές, χημικές και βιολογικές σταθερές και μεταβλητές που εισάγονται στο πρόγραμμα. Τέλος περιγράφεται το πρόγραμμα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (οργανικές ενώσεις εκτός μεθανίου).

Συμπερασματικά, το βιοαέριο προσφέρεται για ιδιαίτερα πολλές ενεργειακές εφαρμογές και αυτό το κατατάσσει σε σημαντικό στοιχείο εκμετάλλευσης. Απαιτείται όμως συστηματική και προσεκτική παρακολούθηση των εκπομπών αερίων στην ατμόσφαιρα αφού συμπεριλαμβάνονται στα επικίνδυνα αέρια που συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

ABSTRACT

The present paper, undertaken within the framework of a Post-graduate programme study called ‘Systems of Renewable Sources of Energy’ aims at estimating the amount of organic compounds excluding methane (NMOCs-Non Methane Organic Compounds) that are produced from an area of disposal of municipal solid waste (Landfill). To simulate this production, the research employed data from the final study of the Technical Service of the Municipality of Aridaia (March 2009) as regards the Landfill of Almopia, applying the LandGEM (Landfill Gas Emissions Model).

More specifically, in the sections that follow, the various types of Landfills are described in full. Their advantages and disadvantages are presented along with the criteria according to which solid waste is accepted. Next follows a presentation of the process of biogas production, as well as the external, internal and regulation factors that contribute to the generation of methane. The third section relates to the formation, production, recovery and the management and exploitation of biogas. The fourth section presents the natural, chemical and biological constants and variables introduced in the simulation. Finally, a description of the programme along with the results (organic compounds excluding methane) is presented.

In conclusion, the significant number of energy applications in the use of biogas classifies it among the major compounds to be exploited. However, systematic and careful observation is required concerning gas emissions in the atmosphere since they are included among the hazardous gases that contribute to the greenhouse effect.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
ABSTRACT	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
Κατάλογος ΠΙΝΑΚΩΝ	7
Κατάλογος ΕΙΚΟΝΩΝ	8
1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ	10
1.1 Συνοπτική περιγραφή	10
1.2 Εδαφική διάθεση	10
1.3 Τι είναι ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (ΧΥΤΑ)	12
1.4 Τοπικά σχέδια ΧΥΤΑ	17
1.5 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός ΧΥΤΑ	23
1.6 Διεργασίες στο κυρίως σώμα του ΧΥΤΑ	24
1.7 Βιώσιμος ΧΥΤΑ	26
1.7.1 Η έννοια του βιώσιμου ΧΥΤΑ	27
1.8 Κατηγοριοποίηση των ΧΥΤΑ με βάση το μέγεθος	27
1.9 Κριτήρια και διαδικασίες αποδοχής αποβλήτων	28
2 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ – ΣΤΑΔΙΑ	30
2.1 Αναερόβια χώνευση	30
2.2 Στάδια αποσύνθεσης απορριμμάτων	30
2.3 Διάρκεια των φάσεων	38

2.4 Αλληλεπίδραση μεταξύ των ειδών	40
2.5 Επίδραση εξωτερικών παραγόντων στη μεθανογένεση	41
2.6 Επίδραση εσωτερικών παραγόντων στη μεθανογένεση	43
2.7 Επίδραση διαχειριστικών παραμέτρων στη μεθανογένεση	51
2.8 Τεχνολογίες της διεργασίας	56
3 ΒΙΟΑΕΡΙΟ	58
3.1 Σύσταση (ποιότητα) βιοαερίου	58
3.2 Πιθανές επιδράσεις εκπεμπόμενου βιοαερίου από τον ΧΥΤΑ	61
3.3 Παραγωγή βιοαερίου	65
3.4 Ρυθμός παραγωγής βιοαερίου	66
3.5 Όγκος παραγόμενου βιοαερίου	67
3.6 Μετανάστευση των αερίων στους χώρους διάθεσης	69
3.7 Η διαρροή του βιοαερίου από τη στρώση κάλυψης	71
3.8 Η τεχνολογία ανάκτησης του βιοαερίου	71
3.9 Προεργασίες για την εκτίμηση της ποσότητας του βιοαερίου	72
3.10 Αξιοποίηση των αερίων	73
3.11 Εφαρμογές χρήσεων σε διάφορες χώρες	74
3.12 Παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο στην Ελλάδα	76
3.13 Μέτρα ασφάλειας	78
4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ LandGEM	79
4.1 Εισαγωγή	79
4.2 Γενικές εκτιμήσεις	80
4.3 Φυσικό μέρος του μοντέλου	82
4.3.1 Φυσικές παράμετροι εισόδου	82
4.3.2 Φυσικές παράμετροι εξόδου	86

4.4 Χημικό μέρος του μοντέλου	89
4.5 Βιολογικό μέρος του μοντέλου	93
4.5.1 Παρουσίαση εξισώσεων	94
4.5.2 Εξισώσεις δυναμικής του οικοσυστήματος	96
4.5.3 Βιοκινητικές σταθερές	98
4.5.4 Συντελεστές απόδοσης οξικού οξέος και μεθανίου	99
4.6 Οργανικές Ενώσεις εκτός μεθανίου NMOCs – (Non Methane Organic Compounds)	99
4.7 Μοντέλα παραγωγής οργανικών ενώσεων εκτός μεθανίου NMOCs - (Non Methane Organic Compounds)	100
5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	105
5.1 Εφαρμογή του Μοντέλου LANDGEM στο ΧΥΤΑ Αλμωπίας	105
5.2 Σταθερές και μεταβλητές του μοντέλου	107
5.3 Προετοιμασία και εξαγωγή των αποτελεσμάτων	110
5.4 Περιγραφή των αποτελεσμάτων της έρευνας	120
5.5 Συμπεράσματα	122
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	124
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134
<u>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ</u>	
Πίνακας	
1. Δαπάνες υποδομής και λειτουργίας ΧΥΤΑ	15
2. Οι αντιδράσεις των τριών βημάτων	34
3. Ποσοστιαία κατανομή αερίων από ΧΥΤΑ στους πρώτους 48 μήνες μετά από το κλείσιμο του ΧΥΤΑ (ή λεκάνης του)	38

4. Ευνοϊκές συνθήκες για μεθανογένεση	39
5. Τυπική σύσταση βιοαερίου	58
6. Τυπικοί ρυπαντές βιοαερίου	59
7. Ορισμένοι οργανικοί (VOCs) που συνήθως περιλαμβάνει το βιοαέριο	60
8. Σύσταση βιοαερίου για αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ) στις ΗΠΑ	61
9. Τιμές απόδοσης απορριμμάτων σε βιοαέριο και μεθάνιο	69
10. Ταχέως και βραδέως βιοαποδομούμενα συστατικά απορριμμάτων	84
11. Πειραματικά προσδιορισμένες τιμές σταθερών υδρόλυσης	90
12. Σταθερές υδρόλυσης και το ποσοστό βιοαποδόμησης επιλεγμένων συστατικών των απορριμμάτων	91
13. Εξισώσεις δυναμικής του οικοσυστήματος	94
14. Βιοκινητικές σταθερές οξυγενών βακτηρίων	98
15. Βιοκινητικές σταθερές μεθανογενών βακτηρίων	98
16. Τιμές συντελεστών k , L_0	111
17. Υπολογιστικό φύλλο ρυπαντών	114
18. Υπολογιστικό φύλλο αποτελεσμάτων εκπομπής αερίων NMOCs	120

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα

1. Γενική άποψη ΧΥΤΑ	12
2. Υπερεδάφιος ΧΥΤΑ	15
3. Επιφανειακή διάθεση απορριμμάτων	17
4. Υγειονομική ταφή. Απότομη κλίση, είσοδος από κάτω, αναχώρηση από κάτω ή από επάνω	18
5. Υγειονομική ταφή σε τάφρους	19
6. Επιφανειακή υγειονομική ταφή αποβλήτων που καταλήγει στη δημιουργία λόφου απορριμμάτων	20
7. Πλήρωση τάφρου με υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα	21
8. Χώρος συνδιάθεσης απορριμμάτων	22

9. Ενδεικτικές διεργασίες και χαρακτηριστικά ενός ΧΥΤΑ	25
10. Υπόστρωμα και σημαντικές βακτηριακές ομάδες στα οικοσυστήματα παραγωγής μεθανίου	36
11. Διαχρονική εξέλιξη των ποιοτικών χαρακτηριστικών του βιοαερίου από ΧΥΤΑ	37
12. Σταθμός παραγωγής βιοαερίου (Άνω Λιόσια)	66
13. Δεξαμενές και διάδρομοι οργανικού άνθρακα	81
14. Χ.Υ.Τ.Α. Διαχειριστικής ενότητας Αλμωπίας	106
15. Εισαγωγή χαρακτηριστικών στο πρόγραμμα Lanfill	113
16. Προσδιορισμός παραμέτρων μοντέλου	113
17. Επιλογή αερίων/ρύπων	115
18. Εισαγωγή ποσότητας απορριμάτων	116
19. Φύλλο επιθεώρησης δεδομένων	116
20. Φύλλο αποτελεσμάτων (εκπομπής αερίων)	117
21. Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων	118
22. Φύλλο απογραφής αποτελεσμάτων	118
23. Συνοπτική αναφορά αποτελεσμάτων	119
24. Παραγόμενη ποσότητα NMOCs στο Χ.Υ.Τ.Α. Διαχειριστικής ενότητας Αλμωπίας	121

1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗΣ ΤΑΦΗΣ

1.1 Συνοπτική περιγραφή

Η εδαφική διάθεση ή ταφή των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ), μέθοδος επεξεργασίας και διάθεσης που χρησιμοποιείτο και από αρχαίους λαούς μεταξύ των οποίων και οι Έλληνες, θεωρείται ως τελική διέξοδος στη διαχείριση των ΑΣΑ. Πολλοί νομίζουν ότι είναι η μόνη μέθοδος επεξεργασίας που προσφέρει πλήρη “επίλυση του προβλήματος” χωρίς να δημιουργεί δευτερεύουσες αρνητικές επιπτώσεις. Αυτή η άποψη δε στέκει, αφού η ταφή των ΑΣΑ “παράγει” διασταλάγματα, βιοαέριο και άλλες ανεπιθύμητες εκροές που πρέπει να τύχουν ειδικής διαχείρισης. Η ταφή υποτίθεται ότι πρέπει να είναι η *τελευταία επιλογή* από διάφορες εναλλακτικές μεθόδους διάθεσης. Η μείωση στην πηγή, η επαναχρησιμοποίηση, η ανάκτηση υλικών και ενέργειας και η βιοεπεξεργασία υποτίθεται ότι έχουν προτεραιότητα (τουλάχιστον σε διερευνητικό επίπεδο) έναντι της ταφής.

Ο όρος “Υγειονομική ταφή” χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1930 στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, για να περιγράψει μια απλή δραστηριότητα διάστρωσης, συμπίεσης και κάλυψης ΑΣΑ με εδαφικό υλικό σε ημερήσια βάση. Τα κύρια γνωρίσματα, που διαφοροποιούσαν τη διαδικασία αυτή ήταν από τις μέχρι τότε συνήθειες διαδικασίες απόρριψης στο έδαφος ήταν η *συμπύεση* και η *ημερήσια κάλυψη*.

1.2 Εδαφική διάθεση

Η εδαφική διάθεση είναι ένα αναπόφευκτο υποσύστημα κάθε συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ, καθώς κάθε μέθοδος επεξεργασίας αφήνει υπόλειμμα που καταλήγει σε χώρο εδαφικής διάθεσης υπολειμμάτων (ΧΕΔΥ) ή χώρο υγειονομικής ταφής αποβλήτων (ΧΥΤΑ). Με τα σημερινά δεδομένα, 100% εκτροπή δε νοείται. Ο ΧΕΔΥ μπορεί να χρησιμοποιείται και για προσωρινή απόθεση πριν τα ΑΣΑ προωθηθούν σε άλλες επεξεργασίες. Ένας σύγχρονος ΧΕΔΥ αποτελεί και αυτοδύναμη μέθοδο επεξεργασίας. Μάλιστα δε είναι η μόνη μέθοδος επεξεργασίας που είναι δυνατή για κάθε τύπο ΑΣΑ.

Εκείνο που επιδιώκεται είναι η εδαφική διάθεση να είναι υγειονομική (προστασία της υγείας) και βιώσιμη (προστασία του περιβάλλοντος).

Σύμφωνα με τη νομοθεσία, διακρίνονται τρεις κατηγορίες ΧΕΔΥ ανάλογα με το αν δέχονται επικίνδυνα, μη – επικίνδυνα (στα οποία περιλαμβάνονται τα αστικά), ή αδρανή απόβλητα, ενώ είναι υποχρεωτική η προεπεξεργασία (πλην των αδρανών υλικών) πριν από την απόθεση (π.χ. τεμαχισμός, καύση, κομποστοποίηση). Εδώ εστιάζουμε στους ΧΕΔΥ για αστικά στερεά απόβλητα, οι οποίοι αναφέρονται ειδικότερα ως χώροι υγειονομικής ταφής αποβλήτων και σχετίζονται συνήθως με απόβλητα που περιέχουν βιοαποδομήσιμα υλικά (ΚΥΑ 69728/824/1996). Στην ίδια περιοχή ενός χώρου εδαφικής διάθεσης είναι δυνατόν να έχουμε χωριστούς (ανεξάρτητους) χώρους ταφής (π.χ. σε διαφορετικές λεκάνες) για διαφορετικά απόβλητα (π.χ. αδρανή ή τοξικά), με διαφορετικές προδιαγραφές κατασκευής, λειτουργίας και μεταφροντίδας.

Τα βιοαποδομήσιμα υλικά μετά την εναπόθεσή τους υφίστανται βιοαποδόμηση με ρυθμό που επηρεάζεται από την υγρασία και τη θερμοκρασία, παράγοντας κυρίως διασταλάγματα και βιοαέριο (θα υπάρξει λεπτομερής αναφορά στα επόμενα κεφάλαια), κύρια συστατικά του οποίου είναι το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Οι ΧΥΤΑ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη στρατηγική που ακολουθείται ως προς τον έλεγχο της υγρασίας στο κυρίως σώμα του ΧΥΤΑ. Οι επιλογές κυμαίνονται από “πλήρη απομόνωση” (ξηρός ΧΥΤΑ) μέχρι “ελεγχόμενη υγρασία” (υγρός ΧΥΤΑ). Αυξημένη υγρασία σημαίνει επιτάχυνση της βιοαποδόμησης και συνεπώς της αδρανοποίησης. Άρα, ο ΧΥΤΑ μπορεί να θεωρηθεί ως βιοαντιδραστήρας, που παραμένει ενεργός μέχρι την πλήρη βιοαποδόμηση των οργανικών υλικών.

Ο απαιτούμενος χρόνος για αδρανοποίηση ή σταθεροποίηση εξαρτάται από την αρχική σύνθεση των ΑΣΑ και μπορεί να ξεπεράσει τα 50 χρόνια μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ. Η Οδηγία 99/31 αμφισβητώντας τη δυνατότητα του ΧΥΤΑ να λειτουργήσει αποτελεσματικά ως βιώσιμος βιοαντιδραστήρας επιβάλλει τη σταδιακή μείωση των βιοαποδομήσιμων υλικών που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ. Δεδομένων των συνθηκών

στη χώρα μας, η υγειονομική ταφή δε μπορεί να αποκλειστεί ως κατάλληλη μέθοδος επεξεργασίας και διάθεσης (Παναγιωτακόπουλος, 2002).

1.3 Τι είναι ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (ΧΥΤΑ)

Το μεγαλύτερο μέρος των σκουπιδιών καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής (ΧΥΤΑ) (Σχήμα 1) ή σε πολλές περιοχές της χώρας μας, σε χωματερές και μάλιστα παράνομες. Σήμερα πολλοί από αυτούς τους χώρους (υγειονομικής ταφής) έχουν γεμίσει και η εύρεση νέων δεν είναι εύκολη, καθώς υπάρχει έντονη αντίδραση από τους κατοίκους των γειτονικών περιοχών. Η δυσκολία χωροθέτησης νέων ΧΥΤΑ καθώς και το αυξημένο κόστος κατασκευής τους, προκειμένου να διασφαλιστεί η προστασία της δημόσιας υγείας και του περιβάλλοντος, αυξάνουν δραματικά το κόστος διαχείρισης των απορριμμάτων και μπορεί να αναγκάσουν τους Δήμους σε αύξηση των δημοτικών τελών για την κάλυψη αυτού του κόστους.



Εικόνα 1: Γενική άποψη ΧΥΤΑ. [1]

Υγειονομική Ταφή είναι η μέθοδος της ελεγχόμενης και οργανωμένης διάθεσης των αποβλήτων στο έδαφος, στους χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων (ΧΥΤΑ). Οι ΧΥΤΑ δεν θα πρέπει να συγχέονται με τις υπάρχουσες χωματερές όπου δεν υπάρχει

κατάλληλη υποδομή και η απόρριψη των αποβλήτων είναι συχνά ανεξέλεγκτη. Τα εργοστάσια υγειονομικής ταφής, κάνουν τέτοια επεξεργασία ώστε τίποτα από τα απορρίμματα που συγκεντρώνονται εκεί δεν πετάγεται. Πρώτα απ' όλα γίνεται διαλογή και ένα μεγάλο ποσοστό από αυτά όπως γυαλί, χαρτί, μέταλλα, πάνε για ανακύκλωση. Άλλα υλικά συμπιέζονται και χάνουν το μεγαλύτερο μέρος από τον όγκο τους και αφού ολοκληρώσουν την επεξεργασία τους γίνονται λιπάσματα. Το ίδιο γίνεται και με τα υγρά που στραγγίζουν από την συμπίεση των απορριμμάτων.

Τίποτα από τα υγρά απόβλητα δεν πηγαίνει στην γη, γιατί στους ΧΥΤΑ προβλέπεται ένα απόλυτα στεγανό σύστημα συγκέντρωσης του 100% των υγρών. Παρ' όλα αυτά για να αποκλειστεί η παραμικρή πιθανότητα να καταλήξουν στην θάλασσα υγρά απόβλητα, από μια πιθανή βλάβη του συστήματος αποστράγγισης, απαγορεύεται να εγκατασταθεί εργοστάσιο επεξεργασίας απορριμμάτων σε απόσταση μικρότερη των 5 χιλιομέτρων από τη θάλασσα.

Ο σχεδιασμός, η τεχνολογία και οι τεχνικές διαχείρισης των ΧΥΤΑ έχουν βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και η εξέλιξη συνεχίζεται. Για την επιλογή του χώρου πρέπει να εξετάζονται τα υδρογεωλογικά στοιχεία της περιοχής, ώστε να μη δημιουργηθεί κίνδυνος ρύπανσης του υδροφόρου ορίζοντα. Οι σύγχρονοι ΧΥΤΑ πρέπει να έχουν επικάλυψη στον πυθμένα τους από φυσικά ή τεχνητά υλικά για στεγανοποίηση, κατάλληλα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας των στραγγισμάτων και σύστημα συλλογής του βιοαερίου.

Κατά την υγειονομική ταφή τα απορρίμματα διαστρώνονται, συμπιέζονται, και στο τέλος της ημέρας σκεπάζονται με αδρανές υλικό (χώμα, μπάζα, κομπόστ κλπ). Έτσι μειώνεται στο ελάχιστο ο κίνδυνος από τη διασπορά των απορριμμάτων και οι δυσάρεστες οσμές.

Επειδή η πιθανότητα αστοχιών στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των ΧΥΤΑ δεν είναι αμελητέα, υπάρχει κίνδυνος αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον (απόλυτη προστασία δε νοείται). Τέτοιες πιθανές επιπτώσεις είναι για παράδειγμα, η

δυσοσμία και οι αναφλέξεις λόγω του βιοαερίου, η ρύπανση ή η μόλυνση των νερών στην ευρύτερη περιοχή από διακίνηση στραγγισμάτων, και οι κίνδυνοι από διακίνηση βιοαερίου. Εκτιμάται ότι οι ΧΥΤΑ και εν γένει οι χώροι ανεξέλεγκτης απόθεσης είναι η μεγαλύτερη ανθρωπογενής πηγή μεθανίου (με άμεση συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι ΗΠΑ όπου οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από ΧΥΤΑ, ανά τόνο ΑΣΑ, είναι τετραπλάσιες εκείνων από εγκαταστάσεις ΚΑΕ (καύση με ανάκτηση ενέργειας).

Ένα σημαντικό ζήτημα είναι η διάρκεια της περιόδου ευθύνης του διαχειριστή ως προς την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων και την κάλυψη ζημιών από τυχόν αστοχίες. Σύμφωνα με τη νομοθεσία πριν από την έναρξη λειτουργίας καταβάλλεται χρηματοοικονομική ή άλλη ισοδύναμη εγγύηση που καλύπτει περίοδο μέχρι και 30 ετών μετά το “κλείσιμο”, ώστε να εξασφαλίζεται η εκπλήρωση των υποχρεώσεων που συνεπάγεται η άδεια λειτουργίας.

Ως προς το κόστος υποδομής και λειτουργίας των ΧΥΤΑ από πρόσφατες αναλύσεις προκύπτουν κατά προσέγγιση οι τιμές του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1). Υποθέτουμε διάρκεια χρήσης 20 ετών και 1kg/κάτοικο/day με ισοδύναμη τελική πυκνότητα (λαμβανομένων υπόψη και των επιπτώσεων των καθιζήσεων) 0,80 τόνους/m³.

Οι τιμές του πίνακα 1 αντιστοιχούν σε πλήρως υπερεδάφιο ΧΥΤΑ (Σχήμα 2), με εκκίνηση από διαθέσιμο επίπεδο χώρο, προϋποθέτουν πλήρη ικανοποίηση της ισχύουσας νομοθεσίας και περιλαμβάνουν δαπάνες για: μηχανολογικό εξοπλισμό, μόνωση, σύστημα συλλογής και επεξεργασίας διασταλαγμάτων και βιοαερίου (εφόσον απαιτείται), σύστημα παρακολούθησης περιβαλλοντικών παραμέτρων καθώς και άλλες δαπάνες υποδομής. Δεν περιλαμβάνουν: κόστος γης, δαπάνες που προκύπτουν στο προκαταρκτικό στάδιο πριν την κατασκευή, δαπάνες αναγκαίων κατάλληλων έργων (π.χ. δρόμους πρόσβασης), δαπάνες εκσκαφών (πλην των αναγκαίων για προετοιμασία του πυθμένα), ή δαπάνες κλεισίματος μεταφροντίδας, εγγυήσεων και αποκατάστασης του χώρου.

Πίνακας 1 : Δαπάνες υποδομής και λειτουργίας ΧΥΤΑ (τιμές έτους 2002) [2],[9].

Μέγεθος ΧΥΤΑ	Μέγεθος ΧΥΤΑ		Δαπάνη Υποδομής (10 ⁶ €)	Κόστος Λειτουργίας (€τόνο)
	Στρέμματα	Χωρητικότητα (10 ³ m ³)		
53 – 80	500	55000	2,00 – 2,30	5,20 – 5,80
80 – 130	1000	110000	3,30 – 3,60	4,10 – 4,60
110 – 165	1500	165000	7,30 – 8,30	5,80 – 6,50
170 – 260	3000	330000	12,00 – 13,50	4,80 – 5,40
270 – 410	6000	660000	19,60 – 22,10	3,90 – 4,40
425 – 645	12000	1320000	32,00 – 36,20	3,20 – 3,60



Εικόνα 2: Υπερεδάφιος ΧΥΤΑ [3]

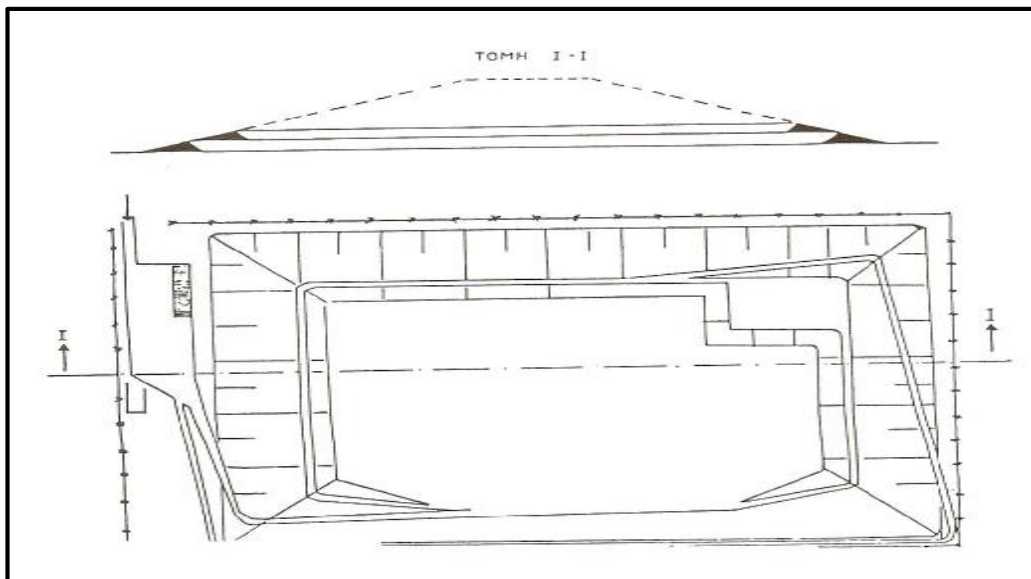
Ο Διαθέσιμος Χώρος ως Παραγωγικός Πόρος. Ο χώρος για διάθεση αποβλήτων είναι ένας παραγωγικός πόρος, με την έννοια ότι είναι αναγκαίος για κάθε οικονομική δραστηριότητα που παράγει απόβλητα. Δεδομένης της δυσχέρειας εύρεσης τέτοιων χώρων, ο πόρος αυτός καθίσταται σπάνιος και το ευκαιριακό του κόστος εξαιρετικό

μεγάλο – πολύ μεγαλύτερο από το κόστος κατασκευής, λειτουργίας και μεταφροντίδας του ΧΥΤΑ. Ως εκ τούτου η αναζήτηση μεθόδων μείωσης της εξάρτησης από ΧΕΔΥ ή αποτελεσματικότερη εκμετάλλευσης των διαθέσιμων χώρων είναι διαρκής. Μεταξύ των υπό διερεύνηση επιλογών είναι (1) η κατάργηση της ημερήσιας κάλυψης των αποβλήτων (ή η αντικατάσταση του υλικού κάλυψης με μεμβράνες ή αφρό) και (2) η επαναχρησιμοποίηση του χώρου (π.χ. με μετακίνηση των αδρανοποιημένων υλικών σε άλλο χώρο, 20 ή 30 χρόνια μετά το κλείσιμο). Έχει επίσης εμφανιστεί το φαινόμενο της πώλησης διαθέσιμου χώρου ταφής σε “τρίτους”, σε τιμές που εκφράζουν το ευκαιριακό κόστος του αγοραστή, με στόχο το οικονομικό όφελος του διαχειριστή. Στη λογική αυτή, στηρίζεται η δημιουργία ιδιωτικών ΧΥΤΑ.

Στη χώρα μας σήμερα σχεδόν το 90% των ΑΣΑ οδηγούνται σε εδαφική διάθεση (50% σε χώρους υγειονομικής ταφής και 40% σε ανεξέλεγκτες παράνομες χωματερές). Για τουλάχιστον 20 χρόνια ακόμα, η εδαφική διάθεση θα αποτελεί την κύρια μέθοδο επεξεργασίας και διάθεσης. Δε θα ήταν υπερβολή να ισχυριστεί κανείς ότι κανένας ΧΥΤΑ δε λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο που να δικαιολογεί τον όρο “υγειονομική ταφή”. Σε θέματα υγειονομικής ταφής, η επιστημονική έρευνα στη χώρα μας είναι περιορισμένη, ενώ υπάρχει έλλειψη επαρκούς γνώσης, εμπειρίας, δεδομένων, πολιτικών και στρατηγικών στις περισσότερες Μεσογειακές χώρες [80].

1.4 Τυπικά σχέδια ΧΥΤΑ

Παρακάτω παρουσιάζονται έξι τυπικά σχέδια χώρων υγειονομικής ταφής αποβλήτων.



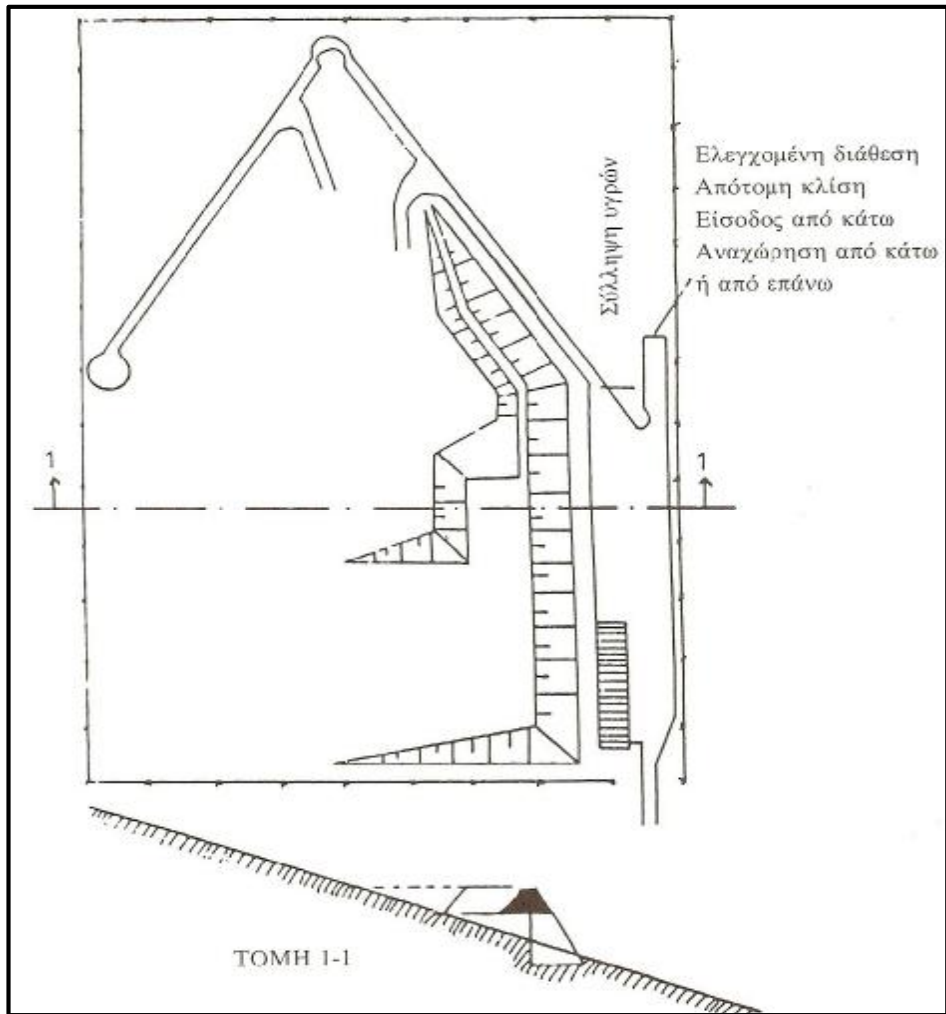
Εικόνα 3: Επιφανειακή διάθεση απορριμμάτων [4]

- ▶ Επιφανειακή διάθεση απορριμμάτων

Στο σχέδιο της Εικόνας 3 παριστάνεται σε κάτοψη-τομή χώρος διάθεσης απορριμμάτων που δημιουργείται πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, με διαδοχικές στρώσεις. Εφαρμόζεται όταν είναι δύσκολη η εκσκαφή του εδάφους για τη διάνοιξη τάφρων ή όταν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι αρκετά υψηλός.

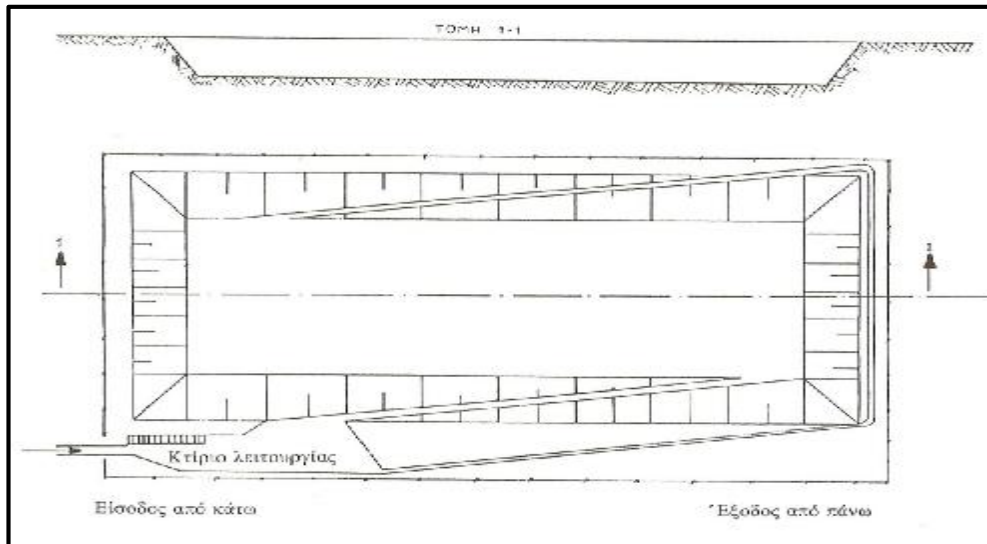
Τα απορρίμματα ξεφορτώνονται και διαστρώνονται σε στενές λωρίδες στην επιφάνεια του εδάφους, σχηματίζονται έτσι στρώσεις βάθους περίπου 50 - 80 cm. Κάθε στρώση συμπιέζεται καθώς προχωρεί η διαδικασία πλήρωσης του χώρου κατά τη διάρκεια της ημέρας μέχρι το πάχος των συμπιεσμένων απορριμμάτων φθάσει τα 2,50 - 3 μέτρα.

Στο τέλος της ημέρας τα απορρίμματα καλύπτονται με στρώση κατάλληλου αδρανούς υλικού, πάχους περίπου 15 - 30 cm το οποίο επίσης πρέπει να συμπιεσθεί, το υλικό προσωρινής επικάλυψης. Το υλικό επικάλυψης εξασφαλίζεται από εκσκαφές στο γύρω χώρο, ή μεταφέρεται από κοντινές περιοχές και είναι συνήθως αμμώδη ή αμμοχαλικώδη υλικά.



Εικόνα 4: Υγειονομική ταφή. Απότομη κλίση, είσοδος από κάτω, αναχώρηση από κάτω ή από επάνω. [4]

- Υγειονομική ταφή. σε απότομη κλίση
- Στο σχέδιο της Εικόνας 4 παριστάνεται σε κάτοψη-τομή χώρος υγειονομικής ταφής απορριμάτων που έχει τοποθετηθεί σε έκταση με απότομη κλίση. Το γέμισμα αρχίζει από το κάτω μέρος και προχωράει προς τα άνω κατά στρώσεις με κλίση πρανών 2:1 και συμπίεσεις μέχρι 0,7



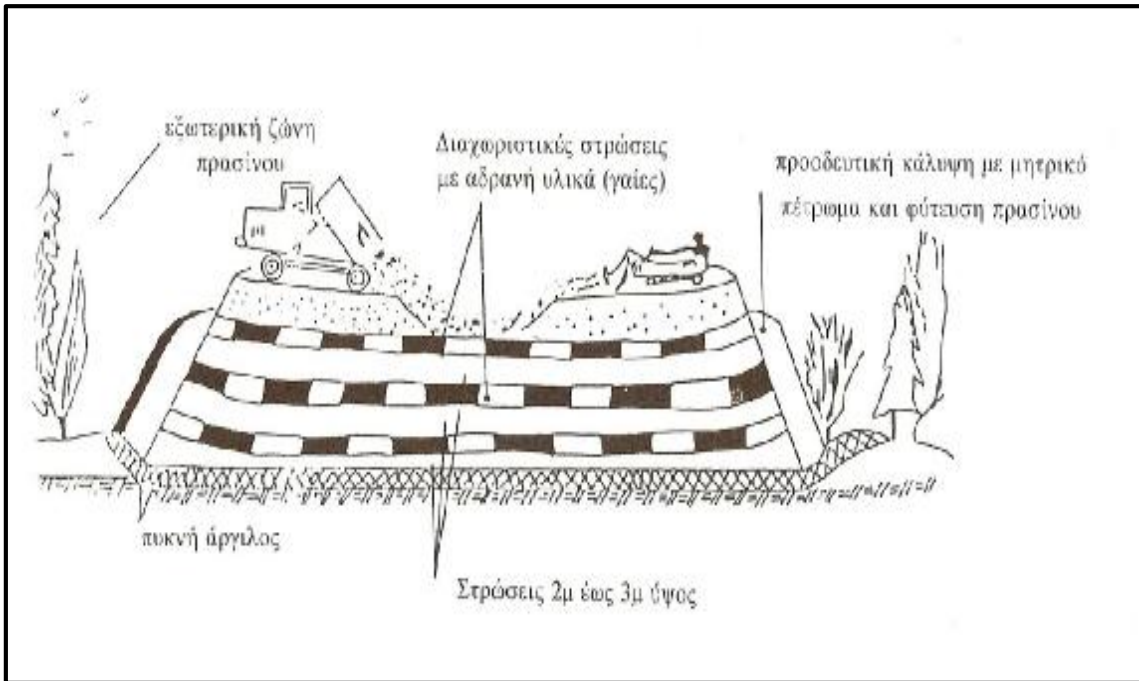
Εικόνα 5: Υγειονομική ταφή σε τάφρους. [4]

▸ Υγειονομική ταφή σε τάφρους

Στο σχέδιο της Εικόνας 5 παριστάνεται σε κάτοψη-τομή χώρος υγειονομικής ταφής απορριμμάτων σε τάφρους

Εφαρμόζεται όταν είναι εύκολη η εκσκαφή του εδάφους για τη διάνοιξη τάφρων ή όταν ο υδροφόρος ορίζοντας δεν είναι αρκετά υψηλός.

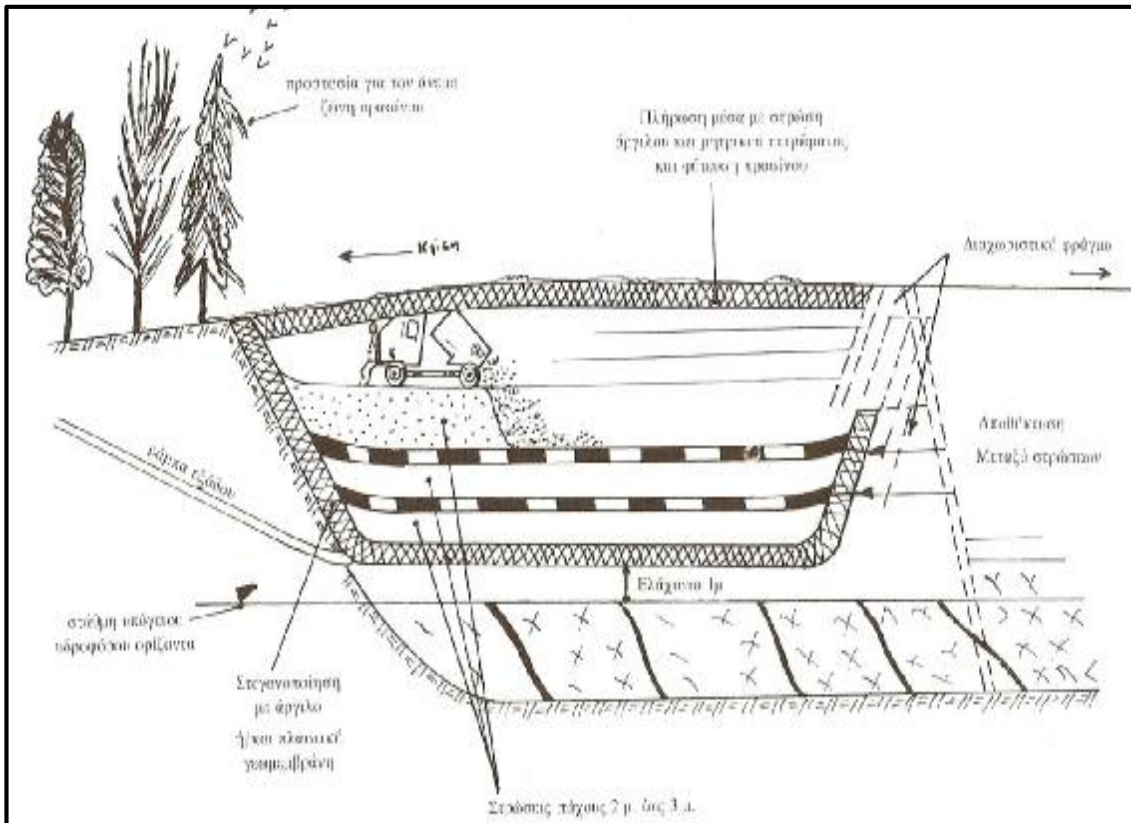
Ο χωρισμός του χώρου διάθεσης σε εμβαδά ορθογωνικής διατομής από 3000 μ² έως περισσότερο από ένα εκτάριο, που αποτελούν μικρούς ανεξάρτητους χώρους διάθεσης με τη μορφή φατνωμάτων ή κυψελών. Για την πραγματοποίηση των εργασιών αυτών γίνονται εκσκαφές τάφρων μέσα στο έδαφος.



Εικόνα 6: Επιφανειακή υγειονομική ταφή αποβλήτων που καταλήγει στην δημιουργία λόφου απορριμμάτων. [4]

- ▶ Επιφανειακή υγειονομική ταφή αποβλήτων που καταλήγει στην δημιουργία λόφου

Στο σχέδιο της Εικόνας 6 παριστάνεται η όψη χώρου διάθεσης υγειονομικής ταφής στην επιφάνεια του εδάφους σε διαδοχικές στρώσεις, 2-3 μέτρων ύψους που καταλήγουν στη δημιουργία λόφου απορριμμάτων.

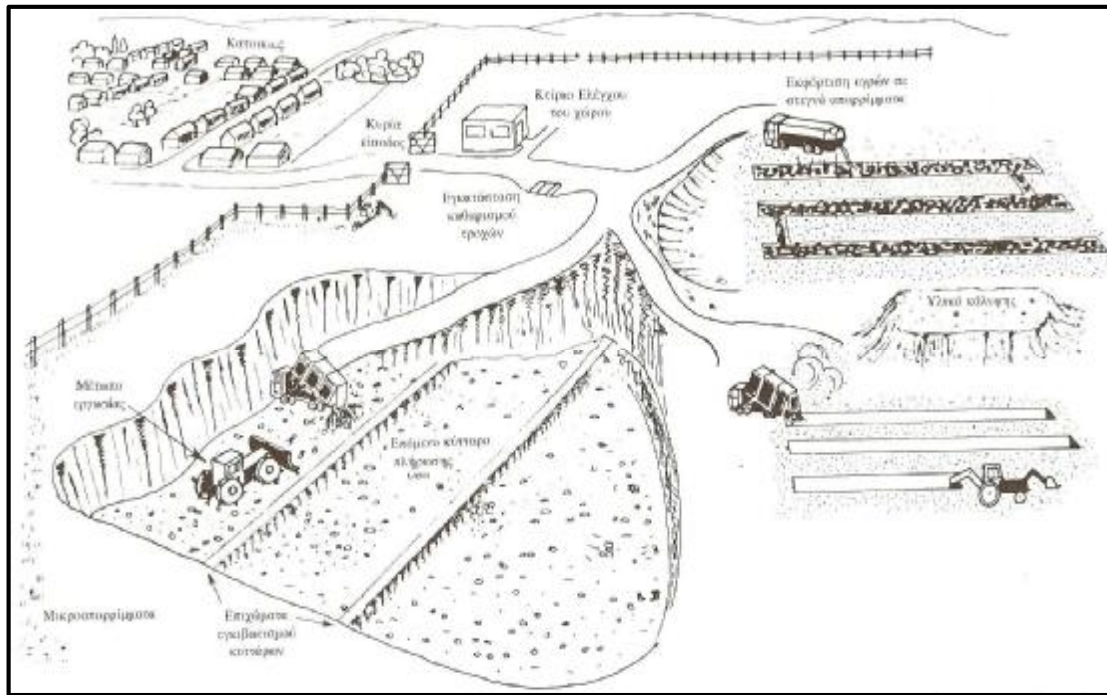


Εικόνα 7: Πλήρωση τάφρου με υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. [4]

- ▶ Πλήρωση τάφρου με υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα

Στο σχέδιο της Εικόνας 7 παριστάνεται η τομή χώρου πλήρωσης με απορρίματα τάφρου, με τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα κοντά στον πυθμένα (με ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους 1μ).

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε τοποθεσίες όπου υπάρχουν φυσικές ή τεχνητές κοιλότητες και μπορούν να πραγματοποιηθούν εκεί εργασίες πλήρωσης με απορρίματα, όπως χαράδρες, λεκάνες, λαγκάδια, δανειοθάλαμοι, λατομεία, έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί γι' αυτό το σκοπό.



Εικόνα 8: Χώρος συνδιάθεσης απορριμμάτων. [4]

▸ Χώρος συνδιάθεσης απορριμμάτων

Στο σχέδιο της Εικόνας 8 παριστάνεται αξονομετρική άποψη του χώρου διάθεσης απορριμμάτων με συνδυασμό όλων των παραπάνω τρόπων και επιπλέον ανάμιξη λυμάτων και απορριμμάτων για την επιτάχυνση της αναεροβίου βιοαποδόμησης, με στόχο τη σύλληψη των παραγόμενων αερίων, για χρησιμοποίησή τους σε συστήματα ανάκτησης ενέργειας.

1.5. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ενός ΧΥΤΑ

Πλεονεκτήματα της υγειονομικής ταφής [5]:

- ▶ Όπου υπάρχει διαθέσιμη γη, η υγειονομική ταφή είναι συνήθως η πιο οικονομική μέθοδος.
- ▶ Η αρχική επένδυση είναι χαμηλή, συγκρινόμενη με τεχνικές μείωσης του όγκου των απορριμμάτων και ανάκτησης υλικών και ενέργειας.
- ▶ Ο χώρος υγειονομικής ταφής μπορεί να δεχτεί μη τοξικά απορρίμματα όλων των τύπων, εξαιρίζοντας την αναγκαιότητα διαχωρισμού ιδιαίτερων υλικών.
- ▶ Έχουμε παραγωγή βιοαερίου, το οποίο είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.
- ▶ Η ανάπλαση μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ προσφέρει κατάλληλους χώρους για πάρκα, αθλητικές εγκαταστάσεις, χώρους αναψυχής, parking καθώς και άλλες χρήσεις.
- ▶ Η μέθοδος της υγειονομικής ταφής είναι ιδιαίτερα εύκαμπτη. Τυχόν αυξημένες ποσότητες απορριμμάτων μπορούν να διατεθούν με ελάχιστο ή και καθόλου επιπρόσθετο προσωπικό και εξοπλισμό.
- ▶ Ένας καλοσχεδιασμένος ΧΥΤΑ δεν αλλοιώνει την ευρύτερη περιοχή.

Μειονεκτήματα της υγειονομικής ταφής [5]:

- ▶ Μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ, η γη μπορεί να είναι ακατάλληλη για κάποιες χρήσεις λόγω ρύπανσης.
- ▶ Σε περιοχές με αυξημένο πληθυσμό και έντονη χρήση γης είναι δυνατόν να προκύπτουν προβλήματα υψηλού οικονομικού κόστους, λόγω της μεγάλης αξίας της γης ή/και της μεγάλης απόστασης μεταξύ των χώρων παραγωγής και διάθεσης.
- ▶ Χώροι που βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες περιοχές είναι πιθανό να προκαλέσουν αντιδράσεις από μέρους των κατοίκων.
- ▶ Σε χώρους εναπόθεσης απορριμμάτων, παρατηρούνται συχνά καθιζήσεις και για το λόγο αυτό απαιτούνται έργα υποστήριξης σε περίπτωση οικοδόμησης μετά την αποκατάσταση του ΧΥΤΑ.

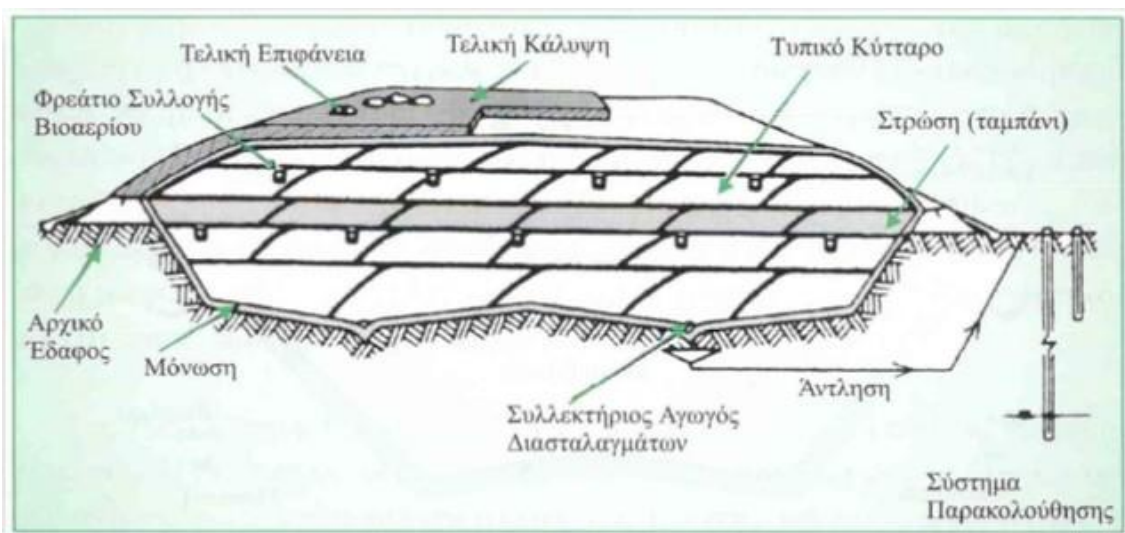
- ▶ Ανεξαρτήτως σχεδιασμού, υπάρχει πάντα ένας μικρός κίνδυνος ρύπανσης από τη λειτουργία των ΧΥΤΑ
- ▶ Το βιοαέριο, αν δεν τεθεί υπό έλεγχο , μπορεί να είναι επικίνδυνο (πυρκαγιά, έκρηξη, συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου)
- ▶ Η ανάκτηση ενέργειας από ΧΥΤΑ δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική
- ▶ Μπορεί να υπάρξει όχληση λόγω θορύβου, οσμών, διέλευσης οχημάτων και αισθητικής υποβάθμισης, όπως με όλες τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας απορριμμάτων.

1.6.Διεργασίες στο κυρίως σώμα του ΧΥΤΑ

Η απορριμματική μάζα του ΧΥΤΑ μαζί με τις μονώσεις και τις καλύψεις, αποτελεί ένα ιδιαίτερο οικοσύστημα (μικρόβια, αδρανή υλικά, οργανικό υπόστρωμα), το οποίο χαρακτηρίζεται από την αυτοοργάνωσή του και τις συνθήκες περιβάλλοντος (υγρασία, θερμοκρασία, οξύτητα κτλ) στις οποίες λειτουργεί (Palmizano et al., 1996). Πρόκειται για έναν βιοαντιδραστήρα, δηλαδή έναν χώρο όπου γίνεται βιοαποδόμηση οργανικής ύλης δια μέσου μικροβιακών οργανικών, με παραγωγή διασταλαγμάτων, βιοαερίου και νέας βιομάζας ενώ εκλύεται θερμότητα και απομένουν αποδομημένα Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ). Οι ρυθμοί παραγωγής εξαρτώνται από τη φύση των ΑΣΑ, την υγρασία, την παρουσία θρεπτικών συστατικών (θετικό) και τοξικών ουσιών (αρνητικό), το pH και τη θερμοκρασία.

Ο ΧΥΤΑ ενεργός βιοαντιδραστήρας για όσο διάστημα λαμβάνει χώρα αξιοσημείωτη βιοαποδόμηση. Ο χρόνος ενεργού ζωής του ΧΥΤΑ εξαρτάται από το ρυθμό βιοαποδόμησης. Έτσι η τεχνολογία των ΧΥΤΑ διαμορφώνεται και αναπτύσσεται αναφορικά με τους ρυθμούς βιοαποδόμησης, τους οποίους ο διαχειριστής ή ο μηχανικός επιθυμεί να ελέγχει. Έτσι, δίνεται ιδιαίτερη σημασία στα χαρακτηριστικά των ΑΣΑ, στην προεπεξεργασία τους, στον έλεγχο της υγρασίας μέσα στο σώμα του ΧΥΤΑ και στον έλεγχο των παραγόμενων διασταλαγμάτων και βιοαερίου.

Συνεπώς, ένας βασικός στόχος είναι να ελέγχονται τα προϊόντα της βιοαποδόμησης για τόσο χρόνο όσο είναι απαραίτητος για να σταθεροποιηθούν ή αδρανοποιηθούν τα ΑΣΑ σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην αποτελούν κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία ή για το φυσικό περιβάλλον. Αυτή η αδρανοποίηση ή εξουδετέρωση των ΑΣΑ γίνεται με φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες.



Εκόνα 9: Ενδεικτικές διεργασίες και χαρακτηριστικά ενός ΧΥΤΑ [6]

Φυσικές διεργασίες [7]

- ▶ Συμπύκνωση των ΑΣΑ, η οποία επηρεάζει δραστικά τη συμπεριφορά του ΧΥΤΑ.
- ▶ Διάλυση ευδιάλυτων υλικών, από το νερό, το οποίο μεταφέρει ουσίες μη αντιδρούσες.
- ▶ Συναγωγή.
- ▶ Απορρόφηση διαλυμένων ρύπων.
- ▶ Προσρόφηση.

Χημικές διεργασίες [7]

- ▶ Οξείδωση από το παγιδευμένο οξυγόνο το οποίο σύντομα εξαντλείται.
- ▶ Αντιδράσεις μετάλλων – οξέων, εξαιτίας της παρουσίας των οργανικών οξέων και CO₂.

Βιολογικές διεργασίες [7]

- ▶ Τα οργανικά υλικά βιοαποδομούνται σταδιακά με μια διαδικασία που περιγράφεται στο κεφ.2, παρ. 2.2.

1.7.Βιώσιμος ΧΥΤΑ

Η υγειονομική ταφή των βιοαποδομήσιμων υλικών βγαίνει προς περιορισμό και ενδεχομένως προς απαγόρευση στις χώρες της ΕΕ. Οι βασικοί λόγοι για τους περιορισμούς είναι οι εξής:

- ▶ Η έμμεσα επιβαλλόμενη διαλογή των υλικών διευκολύνει την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση υλικών.
- ▶ Εφόσον γίνεται ταφή οργανικών ο ΧΥΤΑ παραμένει ενεργός για αρκετές δεκαετίες. Η συμπεριφορά του δεν είναι προβλέψιμη καθώς λείπουν οι μακροχρόνιες παρατηρήσεις ενώ η ποικιλία των ποιοτικών χαρακτηριστικών των ΑΣΑ δυσχεραίνει τη διαμόρφωση γενικών κανόνων. Επιπλέον δεν είναι εύκολα ελεγχόμενη η στεγάνωση ενώ τα συστήματα συλλογής διασταλαγμάτων και αερίων δεν είναι επισκευάσιμα, ούτε καν προσπελάσιμα.
- ▶ Το παραγόμενο βιοαέριο που οφείλεται στην παρουσία των οργανικών, αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και CO₂, περιέχει όμως και περισσότερες από εκατό άλλες συνιστώσες, πολλές από τις οποίες είναι τοξικές και δύσκολα ελεγχόμενες. Υπάρχουν εκτιμήσεις ότι η συμβολή του βιοαερίου των ΧΥΤΑ, διεθνώς, στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τη συμβολή της βιομηχανίας [8].

1.7.1.Η έννοια του βιώσιμου ΧΥΤΑ

Ο βιώσιμος ΧΥΤΑ (sustainable landfill) είναι ένα όρος που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια μετά την Agenda 21 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη (Knox, K and Associates, 2000). Ένας ΧΥΤΑ ορίζεται ως βιώσιμος αν, μιας γενιάς (30 χρόνια) από την απόθεση των τελευταίων ΑΣΑ στο ΧΥΤΑ, επιτυγχάνεται σταθεροποίηση, δηλαδή *κατάσταση οριστικής τελικής διάθεσης* (final storage quality), με τη έννοια ότι τόσο η εναπομείνασα μάζα στο σώμα του ΧΥΤΑ όσο και οι κάθε είδους εκροές και εκπομπές από αυτόν είναι περιβαλλοντικά αποδεκτές χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Αν η διάρκεια λειτουργίας ενός ΧΥΤΑ είναι N χρόνια, τότε βιωσιμότητα σημαίνει επίτευξη σταθεροποίησης σε N+30 χρόνια από την έναρξη λειτουργίας του ΧΥΤΑ.

Έχοντας προσδιορίσει το στόχο του βιώσιμου ΧΥΤΑ και το χρονικό ορίζοντα επίτευξής του, χρειαζόμαστε δείκτες επίδοσης για έλεγχο. Από καθαρά τεχνική άποψη ο προσδιορισμός της κατάστασης οριστικής τελικής διάθεσης συνεπάγεται συσχετισμό με: (1) τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων, (2) το ρυθμό παραγωγής και την ποιότητα του βιοαερίου και (3) την ποιότητα των διασταλαγμάτων.

1.8.Κατηγοριοποίηση των ΧΥΤΑ με βάση το μέγεθος

Η κατηγοριοποίηση ανάλογα με το μέγεθος προκύπτει εμμέσως και στη νομοθεσία όπου υποδεικνύεται ότι οι ΧΥΤΑ πρέπει να διαμορφώνονται σύμφωνα με τη βέλτιστη διαθέσιμη τεχνολογία σε συνδυασμό με την ποσότητα που εισρέει σ' αυτούς. Επίσης το μέγεθος των 60 στρεμμάτων αναφέρεται ως όριο μεταξύ μεσαίου και μεγάλου ΧΥΤΑ. Διακρίνουμε συνεπώς κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος, το οποίο όμως εδώ ορίζεται ως η συνολική ποσότητα αποβλήτων που εισέρχεται στο ΧΥΤΑ καθ' όλη της ενεργού ζωής του [9].

Λαμβάνοντας υπόψη και άλλες αναφορές μεγέθους στη νομοθεσία, αλλά και τις συνθήκες στη χώρα μας, διακρίνουμε τις τρεις ακόλουθες κατηγορίες ως εξής:

- ▶ Μικρό μέγεθος : 10000 – 300000 τόνοι
- ▶ Μεσαίο μέγεθος : 300000 – 1100000 τόνοι

- ▶ Μεγάλο μέγεθος : 1100000 – 30000000 τόνοι.

Σημειώνεται ενδεικτικά ότι 100000 κάτοικοι σε 20 χρόνια παράγουν περίπου 750000 τόνους απορριμμάτων.

1.9.Κριτήρια και διαδικασίες αποδοχής αποβλήτων

Αναγνωρίζονται δύο τρόποι για τον καθορισμό της διαδικασίας αποδοχής αποβλήτων σε ΧΥΤΑ:

- ▶ Θέσπιση καταλόγου αποδεκτών ή μη αποδεκτών αποβλήτων, ανάλογα με τη φύση και την προέλευσή τους.
- ▶ Θέσπιση μεθόδων ανάλυσης αποβλήτων και οριακών τιμών των χαρακτηριστικών των αποδεκτών αποβλήτων.

Στη προκειμένη περίπτωση ο στόχος είναι, σε συνδυασμό με τις τεχνικές προδιαγραφές για τη μόνωση των ΧΥΤΑ, η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας ρύπανσης και των απαιτήσεων κατά τη φάση της μεταφροντίδας (Κουσκούρης και Στοϊλόπουλος, 2002). Οι γενικές αυτές κατευθυντήριες γραμμές θα πρέπει να μετατραπούν από κάθε κράτος – μέλος σε συγκεκριμένες πρακτικές και ελέγξιμες οδηγίες, κάτι που δεν έχει γίνει ακόμα (Κουσκούρης και Στοϊλόπουλος, 2002). Σημειώνεται ότι η άδεια λειτουργίας του ΧΥΤΑ θα πρέπει να προσδιορίζει επακριβώς τους τύπους και τις ποσότητες των αποβλήτων που επιτρέπεται να εναποτίθενται σε αυτόν.

Τα κριτήρια ή οι κανόνες αποδοχής μπορεί να είναι: Απαιτήσεις για πλήρη γνώση της σύνθεσης των αποβλήτων, περιορισμοί στην ποσότητα οργανικών υλών ή άλλων δυνητικά επικίνδυνων συστατικών, περιορισμοί ως προς την πιθανή αποπλυσιμότητα συγκεκριμένων συστατικών, κτλ.

Ο γενικός χαρακτηρισμός και οι δοκιμές των αποβλήτων πρέπει να βασίζονται στην ακόλουθη ιεράρχηση τριών επιπέδων (Κοινοτική Οδηγία 99/31/ΕΚ):

Επίπεδο 1

Βασικός χαρακτηρισμός, δηλαδή ενδεδειγμένος προσδιορισμός, με τυποποιημένες μεθόδους ανάλυσης και δοκιμασίας της συμπεριφοράς, της βραχυπρόθεσμης και μεσοπρόθεσμης αποπλυντικής συμπεριφοράς ή/και των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των αποβλήτων.

Επίπεδο 2

Έλεγχος συμμόρφωσης, δηλαδή περιοδική δοκιμή με απλούστερες τυποποιημένες μεθόδους ανάλυσης και δοκιμασίας της συμπεριφοράς για τον προσδιορισμό του κατά πόσον τα συγκεκριμένα απόβλητα πληρούν τους όρους της άδειας ή/και τα ειδικότερα κριτήρια αναφοράς.

Επίπεδο 3

Επιτόπια επαλήθευση, δηλαδή εξακρίβωση, με ταχεία μέθοδο του ότι τα απόβλητα είναι τα ίδια με εκείνα που υποβλήθηκαν στη δοκιμή συμμόρφωσης και που περιγράφονται στα συνοδευτικά έγγραφα. Η επιτόπια επαλήθευση μπορεί να συνίσταται απλώς σε οπτική εξέταση ενός φορτίου αποβλήτων πριν και μετά την εκφόρτωσή τους στο χώρο ταφής.

2 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ – ΣΤΑΔΙΑ

2.1 Αναερόβια Χώνευση

Η αναερόβια χώνευση είναι η διαδικασία κατά την οποία αναερόβια βακτήρια σε συνθήκες πλήρους έλλειψης οξυγόνου μεταβολίζουν οργανικές ουσίες παράγοντας βακτηριακή μάζα και αέρια προϊόντα.

Τα βακτήρια είναι υδατικοί μικροοργανισμοί και για το λόγο αυτό η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα όταν το ποσοστό υγρασίας είναι τουλάχιστον 60%. Το νερό αποτελεί το ζωτικό περιβάλλον μέσα στο οποίο διαβιώνουν και αναπτύσσονται τα βακτήρια. Έτσι, κατά την αναερόβια χώνευση επιδιώκεται η περίσσεια νερού για να μην αποτελεί το νερό περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης βακτηρίων. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι δεν είναι απαραίτητο τα απορρίμματα να είναι εμβαπτισμένα στο νερό για την επίτευξη αναερόβιας χώνευσης.

Σε γενικές γραμμές, η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης επιτελείται από ένα μικροβιακό οικοσύστημα σε τρία κύρια στάδια (στο πρώτο στάδιο είναι η αερόβια φάση ενώ το δεύτερο στάδιο είναι μεταβατικό) και λαμβάνει χώρα στη διεπιφάνεια μεταξύ στερεού οργανικού υλικού (απορρίμματα) και νερού (ελεύθερο ή σαν υγρασία). Το στερεό υπόστρωμα των απορριμμάτων αποτελεί την τροφή ενός ετερογενούς μικροβιακού πληθυσμού που ζει στην υδατική φάση (δηλαδή στην υγρασία των απορριμμάτων και σε ελεύθερο νερό) και ο οποίος μεταβολίζει τα διαλυμένα συστατικά των στερεών αποβλήτων τελικά σε αέρια προϊόντα (κυρίως διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο).

2.2 Στάδια Αποσύνθεσης Απορριμμάτων

Πολυάριθμες μελέτες έχουν δείξει ότι η σταθεροποίηση των απορριμμάτων γίνεται σε πέντε διαδοχικές φάσεις [10]. Ο ρυθμός καθώς και τα χαρακτηριστικά του βιοαερίου που παράγονται σε ένα Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), ποικίλουν

από τη μία φάση στην άλλη και απεικονίζουν τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα σε αυτή. Στους πραγματικούς σε διαστάσεις ΧΥΤΑ σε σχέση με τις εργαστηριακές προσομοιώσεις ΧΥΤΑ, όπου η τοποθέτηση των στερεών αποβλήτων διαρκεί μεγάλο χρονικό διάστημα προκειμένου να γεμίσει ένα κελί, παρατηρούνται φαινόμενα επικάλυψης των φάσεων, γεγονός που ανακλάται και στα χαρακτηριστικά του παραγόμενου βιοαερίου.

▸ *Φάση I*

Η αρχική φάση η οποία είναι φάση προσαρμογής, σχετίζεται με την αρχική τοποθέτηση των στερεών αποβλήτων και τη συγκέντρωση υγρασίας μέσα στο ΧΥΤΑ. Παρατηρείται μια περίοδος εγκλιματισμού - ή αρχική φάση υστέρησης - η οποία διαρκεί από μερικές μέρες μέχρι εβδομάδες έως ότου αναπτυχθούν ικανά επίπεδα υγρασίας για την υποστήριξη μιας μικροβιακής κοινότητας. Η φάση αυτή είναι αερόβια και το οξυγόνο προέρχεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα που εγκλωβίζεται στα διάκενα των απορριμμάτων κατά την εναπόθεσή τους. Κατά τη φάση αυτή συμβαίνουν διάφορες μεταβολές στα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά του κελιού, προκειμένου να δημιουργηθούν ευνοϊκές συνθήκες για τη βιοχημική αποσύνθεση των απορριμμάτων.

Συγκεκριμένα αρχίζει να παρατηρείται αύξηση στη συγκέντρωση των λιπαρών οξέων, που οφείλεται στον ταχύ μεταβολισμό των οξυγενών βακτηρίων και στη μη κατανάλωσή τους από τα μεθανοβακτήρια, αφού τα τελευταία δεν έχουν ακόμη αρχίσει να αναπτύσσονται. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι το βασικό αέριο κατά το στάδιο αυτό και παράγεται σε ισομοριακές ποσότητες με το καταναλισκόμενο οξυγόνο, λόγω της δραστηριότητας των αερόβιων βακτηρίων. Η βασική πηγή τόσο των αερόβιων όσο και των αναερόβιων μικροοργανισμών που είναι υπεύθυνα για την αποδόμηση των απορριμμάτων, είναι τα ίδια τα απορρίμματα και το χώμα που χρησιμοποιείται για την κάλυψή τους.

Φάση II

Στη δεύτερη φάση - ή μεταβατική φάση - η ποσότητα οξυγόνου του κελιού αρχίζει να μειώνεται και γίνεται μετάβαση από αερόβιο περιβάλλον σε αναερόβιο, σαν αποτέλεσμα της κατανάλωσης του οξυγόνου από τα αερόβια βακτήρια. Καθώς η αναερόβια αποσύνθεση ξεκινά τα νιτρικά και τα θειικά, που μπορούν να λειτουργήσουν σαν δέκτες ηλεκτρονίων σε βιολογικές αντιδράσεις, ανάγονται σε αέριο άζωτο ($N_{2(g)}$) (απονιτροποίηση) και υδρόθειο (H_2S). Τα μέλη της μικροβιακής κοινότητας που είναι υπεύθυνα για τη μετατροπή του οργανικού υλικού των απορριμμάτων σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα ξεκινούν μία διαδικασία τριών βημάτων, που περιγράφονται στη φάση III με μετατροπή των πολύπλοκων οργανικών ενώσεων σε απλούστερες όπως οργανικά οξέα και ενδιάμεσα παράγωγα. Η διεργασία αυτή διέπεται στη διεπιφάνεια μεταξύ στερεού οργανικού υλικού (απορρίμματα) και νερού (ελεύθερο ή σαν υγρασία). Το στερεό υπόστρωμα των απορριμμάτων αποτελεί την τροφή του μικροβιακού πληθυσμού που ζει στην υδατική φάση. Τα λιπαρά οξέα, λόγω της αυξημένης δράσης των οξυγενών βακτηρίων φτάνουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις τους (αύξηση COD) και το pH των εκχυλισμάτων αρχίζει να μειώνεται.

▸ *Φάση III*

Στη φάση αυτή που λέγεται και όξινη φάση, η μικροβιακή φάση που ξεκίνησε στη φάση II συνεχίζεται με την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων οργανικών οξέων και μικρότερων ποσοτήτων αέριου υδρογόνου.

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία των τριών φάσεων, περιλαμβάνει τον χημικής ή ενζυμικής δράσης μετασχηματισμό (υδρόλυση) μεγαλομοριακών ενώσεων σε ενώσεις κατάλληλες για κατανάλωση από μικροοργανισμούς ως πηγή ενέργειας και κυτταρικού άνθρακα, όπως λιπαρά οξέα, σάκχαρα, αμινοξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία και υδρογόνο. Οι μικροοργανισμοί που σχετίζονται με αυτές τις μετατροπές περιγράφονται σαν μη μεθανογενείς, αποτελούμενοι από επαμφοτερίζοντα και υποχρεωτικά αναερόβια βακτήρια, όπως βάκχυλοι, τα κλοστρίδια και τα εντεροβακτήρια.

Το δεύτερο βήμα στη διαδικασία αυτή (οξυγένεση) περιλαμβάνει το μετασχηματισμό, από μικροοργανισμούς γνωστούς ως οξυγενή βακτήρια, των προϊόντων του πρώτου βήματος σε ενδιάμεσα προϊόντα, κυρίως οξικό οξύ (CH_3COOH) και μικρές συγκεντρώσεις φουλβικών και άλλων πολύπλοκων οξέων. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από την μερική πίεση του υδρογόνου καθώς οι οργανισμοί έχουν να καταλύσουν ενδόθερμες αντιδράσεις κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες σε pH γύρω στο 7 (Schumacher, 1983). Η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα φτάνει σε πολύ υψηλά ποσοστά (90%) (Barlaz, 1988), ενώ παράγονται μικρότερες ποσότητες αερίου υδρογόνου. Η μετατροπή των ενδιάμεσων προϊόντων (γαλακτικό οξύ, μεθανόλη) σε απλούστερες ενώσεις, όπως το οξικό οξύ και το διοξείδιο του άνθρακα, που αποτελούν και το πρωταρχικό υπόστρωμα των οξυγενών βακτηρίων, είναι θερμοδυναμικά δυνατή μόνο σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις υδρογόνου. Γι' αυτό και τα οξυγενή βακτήρια λειτουργούν συντροφικά με βακτήρια που καταναλώνουν υδρογόνο. Για τα οξυγενή βακτήρια οι γνώσεις είναι περιορισμένες. Πρόκειται για αυστηρά αναερόβια βακτήρια που συχνά αναφέρονται και σαν υποχρεωτικοί πρωτονικοί απαγωγείς ή υποχρεωτικοί παράγωγοι υδρογόνου, καθώς ο ρόλος τους σχετίζεται με τη διατήρηση της μερικής πίεσης του υδρογόνου σε χαμηλά επίπεδα.

▸ Φάση IV

Αναερόβια σταθερή μεθανογενής φάση. Στη φάση αυτή μια δεύτερη ομάδα μικροοργανισμών, η οποία μετατρέπει το οξικό οξύ και το υδρογόνο σε διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο, γίνεται επικρατέστερη. Σε μερικές περιπτώσεις οι οργανισμοί αυτοί ξεκινούν να αναπτύσσονται προς το τέλος της φάσης III. Ο σχηματισμός του μεθανίου αποτελεί το τρίτο βήμα της διαδικασίας των τριών βημάτων και ονομάζεται μεθανογένεση. Οι μικροοργανισμοί που είναι υπεύθυνοι γι' αυτόν το μετασχηματισμό είναι αυστηρά αναερόβιοι, καλούνται μεθανογενείς και περιλαμβάνουν δύο τύπους βακτηρίων:

1. Εκείνους που ανάγουν το διοξείδιο του άνθρακα μετατρέποντας το σε μεθάνιο (απόδοση: 135,6 KJ/mole παραγόμενου μεθανίου) [11]και
2. Εκείνους που αποκαρβοξυλιώνουν το οξικό οξύ σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα (απόδοση: 31 KJ/mole παραγόμενου μεθανίου) [11].

Τα μεθανογενή βακτήρια μπορούν να χρησιμοποιούν μόνο ένα περιορισμένο αριθμό υποστρωμάτων όπως το μυρμηκικό οξύ, τη μεθανόλη, τις μεθυλαμίνες και το υδρογόνο σε συνδυασμό με το διοξείδιο του άνθρακα και το οξικό οξύ. Σε χωνευτές ιλύος έχει εκτιμηθεί ότι το 70% του παραγόμενου μεθανίου προέρχεται από το οξικό οξύ [12], ενώ δεν έχει γίνει αντίστοιχη εκτίμηση για ΜΕΔΑ. Στον πίνακα φαίνονται όλες οι αντιδράσεις που γίνονται σε κάθε βήμα καθώς και η συνολική αντίδραση των τριών βημάτων.

Πίνακας 2 : Οι αντιδράσεις των τριών βημάτων [13]

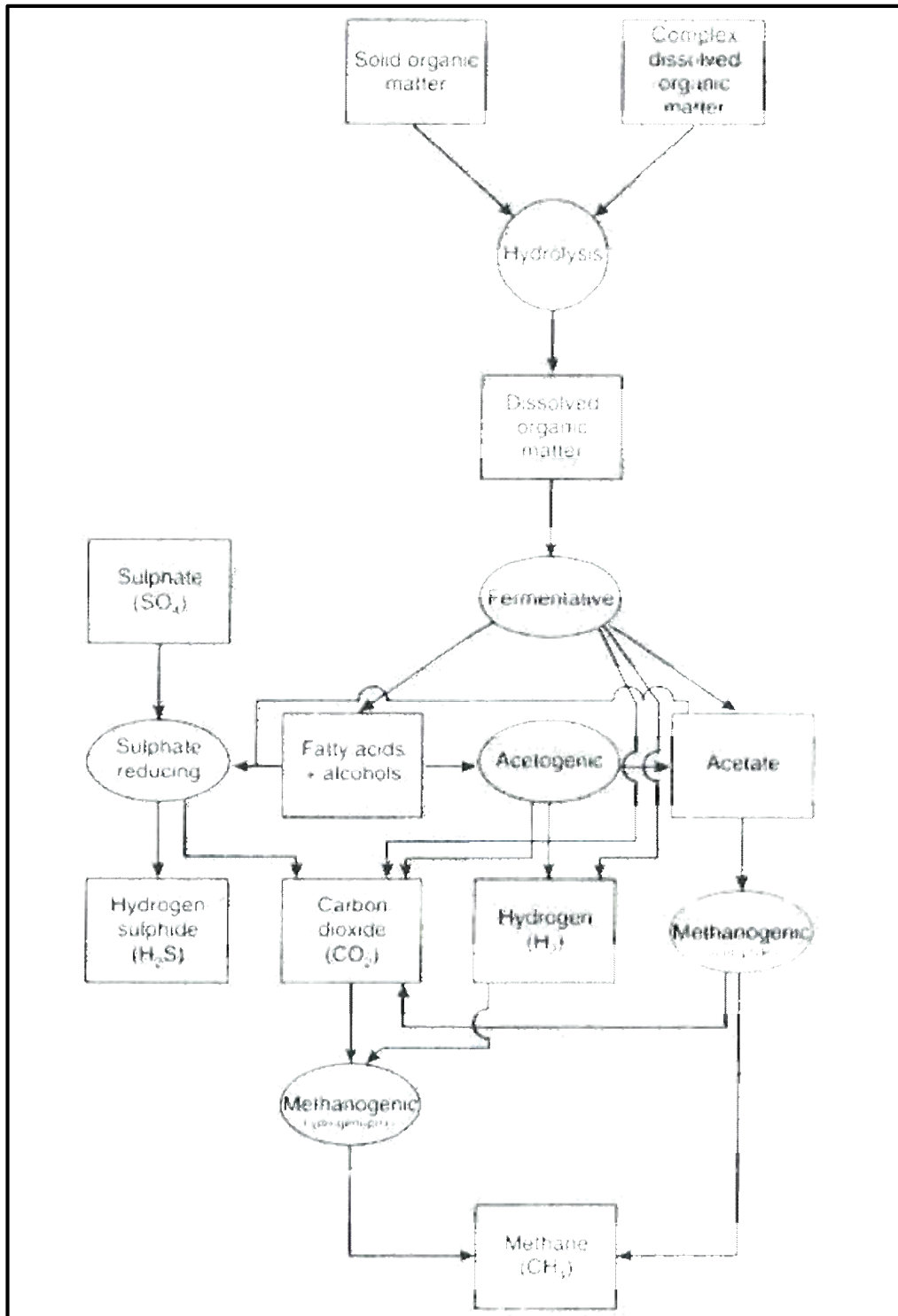
Βήμα 1 – Ζύμωση	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CO_2 + 2C_2H_5OH$
	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow C_3H_7COOH + 2H_2 + 2CO_2$
	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2$
Βήμα 2 – Παραγωγή H_2	$2C_2H_5OH \rightarrow 2CH_3COOH + 4H_2$
	$C_2H_5COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
	$C_3H_7COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + CO_2 + 2H_2$
	$C_6H_5COOH + 6H_2O \rightarrow 3CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
Βήμα 3 – Αναγωγή CO_2	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
Βήμα 3 – Αποκαρβοξυλίωση	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$
CH_3COOH	
Ολική Αντίδραση	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$

Στη φάση IV η παραγωγή του μεθανίου και των οξέων προχωράει ταυτόχρονα, παρά το ότι ο ρυθμός παραγωγής οξέων μειώνεται δραστικά. Επειδή σε αυτή τη φάση τα οξέα και το υδρογόνο που παράγονται από τα οξυγενή βακτήρια μετατρέπονται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, το pH του ΧΥΤΑ βρίσκεται στην ουδέτερη περιοχή κυμαινόμενο από 6,8 έως 8. αντίστοιχα το pH των εκχυλισμάτων θα αυξηθεί, ενώ οι συγκεντρώσεις BOD_5 και COD καθώς και η αγωγιμότητα τους θα μειωθούν. Η σύσταση του βιοαερίου κυμαίνεται από 50-70% σε μεθάνιο και 30-50% σε διοξείδιο του άνθρακα. Κατά τη φάση αυτή μικρές ποσότητες αζώτου και υδρόθειου είναι

παρούσες. Αν η συγκέντρωση του μεθανίου είναι μικρότερη του 50% τότε είναι πιθανή η παρεμπόδιση της παραγωγής του λόγω υψηλών συγκεντρώσεων υδρογόνου ή λόγω μη ευνοϊκών περιβαλλοντικών συνθηκών [11].

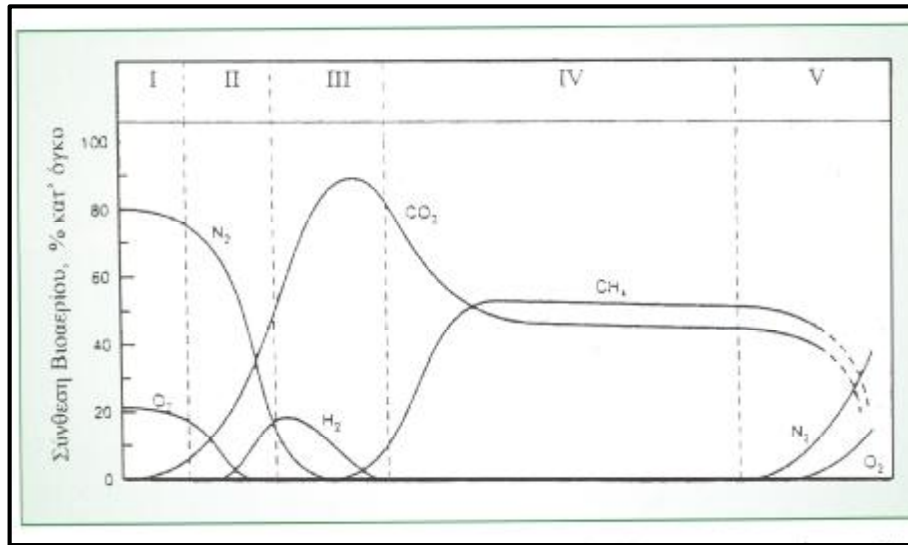
▸ *Φάση V*

Η φάση ωρίμανσης λαμβάνει χώρα αφού τα ευκόλως βιοδιασπώμενα οργανικά υλικά των απορριμμάτων μετατραπούν σε διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο στη φάση IV. Καθώς η υγρασία συνεχίζει να εξαπλώνεται μέσα στη μάζα των απορριμμάτων, τμήμα από τα βιοδιασπώμενα υλικά, που πριν δεν ήταν διαθέσιμα για αποδόμηση, σε αυτή τη φάση αρχίζουν να αποδομούνται. Ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου μειώνεται σημαντικά λόγω του ότι τα περισσότερα θρεπτικά έχουν απομακρυνθεί με τα εκχυλίσματα κατά τη διάρκεια των προηγούμενων φάσεων και το υπόστρωμα που παραμένει στο ΧΥΤΑ είναι αργά βιοαποδομήσιμο. Ανάλογα με τον τρόπο κλεισίματος του κελιού, υπάρχει πιθανότητα να ανιχνευτούν μικρές ποσότητες αζώτου και οξυγόνου στο εκλυόμενο βιοαέριο (αυτό συμβαίνει λόγω εισόδου ατμοσφαιρικού αέρα στο ΧΥΤΑ).



Εικόνα 10: Υποστρώματα και σημαντικές βακτηριακές ομάδες στα οικοσυστήματα παραγωγής μεθανίου [14].

Στο σχήμα (Σχήμα 11) φαίνεται η διαχρονική εξέλιξη και σύνθεση του παραγόμενου αερίου. Η διάρκεια κάθε φάσης εξαρτάται από την κατανομή και το βαθμό τεμαχισμού της οργανικής ύλης στο ΧΥΤΑ, τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών, την υγρασία των απορριμμάτων στο ΧΥΤΑ, τη ροή υγρασίας μέσα στα ΑΣΑ και το βαθμό αρχικής συμπίεσης των ΑΣΑ στη φάση της διάστρωσής τους. Μεγάλη συμπίεση σημαίνει μειωμένο ρυθμό παραγωγής αερίων, άρα μεγαλύτερη διάρκεια τη ενεργού ζωής.



Εικόνα 11: Διαχρονική εξέλιξη των ποιοτικών χαρακτηριστικών του βιοαερίου από ΧΥΤΑ [10].

Σε ενεργούς ΧΥΤΑ είναι φυσικό να υπάρχει ταυτοχρόνως δραστηριότητα σε όλες τις παραπάνω φάσεις. Δηλαδή σε άλλα υλικά των ΑΣΑ εξελίσσεται η φάση I, σε άλλα η φάση II κ.ο.κ. Σε μερικά χρόνια είναι μετά το 'κλείσιμο' επικρατούν αποκλειστικά οι αναερόβιες διαδικασίες μέχρις ότου διασπασθεί όλη η οργανική ύλη. Είναι εξαιρετικά δύσκολο να προσεγγίσει κανείς αξιόπιστα το χρόνο πλήρους αδρανοποίησης. Ακόμα και δεκάδες χρόνια μετά το κλείσιμο, είναι πιθανό να παράγεται μεθάνιο (αν και σε πολύ μικρές ποσότητες).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές για τη σύνθεση του βιοαερίου ενός ΧΥΤΑ στους πρώτους 48 μήνες μετά την ταφή για ΑΣΑ από περιοχές των ΗΠΑ.

Πίνακας 3 : Ποσοστιαία κατανομή αερίων από ΧΥΤΑ στους πρώτους 48 μήνες μετά το κλείσιμο του ΧΥΤΑ (ή λεκάνης του) [8].

Μήνες από το Κλείσιμο	Μέση τιμή % κατ' όγκο		
	N ₂	CO ₂	CH ₄
0-3	5.2	88	5
3-6	3.8	76	21
6-12	0.4	65	29
12-18	1.1	52	40
18-24	0.4	53	47
24-30	0.2	52	48
30-36	1.3	46	51
36-42	0.9	50	47
42-48	0.4	51	48

2.3 Διάρκεια των φάσεων

Η διάρκεια κάθε φάσης ποικίλει εξαρτώμενη από την κατανομή των οργανικών συστατικών στον ΧΥΤΑ, την επάρκεια θρεπτικών, την υγρασία των απορριμμάτων, την πληρότητα σε υγρασία του ΧΥΤΑ και το επίπεδο της αρχικής συμπίεσης των απορριμμάτων. Έτσι όταν το υπόστρωμα είναι αδιάλυτο ή δυσδιάλυτο το πρώτο στάδιο περιορίζει το ρυθμό παραγωγής βιοαερίου. Αντίθετα, σε περίπτωση ευδιάλυτων στερεών, ο ρυθμός παραγωγής περιορίζεται από το τρίτο στάδιο, γιατί αυτό είναι και πιο αργό. Γενικά, από τις τρεις κύριες ομάδες μικροοργανισμών (μ/ο) που εμπλέκονται στην αναερόβια χώνευση (υδρολυτικά, οξυγενή, μεθανογενή), τα μεθανογενή είναι τα πιο αργά και ευαίσθητα σε ότι αφορά τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες βελτιστοποιούν το μεταβολισμό τους. Έτσι η έμφαση για τη βελτιστοποίηση της αναερόβιας χώνευσης δίνεται στις συνθήκες εκείνες που βελτιστοποιούν τον μεταβολισμό των μεθανογενών βακτηρίων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ευνοϊκές συνθήκες για μεθανογένεση.

Πίνακας 4 : Ευνοϊκές συνθήκες για μεθανογένεση [15].

Υγρασία: 60 – 80%

Παρουσία Θρεπτικών (οργανικό υλικό, άζωτο, φώσφορος και άλλα θρεπτικά)

Απουσία Οξυγόνου και άλλων τοξικών ουσιών

pH: 6,7 – 7,2

Αλκαλικότητα μεγαλύτερη από 2000 mg/l ισοδύναμα CaCO₃

Λιγότερα από 3000 mg/l οργανικού οξέος ισοδύναμα CH₃COOH

Θερμοκρασία: Μεσοφιλική (30 – 45 °C)

Θερμοφιλική (50 – 55 °C)

Για παράδειγμα αν τοποθετηθεί στον ΧΥΤΑ μεγάλη ποσότητα από χαμόκλαδα, τότε η αναλογία άνθρακα / αζώτου (C/N) καθώς και η ισορροπία των θρεπτικών μπορεί να μην είναι ικανοποιητική. Ομοίως, η παραγωγή του βιοαερίου από το ΧΥΤΑ μπορεί να επιβραδυνθεί, αν το επίπεδο υγρασίας δεν είναι κατάλληλο. Αυξάνοντας την πυκνότητα των υλικών που βρίσκονται στο ΧΥΤΑ προκαλείται μείωση της πιθανότητας η υγρασία να φτάσει σε όλα τα σημεία των απορριμμάτων και έτσι, μειώνεται ο ρυθμός βιομετατροπής και παραγωγής βιοαερίου.

Σε περίπτωση που οι συνθήκες οι οποίες επηρεάζουν την πορεία του τρίτου βήματος δεν είναι ευνοϊκές, παρατηρείται αδυναμία των μεθανογενών βακτηρίων να μεταβολίσουν το οξικό οξύ που παράγουν τα οξυγενή βακτήρια, τα οποία είναι και πιο γρήγορα στο μεταβολισμό τους και λιγότερο ευαίσθητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Αποτέλεσμα είναι η αύξηση της συγκέντρωσης των οξέων με ταυτόχρονη πτώση της τιμής του pH, το οποίο και αναχαιτίζει τη μεθανογενή δράση (ξίνισμα).

2.4 Αλληλεπίδραση μεταξύ των ειδών

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των ειδών στο περιβάλλον του ΧΥΤΑ είναι πολύπλοκη. Τα θειικά για παράδειγμα μπορούν να προκαλέσουν ανταγωνισμό ανάμεσα στα βακτήρια που καταναλώνουν τα θειικά και στα μεθανοβακτήρια, ανάλογα με τη συγκέντρωση κάθε πληθυσμού [16]. Σε υψηλές συγκεντρώσεις θεικών ο σχηματισμός από τα θειικά ευννοείται ενεργειακά σε αντίθεση με την αντίδραση σχηματισμού μεθανίου από διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο [17].

Σε υπερβολικά μεγάλες ποσότητες δεκτών ηλεκτρονίων, όπως οξυγόνου (O_2), νιτρικών ιόντων (NO_3^-), θεικών ιόντων (SO_4^{2-}), τρισθενούς σιδήρου [Fe(III)] και τετρασθενούς μαγγανίου [Mn(IV)], η παραγωγή μεθανίου σταματά (με εξαίρεση ίσως τα μη ανταγωνιστικά υποστρώματα) και όλος οργανικός άνθρακας μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα [18].

Η απουσία μικροβιακού πληθυσμού που χρησιμοποιεί σαν υπόστρωμα το υδρογόνο ανάγοντας τα θειικά, θα ήταν καταστροφική για τη μεθανογένεση, καθώς και η ισορροπία στη συγκέντρωση του υδρογόνου θα ανατρεπόταν και η παραγωγή σουλφιδίων θα δημιουργούσε ένα ιδιαίτερα τοξικό περιβάλλον για τα μεθανοβακτήρια σε συγκεντρώσεις από 50 – 200 mg/l [19]. Αντίθετα, σε χαμηλές συγκεντρώσεις θεικών, τα βακτήρια που ανάγουν τα θειικά μπορεί να δράσουν συντροφικά με εκείνα που καταναλώνουν ακετόνη.

Όλες οι προαναφερθείσες φάσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα με ρυθμό ο οποίος καθορίζεται από την πιο αργή διαδικασία – συνήθως τη μεθανογένεση [20] παρ' όλον ότι η υδρόλυση του στερεού οργανικού υποστρώματος μοιάζει πιθανό να είναι ο περιοριστικός παράγοντας σε ένα ΧΥΤΑ [21], όπου δεν υπάρχει καθόλου ή πολύ μικρή συγκέντρωση ενδιάμεσων προϊόντων στη διάρκεια των μικροβιακών διεργασιών.

Παρ' όλα αυτά, σε ένα ανομοιογενές σύστημα όπως αυτό ενός ΧΥΤΑ, όλοι οι πληθυσμοί των μικροβίων (υδρολυτικά, οξυγενή, ακετογενή, προπιογενή, μεθανογενή)

μπορεί να μην βρίσκονται σε ισορροπία σε κάθε περιοχή του ΧΥΤΑ και κάθε χρονική στιγμή. Σαν αποτέλεσμα αυτών, συχνά οι ΧΥΤΑ χαρακτηρίζονται από διάφορες χρονικές φάσεις που προκαλούνται από την επικράτηση διαφορετικών μικροβιακών πληθυσμών σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της ζωής τους.

2.5 Επίδραση εξωτερικών παραγόντων στη μεθανογένεση

Η επίδραση των εξωτερικών παραγόντων στη μεθανογένεση περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους

▶ Ατμοσφαιρική θερμοκρασία

Επηρεάζει τη θερμοκρασία των ανώτερων στρωμάτων του ΧΥΤΑ, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία αυτή να είναι παραπλήσια της ατμοσφαιρικής και χαμηλότερη της μεσοφιλικής, όπου κυρίως δρουν τα βακτήρια, μειώνοντας το ρυθμό απόδοσης βιοαερίου των ανωτέρων στρωμάτων.

▶ Βροχόπτωση, Τοπογραφία, Υδρογεωλογία

Ελέγχουν την ποσότητα νερού που διεισδύει (βροχοπτώσεις, παρείσδυση νερού από το έδαφος κλπ.) και επομένως τα επίπεδα υγρασίας της. Πρέπει να τονιστεί ότι οι ισχυρές βροχοπτώσεις οδηγούν σε παροδική μείωση του ποσοστού μεθανίου στο παραγόμενο βιοαέριο, καθώς ελαττώνεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ και εισέρχεται οξυγόνο, το οποίο είναι διαλυμένο στο νερό της βροχής. Επίσης ισχυρές βροχοπτώσεις γεμίζουν τους πόρους των ανωτέρων στρωμάτων του ΧΥΤΑ με νερό, γεγονός που εμποδίζει την κατακόρυφη ανοδική κίνηση του βιοαερίου και ενισχύει την πλευρική διάχυσή του [22].

▶ Ατμοσφαιρική πίεση

Η μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης δείχνει να επηρεάζει τον όγκο και τη σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου. Η διαφορά της πίεσης που επικρατεί στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ από την ατμοσφαιρική, μπορεί είτε να προκαλέσει την είσοδο αέρα στα ανώτερα στρώματά της δημιουργώντας έτσι αναερόβιες συνθήκες που είναι επιβλαβής για τα

μεθανοβακτήρια, είτε να δημιουργήσει τέτοιες συνθήκες που να οδηγήσουν στην αύξηση του παραγόμενου βιοαερίου. Από πειράματα (Young, 1990) διαπιστώθηκε ότι οι μεταβολές στην εκπομπή του βιοαερίου είναι αποτέλεσμα προσωρινών επιδράσεων εξαιτίας της αποθήκευσης του βιοαερίου στο κενό χώρο μεταξύ των απορριμμάτων, που ακολουθούν τις εξής γενικές αρχές:

1. Όταν η ατμοσφαιρική πίεση είναι σταθερή, ο ρυθμός εκπομπής βιοαερίου είναι σταθερός και ανεξάρτητος της πίεσης.
2. Όταν η ατμοσφαιρική πίεση αυξάνεται, ο ρυθμός μειώνεται αναλογικά με το ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται η πίεση.
3. Όταν η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται, ο ρυθμός αυξάνεται αναλογικά με το ρυθμό με τον οποίο μειώνεται η πίεση.

Όσον αφορά τη σύσταση του βιοαερίου, η βαρομετρική πίεση επηρεάζει τη σύσταση του σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 60 m από το ΧΥΤΑ, όπου οξείδωση μεθανίου παρατηρείται στα ανώτερα 120 cm του εδάφους. Σε αποστάσεις μικρότερες των 40 m η επίδραση της πίεσης δεν είναι σημαντική καθώς λόγω της υψηλότερης πίεσης εσωτερικά του ΧΥΤΑ η ροή βιοαερίου είναι σταθερή. Σε τέτοιες αποστάσεις οξείδωση μεθανίου παρατηρείται στα πρώτα 10 με 20 cm του εδάφους. Με την αύξηση της βαρομετρικής πίεσης ατμοσφαιρικός αέρας διεισδύει στο έδαφος αραιώνοντας το μεθάνιο όσο και το διοξείδιο του άνθρακα. Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα αυξάνεται τόσο από την οξείδωση του μεθανίου όσο και από τη μεταφορά του από την υγρή στην αέρια φάση καθώς με την εισροή ατμοσφαιρικού αέρα ελαττώνεται η μερική του πίεση [23].

▶ *Άλλοι παράγοντες*

Ο πάγος και το χιόνι καλύπτουν το έδαφος, εμποδίζοντας την έξοδο του βιοαερίου από το ΧΥΤΑ. Επίσης, ο άνεμος επηρεάζει την κίνηση του βιοαερίου σε ξηρά υψηλού πορώδους εδάφη σε βάθος ένα (1) με δύο (2) μέτρα, ενώ σε χουμικά, υψηλού κοκκώδους εδάφη, μερικά εκατοστά.

Η επίδραση ανέμων μεγάλης εντάσεως έχει σαν αποτέλεσμα την απομάκρυνση του βιοαερίου από την επιφάνεια του ΧΥΤΑ, γεγονός που συντελεί στην αύξηση του ρυθμού εξόδου του από το έδαφος.

Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι αν η περιοχή εμφανίζει σεισμικότητα, μπορεί να δημιουργηθούν ρήγματα εντός του ΧΥΤΑ τα οποία συντελούν στην αύξηση του εκπεμπόμενου βιοαερίου λόγω τόσο των νέων οδών διαφυγής όπου δημιουργούν τα ρήγματα όσο και από τη διαφυγή εγκλωβισμένου σε κοιλότητες αερίου [24].

2.6 Επίδραση εσωτερικών παραγόντων στη μεθανογένεση

Η παραγωγή βιοαερίου από ένα κελί επηρεάζεται από πολλούς περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως το οξυγόνο, το υδρογόνο, το pH, την αλκαλικότητα, τα θρεπτικά, τη θερμοκρασία, την ποσότητα νερού και διάφορους άλλους ανασταλτικούς παράγοντες. Η επίδραση αυτών των παραγόντων περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

► Οξυγόνο

Η απουσία ελεύθερου οξυγόνου είναι απαραίτητη για τη βιολογική δράση των αναερόβιων βακτηρίων. Το οξυγόνο που αρχικά υπάρχει στους πόρους των απορριμμάτων μετά την εναπόθεσή τους, καταναλώνεται τις πρώτες μέρες από τα αερόβια βακτήρια πριν την έναρξη της αναερόβια αποσύνθεσης. Οξυγόνο μπορεί να εισχωρήσει στο κελί από την ατμόσφαιρα λόγω διάχυσης. Η ποσότητα όμως αυτή περιορίζεται στα ανώτερα στρώματα του κελιού καθώς αερόβια βακτήρια που αναπτύσσονται στην ανώτερη ‘ζώνη’ των απορριμμάτων το καταναλώνουν, εμποδίζοντας την κίνησή του από την εξαγωγή βιοαερίου σε ένα κελί, είναι πιθανό να εισχωρήσει ατμοσφαιρικό οξυγόνο εξαιτίας κίνησης της αέριας μάζας, αναστέλλοντας τη παραγωγή μεθανίου. Παρά το γεγονός ότι δεν είναι γνωστά μεθανοβακτήρια σε μορφή σπορίων [25], εντούτοις η βιοκοινωνία των μεθανοβακτηρίων δεν καταστρέφεται τελείως και μετά την κατανάλωση του οξυγόνου επανεμφανίζεται.

▸ *Υδρογόνο*

Το υδρογόνο παράγεται τόσο κατά το στάδιο της ζύμωσης όσο και της οξυγένεσης από τη δράση των βακτηρίων. Τα υδρολυτικά βακτήρια παράγουν υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα και οξικό οξύ σε χαμηλές πιέσεις υδρογόνου, ενώ σε υψηλές πιέσεις παράγουν υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα, αιθανόλη, βουτυρικό και προπιονικό οξύ [26]. Τα τρία τελευταία οργανικά συστατικά, μπορούν να αποδομηθούν περαιτέρω από τα οξυγενή βακτήρια σε χαμηλές πιέσεις υδρογόνου. Η μετατροπή του προπανικού οξέος απαιτεί μερική πίεση υδρογόνου κάτω των $9 \cdot 10^{-5}$ atm [26]. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση που αυξηθεί η μερική πίεση του υδρογόνου, το προπιονικό οξύ και σε κάποια έκταση το βουτυρικό οξύ, δεν θα αποδομηθούν περαιτέρω, ενδεχομένως προκαλώντας υπερσυσσώρευση πτητικών οργανικών οξέων, μείωση του pH και αναστολή της μεθανογένεσης [27].

▸ *pH και Αλκαλικότητα*

Τα αναερόβια βακτήρια και κυρίως τα μεθανογενή παρουσιάζουν ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης σε εύρος pH 7,0 – 7,2, ενώ μπορούν να αναπτυχθούν σε εύρος μεταξύ 6,0 – 8,0 [28]. Τα υδρολυτικά και τα οξυγενή βακτήρια καθώς και εκείνα που ανάγουν τα θειικά μπορούν να επιβιώσουν σε μεγαλύτερο εύρος τιμών pH. Πτώση pH κάτω του 6,0 μπορεί να αποβεί τοξική για τα μεθανοβακτήρια επηρεάζοντας το μεταβολισμό τους και αλλάζοντας την ισορροπία των ενζυμικών αντιδράσεων. Γενικά αν τα μεθανοβακτήρια πιέζονται λόγω δυσμενών περιβαλλοντικών παραγόντων, η ικανότητά τους να μεταβολίζουν το υδρογόνο και το οξικό οξύ σε μεθάνιο περιορίζεται, και ενδεχόμενα την αναστολή της παραγωγής μεθανίου, η οποία προκαλεί περαιτέρω μείωση του pH. Τελικά, κάτω από αυτές τις συνθήκες, η παραγωγή μεθανίου σταματά. Αρχικά συναντώνται όξινα περιβάλλοντα, όμως μετά από κάποιο χρονικό διάστημα το pH γίνεται ουδέτερο. Συνεπώς μη βέλτιστες συνθήκες pH δε συναντώνται για μεγάλη περίοδο.

Η αλκαλικότητα εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να εξουδετερώνει τα οξέα. Σε τιμές pH μεταξύ 6,0 – 8,0 το σύστημα διοξειδίου του άνθρακα – όξινου ανθρακικού είναι η κύρια συνιστώσα της ολικής αλκαλικότητας. Η αλκαλικότητα όξινου

ανθρακικού, το pH και το διοξείδιο του άνθρακα, αλληλοσυσχετίζονται στις αναερόβιες διεργασίες [29].

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι το οικοσύστημα των μεθανοβακτηρίων είναι ιδιαίτερα εύθραυστο και η ισορροπημένη σχέση μεταξύ των ομάδων των βακτηρίων που συμμετέχουν στην μεθανογένεση ιδιαίτερα κρίσιμη για την καλή λειτουργία του συστήματος και κατ' επέκταση για την παραγωγή μεθανίου.

▸ *Θειικά*

Τόσο τα μεθανοβακτήρια όσο και εκείνα τα βακτήρια που ανάγουν τα θειικά, χρησιμοποιούν σαν υπόστρωμα το οξικό οξύ και το υδρογόνο. Όταν η συγκέντρωση των θεικών είναι υψηλή, η παραγωγή μεθανίου μειώνεται δραστικά. Η καταστολή της παραγωγής μεθανίου δε σχετίζεται με τοξική επίδραση των θεικών στα μεθανογενή βακτήρια, αλλά στον ανταγωνισμό των δύο ομάδων βακτηρίων για το υπόστρωμα. Η επιπλέον ενέργεια που παράγεται από τα βακτήρια που καταναλώνουν τα θειικά, οδηγεί στην αύξηση της βιοκοινωνίας [28].

▸ *Θρεπτικά συστατικά*

Το αναερόβιο οικοσύστημα πρέπει εκτός από τα οργανικά υλικά να καταναλώνει και κάποια ανόργανα θρεπτικά συστατικά, κυρίως άζωτο και φώσφορο. Όλα τα θρεπτικά που είναι απαραίτητα σε μικροποσότητες όπως θείο, μαγνήσιο, νάτριο, μαγγάνιο, ασβέστιο, κάλιο, σίδηρος, ψευδάργυρος, χαλκός, σελήνιο και κοβάλτιο, θεωρείται ότι υπάρχουν σε επάρκεια στους περισσότερους ΧΥΤΑ όμως η μη ικανοποιητική ομογενοποίηση των απορριμμάτων μπορεί να δημιουργήσει περιοχές με έλλειψη αζώτου. Το αναερόβιο οικοσύστημα αφομοιώνει για αύξηση της βιομάζας του πολύ μικρή ποσότητα υποστρώματος από τα κελιά και γι' αυτό το λόγο χρειάζεται μικρότερες ποσότητες αζώτου και φωσφόρου από ότι το αερόβιο οικοσύστημα. Ενώ στα αστικά απόβλητα συνήθως περιέχονται ποικιλία θρεπτικών συστατικών με αποτέλεσμα να αποτελούν ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη του αναερόβιου οικοσυστήματος, σε βιομηχανικά απόβλητα απαιτείται η προσθήκη αζώτου, φωσφόρου και σε μερικές περιπτώσεις, σιδήρου [15]. Η συνδιάθεση οικιακών και βιομηχανικών

αποβλήτων μπορεί να αποβεί ευεργετική με τη συνύπαρξη οργανικών και ανόργανων συστατικών που ευνοούν την ανάπτυξη των μικροβίων με αποτέλεσμα η αποδόμηση των απορριμμάτων να είναι πιο αποτελεσματική και γρήγορη.

Η ανάπτυξη των αναερόβιων μικροοργανισμών σε ένα ΧΥΤΑ μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη μικροβιακής ιλύος, η οποία παίζει το ρόλο πηγής θρεπτικών συστατικών αλλά και υγρασίας. Παρ' όλα αυτά μεγάλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών μπορεί να αποβούν τοξικές τελικά για τα βακτήρια.

Τα κύρια θρεπτικά πρέπει να είναι διαθέσιμα σε επαρκείς ποσότητες και σε συγκεκριμένες μορφές και αναλογίες ώστε να μπορούν να επηρεάσουν το ρυθμό ανάπτυξης των βακτηρίων. Για παράδειγμα, τα βακτήρια χρησιμοποιούν 5 φορές περισσότερο άζωτο απ' ότι φώσφορο για την αύξηση της κυτταρικής τους μάζας [30]. Μελέτες σε αναερόβιους χωνευτές έχουν δείξει ότι για να βελτιστοποιηθεί η παραγωγή του μεθανίου απαιτείται αναλογία άνθρακα – αζώτου ίση με 30 [31]. Υψηλότερες αναλογίες C/N προκαλούν αύξηση της εκατοστιαίας αναλογίας διοξειδίου του άνθρακα ενώ μικρότερες, αύξηση της συγκέντρωσης αμμωνίας στην υδατική φάση. Τα βακτήρια που σχετίζονται με τη μεθανογένεση είναι υδατικοί μικροοργανισμοί και αποκτούν την τροφή τους από το υδατικό διάλυμα του ΧΥΤΑ. Έτσι τα θρεπτικά θα πρέπει να διαλυθούν προκειμένου να χρησιμοποιηθούν από τα βακτήρια. Η διαθεσιμότητα αυτών εξαρτάται μόνο από τη διαλυτική ικανότητα της υδατικής φάσης του ΧΥΤΑ και της ενζυμικής δράσης των βακτηρίων. Είναι λοιπόν φανερό ότι ο ρυθμός ανάπτυξης των βακτηρίων εξαρτάται από το ρυθμό εισόδου των θρεπτικών στην υδατική φάση.

▸ *Τοξικές ουσίες*

Το οικοσύστημα των βακτηρίων και κυρίως των μεθανοβακτηρίων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις τοξικές ουσίες, οι οποίες αναστέλλουν τις λειτουργίες των μικροβίων κατά την αναερόβια χώνευση, μειώνοντας τις αποδόσεις τους. Σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις δηλητηριάζουν τους μικροοργανισμούς, σταματώντας κάθε διεργασία.

Η τοξική δράση του οξυγόνου, του υδρογόνου και των θεικών συζητήθηκε χωριστά εξαιτίας της μεγάλης σημασίας τους για το σύστημα. Εκτός όμως από αυτές τις τοξικές ουσίες, μπορούν να υπάρξουν στο περιβάλλον του ΧΥΤΑ και ένα πλήθος άλλων, που μπορεί να εμφανίσουν τοξική δράση όπως η αμμωνία, τα πτητικά λιπαρά οξέα και τα βαρέα μέταλλα. Άλλες ουσίες που σε υψηλές συγκεντρώσεις έχουν ανασταλτική επίδραση στα μικρόβια είναι το οργανικό υπόστρωμα, το διοξείδιο του άνθρακα, τα ιόντα αλάτων, τα σουλφίδια και άλλες οργανικές ενώσεις [32].

▸ *Θερμοκρασία*

Όπως όλες οι μικροβιακές διεργασίες έτσι και ο ρυθμός της αναερόβιας αποσύνθεσης επηρεάζονται άμεσα από τη θερμοκρασία. Ανάλογα με τη θερμοκρασία στην οποία τα βακτήρια βελτιστοποιούν τη δραστηριότητά τους κατατάσσονται στα *ψυχρόφιλα*, με τυπικό θερμοκρασιακό εύρος από -2°C έως 30°C και βέλτιστο μεταξύ 12°C - 18°C , στα *μεσόφιλα*, με τυπικό θερμοκρασιακό εύρος από 20°C έως 45°C και βέλτιστο μεταξύ 25°C - 40°C , στα *θερμόφιλα*, με τυπικό θερμοκρασιακό εύρος από 45°C έως 75°C και βέλτιστο μεταξύ 55°C - 65°C και στα υπερθερμοφιλικά (*hyperthermophiles*) ή ακραία θερμοφιλικά (*extreme thermophiles*) με τυπικό θερμοκρασιακό εύρος από 75°C - 115°C και βέλτιστο 80°C [33].

Τα μεθανοβακτήρια αποτελούνται από μεσοφιλικούς οργανισμούς με μέγιστους ρυθμούς ανάπτυξης γύρω στους 40°C , από θερμοφιλικούς με μέγιστους ρυθμούς ανάπτυξης κοντά στους 70°C , και από υπερθερμοφιλικούς με μέγιστους ρυθμούς ανάπτυξης στους 80°C . Στους ΧΥΤΑ συνήθως απαντώνται οι μεσοφιλικοί οργανισμοί, σαν αποτέλεσμα τόσο των περιβαλλοντικών επιδράσεων όπως το κλίμα, όσο και εσωτερικών παραγόντων όπως η θερμότητα που παράγεται από τις αερόβιες και αναερόβιες διεργασίες. Έτσι βέλτιστες συνθήκες παραγωγής βιοαερίου έχουν παρατηρηθεί σε θερμοκρασίες 35°C - 40°C . Στους πραγματικούς ΧΥΤΑ όμως συναντώνται συνήθως χαμηλότερες θερμοκρασίες, αλλά αυτό εξαρτάται από το βάθος απόθεσης των απορριμμάτων. Σε ΧΥΤΑ στη Γερμανία απομονώθηκαν κάποια είδη μεθανογενών υπερθερμοφιλικών βακτηρίων [34] και ερευνάται η περίπτωση ανόδου τις θερμοκρασίας στο περιβάλλον του ΧΥΤΑ στους 80°C .

Γενικά σε ένα ΧΥΤΑ, η θερμοκρασία αυξάνεται κατά το στάδιο της αερόβιας αποδόμησης των απορριμμάτων, που λαμβάνει χώρα μέχρι την κατανάλωση του οξυγόνου που αρχικά περιέχεται στο πορώδες των απορριμμάτων. Όταν η αποσύνθεση των απορριμμάτων μετατραπεί σε αναερόβια, οι θερμοκρασίες μειώνονται διατηρούμενες παρ' όλα αυτά σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Έχουν παρατηρηθεί θερμοκρασίες μέχρι και 71°C σε ΧΥΤΑ με μεγάλα βάθη και μέσο βάθος απορριμμάτων 37m [35].

▸ *Υγρασία*

Η υγρασία είναι ο σημαντικότερος παράγοντας απ' όλους εκείνους που επηρεάζουν την αποσύνθεση των απορριμμάτων. Παρέχει το υδατικό περιβάλλον που είναι απαραίτητο για τη διαδικασία της μικροβιακής μεθανογένεσης, αποτρέπει την είσοδο οξυγόνου και εξυπηρετεί τη μετακίνηση θρεπτικών και τη διανομή βακτηρίων στο ΧΥΤΑ.

Τα μεθανογενή βακτήρια, αλλά και γενικά όλα τα βακτήρια, απαιτούν ένα ελάχιστο επίπεδο υγρασίας (15%) το οποίο όμως παρέχεται ακόμα και στον ξηρότερο ΧΥΤΑ. Έτσι η παραγωγή βιοαερίου παρατηρείται σε όλους τους ΧΥΤΑ. Καθώς το επίπεδο της υγρασίας των απορριμμάτων αυξάνεται στην υγρασία κορεσμού, ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου αυξάνεται μέτρια αφού τα θρεπτικά, η αλκαλικότητα, το pH, τα βακτήρια κλπ δε μπορούν να κινηθούν με ευκολία μέσα στο ΧΥΤΑ. Όταν όμως η υγρασία ξεπεράσει την υγρασία κορεσμού, τα 'αποστραγγίσματα' που δημιουργούνται μπορούν να διαλύσουν και να μεταφέρουν τα θρεπτικά, τα βακτήρια κλπ σε διάφορα σημεία των απορριμμάτων, να αραιώσουν τις τοξικές ουσίες και να περιορίσουν την είσοδο οξυγόνου από την ατμόσφαιρα. Αυτές οι συνθήκες που αποτελούν ένα πιο επιθυμητό περιβάλλον, προκαλούν αύξηση του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου. Από τη στιγμή που η υγρασία ξεπεράσει τα επιθυμητά επίπεδα το σύστημα μπορεί να περιορίζεται από άλλους παράγοντες, όχι όμως από την υγρασία. Γενικά, υγρασίες της τάξης του 60 – 80% μέχρι τον κορεσμό θεωρούνται βέλτιστες [36]. Σε πειράματα [37] η απόδοση και σύσταση του βιοαερίου σε μεθάνιο επιτεύχθηκε με υγρασία 80% (η υψηλότερη των πειραμάτων).

Σε τυπικούς ΧΥΤΑ σπάνια παρατηρούνται βέλτιστες συνθήκες υγρασίας αφού η υγρασία των απορριμμάτων κυμαίνεται από 20–30% για χώρες με ‘ξηρά’ απορρίμματα όπως οι ΗΠΑ, μέχρι και 40–50% για χώρες με υγρά απορρίμματα όπως η Ελλάδα. Μετά την ταφή τους ένας μεγάλος αριθμός αιτιών μπορεί να επηρεάσει την υγρασία τους όπως:

1. Η διείσδυση νερού από την επιφάνεια των απορριμμάτων που προοδευτικά αυξάνει τη συγκέντρωση της υγρασίας, ξεκινώντας από τα ανώτερα στρώματα του κελιού (τα απορρίμματα πρέπει να φτάσουν την υγρασία κορεσμού πριν τα εκχυλίσματα περάσουν στο επόμενο κελί).
2. Η διείσδυση του νερού από το έδαφος, που διαποτίζει τα απορρίμματα από το κατώτερο μέρος εξαιτίας τριχοειδών και απορροφητικών φαινομένων.
3. Η διευθέτηση των απορριμμάτων (το χαμηλότερο τμήμα του κελιού έχει μεγαλύτερη πυκνότητα, σαν αποτέλεσμα της μείωσης της περιεχόμενης υγρασίας μετά την παραγωγή εκχυλισμάτων).
4. Η παραγωγή νερού σαν προϊόν των διεργασιών αποσύνθεσης.
5. Η προσθήκη υγρασίας με έγχυση ή άλλα τεχνητά μέσα.
6. Οι κλιματικές συνθήκες.

Είναι δυνατό επίσης οι μεγάλες προσθήκες νερού στα απορρίμματα, όπως μετά από μεγάλες βροχοπτώσεις, να οδηγήσουν σε μείωση της ποσοστιαίας σύστασης σε μεθάνιο και αύξηση σε διοξείδιο του άνθρακα για κάποιο αρχικό χρονικό διάστημα [38]. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην είσοδο οξυγόνου στο οικοσύστημα που βρίσκεται διαλυμένο στο προστιθέμενο νερό και στην αύξηση του οξυγενετικού σταδίου. Επίσης μπορεί να οφείλεται στη μείωση της θερμοκρασίας που μπορεί να επιφέρει στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ η προσθήκη και η κίνηση του νερού, επιδρώντας στην ανάπτυξη των μεθανοβακτηρίων. Τέλος οι μεγάλες ποσότητες εκχυλισμάτων που δημιουργούνται, αποστραγγίζουν τα απορρίμματα από τις οργανικές ουσίες μειώνοντας έτσι το προς βιοαεριοποίηση υπόστρωμα.

▸ *Το μέγεθος των σωματιδίων*

Υπάρχουν συγκρουόμενες απόψεις για την επίδραση του μεγέθους των σωματιδίων στην παραγωγή βιοαερίου.

Σ πείραμα με απορρίμματα σωματιδιακού μεγέθους 25cm σε μελέτη 360 ημερών, παρατηρήθηκε ότι όταν το μέγεθος των απορριμμάτων μειώθηκε 10 φορές (με τεμαχισμό), η παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε 4,4 φορές [39]. Όμως το μεγαλύτερο ποσοστό βιοαερίου ήταν διοξείδιο του άνθρακα. Το πειραματικό μέρος που παρήγαγε τη μέγιστη ποσότητα μεθανίου δεν είχε τεμαχιστεί.

Ο τεμαχισμός των απορριμμάτων πιστεύεται ότι έχει ευνοϊκές επιδράσεις στην παραγωγή βιοαερίου, καθώς εκθέτει μεγαλύτερη επιφάνεια απορριμμάτων στο βακτηριακό οικοσύστημα και στην υγρασία. Ο τεμαχισμός σε πολλές περιπτώσεις συνδυάζεται με την απομάκρυνση γυαλιών και μετάλλων, μειώνοντας ακόμα περισσότερο τον όγκο τους. Επιπλέον, από τη στιγμή που ο τεμαχισμός μειώνει τη ποσότητα χώματος που χρησιμοποιείται για κάλυψη, επιτρέπεται η τοποθέτηση περισσότερων απορριμμάτων σε ένα δεδομένο χώρο. Έτσι παράγεται περισσότερη ποσότητα ανά μονάδα όγκου.

▸ *Πυκνότητα*

Οι περισσότεροι ΧΥΤΑ έχουν συνήθως περιορισμένη διακύμανση πυκνότητας. Η πυκνότητα αυτή μεταβάλλεται με την προσθήκη νερού (διείσδυση από βροχόπτωση), την αφυδάτωση (σε άνυδρες ή μικρής βροχόπτωσης περιοχές), τη διευθέτησή τους με την προσθήκη νέων απορριμμάτων και τη βιολογική αποδόμηση.

Γενικά, αύξηση της πυκνότητας των απορριμμάτων έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους και επομένως του οξυγόνου που εγκλωβίζεται σε αυτό, γεγονός που επιτρέπει την επικράτηση αναερόβιων συνθηκών στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Επίσης, η αύξηση της πυκνότητας επιτρέπει την αποθήκευση μεγαλύτερης ποσότητας απορριμμάτων σε δεδομένο όγκο και επομένως την αύξηση της παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου ανά μονάδα όγκου.

▸ *Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου*

Υψηλές μερικές πιέσεις διοξειδίου του άνθρακα, ειδικά στην αρχή της αερόβιας φάσης, μπορεί να παρεμποδίσουν τη μεθανογένεση. Αν και ακόμα δεν έχει εξακριβωθεί, θεωρείται ότι η αιτία για την παρεμπόδιση οφείλεται στην αύξηση του δυναμικού οξειδοαναγωγής ή στην εξασθένηση των λειτουργιών των κυτταρικών μεμβρανών, που οφείλεται στην αύξηση της ρευστότητας τους από τη διάλυση του διοξειδίου του άνθρακα [40]. Επίδραση από τις υψηλές συγκεντρώσεις μεθανίου στην παραγωγή βιοαερίου δεν έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία, όμως έχει ότι συγκεντρώσεις μεθανίου μικρότερες του 50% έχουν σαν αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της παραγωγής του, λόγω υψηλών συγκεντρώσεων υδρογόνου ή μη ευνοϊκών περιβαλλοντικών συνθηκών [11].

▸ *Βακτηριακός πληθυσμός*

Η παραγωγή μεθανίου σε ανεξέλεγκτες μονάδες εδαφικής διάθεσης ότι το βακτηριακό οικοσύστημα που σχετίζεται με τη μεθανογένεση υπάρχει στα απορρίμματα και στο υλικό που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή του ΧΥΤΑ. Εφοδιασμός των απορριμμάτων με βακτήρια από άλλες πηγές π.χ. χωνεμένη λάσπη από βοθρολύματα, δρα ευεργετικά στη μεθανογένεση. Όμως από τη στιγμή που τα αναερόβια βακτήρια δεν αναπτύσσονται στο περιβάλλον με οξυγόνο ο εφοδιασμός του ΧΥΤΑ με αυτά μπορεί να μην έχει ουσιαστική επίδραση στην παραγωγή μεθανίου, αν το προστιθέμενο υλικό εκτεθεί και εξισορροπηθεί με τον ατμοσφαιρικό αέρα [40].

2.7 Επίδραση διαχειριστικών παραμέτρων

Ο τρόπος διαχείρισης ενός ΧΥΤΑ μπορεί να επηρεάσει την παραγωγή βιοαερίου μεταβάλλοντας τις εσωτερικές συνθήκες της.

▸ *Συμπίεση απορριμμάτων*

Η συμπίεση των απορριμμάτων συντελεί στη μερική ομογενοποίηση και ανάμιξη τους. Πειραματικά δεδομένα για την επίδραση της συμπίεσης των απορριμμάτων στην παραγωγή μεθανίου είναι λίγα [41] και σαφή συμπεράσματα δεν μπορούν να

τεκμηριωθούν. Όμως από τα λίγα δεδομένα φαίνεται ότι μερική ή καθόλου συμπίεση μπορεί αρχικά να κάνει την όξινη φάση λιγότερο δραστήρια και έτσι να επιταχύνει την έναρξη της μεθανογένεσης, τουλάχιστον σε σχετικά υγρά απορρίμματα. Από την άλλη πλευρά, σε ξηρά απορρίμματα η συμπίεση μπορεί να αυξήσει την παραγωγή μεθανίου, βελτιώνοντας την περιεχόμενη υγρασία και μειώνοντας την είσοδο ατμοσφαιρικού οξυγόνου.

▸ *Προσθήκη νερού*

Η προσθήκη νερού αυξάνει το ποσοστό υγρασίας της και βελτιώνει τη διανομή της. Χρησιμοποιείται αρκετά συχνά, ως διαχειριστική πρακτική σε άνυδρες περιοχές, όπως έχει αναφερθεί στις εσωτερικές παραμέτρους.

▸ *Ανακύκλωση εκχυλισμάτων*

Η ανακύκλωση των εκχυλισμάτων είναι η πιο καλά μελετημένη διαχειριστική πρακτική. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει, η διαδικασία αυτή είτε βελτιώνει την παραγωγή και σύσταση του βιοαερίου[42.1.2.3], είτε δεν έχει επίδραση [43],[11] είτε έχει αρνητική επίδραση [44].

Τα εκχυλίσματα προάγουν τη μεθανογένεση αυξάνοντας την υγρασία των απορριμμάτων, παρέχοντας θρεπτικά και βιομάζα και μειώνοντας τη συγκέντρωση των παρεμποδιστών. Ιδιαίτερη σημασία για την αύξηση της μεθανογένεσης έχει η σύσταση των εκχυλισμάτων. Σε περιοχές με υγρό κλίμα η ανακύκλωση των εκχυλισμάτων είναι ευεργετική μόνο στα πρώτα χρόνια λειτουργίας του ΧΥΤΑ, καθώς αυξάνει την περιεκτικότητα σε υγρασία και τη διανομή της στα κελιά. Όμως, αν τα εκχυλίσματα παρουσιάζουν χαμηλή τιμή pH και οι συνθήκες της μεθανογένεσης δεν είναι σταθερές, η ανακύκλωση των εκχυλισμάτων μπορεί να είναι καταστροφική για την παραγωγή μεθανίου, εκτός αν γίνεται προσθήκη ρυθμιστικών ουσιών.

Αν η υγρασία είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα και τα εκχυλίσματα έχουν χαμηλό BOD₅, η ανακύκλωση έχει πολύ μικρή επίδραση. Σε ξηρά κλίματα τα εκχυλίσματα αυξάνουν την περιεχόμενη υγρασία, όμως χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά τη σύστασή

τους. Επιπλέον, αν γίνεται συνδιάθεση βιομηχανικών και αστικών απορριμμάτων αναμένονται υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών ουσιών, ικανών να δηλητηριάσουν τα βακτήρια.

▸ *Υλικά κάλυψης*

Πολύ λίγα είναι γνωστά για την επίδραση του υλικού ημερήσιας κάλυψης στη σταθεροποίηση των απορριμμάτων. Αρνητικές επιδράσεις είναι αναμενόμενες όταν το ανώτερο στρώμα υποστεί αερόβια επεξεργασία. Τα υλικά μειώνουν αυτά μειώνουν τη διείσδυση του αέρα, μεταβάλλοντας το ρυθμό αποσύνθεσης απορριμμάτων. Χρήση αργιλικών χωμάτων για καθημερινή κάλυψη, μπορεί να προκαλέσει μεταγενέστερα ετερογένεια στη διανομή του νερού και τελικά να δημιουργήσει περιοχές με νερό και πολύ ξηρές ζώνες δίπλα σε περιοχές χαμηλής υδροπερατότητας. Σε πολλές περιπτώσεις το υλικό κάλυψης παίζει το ρόλο ρυθμιστικής ουσίας, βοηθώντας έτσι στην αποφυγή ακραίων τιμών pH.

▸ *Βλάστηση επιφάνειας*

Η επιφανειακή βλάστηση καθορίζει το ρυθμό και την ποσότητα του νερού που διεισδύει στο ΧΥΤΑ, επηρεάζοντας έτσι το ποσοστό υγρασίας. Διείσδυση με ταχύ ρυθμό μπορεί να εμποδίσει την παραγωγή μεθανίου, ενώ συνεχής διείσδυση πιστεύεται ότι προκαλεί μεγαλύτερους ρυθμούς μεθανογένεσης. Επίσης, οι ρίζες προσδίδουν μεγαλύτερη συνεκτικότητα στα σωματίδια του εδάφους κλείνοντας τους πόρους, με αποτέλεσμα τον περιορισμό εκπομπής βιοαερίου. Αντίθετα μεγάλες και νεκρές ρίζες δημιουργούν διόδους διαφυγής του [24].

▸ *Ανάκτηση βιοαερίου*

Η έντονη ανάκτηση βιοαερίου μπορεί να προκαλέσει τη διείσδυση ατμοσφαιρικού αέρα στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ, λόγω μείωσης της εσωτερικής πίεσης. Επίσης, σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν [45], διαπιστώθηκε ότι η ύπαρξη πηγαδιών ανάκτησης βιοαερίου προκαλούσε μεγάλη οξείδωση του μεθανίου.

▸ *Προσθήκη ιλύος*

Η επίδραση προσθήκης ιλύος στα απορρίμματα έχει μελετηθεί σε πολλές περιπτώσεις. Τα θετικά αποτελέσματά της μπορούν να αποδοθούν στην αύξηση της υγρασίας των απορριμμάτων, στον εφοδιασμό του ΧΥΤΑ με άμεσα προσλήψιμες θρεπτικές ουσίες και στην προσθήκη νέας βακτηριακής μάζας, παράγοντες που ευνοούν τη μεθανογένεση.

Οι ευεργετικές όμως επιδράσεις της προσθήκης ιλύος δεν είναι πάντοτε δεδομένες. Στην περίπτωση που έχουν ήδη επικρατήσει συνθήκες μεθανογένεσης, η προσθήκη ιλύος έχει ιδιαίτερα περιορισμένη επίδραση. Επιπρόσθετα, πολύ κρίσιμος είναι ο παράγοντας επίδρασης της προσθήκης ιλύος στην τιμή του pH. Ιλύς με χαμηλή τιμή pH π.χ. σηπτική ιλύς, μπορεί να έχει αρνητική επίπτωση στην παραγωγή μεθανίου, ενώ ιλύς με ουδέτερη τιμή μπορεί να επιδράσει θετικά.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε χώρες όπου η υγρασία των απορριμμάτων είναι χαμηλή, ενώ σε χώρες που η υγρασία των απορριμμάτων είναι υψηλή (π.χ. Ελλάδα) δεν ενδείκνυται.

▸ *Σύσταση απορριμμάτων – Προεπεξεργασία*

Η σύσταση των απορριμμάτων αν και είναι δεδομένη για κάθε περιοχή, εμπεριέχει παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγή του βιοαερίου. Πρόσφατα, από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε αναερόβιους χωνευτές ότι η παρουσία πλαστικών υλικών (κυρίως πολυαιθυλένιο) στα στερεά απόβλητα προκαλεί μείωση του παραγόμενου βιοαερίου, ενδεχόμενα εξαιτίας της δημιουργίας τοξικών παραπροϊόντων [46]. Στα πλαίσια βελτιστοποίησης της παραγωγής βιοαερίου σε ΧΥΤΑ ίσως θα ήταν χρήσιμο να βρεθούν τεχνικές απομάκρυνσης των πλαστικών υλικών από τα απορρίμματα πριν τη διάθεσή τους σε αυτή.

Η προεπεξεργασία των απορριμμάτων περιλαμβάνει την απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων καθώς και εκείνων που δεν είναι βιοαποδομήσιμα όπως το γυαλί και τα μέταλλα. Τα εναπομείναντα απορρίμματα τεμαχίζονται.

▸ *Τεμαχισμός*

Ο τεμαχισμός των απορριμμάτων αυξάνει την ομοιογένειά τους. Μειώνοντας το μέγεθος και αναμιγνύοντάς τα αυξάνεται η ειδική επιφάνειά τους και η περιεκτικότητα –διανομή υγρασίας στο εσωτερικό του ΧΥΤΑ [47]. Παρ' όλα αυτά, ο τεμαχισμός με δεδομένα ποσοστά υγρασίας φαίνεται να εμποδίζει τη διακίνηση θρεπτικών μέσα στη μάζα των απορριμμάτων ελαττώνοντας την παραγωγή μεθανίου[42.1]. Αν οι αρνητικές επιδράσεις του τεμαχισμού καταστρατηγηθούν, τότε μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα ευεργετικός για τις μετέπειτα φάσεις, προάγοντας την υδρόλυση και την οξυγένεση. Η παρατήρηση ότι η υδρόλυση τείνει να περιορίσει την παραγωγή μεθανίου στις μετέπειτα φάσεις της σταθεροποίησης ενός ΧΥΤΑ [48],[66] αποδεικνύει ότι μόνο ο τεμαχισμός δεν αρκεί, αλλά σε συνδυασμό με μέτρα ελέγχου της οξυγένεσης μπορεί να έχει ευεργετικά αποτελέσματα.

▸ *Προσθήκη ουσιών για τη διατήρηση του pH*

Οι καταστροφικές επιδράσεις των χαμηλών τιμών pH στην παραγωγή μεθανίου συχνά οδηγούν στη χρήση ουσιών για τη διατήρησή του σε επιθυμητά επίπεδα, είτε ενσωματώνοντας την ουσία στη μάζα των απορριμμάτων (π.χ. ανθρακικό ασβέστιο), είτε διαλύοντας τη στα εκχυλίσματα πριν την ανακύκλωσή τους (π.χ. καυστικό νάτριο ή όξινο ανθρακικό νάτριο). Οι περισσότερες μελέτες που έγιναν σε εργαστηριακή κλίμακα έδειξαν θετική επίδραση της προσθήκης ρυθμιστικής ουσίας στη μεθανογένεση [49]. Η μεθανογένεση από μόνη της παρέχει ρυθμιστική ικανότητα αυξάνοντας το pH και μόνο όταν η διαδικασία αυτή δε μπορεί να αντισταθμίσει την οξύτητα που δημιουργείται, επιδρά η προστιθέμενη ρυθμιστική ουσία. Αυτό σημαίνει ότι η προσθήκη ρυθμιστικών ουσιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν προληπτικό μέτρο για την αποφυγή χαμηλών τιμών pH, ή σαν 'θεραπεία' του ΧΥΤΑ στις οποίες έχει ανασταλεί η παραγωγή μεθανίου εξαιτίας χαμηλών τιμών pH. Πάντως σε μια περίπτωση [50] προσθήκη ανθρακικού ασβεστίου για τη ρύθμιση του pH δεν είχε μακροχρόνια αποτελέσματα στο ρυθμό παραγωγής βιοαερίου.

2.8 Τεχνολογίες της διεργασίας

Από τεχνολογικής σκοπιάς, η αναερόβια χώνευση χρησιμοποιείται πάνω από εκατό χρόνια για την βιοσταθεροποίηση οργανικών αποβλήτων και τη παραγωγή καύσιμου βιοαερίου. Η πλέον κλασική μορφή χρήσης συναντάται σήμερα στην επεξεργασία της βιολογικής λάσπης που προκύπτει σε εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας αστικών αποβλήτων. Στη περίπτωση των απορριμμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί δύο κύριες τεχνικές που εφαρμόζουν αναερόβια χώνευση.

Η μία τεχνική αποτελεί την εφαρμογή της κλασικής τεχνολογίας που αναφέρθηκε παραπάνω. Η χώνευση γίνεται μέσα σε βιοαντιδραστήρες που καλούνται χωνευτές. Οι χωνευτές είναι αεροστεγείς δεξαμενές από μέταλλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα μέσα στους οποίους τα οργανικά συστατικά των απορριμμάτων παραμένουν για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα που καλείται χρόνος παραμονής. Ο χρόνος αυτός αποτελεί τη βασική παράμετρο σχεδίασης των χωνευτών. Η τροφοδοσία των χωνευτών γίνεται αφού διαχωριστούν τα απορρίμματα και το οργανικό τους μέρος κατατηθεί. Η τεχνική αυτή δεν έχει βρει ευρεία εφαρμογή για μια σειρά από λόγους που παρουσιάζονται παρακάτω:

- ▶ *Μη επίτευξη ικανοποιητικού βαθμού διαχωρισμού των απορριμμάτων*

Αυτό έχει σαν συνέπεια το μέρος εκείνο που μπορεί να αποδομηθεί στο χωνευτή (οργανικά) να περιέχει προσμίξεις όπως μέταλλα και γυαλιά που δημιουργούν προβλήματα στις αντλίες του χωνευτήρα και σε άλλα τμήματα που χρησιμοποιούνται στη ροή του ρευστού μείγματος στερεών και νερού. Το πρόβλημα οφείλεται βέβαια και στη μη καλή διαλογή κατά το στάδιο προεπεξεργασίας.

- ▶ *Μεγάλη περιεκτικότητα των οργανικών απορριμμάτων σε συστατικά που είναι δύσκολα υδρολύσιμα και άρα βιοαποδομούσιμα*

Για να χωνευτούν τέτοια υλικά πρέπει να παραμείνουν για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα μέσα στο χωνευτή. Απαιτούνται δηλαδή υπερβολικά μεγάλοι χρόνοι

παραμονής κάτι που αυξάνει τον απαιτούμενο όγκο τους άρα και το επενδυτικό κόστος των χωνευτήρων.

▸ *Απαίτηση σε ρευστά*

Η λειτουργία τους βασίζεται στο ότι η τροφοδοσία, ανάμειξη και εκροή τους απαιτούν ρευστά και μάλιστα χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά (συνήθως κάτω από 8% στερεά). Επειδή τα οργανικά απορρίμματα δεν περιέχουν πολύ νερό (το πολύ 60%) το ποσοστό νερού πρέπει να ανέβει τουλάχιστον στο 92% για να έχουμε 8% στερεά. Αυτό γίνεται με προσθήκη νερού. Μετά τη χώνευση το νερό αυτό διαχωρίζεται κατά μεγάλο ποσοστό από τα κυρίως στερεά και πρέπει να ανακυκλωθεί ή να διατεθεί. Ακόμα και στη περίπτωση ανακύκλωσης στο χωνευτή σε κάποια φάση το νερό θα πρέπει να διατεθεί γιατί η σύστασή του θα είναι τέτοια που δε θα επιτρέπεται η ανακύκλωση του. Πριν τη διάθεση το νερό αυτό λόγω υψηλού ρυπαντικού φορτίου πρέπει να επεξεργαστεί περαιτέρω κάτι που αυξάνει το κόστος της διεργασίας.

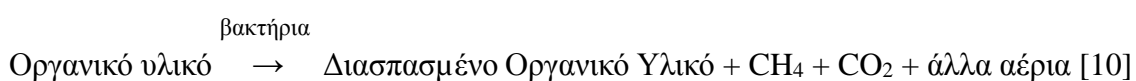
Σε συνάρτηση με τα παραπάνω προβλήματα που συναντάμε η εν λόγω διεργασία (κλασική αναερόβια χώνευση σε χωνευτές) δεν έχει βρει ευρεία εφαρμογή, ενώ έχει επικρατήσει σχεδόν σε όλο τον κόσμο η ανάκτηση του βιοαερίου σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων [51].

3 ΒΙΟΑΕΡΙΟ

3.1. Σύσταση (ποιότητα) Βιοαερίου

Η σύσταση του βιοαερίου εξαρτάται από το είδος του υποστρώματος που μεταβολίζεται αλλά και από ένα σύνολο περιβαλλοντικών παραγόντων που επηρεάζουν τη μικροβιακή δράση.

Η γενικευμένη χημική αντίδραση που περιγράφει την αναερόβια διάσπαση των στερεών αποβλήτων είναι:



Από την παραπάνω αντίδραση γίνεται φανερό ότι το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα είναι τα δύο κύρια συστατικά του βιοαερίου (αποτελούν περισσότερο από το 90% του συνολικά παραγόμενα αερίου). Το άζωτο και το οξυγόνο παρουσιάζονται σε μικρές ποσότητες σαν αποτέλεσμα του εγκλωβισμού ατμοσφαιρικού αέρα κατά την εναπόθεση των απορριμμάτων, της διάχυσής του μέσω του επιφανειακού στρώματος χωματοκάλυψης και της εισροής εξαιτίας της αρνητική πίεσης που δημιουργείται στο εσωτερικό της ΜΕΔΑ από την εξαγωγή του βιοαερίου. Τα υπόλοιπα αέρια που υπάρχουν μπορεί να δράσουν τοξικά ακόμα και σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις και τοπικά να προκαλέσουν τοξικές επιδράσεις στους μικροβιακούς πληθυσμούς, παρεμποδίζοντας ή και αναστέλλοντας σε ακραίες περιπτώσεις τη μεθανογένεση.

Πίνακας 5 : Τυπική σύσταση βιοαερίου [29]

Σύσταση βιοαερίου	I % κ.ο.	II % κ.ο.	III % κ.ο.
CH ₄	65	50-45	25
CO ₂	35	45-35	20
N ₂	-	4-16	45
O ₂	-	1-4	10

- 1) κατά τη φυσική διαφυγή του αερίου από το ΧΥΤΑ,
- 2) με χρήση ενός τυπικού συστήματος απαγωγής και ύπαρξη καλής στεγάνωσης της επιφάνειας,
- 3) με υπερβολική άντληση και ανεπαρκή στεγάνωση της επιφάνειας του ΧΥΤΑ.

Εκτός από το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα, που αποτελούν τα βασικά συστατικά του βιοαερίου, στο τελευταίο υπάρχουν και άλλες ουσίες σε μικρότερες συγκεντρώσεις, καθώς και τοξικές ουσίες που βρίσκονται σε ίχνη. Οι τυπικοί και οι οργανικοί ρυπαντές που βρίσκονται στο βιοαέριο φαίνονται στους πίνακες 5 και 6, αντίστοιχα.

Πίνακας 6 : Τυπικοί ρυπαντές βιοαερίου [52]

Τυπικοί ρυπαντές	Μέση τιμή	
	1) mg/m ³	2) mg/m ³
Σ S	200	150
Σ Cl	100	50
Σ F	20	10
CFC	50	25
HAHC	5-1000	5-50
Cd	0-1	0-0.5
Hg	0-1	0-0.5
Σ Met.	0-5	0-3

- 1) κατά τη φυσική διαφυγή του αερίου από το Χ.Υ.Τ.Α.,
- 2) με χρήση ενός τυπικού συστήματος απαγωγής και ύπαρξη καλής στεγάνωσης της επιφάνειας του Χ.Υ.Τ.Α.

Πίνακας 7 : Ορισμένοι οργανικοί ρυπαντές (VOCs) που συνήθως περιλαμβάνει το βιοαέριο. [52]

Ρυπαντές	Ομάδα	WPC	Τυπική Συγκέντρωση *	Μέγιστη Συγκέντρωση *
CH ₂ ClF	A2		10	
CH ₂ ClF ₂		1800	5	
CHCl ₂ F		45	5	
CHCl ₃ F		5600	10	
C ₂ Cl ₃ F		3800	2	
C ₂ H ₃ Cl	A1		10	200
CH ₂ Cl ₂	B	360	20	1000
C ₂ H ₂ Cl ₂	B	8		2
C ₃ H ₂ Cl ₂		790	30	700
C ₂ HCl ₃		1080	2	400
C ₂ Cl ₄	B	345	10	180
C ₆ H ₆	A1		5	500
C ₇ H ₈		380	100	1700
C ₈ H ₁₀		440	50	
C _n H _{2n+2}			300	
CH ₂ CHO	B	90	20	
CH ₂ O	B	0.6		
H ₂ S		15	100	20000
RSH		1	2	200

Ομάδα A1: Καρκινογόνα για τον άνθρωπο

Ομάδα A2: Καρκινογόνα από πειράματα με ζώα

Ομάδα B: Ύποπτα ως καρκινογόνα

Στον πίνακα (8) παρουσιάζεται μια τυπική σύσταση βιοαερίου για ΑΣΑ στις ΗΠΑ [10].

Επισημαίνεται ότι οι τιμές του πίνακα μεταβάλλονται διαχρονικά. Η θερμοκρασία του

βιοαερίου κυμαίνεται από 38° έως 50°C, είναι κεκορεσμένο ως προς την υγρασία και η θερμογόνο δύναμη του κυμαίνεται από 14000 έως 20000 KJ/m³.

Πίνακας 8 : Σύσταση βιοαερίου για ΑΣΑ στις ΗΠΑ [10]

Συστατικό	Περιεκτικότητα (% ξηρού όγκου)
Μεθάνιο	45-60
Διοξείδιο του άνθρακα	40-60
Άζωτο	2.0-5.0
Οξυγόνο	0.10-1.0
Σουλφίδια, μερκαπτάνες κτλ.	0.0-1.0
Αμμωνία	0.10-1.0
Υδρογόνο	0-0.20
Μονοξείδιο του άνθρακα	0-0.20
Άλλα αέρια	0.01-0.60

3.2 Πιθανές επιδράσεις εκπεμπόμενου βιοαερίου από τον ΧΥΤΑ

Οι ανεξέλεγκτες εκπομπές του βιοαερίου είναι πιθανό να έχουν διαφορετική (αρνητική τις περισσότερες φορές) επίδραση στο γύρω περιβάλλον. Οι σημαντικότερες αυτών των επιδράσεων είναι οι παρακάτω:

- ▶ Κίνδυνος φωτιάς ή έκρηξης
- ▶ Προβλήματα υγείας
- ▶ Υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος
- ▶ Μόλυνση του υπόγειου υδροφορέα
- ▶ Επίδραση στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή
- ▶ Ανεπιθύμητες οσμές

Όλα τα παραπάνω συνδέονται σε διαφορετική κλίμακα. Μια σύντομη περιγραφή ακολουθεί για τη κάθε μια κατηγορία των επιδράσεων της ανεξέλεγκτης εκπομπής βιοαερίου.

Κίνδυνος φωτιάς ή έκρηξης

Το βιοαέριο είναι εκρηκτικό κυρίως εξαιτίας της περιεκτικότητάς του σε μεθάνιο. Το όριο το οποίο το μεθάνιο προκαλεί έκρηξη κυμαίνεται από 5 – 15% στον αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα προαναφερθέντα όρια επηρεάζονται ελαφρώς μόνο από την ύπαρξη άλλων συνιστωσών [53]. Αν το βιοαέριο αναμιχθεί άμεσα με τον ατμοσφαιρικό αέρα δεν εγκυμονεί κίνδυνος έκρηξης [54], αλλά στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να προκληθεί φωτιά.

Ο κύριος περιβαλλοντικός κίνδυνος στην περίπτωση της έκρηξης έγκειται ότι το βιοαέριο μπορεί να εισέλθει στο εσωτερικό των σπιτιών διαμέσου των ρωγμών που υπάρχουν στα θεμέλια ιδιαίτερα των παλαιών κτισμάτων. Μετά την ανάμιξη του με τον αέρα, και λόγω κάποιας αιτίας (όπως ο σπινθήρας της κουζίνας ή η λάμψη από ένα σπέρτο), μπορεί να ευνοηθεί η έκρηξη.

Πολλές περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων μεθανίου στο εσωτερικό των σπιτιών εξαιτίας του βιοαερίου στην ευρύτερη περιοχή (λόγω της ύπαρξης ΧΥΤΑ) έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία. Ο Gendebain et al., (1992) [53] έχουν καταγράψει περί τις 60 περιπτώσεις από τη Μεγάλη Βρετανία, τις ΗΠΑ, τη Γερμανία και τον Καναδά για ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων μεθανίου, και 55 περιπτώσεις από τις ΗΠΑ, τη Μεγάλη Βρετανία και τον Καναδά όπου υπήρξαν εκρήξεις, φωτιές και ανθρώπινοι τραυματισμοί.

Προβλήματα υγείας

Το διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο είναι το άλλο συστατικό εκτός του μεθανίου που υπάρχει σε μεγάλες συγκεντρώσεις στο βιοαέριο, εισέρχεται στο αναπνευστικό σύστημα με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αδιαθεσίες ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις. Το βιοαέριο έχει υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με το όριο της κατώτατης τιμής (threshold limit value), 0.5% ή 5000 ppm [54]. Αυτό σημαίνει ότι γενικά απαιτείται δέκα φορές υψηλότερη διάλυση για να μην υπερβεί η παραπάνω τιμή για το διοξείδιο του άνθρακα από ότι απαιτείται για το χαμηλότερο όριο έκρηξης του μεθανίου (lower explosion limit).

Οι επιδράσεις στην υγεία από τις οργανικές ανιχνεύσιμες ουσίες έχουν συζητηθεί από τους Young and Parker (1983) [55]. Έχουν καταλήξει ότι οι παραπάνω οργανικές ουσίες δε σχετίζονται ιδιαίτερα με διάφορα περιστατικά. Ο Little *et al.*, (1992) [56] εκφράζουν ότι το βινυλοχλωρίδιο είναι επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία ειδικά στη περίπτωση όπου υπάρχουν κατοικίες πλησιέστερα από τα 100 m ή είναι κτισμένα στη κορυφή του ΧΥΤΑ. Επίσης ο Ward *et al.*, (1992) [57] ανέφεραν ότι το βινυλοχλωρίδιο, ανάμεσα σε 77 ουσίες, διασπείρεται όσο το δυνατό πιο μακριά από το ΧΥΤΑ (έως και 50m). Ο Petersen (1988) [58] διαπίστωσε ότι επιπλέον με το βινυλοχλωρίδιο το βενζένιο θέτει σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία.

Υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος

Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί πολλές περιπτώσεις υποβάθμισης του φυσικού περιβάλλοντος σε κοντινή ακτίνα γύρω από το ΧΥΤΑ. Ο Gendebein *et al.*, (1992) [53] έχουν περιγράψει 31 διαφορετικές περιπτώσεις από τη Μεγάλη Βρετανία, τις ΗΠΑ, το Καναδά και την Ιαπωνία. Ο κύριος λόγος για την καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος από το βιοαέριο είναι η ασφυξία από την απώλεια του οξυγόνου στη περιοχή. Η απώλεια αυτή μπορεί να οφείλεται είτε στη μετατόπιση του οξυγόνου από το βιοαέριο, είτε από τη οξείδωση του μεθανίου. Υψηλές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (>20%) είναι τοξικές για τα φυτά [59], όπως και κάποιες οργανικές ουσίες που περιέχονται στο βιοαέριο (π.χ. υδρόθειο).

Μόλυνση του υπόγειου υδροφορέα

Πολλά από τα συστατικά του βιοαερίου είναι πολύ υδατοδιαλυτά (η διαλυτότητα του διοξειδίου του άνθρακα είναι 2320 mg/l στους 10°C και μόνο 30 mg/l για το μεθάνιο). Πολλά από αυτές τις οργανικές ουσίες του βιοαερίου έχουν υψηλή υδατοδιαλυτότητα και μπορούν διηθηθούν στο νερό που περνάει στο υπέδαφος και με αυτόν τον τρόπο ελλοχεύει ο κίνδυνος μόλυνσης του υπόγειου υδροφορέα.

Επίδραση στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή

Η παγκόσμια σημασία των εκπομπών του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα είχε αγνοηθεί μέχρι πρόσφατα. Το μεθάνιο και πιθανόν κάποια άλλα αέρια (π.χ. CFCs) που εκλύονται

από τους ΧΥΤΑ θεωρούνται σαν «αέρια του θερμοκηπίου» και επηρεάζουν το στρώμα του όζοντος.

Ανεπιθύμητες οσμές

Είναι σύνηθες φαινόμενο τα παράπονα από τους κατοίκους λόγω των δυσάρεστων οσμών που προκύπτουν από την εκπομπή του βιοαερίου στους ΧΥΤΑ [53]. Η δυσάρεστη οσμή φαίνεται ότι προέρχεται από τα κύρια συστατικά του βιοαερίου όπως είναι το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Όμως και τα δύο είναι άοσμα. Τα κύρια προβλήματα της οσμής συνδέονται στο αρχικό οξύ κατά το στάδιο της ζύμωσης, όπου σχηματίζονται μερκαπτάνες και πτητικό οξύ. Χρειάζονται 1000000 διαλύσεις για να φτάσουν κάποιες από αυτές τις ενώσεις κάτω από το όριο της κατώτατης τιμή όσον αφορά τις οσμές [55].

Καλό είναι να γίνεται έλεγχος και παρακολούθηση, δια μετρήσεων της περιεκτικότητας του μεθανίου, για την ασφάλεια των εργαζομένων και αυτών που ζουν κοντά στο χώρο.

Το βιοαέριο δειγματίζεται με μικρά πηγαδάκια παρατήρησης στη διάθεση ή τις περιοχές που το αέριο μπορεί να μεταναστεύσει ή να συσσωρευτεί. Η ανάλυση του μεθανίου και μερικών άλλων αερίων, μπορεί να γίνει επί τόπου, εάν κριθεί απαραίτητο και να γίνει σύνδεση με αυτόματα συστήματα συναγερμού.

Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα:

- ▶ 1967, Centre de loisirs Atlanta Georgia: δύο θάνατοι, δύο τραυματίες
- ▶ 1971, Cherry Hill – New Jersey: Πυρκαγιά σε δύο σπίτια κοντά σε ένα χώρο διάθεσης
- ▶ 1974, New Jersey: Ένας οδηγός μηχανήματος στο εργοτάξιο νεκρός από έκρηξη στο χώρο διάθεσης
- ▶ 1975, Michigan: Έκρηξη σε κατοικία κοντά σε χώρο διάθεσης.

3.3 Παραγωγή Βιοαερίου

Ένας ΧΥΤΑ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα βιοαντιδραστήρα, ως ένα ιδιαίζον οικοσύστημα. Τα οργανικά υλικά βιοαποδομούνται σταδιακά μέσα στο ΧΥΤΑ. Η βιοαποδόμηση οφείλεται σε συνδυασμό φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών και παράγει στερεά, υγρά και αέρια προϊόντα (βιοαέριο).

Η ακριβής εκτίμηση των παραγόμενων ποσοτήτων είναι εξαιρετικά δύσκολη, αν όχι αδύνατη. Υπάρχουν πλήθος υπολογιστικών μοντέλων και συνεχώς ανακλύπτον νέα και πιο αξιόπιστα βασιζόμενα στις συνεχώς αυξανόμενες εμπειρίες και τα νέα δεδομένα. Το βασικό πρόβλημα εν προκειμένω είναι η κατανόηση και μοντελοποίηση των μικροβιολογικών και βιοχημικών διεργασιών. Το επιστημονικό πεδίο είναι διεθνώς ευρύτατο και ενεργό, καθώς μάλιστα ενθαρρύνεται και επιδοτείται η ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου.

Θεωρητικά από ένα τόνο Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) παράγονται (ανάλογα με τη σύνθεση τους) από 120 μέχρι 400 m³ βιοαερίου με θερμογόνο δύναμη από 3800 μέχρι 4700 Kcal/m³ [78]. Ένας άλλος πρακτικός κανόνας υποδεικνύει ότι ένας ΧΥΤΑ με 10⁶ τόνους ΑΣΑ, που τοποθετήθηκαν σε διάστημα 10 ετών, θα παράγει περίπου 700 m³/h βιοαέριο στο διάστημα μέγιστης παραγωγής, ενώ στα 10 χρόνια, η μέγιστη αυτή παραγωγή μειώνεται στο μισό [79]. Οι εκτιμήσεις αυτές οι οποίες αναφέρονται σε σύνθεση ΑΣΑ από άλλες χώρες παρατίθενται εδώ για να δηλώσουν την αδυναμία αξιόπιστων υπολογισμών.



Εικόνα 12: Σταθμός παραγωγής βιοαερίου (Άνω Λιόσια, Αθήνα) [8]

3.4 Ρυθμός παραγωγή βιοαερίου

Ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου αποτελεί τη διαχρονική κατανομή της απόδοσης των απορριμμάτων σε βιοαέριο και εκφράζεται σε μονάδες όγκου αέρα ανά χρόνο.

Παρά το γεγονός ότι το ολικό ποσό του βιοαερίου που θα παραχθεί καθορίζεται από τη στοιχειομετρία της αντίδρασης, οι τοπικές υδρολογικές συνθήκες, το pH, η επάρκεια θρεπτικών και η θερμοκρασία επηρεάζουν σημαντικά το ρυθμό παραγωγής του βιοαερίου.

Για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου, θα πρέπει να ελέγχεται ο ΧΥΤΑ από τη στιγμή της εναπόθεσης των απορριμμάτων μέχρι τη στιγμή της πλήρους αποσύνθεσης τους. Κάτι τέτοιο όμως είναι αρκετά δύσκολο εξαιτίας του απαιτούμενου χρόνου και του μεγέθους των πραγματικών ΧΥΤΑ. Γι' αυτό οι πρώτες προσπάθειες προσδιορισμού του ποσού και του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακούς προσομοιωτές. Το ευρύ φάσμα τιμών που έχει αποκτηθεί από εργαστηριακές μετρήσεις, οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιούνται οι μελέτες.

Ενώ εργαστηριακές προσομοιώσεις ΧΥΤΑ παρουσιάζουν ρυθμούς απόδοσης από 0,09 έως 488 l/Kg/yr [40],[50] οι εκτιμήσεις σε πραγματικούς ΧΥΤΑ κυμαίνονται από 1 έως 8 l/Kg/yr [40]. Η εκτίμηση του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου δεν είναι εύκολη, αφού κάθε ΜΕΔΑ έχει τις δικές της ιδιαιτερότητες. Όμως, η εξέλιξη του ρυθμού παραγωγής, αποτελεί βασική προϋπόθεση στη σχεδίαση ενός Συστήματος Ανάκτησης Βιοαερίου (ΣΑΒ).

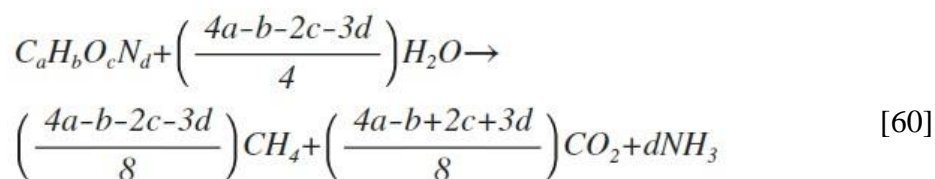
3.5 Όγκος παραγόμενου βιοαερίου

Ο όγκος του παραγόμενου βιοαερίου, που ορίζεται και ως το συνολικό ποσό αερίου που παράγεται από μοναδιαίο όγκο αστικών στερεών αποβλήτων σε άπειρο θεωρητικά χρόνο, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όταν γίνονται προσπάθειες ανάκτησης ή ελέγχου του. Η εκτίμηση του όγκου του παραγόμενου βιοαερίου βασίζεται τόσο σε θεωρητικές, όσο και πειραματικές μελέτες.

Οι θεωρητικές μελέτες ακολουθούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της μέγιστης θεωρητικής ποσότητας.

1) Στοιχειομετρική προσέγγιση (στοιχειομετρικές μέθοδοι)

Παρακάτω δίνεται μια στοιχειομετρική προσέγγιση των αντιδράσεων κατά τη μεθανογένεση στην οποία τα αντιδρώντα είναι τα συστατικά των απορριμμάτων εκφραζόμενα με εμπειρικούς τύπους που έχουν εξαχθεί από τη χημική σύσταση τους και τα προϊόντα περιλαμβάνουν τα δύο κύρια συστατικά του βιοαερίου, δηλαδή το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Η αντίδραση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θεωρητική εκτίμηση της σύστασης αλλά και της ποσότητας του βιοαερίου που παράγεται κατά την αναερόβια αποσύνθεση διαφόρων υποστρωμάτων:



2) Μέθοδος βιοαποδομήσιμου κλάσματος

Ο υπολογισμός του όγκου του παραγόμενου βιοαερίου γίνεται με τη μέθοδο του βιοαποδομήσιμου κλάσματος. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται μικρότερη ποσότητα παραγόμενου βιοαερίου. Για κάθε συστατικό των απορριμμάτων λαμβάνει διαφορετικούς ρυθμούς αποδόμησης ή χρόνους ημίσειας ζωής, ή υπολογίζει το ρυθμό αποσύνθεσης κάθε συστατικού με βάση το περιεχόμενο του σε πτητικά στερεά χρησιμοποιώντας έναν κοινό παράγοντα απόδοσης βιοαερίου για όλα τα βιοαποδομήσιμα πτητικά στερεά.

Οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις υπεραπλουστεύουν τις πραγματικές διαδικασίες και αποτυγχάνουν στην επίδραση άλλων παραγόντων, όπως η διάρκεια της αερόβιας και αναερόβιας διαδικασίας, ο περιορισμός των θρεπτικών, οι βιολογικές αναστολές, οι φυσικοχημικές αλληλεπιδράσεις και οι απαιτήσεις για κυτταρική ανάπτυξη και αναπαραγωγή. Έτσι θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο για τον υπολογισμό των μέγιστων αποδόσεων και για το καθορισμό ολόκληρης της διαδικασίας μετατροπής.

Οι αποδόσεις σε μελέτες αναερόβιων χωνευτών χαρακτηρίζονται από ένα ομογενές και ελεγχόμενο περιβάλλον, σε αντίθεση με τις ΧΥΤΑ στις οποίες υπάρχει πλήρης ανομοιομορφία στο υπόστρωμα και μη ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι μελέτες σε εργαστηριακούς προσομοιωτές ΧΥΤΑ παρέχουν καλύτερες πληροφορίες σε σχέση με τις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Η απόδοση των απορριμμάτων σε βιοαέριο και μεθάνιο ανάλογα με τη μέθοδο υπολογισμού, έχει συλλεχθεί και κατηγοριοποιηθεί στη βιβλιογραφία [40],[50]. Στο παρακάτω πίνακα δίνεται το εύρος των τιμών αυτών ανάλογα με τη μέθοδο.

Πίνακας 9 : Τιμές απόδοσης απορριμμάτων σε βιοαέριο και μεθάνιο [29].

Μέθοδος	Απόδοση βιοαερίου	
	(l/Kg ξηρού σκουπιδιού)	Απόδοση μεθανίου (l/Kg ξηρού σκουπιδιού)
Μέθοδος βιοαποδομήσιμου κλάσματος	120-350	60-170
Στοιχειομετρική μέθοδος	120-500	210-270
Αναερόβιος Χωνευτής	210-390	120-280
Εργαστηριακές προσομοιώσεις ΧΥΤΑ	0.001-250	0.001-140

3.6 Η μετανάστευση των αερίων στους χώρους διάθεσης

Το μεθάνιο είναι ελαφρύτερο του αέρα και τείνει να κινηθεί κατακόρυφα και να διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Επίσης, επειδή τα μόρια του είναι σχετικώς μικρά, μπορεί να κινηθεί μέσα σε πορώδη εδάφη και να εκτονωθεί αρκετές εκατοντάδες μέτρα μακριά από τα όρια του χώρου διάθεσης [61]. Όταν ο χώρος έχει σχήμα λάκκου και είναι τοποθετημένος σε διαπερατό πέτρωμα, μπορεί να εκτιμηθεί η μέγιστη απόσταση μετανάστευσης από τα όρια του, σε τιμές που υπολείπονται από το κατώτερο όριο εκρηκτικότητας (5% CH₄) (με κοκκώδη εδάφη και αργιλλώδη κάλυψη) από τον παρακάτω τύπο:

$$D=10 \times H \text{ (Hansjörg Oeltschner)}$$

Όπου:

D=H απόσταση μετανάστευσης του αερίου (με κατώτατο όριο εκρηκτικότητας 5% CH₄)

H = Το βάθος των απορριμμάτων μέσα στο έδαφος

Το αέριο στις περισσότερες περιπτώσεις εκτονώνεται στην ατμόσφαιρα, αλλά σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει σε κτίρια κοντά στο χώρο, με κίνδυνο πρόκλησης εκρήξεων, πυρκαγιάς ή δυσάρεστων οσμών. Η μετανάστευση των αερίων,

πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη από όσους προγραμματίζουν δραστηριότητες κοντά σε λειτουργούντα χώρο διάθεσης.

Η συσσώρευση του αερίου στο χώρο σε θύλακες, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη και πρέπει όλοι οι εργαζόμενοι και οι προσερχόμενοι στο χώρο, να είναι ενήμεροι του κινδύνου. Τα παιδιά πρέπει να παραμένουν μακριά από το χώρο. Το συσσωρευμένο αέριο (μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα) δημιουργεί μια πίεση 2,5–5cm νερού πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση. Το αέριο (βιοαέριο) ωθείται προς τις διόδους ελάχιστης αντίστασης (περιοχές μεγάλης διαπερατότητας, ρηγματωμένες κ.τ.λ.). Διάτρητοι σωλήνες, στραγγιστήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή του βιοαερίου. Η κίνησή του λόγω διαφοράς πίεσης είναι γνωστή σα ροή πίεσης. Τα αέρια του χώρου μπορούν να μεταναστεύσουν επίσης, λόγω ροής διάχυσης.

Για την αντιμετώπιση της πλευρικής μετανάστευσης χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τρόποι:

- ▶ Αδιαπέρατα τοιχώματα. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται άργιλος, μπετονίτης, πλαστικά φύλλα, σκυρόδεμα.
- ▶ Αεριστήρες. Κατασκευάζονται στο εσωτερικό μέρος με σκοπό τη διακοπή της μετανάστευσης του βιοαερίου προς μια ανεπιθύμητη ή επικίνδυνη κατεύθυνση. Για χώρους βάθους μέχρι 5 m σκάβεται τάφος στην περίμετρο του χώρου και γεμίζεται με χοντρά και αδρανή, ώστε να εμποδιστεί η μετανάστευση των αερίων. Για μεγαλύτερα βάθη, πρέπει να γίνουν αδιαπέρατα τοιχώματα.

Ο αεριστήρας δε πρέπει να συμπιέζεται και η άνω επιφάνεια του να μην μπλοκάρεται και κλίνει. Η απόσταση μεταξύ των αεριστήρων, μεταβάλλεται συνήθως από 18–60m περίπου. Το πάχος τους για να έχουμε συνεχή κίνηση των αερίων συνίσταται να είναι από 0,3 έως 0,45m. Ο αεριστήρας πρέπει να παραμένει σχετικά ξηρός, για να διατηρεί τη διαπερατότητα στην διόδο των αερίων. Αυτό επιτυγχάνεται δια φυσικής στράγγισης ή άντλησης των υγρών που διηθούνται στον αεριστήρα.

Άλλος τρόπος ελέγχου της μετανάστευσης των αερίων είναι, με κατακόρυφα πηγάδια γεμάτα με λίθους ή χαλίκια μέσα στα οποία τοποθετούνται διάτρητοι σωλήνες. Τα πηγάδια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάκτηση του βιοαερίου.

Εάν ο έλεγχος της μετανάστευσης είναι η μόνη εξέταση, τότε τα πηγάδια συλλογής τοποθετούνται γύρω στα όρια του χώρου διάθεσης (συνήθως μέχρι 150m από την περίμετρο του χώρου διάθεσης). Μπορεί όμως να γίνει αναγκαίο, να έχουμε δύο χωριστά συστήματα συλλογής, ένα για τον έλεγχο της μετανάστευσης και ένα για την ανάκτηση και αξιοποίηση.

3.7 Η διαρροή του βιοαερίου από τη στρώση κάλυψης

Η διαρροή ακολουθεί το Νόμο του Darcy:

$$\text{και} \quad K_{\mu} = K_v * \frac{\alpha v}{\alpha \mu} \quad Q = E * K * \frac{\Delta H}{l}$$

όπου:

K_{μ} = διαπερατότητα μεθανίου

$K_v = K$ = διαπερατότητα νερού

$\alpha \mu$ = ιξώδες μεθανίου

αv = ιξώδες νερού

E = επιφάνεια

3.8 Η τεχνολογία ανάκτησης του βιοαερίου

Σε μερικούς ΧΥΤΑ, αξίζει η αφαίρεση του βιοαερίου για τη χρήση του σαν καύσιμο.

Πρέπει όμως να πληρούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις [4]:

- ▶ Να έχει επισημανθεί μια κατάλληλη χρήση του βιοαερίου.

- ▶ Ο χώρος να έχει ένα ελάχιστο 10 m βιοαποδομήσιμου υλικού.
- ▶ Να μην υπάρχει στο χώρο ήδη τοποθετημένη μια μεγάλη ποσότητα απορριμμάτων. Από την πείρα θεωρείται απαραίτητο να υπάρχουν 0,5 εκατομμύριο τόνοι.
- ▶ Τα απορρίμματα να μην είναι πολύ παλαιά. Απορρίμματα που έχουν εναποτεθεί μεταξύ 5 και 10 ετών, φαίνεται ότι έχουν την μεγαλύτερη απόδοση.
- ▶ Η στάθμη του υπογείου νερού να είναι, 5 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οι συνθήκες κορεσμού, δε συντελούν στη συλλογή του χώρου διάθεσης.

Κάτω από αυτά τα κριτήρια, οι αεριστήρες στην ατμόσφαιρα και η καύση των αερίων μέσω ειδικών συσκευών, θα παραμένουν για τους περισσότερους χώρους, ο μόνος τρόπος ελέγχου των παραγόμενων αερίων.

Υπάρχουν δύο τεχνολογίες για την ανάκτηση του βιοαερίου. Η μία αφορά τους χώρους διάθεσης που έχουν τελειώσει και η άλλη αυτούς που βρίσκονται σε εκμετάλλευση. Η τεχνολογία που αφορά χώρους που βρίσκονται σε εκμετάλλευση χωρίζεται σε συστήματα κατακόρυφης και οριζόντιας συλλογής.

3.9 Προεργασίες για την εκτίμηση της ποσότητας του βιοαερίου

Σε ορισμένες θέσεις κατασκευάζονται γεωτρήσεις με σκοπό τον προσδιορισμό της ποσότητας του αερίου που θα εξαχθεί, για διάφορες πιέσεις αναρρόφησης. Οι πραγματοποιούμενες δοκιμές άντλησης ξεχωρίζονται στις στατιστικές και στις δυναμικές. Με τις δυναμικές δοκιμές προσδιορίζονται κατά τη διάρκεια της άντλησης.

- ▶ Η ποσότητα του μεθανίου για διάφορες παροχές άντλησης
- ▶ Η κρίσιμη παροχή, δηλαδή εκείνη η παροχή αναρρόφησης, πέραν της οποίας παρουσιάζεται μια μεγάλη ελάττωση της περιεκτικότητας του μεθανίου.

Με τις δοκιμές επίσης στην περιοχή του χώρου, επιδιώκεται να ξεχωριστεί, το μέρος που έχει την καλύτερη ποιότητα για να αξιοποιηθεί.

Για τον προσδιορισμό της σφαίρας επίδρασης κάθε φρέατος εξαγωγής χρησιμοποιούνται πιεζόμετρα σε διαφορετικές αποστάσεις από το φρέαρ. Η σφαίρα επίδρασης θεωρείται ότι βρίσκεται σε μια ακτίνα από 30-50m. Ο αριθμός των φρεάτων που απαιτούνται, μπορεί να μεταβάλλεται κατά μέσο όρο στα δύο ανά εκτάριο (ha). Η ποσότητα του εξαγόμενου αερίου είναι επίσης μεταβλητή. Μια τυπική τιμή είναι περίπου 3m³/min. Επίσης με την εύρεση της περιεκτικότητας των απορριμμάτων σε οργανικές ουσίες, μπορούμε να εκτιμήσουμε το δυναμικό της βιοαποδόμησης που είναι παρόν, και να προβλέψουμε τη μελλοντική παραγωγή βιοαερίου.

Διερευνήσεις πρέπει να γίνουν και για τις απώλειες του μεθανίου που είναι κυρίως:

- ▶ Η διάχυση πάνω από την κάλυψη του χώρου
- ▶ Η πλευρική μετανάστευση στο χώρο
- ▶ Η καθυστέρηση στην έναρξη της παραγωγής
- ▶ Η διακοπή για οικονομικούς λόγους

3.10 Αξιοποίηση των αερίων

Εάν δεχτούμε μια ανάκτηση 4m³ βιοαερίου ανά έτος και ανά τόνο, ένας χώρος που δέχεται 100.000 τόνους/year απορριμμάτων, αυξάνει κάθε χρόνο το δυναμικό του κατά 200 τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (τ.ι.π.). Σε 10 χρόνια θα αντιστοιχεί σε 2.000 τ.ι.π.

Γενικά ένας χρόνος με 55% μεθάνιο, έχει μια τυπική θερμογόνο δύναμη του βιοαερίου 20 MJ/m³.

Το βιοαέριο μπορεί να έχει τις ακόλουθες χρήσεις:

- ▶ Κατευθείαν πώληση σε ένα πελάτη
- ▶ Πώληση μετά από καθαρισμό και συμπίεση

- ▶ Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- ▶ Έγχυση σε υφιστάμενο αγωγό εθνικού δικτύου φυσικού αερίου
- ▶ Μετατροπή του σε άλλες χημικές μορφές.

Εξετάζεται επίσης η ζήτηση για χρήση του αναπαραγόμενου CO₂, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ψύξη και σαν παράγων ουδετεροποίησης για έλεγχο του pH [62]. Το κόστος καθαρισμού του CO₂ ανάλογα με την καθαρότητα, κυμαίνεται από 0,6 έως 3\$ ανά 1000 ft³.

Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν καύσιμο για αυτοκίνητα. Πρέπει όμως να ισχύουν προδιαγραφές που αναφέρονται παρακάτω:

- ▶ $H_2S \leq 15 \text{ mg/Nm}^3$
- ▶ Ετήσια τεχνική επιθεώρηση του αυτοκινήτου
- ▶ Φιάλες χωρίς συγκόλληση με πίεση δοκιμής 300 bars.

Ο καθορισμός του βιοαερίου και η συμπίεση σε πίεση 200 bars είναι σχετικά δαπανηρά. Η τροφοδότηση μιας εκατοντάδας δημοτικών αυτοκινήτων δε θεωρείται ακόμα οικονομική. Ο ελάχιστος αριθμός αυτοκινήτων για μια τέτοια δραστηριότητα πρέπει να φτάνει τα 300 αυτοκίνητα.

3.11 Εφαρμογές χρήσεων σε διάφορες χώρες

Σε αρκετές χώρες έχει αρχίσει να πραγματοποιείται η αξιοποίηση του βιοαερίου και θα αναφερθούμε σε ορισμένες εφαρμογές χρήσεων. Παρακάτω κατηγοριοποιούνται ανά χώρα [4].

ΗΠΑ

Έχουν γίνει εγκαταστάσεις σε χώρους διάθεσης για την εξαγωγή βιοαερίου και την χρησιμοποίησή του στη βιομηχανία σαν καυσίμου μετά από καθαρισμό ή για την κίνηση ηλεκτρογεννητριών

Στο Brea της Καλιφόρνιας παράγονται από βιοαέριο που εξάγεται από το χώρο διάθεσης, 120.000KWH ηλεκτρικού ρεύματος ανά ημέρα, ικανού για να καλύψει τις ανάγκες 10.000 κατοίκων. Η ολική παραγωγή κατά τις εκτιμήσεις, ισοδυναμεί με 2700 βαρέλια πετρελαίου ανά βδομάδα περίπου. Η διάρκεια πραγματοποίησης της εγκατάστασης έφθασε τα τέσσερα χρόνια (άδεια, μελέτες, προμήθειες, κατασκευές κ.τ.λ.). το κόστος ανέρχεται σε 11 εκατομμύρια \$. Το αέριο εξάγεται από χώρο διάθεσης 55 εκταρίων.

Η συλλογή του γίνεται σε περισσότερα από 30 φρέατα βάθους 38m. Σε οπές 9cm εισάγονται διάτρητοι σωλήνες διαμέτρου 15,6cm. Οι σωλήνες συνδέονται με τον κύριο σωλήνα συλλογής ο οποίος διατρέχει μήκος 4,5km πάνω στην επιφάνεια του χώρου. Το αέριο καθαρίζεται από την υγρασία και διάφορα άλλα ίχνη ρυπάνσεων. Η ποσότητα θαμένων απορριμμάτων ήταν 20 εκατομμύρια τόνοι και η ηλικία της εγκατάστασης 25 χρόνια.

Η προσδοκώμενη ωφέλεια από την ανάκτηση του βιοαερίου είναι η ελάττωση της μετανάστευσής του, των εκπομπών υδρογονανθράκων και των οσμών. Η ελάττωση των εκπομπών του βιοαερίου εντός του επιφανειακού εδάφους του χώρου διάθεσης επιτρέπει την επιστροφή του οξυγόνου και διευκολύνει την ανάπτυξη εκ νέου φυτών και ανθέων (πολλοί χώροι διάθεσης που δεν είναι πια σε λειτουργία, μετατρέπονται σε πάρκα και χώρους αναψυχής).

Αγγλία

Ένας από τους χώρους διάθεσης που λειτουργεί με πολύ επιτυχή αποτελέσματα είναι στο Aneley. Το αέριο εξάγεται από το χώρο διάθεσης, ψύχεται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και αντλείται κατ' ευθείαν στην Thames Board Mills δύο μίλια πιο μακριά.

Γερμανία

Στη Γερμανία παρουσιάστηκαν προβλήματα, από την παρουσία χλωριωμένων υδρογονανθράκων, που βρίσκονταν μέσα στο βιοαέριο (σε χώρους είχαν γίνει δεκτά και

βιομηχανικά απορρίμματα για ορισμένο χρόνο). Παρουσιάστηκαν σοβαρές διαβρώσεις, σε εξαρτήματα του μηχανικού εξοπλισμού παραγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος. Έτσι θεωρείται αναγκαίο πριν την εξαγωγή και χρήση του αερίου, να γίνεται ανάλυση των απορριμμάτων που εναποτέθηκαν ή πρόκειται να εναποτεθούν στο χώρο διάθεσης. Πρόσφατα πειράματα που γίνονται σε πειραματικές μονάδες, αποσκοπούν στην απομάκρυνση των ρυπαντών από βιοαέριο.

Γαλλία

Πειράματα που έγιναν στη Γαλλία έδειξαν ότι:

- ▶ Η υγρασία είναι η παράμετρος κλειδί, για την αύξηση της παραγωγής του μεθανίου. Η περίσσεια όμως υγρασία, εμποδίζει τη συλλογή του μεθανίου με οικονομικό τρόπο.
- ▶ Η παραγωγή μεθανίου γίνεται παντού, ακόμη και σε ξηρούς χώρους διάθεσης με λίγη υγρασία.
- ▶ Ο χρόνος που απαιτείται για την έναρξη παραγωγής μεθανίου μετά από τη διάθεση είναι ένας μήνας.

Οι Γάλλοι πιστεύουν ότι 5 εκατομμύρια τόνοι απορριμμάτων, που διατίθενται με υγειονομική ταφή, μπορούν να ικανοποιήσουν το 0,1% των ενεργειακών αναγκών της χώρας.

3.12 Παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο στην Ελλάδα

Το βιοαέριο όπως προαναφέρθηκε παράγεται από την αναερόβια αποσύνθεση οργανικών απορριμμάτων που συγκεντρώνονται σε χωματερές. Αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα μαζί με υδρατμούς και μικρές ποσότητες οργανικών ενώσεων. Η σημαντική περιεκτικότητα μεθανίου στο βιοαέριο το καθιστά κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας (ηλεκτρικής και θερμικής).

Κάθε Ευρωπαίος παράγει 5 με 15 κιλά απορριμμάτων κάθε ημέρα. Η εκμετάλλευση του βιοαερίου από τις χωματερές είναι μια λύση που κερδίζει συνεχώς υποστηρικτές.

Πριν από μερικά χρόνια ολοκληρώθηκε για λογαριασμό της ΒΕΑΛ (Βιοαέριο-Ενέργεια Άνω Λιοσίων) ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από βιοαέριο, το οποίο αντλείται από τον όγκο των απορριμμάτων που εναποτίθενται στον Χωματερή Άνω Λιοσίων.

Ο σταθμός των Άνω Λιοσίων είναι από τους μεγαλύτερους με καύσιμο βιοαέριο παγκοσμίως και η κατασκευή του ίδιου και των δικτύων διανομής κόστισε περισσότερο από 6,5 δισ. δρχ.

Η μονάδα έχει δυνατότητα να παρέχει 8.000 κυβικά μέτρα βιοαερίου την ώρα, ενώ παράγει και ηλεκτρισμό (ισχύς 13 MW) και θερμότητα (16 MW). Η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από την ίδια ποσότητα καυσίμου με σημαντικά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από την ανεξάρτητη παραγωγή της καθεμιάς από τις προαναφερόμενες μορφές ενέργειας.

Το βιοαέριο που παράγεται από την αναερόβια χώνευση της βιομάζας που συγκεντρώνεται στη χωματερή, αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (γενικά 40 – 70%) και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ -συνήθως μέχρι 5%- συμμετέχουν στη σύστασή του και άλλα αέρια όπως υδρογόνο, άζωτο, μονοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, υδρατμοί κ.λπ. Όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο, τόσο μεγαλύτερη απόδοση έχει ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας

Να προσθέσουμε ότι τα προϊόντα της επεξεργασίας είναι αρκετά σταθεροποιημένα. Το όλο έργο αναμένεται να συμβάλει σημαντικά στην αναβάθμιση του επιβαρημένου περιβάλλοντος της Αττικής, αφού ελέγχει την ανεξέλεγκτη έκλυση βιοαερίου από τα απορρίμματα, που συντελεί σημαντικά στην εντατικοποίηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Τέλος, επιταχύνει την εξάλειψη των οσμών και την αποφυγή εκδήλωσης πυρκαγιών (το τελευταίο δεν είναι σπάνιο τους καλοκαιρινούς μήνες) [63].

3.13 Μέτρα ασφάλειας

Πρέπει να λαμβάνονται τα αναγκαία μέτρα ασφάλειας, για να μην δημιουργούνται φλόγες ή σπινθήρες στο χώρο, κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων, τα οποία συνίστανται παρακάτω [4]:

- ▶ Απαγόρευση του καπνίσματος
- ▶ Κατάλληλη τοποθέτηση του γεωτρήπανου
- ▶ Ο χρησιμοποιούμενος μηχανικός εξοπλισμός να μην παράγει σπινθήρες
- ▶ Έλεγχος της περιεκτικότητας του μεθανίου πριν τεθεί σε λειτουργία το γεωτρήπανο
- ▶ Περιοδικό έλεγχο της γεώτρησης
- ▶ Προστασία του προσωπικού, γάντια κ.τ.λ. Επίσης οι εισερχόμενοι σε φρεάτια επίσκεψης πρέπει να έχουν αναπνευστική συσκευή και να είναι συνδεδεμένοι με καλώδιο ασφαλείας, που κρατάει δεύτερος εργάτης.

4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Η αναγκαιότητα του μοντέλου παραγωγής βιοαερίου βασίζεται στην προστασία του περιβάλλοντος καθώς και στις εκτιμήσεις ανάκτησης ενέργειας. Στην πρώτη περίπτωση το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιδράσεων και του κινδύνου έκρηξης λόγω της ανεξέλεγκτης εκπομπής βιοαερίου. Στη δεύτερη περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό συστημάτων ανάκτησης βιοαερίου, καθώς και ανάλυσης της οικονομικής βιωσιμότητας των διαδικασιών της ανάκτησης βιοαερίου. Στο σημείο αυτό υπάρχουν δύο σημαντικές ερωτήσεις που πρέπει να απαντηθούν. Η πρώτη αναφέρεται στη μέγιστη απόδοση βιοαερίου και η δεύτερη με ποιο ρυθμό θα παραχθεί το βιοαέριο.

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες στο παρελθόν για να απαντηθούν οι δυο παραπάνω απαντήσεις σε εμπειρικά μοντέλα όπου ήδη έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία (Κεφ.5, παρ.4). Το αντικείμενο όλων αυτών των μοντέλων είναι η πρόβλεψη την απόδοσης και του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου.

Τα μοντέλα που ασχολούνται με την παραγωγή βιοαερίου έχουν σαν βασικό στόχο την αξιολόγηση του ρυθμού της παραγωγής του βιοαερίου. Με την παραγωγή του αερίου γνωστή, η ερώτηση σχετικά με το ρυθμό μεταφράζεται σαν ερώτηση ανάλυσης του ρυθμού παραγωγής ανά το χρόνο. Τέτοια προσέγγιση είναι διαδεδομένη στην χημική μηχανική όπου η θερμοδυναμική και η στοιχειομετρία χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν την παραγωγή και οι χημικές κινητικές χρησιμοποιούνται για την κατάλληλη έκφραση του ρυθμού της παραγωγής βιοαερίου. Οι κινητικές πρώτης τάξης χρησιμοποιούνται από όλα τα κινητικά μοντέλα. Ο λόγος της χρήσης κινητικών πρώτης τάξης βασίζεται στην εφαρμογή υποστρώματος – περιοριστικών συνθηκών σε μια εξίσωση που περιγράφει το ρυθμό της χρησιμότητας του υποστρώματος όπου βασίζεται στο μοντέλο του Monod για την ανάπτυξη των μικροβίων. Ένα μεγάλο μειονέκτημα

όλων αυτών των εμπειρικών μοντέλων είναι ότι δεν υπολογίζουν βασικές μεταβλητές όπως είναι η περιεκτικότητα σε νερό, η πυκνότητα των απορριμμάτων και το πορώδες, ή τα θρεπτικά και το pH. Τέλος κανένα από αυτά τα μοντέλα δεν εμπεριέχει σημαντικά τμήματα της διαδικασίας που έχει το συγκεκριμένο και θα περιγραφούν παρακάτω όπως η υδρόλυση, η ανάπτυξη του μικροβιακού οικοσυστήματος και μεταφορά μάζας (στερεή-υγρή φάση).

Στις επόμενες παραγράφους θα περιγραφεί η δομή του μοντέλου όπου αναλύονται τα φυσικά, χημικά και βιολογικά συστατικά που συντελούν κατά τη μεθανογένεση.

4.2 Γενικές εκτιμήσεις

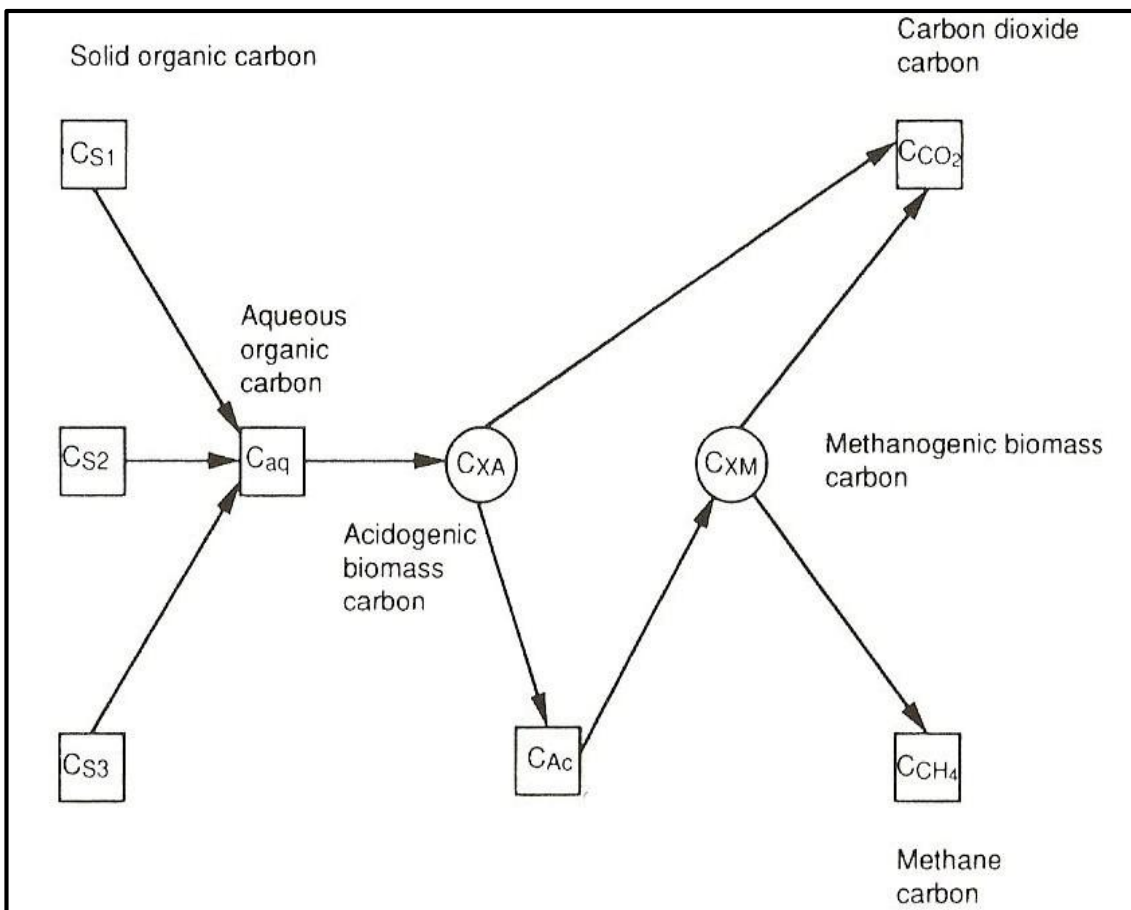
Το παρόν μοντέλο είναι δομημένο στο στερεό υπόστρωμα του βιοαντιδραστήρα (ΧΥΤΑ). Το στερεό υπόστρωμα είναι το ίδιο το σκουπίδι. Το κεντρικό τμήμα του απορρίμματος είναι τα βιοαποδομήσιμα οργανικά. Η σύνθεση των απορριμμάτων είναι μεταβλητή και αντιμετωπίζεται υπό αυτή τη μορφή στο μοντέλο. Τυπικά το 70% του ξηρού βάρους (του σκουπιδιού) είναι οργανική ύλη και περίπου το μισό της οργανικής ύλης είναι οργανικός άνθρακας. Υδρογονάνθρακες, λιπίδια, πρωτεΐνες και πλαστικά είναι μέρη των οργανικών ενώσεων. Η κυτταρίνη είναι το επικρατέστερο συστατικό με περισσότερο του 80% του οργανικού άνθρακα.

Παλαιότερες μελέτες έχουν δείξει ότι περίπου το 50% (ξηρού βάρους) του οργανικού μέρους του απορρίμματος μπορεί να μετατραπεί σε βιοαέριο (μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα) κάτω από αναερόβιες συνθήκες [64]. Το χαμηλό ποσοστό του βιοαεριοποιήσιμου άνθρακα αποδίδεται στην παρουσία λιγνοκυτταρινικών ουσιών (αναερόβια βιοαποδόμηση), και προτείνονται μέθοδοι προεπεξεργασίας των απορριμμάτων βάσει των οποίων μπορεί να αυξηθεί η βιοαεριοποίηση σε ποσοστό του 50% [65]. Βάσει αυτών των εκτιμήσεων, τα ακόλουθα μπορούν να θεωρηθούν εφαρμόσιμα στην περίπτωση των απορριμμάτων :

- ▶ 0,700 Kg οργανικής ύλης ανά Kg ξηρού απορρίμματος
- ▶ 0,350 Kg οργανικού άνθρακα ανά Kg ξηρού απορρίμματος

- 0,175 Kg βιοαεριοποιήσιμου οργανικού άνθρακα ανά Kg ξηρού απορρίμματος

Εάν υποθέσουμε ότι παράγονται ίσοι όγκοι μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα ανά mole βιοαεριοποιήσιμου οργανικού άνθρακα ($C_{(org)} + H_2O + \frac{1}{2}CH_4 + \frac{1}{2}CO_2$), τότε μπορούν να παραχθούν 0,67 Kg μεθανίου και 1,83 Kg διοξειδίου του άνθρακα ανά Kg οργανικού άνθρακα. Σύμφωνα με την προηγούμενη υπόθεση ότι 0,175 Kg βιοαεριοποιήσιμου οργανικού άνθρακα ανά Kg ξηρού απορρίμματος, η παραγωγή μπορεί να υπολογιστεί: 0,1167 Kg μεθανίου ξηρού σκουπιδιού και 0,3208 Kg μεθανίου ανά Kg ξηρού απορρίμματος, ή σε όγκο (22,4 σε κανονικές συνθήκες ανά mole αερίου), 0,1634 m³ CH₄/Kg και 0,1634 m³ CO₂/Kg όπου προκύπτει το άθροισμα 0,3268 m³ συνολικού αερίου ανά Kg ξηρού απορρίμματος.



Εικόνα 13: Δεξαμενές και διάδρομοι οργανικού άνθρακα. [66]

4.3 Φυσικό μέρος

Οι φυσικές παράμετροι εδαφικού βιοαντιδραστήρα απορριμμάτων αλλάζουν με το χρόνο μεταβάλλοντας το ρυθμό παραγωγής βιοαερίου. Η αεριοποίηση των οργανικών ουσιών λόγω βιολογικών (αερόβιων και αναερόβιων) διεργασιών, ελευθερώνει θερμότητα, νερό και αέρια. Η έκλυση θερμότητας επηρεάζει τη θερμοκρασία του βιοαντιδραστήρα, ενώ η έκλυση υδρατμών επηρεάζει την υγρασία των απορριμμάτων. Επιπλέον η αεριοποίηση των οργανικών ουσιών και η δημιουργία εκχυλισμάτων έχει σαν αποτέλεσμα την καθίζηση του ΧΥΤΑ που επηρεάζει την πυκνότητα των απορριμμάτων. Αλλαγές στην πυκνότητα επηρεάζουν με τη σειρά τους το πορώδες και την περιεκτικότητα σε νερό. Εκτός των παραπάνω υπάρχουν και εξωτερικές επιδράσεις, όπως οι κλιματικές παράμετροι, που προκαλούν συνεχείς διακυμάνσεις στις συνθήκες που επικρατούν σε ένα ΧΥΤΑ.

4.3.1 Φυσικές παράμετροι εισόδου

Όλες οι φυσικές παράμετροι εισόδου – εκτός από την πυκνότητα των απορριμμάτων – εισάγονται στο πρόγραμμα σαν εκατοστιαία ποσοστά (τιμές από 0 έως 100). Οι παράμετροι αυτοί περιγράφονται στη συνέχεια.

- ▶ Πυκνότητα απορριμμάτων, **D**

Εισάγεται η φαινομενική πυκνότητα (bulk density) των αποτιθέμενων (συμπιεσμένων) απορριμμάτων (Kg/m^3). Το πρόγραμμα θεωρεί τα απορρίμματα σαν ένα ομογενές μείγμα με συγκεκριμένη πυκνότητα καθ' όλη τη διάρκεια της αποσύνθεσης.

Η πυκνότητα απαιτείται για τον υπολογισμό του πορώδους των απορριμμάτων και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Όπου: ρ = πυκνότητα απορριμμάτων (kg/m^3)

M = συνολική μάζα (Kg)

V = συνολικός όγκος απορριμμάτων (m^3)

► Σύσταση απορριμμάτων

Η σύσταση των απορριμμάτων εισάγεται βάσει της παρακάτω κατάταξης:

1. Αγροτικά παραπροϊόντα
2. Υπολείμματα τροφής
3. Χαρτί
4. Πλαστικά / λάστιχα
5. Υφάσματα και ξύλο
6. Αδρανή ανόργανα κλάσματα (γυαλί, μέταλλα, πέτρες, στάχτες κτλ.)

Έμφαση κατά την εισαγωγή της σύστασης των απορριμμάτων πρέπει να δίνεται στα οργανικά συστατικά (ζυμώσιμα, χαρτί, αγροτικά, πλαστικά, υφάσματα, ξύλο, δέρμα) γιατί αυτά χρησιμοποιούνται από τον κώδικα κατά τους υπολογισμούς. Τα ανόργανα συστατικά εισάγονται σε μια κατηγορία. Το άθροισμα όλων των συστατικών που εισάγονται θα πρέπει να είναι τελικά ίσο με το εκατό (100), έτσι ώστε να είναι ακριβείς οι υπολογισμοί των διαφόρων παραμέτρων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η σύσταση των απορριμμάτων ενός ΧΥΤΑ σχετικά με τη βιοαποδόμησή τους ανάλογα με τα χρόνια και κατηγοριοποιούνται σε ταχέως και βραδέως βιοαποδομούμενα.

Πίνακας 10 : Ταχέως και βραδέως βιοαποδομούμενα συστατικά απορριμμάτων [10].

Συστατικό	Ταχέως βιοαποδομούμενα	Βραδέως βιοαποδομούμενα
	1 – 5 έτη	15 – 50 έτη
Υπολείμματα τροφίμων	X	
Εφημερίδες	X	
Χαρτί γραφείου	X	
Χαρτόνι	X	
Πλαστικά		
Ύφασμα		X
Ελαστικά		X
Δέρμα		X
Κλαδοδέματα	X (60 %)	X (40 %)
Ξύλο		X

► Υγρασία συστατικών, w_i

Η περιεκτικότητα σε νερό είναι πολύ σημαντική φυσική παράμετρος. Στην περίπτωση πλήρους κορεσμού των απορριμμάτων σε υγρασία, η διεπιφάνεια στερεού – υγρού είναι ίση με τη συνολική επιφάνεια των στερεών του βιοαντιδραστήρα και οι μικροβιακές διεργασίες μεγιστοποιούνται ως προς το διαθέσιμο χώρο εξέλιξης. Στην περίπτωση που τα απορρίμματα είναι ακόρεστα σε υγρασία, η ενυδατωμένη επιφάνεια αποτελεί ποσοστό της συνολικής και θα αεριοποιηθεί ποσοστό του συνολικά διαθέσιμου οργανικού άνθρακα.

Στον κώδικα γίνεται η θεώρηση ότι η υγρασία είναι σε όλο τον όγκο των απορριμμάτων και παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια των μικροβιακών διεργασιών, δηλαδή είναι συνεχώς ίση με την αρχική της τιμή.

Για κάθε κατηγορία συστατικών είναι απαραίτητη η μέση τιμή της υγρασίας που έχουν αυτά αμέσως μετά την εναπόθεση τους στο ΧΥΤΑ καθώς και η υγρασία κορεσμού τους. Οι τιμές αυτές προσδιορίζονται από εργαστηριακές μετρήσεις και δίνονται στη βιβλιογραφία [10]. Με βάση τις τιμές αυτές γίνεται διόρθωση των σταθερών υδρόλυσης των τριών κατηγοριών υδρολυόμενων συστατικών. Ο μέγιστος ρυθμός υδρόλυσης επιτυγχάνεται όταν η υγρασία του συστατικού είναι ίση με την υγρασία κορεσμού του.

► **Οργανικός άνθρακας, OC**

Ο οργανικός άνθρακας εισάγεται σαν ποσοστό επί της ξηρής βάσης του κάθε συστατικού και μπορεί να προσδιοριστεί εργαστηριακά αλλά και στοιχειομετρικά για κάποια ένωση ή για κάποιο συστατικό των απορριμμάτων.

► **Βιοαεριοποιήσιμο κλάσμα οργανικού άνθρακα, PB**

Οι μικροοργανισμοί δε μπορούν να μεταβολίσουν όλο τον οργανικό άνθρακα που περιέχεται στα απορρίμματα, καθώς ένα τμήμα του δεν είναι αποδομήσιμο ή αποδομείται πολύ αργά (π.χ. λιγνοκυτταρινικά συμπλέγματα). Το κλάσμα του βιοαεριοποιήσιμου άνθρακα εκφράζεται σαν ποσοστό επί της εκατό του οργανικού άνθρακα.

4.3.2 Φυσικές παράμετροι εξόδου

Με βάση τα προαναφερθέντα υπολογίζονται από το πρόγραμμα οι ακόλουθες φυσικές παράμετροι:

- Συνολική υγρασία απορριμμάτων

Η συνολική υγρασία υπολογίζεται από την σχέση:

$$w = \sum_{i=1}^n c_i * w_i$$

Όπου:

w = υγρασία απορριμμάτων (% σε υγρή βάση)

c_i = βάρος συστατικού i / βάρος απορριμμάτων (υγρή βάση)

w_i = υγρασία συστατικού i (% υγρή βάση)

- Υγρασία κορεσμού απορριμμάτων

Η συνολική υγρασία κορεσμού υπολογίζεται από την σχέση [50]:

$$w_{sat} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(1 - w_i) * c_i * w_{sati}}{n}}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{(1 - w_i) * c_i * w_{sati}}{n} + \sum_{i=1}^n (1 - w_i) * c_i^{1-w_{sati}}}$$

Όπου:

w_i = υγρασία συστατικού i (% υγρή βάση)

c_i = βάρος συστατικού i / βάρος απορριμμάτων (υγρή βάση)

w_{sat} = υγρασία κορεσμού απορριμμάτων (% υγρή βάση)

w_{sati} = υγρασία κορεσμού συστατικού i (% υγρή βάση)

- ▶ Ξηρό μέρος απορριμμάτων

Το ξηρό κλάσμα των απορριμμάτων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_S = (1-w) * M_T$$

Όπου:

w = υγρασία απορριμμάτων (% υγρή βάση)

M_S = ξηρή μάζα απορριμμάτων

M_T = συνολική μάζα απορριμμάτων

- ▶ Πορώδες, P

Το πορώδες εκφράζεται σε m³ πόρων / m³ αντιδραστήρα και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_g = \frac{M_L}{D} - \frac{M_s}{\rho_s} - \frac{M_L}{\rho_L}$$

Όπου:

V_g = όγκος πόρων απορριμμάτων (m³)

ρ_s = πυκνότητα απορριμμάτων βιοαντιδραστήρα (Kg / m³)

ρ_L = πυκνότητα εκχυλισμάτων βιοαντιδραστήρα (Kg / m³)

M_L = μάζα εκχυλισμάτων βιοαντιδραστήρα (Kg)

Όπου: M_L = M_T - M_S = wM_T

M_S = ξηρή μάζα βιοαντιδραστήρα (Kg)

M_T = συνολική μάζα απορριμμάτων (Kg)

D = πυκνότητα βιοαντιδραστήρα (Kg / m³)

Με βάση το πορώδες υπολογίζεται ο όγκος μέσα στη μάζα των απορριμμάτων που μπορεί να καταληφθεί από αέρια. Στη συνέχεια υπολογίζεται η μερική πίεση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα η οποία χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του pH.

- Συντελεστής ενεργού επιφάνειας αντίδρασης, γ

Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται για κάθε συστατικό (και για το σύνολο των απορριμμάτων), από τη σχέση:

$$\gamma_i = W_i / W_{sati}$$

Όπου:

γ_i = συντελεστής ενεργού επιφάνειας αντίδρασης συστατικού i (αδιάστατος)

w_i = υγρασία συστατικού i (% υγρή βάση)

w_{sati} = υγρασία κορεσμού συστατικού i (% υγρή βάση)

Ο συντελεστής γ_i εκφράζει το ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του στερεού τμήματος του συστατικού που βρίσκεται σε επαφή με την υγρή φάση και χρησιμοποιείται στη διόρθωση των μέγιστων σταθερών υδρόλυσης. Ανάλογα με το γ_i του κάθε συστατικού υπολογίζονται τελικά οι τρεις τιμές γ για την κάθε μία από τις κατηγορίες υδρολύσιμων συστατικών των απορριμμάτων.

- Συνολικός στερεός οργανικός και βιοαεριοποιήσιμος άνθρακας

Ο οργανικός και βιοαεριοποιήσιμος άνθρακας των συστατικών των απορριμμάτων υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$OCw_i = OC_i * c_i * \rho_w \frac{(1 - w_i)}{w_i}$$

$$PBOC_i = PB_i * OCw_i$$

Όπου:

OCw_i = οργανικός άνθρακας συστατικού i ανά όγκο υγρασίας συστατικού i (Kg C / m³ H₂O)

$PBOC_i$ = βιοαεριοποιήσιμος άνθρακας συστατικού i ανά όγκο υγρασίας κορεσμού i (Kg C / m³ H₂O)

OC_i = οργανικό κλάσμα συστατικού i (ξηρή βάση)

PB_i = βιοαεριοποιήσιμο κλάσμα άνθρακα συστατικού i

c_i = βάρος συστατικού i / βάρος απορριμμάτων (υγρή βάση)

w_i = υγρασία συστατικού i (% υγρή βάση)

ρ_w = πυκνότητα νερού απορριμμάτων

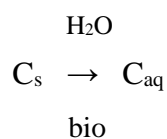
Με βάση τις τιμές του οργανικού και βιοαποδομήσιμου άνθρακα των συστατικών, υπολογίζεται ο συνολικός βιοαποδομήσιμος άνθρακας ανά υδρολύσιμη κατηγορία συστατικών και ανά συνολική μάζα απορριμμάτων.

Θεωρώντας ότι σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας 12gr βιοαεριοποιήσιμου C παράγουν (σε άπειρο θεωρητικά χρόνο) 22,4lt μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα, υπολογίζεται η θεωρητική μοναδιαία απόδοση των απορριμμάτων σε βιοαέριο.

4.4 Χημικό μέρος

- Σταθερές υδρόλυσης συστατικών

Το χημικό μέρος του κώδικα βασίζεται στην κινητική της ακόλουθης χημικής αντίδρασης:



Όπου:

C_s η συγκέντρωση του υδρολύσιμου και βιοαεριοποιήσιμου άνθρακα των

απορριμμάτων, όπως αυτός υπολογίζεται από το φυσικό μέρος του κώδικα

C_{aq} η συγκέντρωση του διαλυμένου (υδρολυμένου) οργανικού άνθρακα

Η αντίδραση πραγματοποιείται με τη βοήθεια μικροοργανισμών (bio) σε υδατικό περιβάλλον (H_2O), δηλαδή είναι βιολογική και χημική αντίστοιχα. Ο κώδικας δε διαχωρίζει τη βιολογική από τη χημική διαδικασία.

Η μαθηματική έκφραση της παραπάνω αντίδρασης διαφοροποιείται ανάλογα με το κάθε συστατικό των απορριμμάτων και τελικά παίρνει τη μορφή:

$$- \frac{dCs_i}{dt} = Kh_i * Cs_i$$

Όπου:

Kh_i σταθερά ρυθμού υδρόλυσης του συστατικού i

Cs_i ο στερεός βιοαεριοποιήσιμος άνθρακας του συστατικού i

Οι σταθερές υδρόλυσης εκφράζονται ως χρόνος⁻¹ (πρώτης τάξης αντίδραση) και δηλώνουν το ρυθμό με τον οποίο υδρολύεται το κάθε συστατικό. Οι σταθερές αυτές είναι μεγάλες για τα γρήγορα υδρολυόμενα συστατικά και μικρότερες για τα μεσαία και αργά υδρολυόμενα.

Η κατηγοριοποίηση που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

Υπολείμματα τροφής, αγροτικά παραπροϊόντα	Ταχέως υδρολυόμενα
Χαρτί	Μεσαία υδρολυόμενα
Υφάσματα, δέρμα, ξύλο, πλαστικά	Αργά υδρολυόμενα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τιμές σταθερών υδρόλυσης για διάφορες χημικές ενώσεις. Με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται αύξηση των σταθερών υδρόλυσης.

Πίνακας 11 : Πειραματικά προσδιορισμένες τιμές σταθερών υδρόλυσης [67].

Βιοπολυμερή	Εύροι σταθερών υδρόλυσης (day ⁻¹)
Λιπίδια	0,08 – 1,7
Πρωτεΐνες	0,02 – 0,03
Κυτταρίνη	0,04 – 0,13
Ημικυτταρίνη	0,54

Οι τιμές αυτές μπορούν να θεωρηθούν μέγιστες σε ένα ΧΥΤΑ αφού σπάνια συναντώνται ευνοϊκές συνθήκες υδρόλυσης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τιμές σταθερών υδρόλυσης και το ποσοστό βιοαποδόμησης επιλεγμένων συστατικών των απορριμμάτων.

Πίνακας 12 : Σταθερές υδρόλυσης και το ποσοστό βιοαποδόμησης επιλεγμένων συστατικών των απορριμμάτων [68].

Υλικό	Σταθερά υδρόλυσης (day ⁻¹)			Ποσοστό βιοαποδόμησης %
	20 °C	30 °C	40 °C	
Ψωμί	-	0,195	-	90 ± 5
Φύλλα	0,068	0,215	0,386	35 ± 10
Φλοιός δέντρου	-	0,076	0,240	5 ± 2
Άχυρο	0,024	0,087	0,014	39 ± 7
Φλούδες πορτοκαλιού	0,145	0,246	0,474	92 ± 12
Γρασίδι	0,035	0,090	0,266	47 ± 14

Αν γ_i ο συντελεστής επιφανείας αντίδρασης του συστατικού i ισχύει:

$$K_{hi} = \gamma_i * K_{hi_{max}}$$

Όπου:

$K_{hi_{max}}$ η μέγιστη σταθερά υδρόλυσης που αποτελεί παράμετρο εισόδου στο πρόγραμμα και εκφράζει το μέγιστο ρυθμό με τον οποίο μπορεί να υδρολυθεί το κάθε συστατικό σε συνθήκες κορεσμού υγρασίας.

Η $K_{hi_{max}}$ έχει τη μέγιστη τιμή για τα ζυμώσιμα και τα αγροτικά παραπροϊόντα. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται κυρίως οι πρωτεΐνες και οι υδατάνθρακες. Το χαρτί θεωρείται μέτρια υδρολυόμενο συστατικό καθώς περιέχει κυτταρίνη και λιγνίνη.

Τέλος τα πλαστικά, τα λάστιχα, το ξύλο (κυρίως λιγνίνη), το δέρμα και τα υφάσματα, θεωρούνται αργά υδρολύσιμα συστατικά και γι' αυτό τους δίνεται η ελάχιστη K_h _{max}. Οι ευρεθείσες τιμές της σταθεράς υδρόλυσης ανάλογα με το είδος του υποστρώματος, το pH, και τη θερμοκρασία έχουν συγκεντρωθεί και καταγραφεί στη βιβλιογραφία [40] με τιμές που κυμαίνονται από 0,003–1,7 day⁻¹.

Ο διαχωρισμός των συστατικών σε τρεις κατηγορίες ισχύει μόνο στην υδρόλυση. Στη συνέχεια ο υδατικός άνθρακας εισάγεται στο βιολογικό μέρος του προγράμματος χωρίς διαχωρισμό.

► Υπολογισμός και επίδραση **pH**

Καθώς ο κώδικας προσομοιάζει το αναερόβιο στάδιο της αποδόμησης των απορριμμάτων, το αρχικά εγκλωβισμένο στη μάζα των απορριμμάτων οξυγόνο (20% κ.ο) έχει μετατραπεί, κατά το αερόβιο στάδιο της αποδόμησης, σε αντίστοιχο ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα. Το χημικό σύστημα τη στιγμή έναρξης της αναερόβιας βιοαποδόμησης μπορεί να προσεγγιστεί από ένα αέριο–υγρό σύστημα με μερική πίεση διοξειδίου του άνθρακα 0,2 atm (θεωρώντας ολική πίεση 1 atm και αμελητέα τάση ατμών). Θεωρώντας το παραγόμενο οξικό οξύ ως το αντιπροσωπευτικά σχηματιζόμενο οξύ στη διαδικασία της μεθανογένεσης, ο υπολογισμός του pH γίνεται από τις εξισώσεις που ακολουθούν:

$$\frac{2K_{SO}a_0}{K_H P_{CO_2} a_2} + [H^+] = \frac{K_H P_{CO_2}}{a_0} (a_1 + 2a_2) + \frac{K_w}{[H^+]} + [A_C^-]$$

$$a_0 = \left(1 + \frac{K_{a_1}}{[H^+]} + \frac{K_{a_1} K_{a_2}}{[H^+]^2}\right)^{-1}$$

$$a_1 = \left(\frac{[H^+]}{K_{a_1}} + 1 + \frac{K_{a_2}}{[H^+]}\right)^{-1}$$

$$a_2 = \left(\frac{[H^+]^2}{K_{a_1} K_{a_2}} + \frac{[H^+]}{K_{a_2}} + 1\right)^{-1}$$

$$pH = -\log[H^+]$$

Όπου:

$[H^+] =$ συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου (mole / lt)

$[Ac^-] =$ συγκέντρωση ιόντων οξικού οξέος (mole/lt)

$K_{SO} =$ σταθερά υδρόλυσης ανθρακικού ασβεστίου ($10^{-8,3}$)

$K_{a1} =$ πρώτη σταθερά ισορροπίας ανθρακικών ($10^{-6,3}$)

$K_{a2} =$ δεύτερη σταθερά ισορροπίας ανθρακικών ($10^{-10,25}$)

$K_H =$ σταθερά Henry για το CO_2 ($10^{-1,5}$)

$P_{CO_2} =$ μερική πίεση CO_2 (atm)

Στον κώδικα θεωρήθηκε ότι η μέγιστη απόδοση των μεθανοβακτηρίων λαμβάνει χώρα σε εύρος pH 6–8, ενώ για τιμές μικρότερες του 4,5 και μεγαλύτερες του 9 η απόδοση τους είναι μηδενική. Για εύρος τιμών pH 4,5–6 και 8–9, η απόδοση των βακτηρίων ακολουθεί γραμμική πορεία. Το εξαγόμενο pH διορθώνει στη συνέχεια το μέγιστο ειδικό ρυθμό ανάπτυξης των μεθανογενών βακτηρίων (μ_{maxM}).

4.5 Βιολογικό μέρος του μοντέλου

Το βιολογικό μέρος ορίζει την παρουσία του μικροβιακού οικοσυστήματος, που αναπτύσσεται στην υγρή φάση του συστήματος. Ο υδατικός άνθρακας που σχηματίζεται από την υδρόλυση των τριών τύπων στερεών συστατικών των απορριμμάτων, αποτελεί τροφή για τους μικροοργανισμούς. Αντιπροσωπευτικές κατηγορίες βακτηρίων θεωρήθηκαν τα οξυγενή βακτήρια, που μεταβολίζουν τον υδατικό άνθρακα σε οξικό οξύ και διοξείδιο του άνθρακα και τα μεθανοβακτήρια, που μεταβολίζουν το οξικό οξύ σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Κατά τις μεταβολικές αυτές δραστηριότητες παράγεται επίσης νερό και νέα βιομάζα

4.5.1 Παρουσίαση εξισώσεων

Με βάση το κινητικό μοντέλο εξέλιξης βακτηρίων του Monod, χρησιμοποιούνται εφτά (7) διαφορικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις αυτές είναι :

Πίνακας 13 : Εξισώσεις δυναμικής του οικοσυστήματος [50].

<u>Εξίσωση I</u>	$C_{(s)i} = k_{hi} C_{(s)i}$
Στερεός άνθρακας	
<u>Εξίσωση II</u>	$C_{(aq)} = \sum_{i=1}^3 k_{hi} C_{(s)i} - \frac{1}{Y_A} \mu_A \frac{C_{(aq)}}{k_{S_A} + C_{(aq)}} C_{X_A}$
Υδατικός άνθρακας	
<u>Εξίσωση III</u>	$C_{X_A} = (\mu_A \frac{C_{(aq)}}{k_{S_A} + C_{(aq)}} - k_{d_A}) C_{X_A}$
Άνθρακας βιομάζας οξυγενών	
<u>Εξίσωση IV</u>	$C_{X_M} = (\mu_M \frac{C_{A_c}}{k_{S_M} + C_{A_c}} - k_{d_M}) C_{X_M}$
Άνθρακας βιομάζας μεθανογενών	
<u>Εξίσωση V</u>	$C_{A_c} = Y_{A_c} (\frac{1-Y_A}{Y_A} \mu_A \frac{C_{(aq)}}{k_{S_A} + C_{(aq)}} + k_{d_A}) C_{X_A} - \frac{1}{Y_M} \mu_M \frac{C_{A_c}}{k_{S_M} + C_{A_c}} C_{X_M}$
Άνθρακας του οξικού οξέος	
<u>Εξίσωση VI</u>	$C_{CO_2} = (1-Y_{A_c}) (\frac{1-Y_A}{Y_A} \mu_A \frac{C_{(aq)}}{k_{S_A} + C_{(aq)}} + k_{d_A}) C_{X_A} + (1-Y_{CH_4}) (\frac{1-Y_M}{Y_M} \mu_M \frac{C_{A_c}}{k_{S_M} + C_{A_c}} + k_{d_M}) C_{X_M}$
Άνθρακας του διοξειδίου του άνθρακα	
<u>Εξίσωση VII</u>	$C_{CH_4} = Y_{CH_4} (\frac{1-Y_M}{Y_M} \mu_M \frac{C_{A_c}}{k_{S_M} + C_{A_c}} + k_{d_M}) C_{X_M}$
Άνθρακας του μεθανίου	

Όπου:

k_h = σταθερά υδρόλυσης (time^{-1})

$C_{(s)}$ = συγκέντρωση του στερεού βιοαεριοποιήσιμου άνθρακα

$C_{(aq)}$ = συγκέντρωση του υδατικού άνθρακα

Y_A = συντελεστής απόδοσης βιομάζας οξυγενών σε mg παραγόμενης βιομάζας ανά mg μεταβολιζόμενου υποστρώματος

μ_A = σταθερά που εκφράζει το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης των οξυγενών μικροβίων (time^{-1})

K_{SA} = σταθερά ημικορεσμού των οξυγενών μικροβίων (mg/l). (Είναι η συγκέντρωση του περιοριστικού υποστρώματος όταν $\mu = \mu_{\max}/2$)

C_{XA} = άνθρακας βιομάζας των οξυγενών

Kd_A = σταθερά του ρυθμού θανάτου της οξυγενούς βιομάζας (time^{-1})

C_{XM} = συγκέντρωση άνθρακα της μεθανογενούς βιομάζας

C_{AC} = συγκέντρωση άνθρακα του ανθρακικού οξέος

μ_M = σταθερά που εκφράζει το μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης των μεθανογενών μικροβίων (time^{-1})

K_{SM} = σταθερά ημικορεσμού των μεθανογενών μικροβίων (mg/l)

Kd_M = σταθερά του ρυθμού θανάτου της μεθανογενούς βιομάζας (time^{-1})

Y_{AC} = συντελεστής απόδοσης άνθρακα του οξικού οξέος

Y_M = συντελεστής απόδοσης βιομάζας μεθανογενών σε mg παραγόμενης βιομάζας ανά mg μεταβολιζόμενου υποστρώματος

Y_{CH_4} = συντελεστής σχηματισμού μεθανίου

Το στάδιο της υδρόλυσης αντιπροσωπεύεται από μια διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης (Εξίσωση I). Οι δύο επόμενες βιολογικές διεργασίες (οξυγένεση-μεθανογένεση) περιγράφονται από τις εξισώσεις II–VII.

4.5.2 Εξισώσεις δυναμικής οικοσυστήματος

Η βιομάζα των μικροοργανισμών και οι οργανικές ενώσεις που εμπλέκονται στο σύστημα εκφράζονται στον κώδικα σαν άνθρακες (C). Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ομοιογένεια στο ισοζύγιο μάζας και βοηθάει στην αποφυγή λανθασμένων εκτιμήσεων λόγω του μεγάλου αριθμού διαφορετικών οργανικών ενώσεων. Υπάρχουν πέντε (5) διαφορετικά είδη άνθρακα και δύο (2) αέρια προϊόντα μεταβολισμού. Οι μονάδες στις οποίες γίνεται ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων είναι C / lt H₂O. Ο κώδικας συνδέει τα εξής:

- ▶ Στερεός βιοαεριοποιήσιμος άνθρακας, C_s

Διακρίνεται στον γρήγορα, μεσαία και αργά βιοαεριοποιήσιμος άνθρακας, ανάλογα με το ρυθμό υδρόλυσης του κάθε συστατικού, συμβολίζεται με C_{s1}, C_{s2}, C_{s3} αντίστοιχα και αποτελεί το αρχικό υπόστρωμα. Η υδρόλυση του κάθε είδους άνθρακα λαμβάνει χώρα σύμφωνα με την εξίσωση I, με βάση τις τρεις διαφορετικές σταθερές υδρόλυσης.

- ▶ Υδατικός άνθρακας, C_{aq}

Ο υδατικός άνθρακας είναι το προϊόν της χημικής και ενζυμικής υδρόλυσης του στερεού άνθρακα. Τα προϊόντα υδρόλυσης των τριών τύπων στερεού άνθρακα προστίθενται, ενώ κάποιο τμήμα τους καταναλώνεται από τα οξυγενή βακτήρια. Με βάση το σχηματισμό και την κατανάλωση του υδατικού άνθρακα υπολογίζεται, σε κάθε χρονικό βήμα, η συγκέντρωσή του (Εξίσωση II).

- ▶ Άνθρακας βιομάζας οξυγενών βακτηρίων, C_{xA}

Τα οξυγενή βακτήρια μετατρέπουν τις διαλυμένες οργανικές ενώσεις (που εκφράζονται σαν υδατικός άνθρακας) σε νέα μικροβιακή μάζα, οξικό οξύ και διοξείδιο του άνθρακα. Η ανάπτυξη τους εκφράζεται από την κινητική εξίσωση Monod (πρώτο σκέλος Εξίσωσης III) ενώ ο ρυθμός θανάτου τους εκφράζεται από τη γραμμική σχέση πρώτου βαθμού (δεύτερο σκέλος Εξίσωσης III).

▶ Άνθρακας οξικού οξέος, **C_{AC}**

Το οξικό οξύ θεωρείται στον κώδικα σαν το αντιπροσωπευτικό όλων των οργανικών οξέων που παράγονται κατά την αναερόβια χώνευση. Το οξικό οξύ αποτελεί το μεταβολικό προϊόν των οξυγενών βακτηρίων (πρώτο σκέλος Εξίσωσης V) και το υπόστρωμα των μεθανοβακτηρίων (δεύτερο σκέλος Εξίσωση V)

▶ Άνθρακας βιομάζας μεθανογενών βακτηρίων, **C_{XM}**

Τα μεθανοβακτήρια αυξάνονται σύμφωνα με την εξίσωση Monod (πρώτο μέλος Εξίσωσης IV) και θανατώνονται με ρυθμό που εκφράζεται από το δεύτερο μέλος της Εξίσωσης IV.

▶ Άνθρακας διοξειδίου του άνθρακα, **CO₂** και **CH₄**

Το διοξείδιο του άνθρακα και το μεθάνιο αποτελούν, σύμφωνα με τον κώδικα, τα τελικά προϊόντα όλων των διεργασιών του συστήματος.

Το διοξείδιο του άνθρακα που σχηματίζεται από τα οξυγενή βακτήρια αντιπροσωπεύεται στην Εξίσωση VI από το πρώτο σκέλος, ενώ το δεύτερο μέλος εκφράζει αυτό που σχηματίζεται από τη δράση των μεθανοβακτηρίων. Το μεθάνιο αποτελεί προϊόν της δράσης μόνο των μεθανοβακτηρίων, διαδικασία που εκφράζεται από την εξίσωση VII.

Αφού υπολογιστούν οι ρυθμοί παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου (gr C/lit H₂O/d) μετατρέπονται στη συνέχεια σε m³/Kg/day υγρών (ή ξηρών) απορριμμάτων, βάσει της υπόθεσης ότι 1 mole C (12 gr) αερίου προϊόντος καταλαμβάνει όγκο 22,4 lt σε κανονικές συνθήκες.

4.5.3 Βιοκινητικές σταθερές

Η ανάπτυξη των μικροοργανισμών χαρακτηρίζεται από τέσσερις βιοκινητικές παραμέτρους:

- ▶ Τη σταθερά μέγιστου ρυθμού ανάπτυξης μικροβίων, μ_m
- ▶ Τη σταθερά θνησιμότητα ημικορεσμού, K_s
- ▶ Τη σταθερά θνησιμότητας, K_d
- ▶ Το συντελεστή απόδοσης παραγωγής βιομάζας, Y

Στη βιβλιογραφία έχει παρουσιαστεί εύρος τιμών για τις προαναφερθείσες βιοκινητικές σταθερές. Στους πίνακες που ακολουθούν αναφέρονται οι τιμές των βιοκινητικών αυτών σταθερών.

Πίνακας 14 : Βιοκινητικές σταθερές οξυγενών βακτηρίων [21],[69],[70].

	μ_A (day ⁻¹)	K_{SA} (gC _{aq} /l)	K_{dA} (day ⁻¹)	Y_A (mgC _{XA} /mgC _{aq})
Μικρότερη τιμή	2	0,01	-	0,10
Μέση τιμή	10	0,05	0,05	0,15
Μέγιστη τιμή	30	0,15	0,40	0,50

Πίνακας 15 : Βιοκινητικές σταθερές μεθανογενών βακτηρίων [20],[71],[72].

	μ_M (day ⁻¹)	K_{SM} (gC _{aq} /l)	K_{dM} (day ⁻¹)	Y_M (mgC _{XA} /mgC _{aq})
Μικρότερη τιμή	0,10	0,01	0,01	0,05
Μέση τιμή	0,25	0,50	0,03	0,06
Μέγιστη τιμή	0,50	2,5	0,04	0,07

4.5.4 Συντελεστές απόδοσης οξικού οξέος, Y_{AC} και μεθανίου, Y_{CH_4}

Στον κώδικα χρησιμοποιούνται οι συντελεστές απόδοσης οξικού οξέος (Y_{AC}) και μεθανίου (Y_{CH_4}), οι οποίοι εκφράζουν το ποσοστό των προϊόντων μεταβολισμού των βακτηρίων. Ο συντελεστής απόδοσης διοξειδίου του άνθρακα από τα οξυγενή και τα μεθανογενή βακτήρια είναι $Y_{CO_2X_a} = 1 - Y_{AC}$ και $Y_{CO_2X_m} = 1 - Y_{CH_4}$. Ο συντελεστής απόδοσης οξικού οξέος λαμβάνεται ίσος με 0,9 ενώ ο συντελεστής απόδοσης μεθανίου λαμβάνεται ίσος με 0,6 [50].

4.6 Οργανικές Ενώσεις εκτός μεθανίου NMOCs – (Non Methane Organic Compounds).

Οργανικά συστατικά εκτός μεθανίου (NMOCs). Τα οργανικά συστατικά εκτός μεθανίου αποτελούνται από πτητικές οργανικές ενώσεις, VOCs, κατά 39 % κ.ο. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις που εκπέμπονται από το έδαφος αντιδρούν με το ηλιακό φως παραγωγτας όζον στην επιφάνεια του εδάφους (ground – level ozon). Οι VOCs που υπάρχουν στο βιοαέριο είναι δύσκολο να μετρηθούν χωριστά, για αυτό χρησιμοποιούνται οι NMOCs σαν υποκατάστατο.

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για τις πτητικές οργανικές ενώσεις. Ο De Nevers όρισε τα VOCs ως οργανικά υγρά ή στερεά που έχουν τάση ατμών μεγαλύτερη από 0,0007atm (0,532 mmHg) και σημείο βρασμού λιγότερο από 260°C. Ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας (WHO) όρισε ως VOCs κάθε οργανική ένωση που έχει τάση ατμών μεγαλύτερη από 0,0013atm σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση. Η EPA όρισε ως VOCs “Κάθε ένωση του άνθρακα, εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα, το μονοξείδιο του άνθρακα, το ανθρακικό οξύ, τα μεταλλικά καρβίδια, τα ανθρακικά άλατα και το ανθρακικό αμμώνιο, που συμμετέχουν στις ατμοσφαιρικές φωτοχημικές αντιδράσεις. Στις οργανικές ενώσεις περιλαμβάνονται οι περισσότεροι επικίνδυνοι αέριοι ρυποί (HAPs). Οι VOCs που εκπέμπονται από απορριμμάτα αποτελούν λιγότερο από το 1% κ.ο. του βιοαερίου. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις περιλαμβάνουν υδρογονάνθρακες, ολεφίνες, αρωματικά, και μόρια με αλογόνα, θείο, άζωτο, οξυγόνο. Πολλές από αυτές είναι τοξικές ενώ προκαλούν και δυσάρεστες οσμές. Οι VOCs προκαλούν προβλήματα στην

ανθρώπινη υγεία με το σχηματισμό όζοντος και επικίνδυνων αεροζόλ. Οι VOCs επιδρούν στην ανθρώπινη υγεία και προκαλούν, ανάλογα με τη δόση και τον τρόπο έκθεσης, από απλές ενόχλησείς μεχρι σοβαρούς κινδύνους και θάνατο. Οι VOCs απορροφούνται στους πνεύμονες και στο γαστρεντερικό σύστημα, ενώ διαλύονται στους λιπώδεις ιστούς και βιοσυσσωρεύονται σε αυτούς.

Η εκπομπή των VOCs στην ατμόσφαιρα μειώνει την ποιότητα του αέρα. Οι VOCs συμβάλουν στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους και της όξινης εναπόθεσης.. Οι φωτοχημικοί ρύποι δημιουργούνται όταν οι VOCs αντιδρούν με οξειδία του αζώτου, NOx, παρουσία ακτινοβολίας UV. Τέτοιοι ρύποι είναι οι αλδεϋδες, το υπεροξειδίο του υδρογόνου, το όζον, τα οργανικά και ανόργανα οξέα καθώς και σωματίδια και PAN. Το όζον θεωρείται ρύπος μεγαλύτερης βαρύτητας καθώς έχει τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα και περισσότερες επιπτώσεις στην αλλαγή του περιβάλλοντος, στην υγεία των ζωντανών οργανισμών και στην ανάπτυξη των φυτών. Ενώ τέτοιου είδους αντιδράσεις είναι κατά πλειοψηφία ασταθείς και πολύ ενεργές.

4.7 Μοντέλα παραγωγής οργανικών ενώσεων εκτός μεθανίου NMOCs - (Non Methane Organic Compounds)

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά μοντέλα παραγωγής βιοαερίου. Εδώ παρουσιάζονται μερικά από αυτά [29]:

Berkeley Madonna

Το πρόγραμμα Berkeley Madonna σχεδιάστηκε για την επίλυση συστημάτων απλών και πολύπλοκων διαφορικών εξισώσεων, με τον απλούστερο δυνατό τρόπο. Με τη σύνταξη των εξισώσεων υπό μορφή κειμένου στον κώδικα πετυχαίνει τη γρήγορη εκτέλεση αυτών παρόμοια με τον κώδικα FORTRAN. Τα μοντέλα προς δημιουργία από τον κάθε χρήστη κατασκευάζονται γρήγορα και με εύκολο τρόπο χάρη στην εύχρηστη γραφή των εξισώσεων στο κώδικα. Επίσης μπορεί να γίνει χρήση από το ίδιο το πρόγραμμα διαγραμμάτων ροής για την εισαγωγή των εξισώσεων και των σταθερών αλλά και μεταβλητών που χρησιμοποιεί ο κώδικας. Επίσης ένα από τα πλεονεκτήματα του

προγράμματος είναι η άρτια συνεργασία που έχει με το πρόγραμμα Stella, όπου μπορεί να τρέξει τις εξισώσεις που έχουν εισαχθεί στον προαναφερθέντα κώδικα (Stella) με πολύ μικρές τροποποιήσεις.

Στο πρόγραμμα συνδυάζονται μεταβλητές και σταθερές (όπου συνθέτουν τις διαφορικές εξισώσεις που εισάγονται σε αυτό) και χρησιμοποιώντας μία από τις προτεινόμενες μεθόδους του προγράμματος εξάγονται τα αποτελέσματα που θέλουμε υπό τη μορφή διαγραμμάτων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι πέντε (5) και παρουσιάζονται παρακάτω:

- ▶ Euler's Method
- ▶ Runge – Kutta 2
- ▶ Runge – Kutta 4
- ▶ Auto – stepsize
- ▶ Rosenbrock (stiff)

Τα βήματα (steps) των παραπάνω μεθόδων καθορίζονται από το DT. Ο αριθμός των βημάτων (εξαιρουμένου του αρχικού) που λαμβάνει χώρα είναι ίσος με:

$$\text{Steps} = (\text{STOPTIME} - \text{STARTIME}) / \text{DT}$$

Το ζητούμενο είναι η μοντελοποίηση των μηχανισμών που διέπουν την παραγωγή του βιοαερίου και στη συνέχεια η ποιοτική ανάλυση της παραγωγής αλλά και του ρυθμού της. Τα παραπάνω εξαρτώνται άμεσα από μια σειρά παραμέτρους όπως είναι τα βακτήρια που συμμετέχουν στη παραγωγή (οξυγενή, μεθανογενή), οι συντελεστές ανάπτυξης και θανάτωσής τους, η υδρόλυση καθώς και η σύσταση.

Έγινε κωδικοποίηση όλων των παραμέτρων καθώς και η εισαγωγή όλων των αρχικών τιμών. Η βιομάζα των μικροοργανισμών και οι οργανικές ενώσεις που εμπλέκονται στο σύστημα εκφράζονται σαν άνθρακες (C). Οι μονάδες στις οποίες γίνεται ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων είναι grC/lit H₂O. Όλη η διεργασία γίνεται στη διεπιφάνεια στερεού υγρού και γι αυτό σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα έπαιξαν οι σταθερές υδρόλυσης του κάθε συστατικού, αλάλογα με τη ταχύτητα υδρόλυσής του (γρήγορα, μεσαία και αργά υδρολυόμενα συστατικά).

Palos Verdes [35]

Χρησιμοποιεί ένα δύο πρώτης τάξεως μοντέλο για την προσομοίωση της παραγωγής βιοαερίου στις ΜΕΔΑ. Στο πρώτο στάδιο ο ρυθμός παραγωγής αερίου είναι ανάλογος της ποσότητας του αερίου που έχει ήδη παραχθεί. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου που ξεκινά από το μέγιστο του πρώτου σταδίου, ο ρυθμός παραγωγής αερίου μειώνεται ανάλογα της ποσότητας που υπολείπεται να παραχθεί. Επιπλέον ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής αερίου και η μετάβαση από το πρώτο στο δεύτερο στάδιο συμβαίνει τη στιγμή που το μισό από το ολικό αέριο που πρόκειται να παραχθεί έχει παραχθεί. Τα οργανικά υλικά χωρίζονται σε άμεσα, μέτρια και αργά αποδομούμενα, με τη συνολική παραγωγή να προκύπτει από το άθροισμα κάθε κατηγορίας.

Sheldon Arleta [35]

Χρησιμοποιείται κινητικό μοντέλο δύο σταδίων όμοιο με αυτό του Palos Verdes. Δέχεται παρόμοιες υποθέσεις εκτός από ότι χωρίζει τα απορρίμματα σε δύο κατηγορίες, άμεσα και αργά αποδομούμενα. Επιπλέον δέχεται ότι η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου συμβαίνει στο 35% του χρόνου αποδόμησης των απορριμμάτων.

Lu and Kunz (1981)

Εφαρμόστηκε μοντέλο ενός σταδίου, αντίστοιχο με αυτό των δύο σταδίων στις παραπάνω προσεγγίσεις. Δέχεται ότι ύστερα από μια αρχική φάση υστέρησης (lag phase) για τη παραγωγή βιοαερίου, χρονικά πολύ μικρή κατά την οποία αναερόβιες συνθήκες αποδόμησης των απορριμμάτων επικράτησαν, ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου έχει τη μέγιστη τιμή του. Στη συνέχεια υποθέτει τη μείωση του ρυθμού παραγωγής. Η ολική παραγωγή βιοαερίου υπολογίζεται από τα επιμέρους συστατικά των απορριμμάτων με άθροιση των αντίστοιχων ποσοτήτων.

Bryers (1984)

Θεωρώντας ως κύριο υπόστρωμα τη γλυκόζη, μια ομάδα βακτηρίων μεταβολίζουν τη γλυκόζη σε προπιονικό, βουτυρικό και οξικό οξύ. Με τη βοήθεια των άλλων βακτηρίων μεταβολίζεται το προπιονικό σε οξικό οξύ ενώ το οξικό και το βουτυρικό σε υδρογόνο. Επιπρόσθετα το οξικό οξύ μεταβολίζεται από βακτήρια σε διοξείδιο του άνθρακα.

Τέλος βακτήρια μετατρέπουν το υδρογόνο σε μεθάνιο. Είναι μοντέλο που βασίζεται στη δράση πέντε ομάδων μικροοργανισμών για την αποδόμηση των απορριμμάτων

SCS Engineers (1996)

Παρουσιάζεται η εξίσωση βασισμένη σε μια πρώτη τάξης αντίδραση για το ρυθμό παραγωγής μεθανίου. Η εξίσωση καλύπτει όλη τη διάρκεια λειτουργίας της ΜΕΔΑ και είναι

$$G = W L_o [(k + s)/s][1 - e^{-s(t - t_i)}][ke^{-s(t - t_i)}]$$

όπου:

G=παραγωγή μεθανίου σε χρόνο t (ft³/yr⁻¹)

W=μάζα ενταφιαζόμενων απορριμμάτων (ton)

L_o=ικανότητα παραγωγής μεθανίου (ft³/ton waste)

t=χρόνος απόθεσης απορριμμάτων (yr)

t_i=χρόνος υστέρησης (lag time) για την έναρξη παραγωγής μεθανίου (yr)

k=σταθερά πρώτης τάξης του ρυθμού μείωσης της παραγωγής μεθανίου (yr⁻¹)

s=σταθερά πρώτης τάξης του ρυθμού αύξησης της παραγωγής μεθανίου (yr⁻¹)

Επιπρόσθετα η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα υπολογίζεται από την αναλογία mole μεθανίου προς διοξείδιο του άνθρακα που έχει βρεθεί στο παραγόμενο βιοαέριο.

Landfill Gas Emission Model (LandGEM) (US EPA, 1998)

Χρησιμοποιεί μιας πρώτης τάξης εξίσωση με προκαθορισμένες τιμές, είτε με στοιχεία του χρήστη από το πεδίο. Απαραίτητα στοιχεία για τη εκτίμηση της παραγωγής βιοαερίου είναι οι σταθερές L_o (Potential Methane Generation Capacity) και k (Methane Generation Rate Constant). Η σταθερά L_o εξαρτάται από την κυτταρίνη του σκουπιδιού και κυμαίνεται από 0,2 έως 270 m³/Mg, ενώ η k εξαρτάται από την υγρασία του σκουπιδιού, τα θρεπτικά για τη μεθανογένεση, το pH και τη θερμοκρασία και κυμαίνεται από 0,003 έως 0,21yr⁻¹ σύμφωνα με τα στοιχεία NSPS (New Source Performance Standard). Επιπρόσθετος παράγοντας είναι ο NMOC (Non Methane Organic Carbon) του οποίου η εισαγωγή δεν είναι απαραίτητη. Το μοντέλο χρησιμοποιεί δύο ομάδες προκαθορισμένων τιμών για τα k, L_o, και NMOC, την AP-42

και την CAA (Clean Air Act) ενώ επιτρέπει και στον χρήστη την εισαγωγή δικών του τιμών για τις σταθερές αυτές, εφοδιάζοντας τον με ένα μοντέλο για τον υπολογισμό του k. Οι εκτιμήσεις που προκύπτουν με χρήση των προκαθορισμένων τιμών CAA βασίζονται στις απαιτήσεις του NSPS. Δίνει συντηρητικές εκτιμήσεις εκπομπών και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει αν ένας ΧΥΤΑ λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του NSPS. Η άλλη ομάδα προκαθορισμένων τιμών βασίζεται στις τιμές εκπομπών που έχει καθορίσει η EPA.

Τέλος το μοντέλο έχει την ικανότητα, δίνοντας του την ετήσια ποσότητα απορριμμάτων για κάποια χρόνια να υπολογίζει την ποσότητα απορριμμάτων για ενδιάμεσες χρονιές στις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις καθώς και την εξέλιξη της ποσότητας των απορριμμάτων μέχρι το κλείσιμο του ΧΥΤΑ.

5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

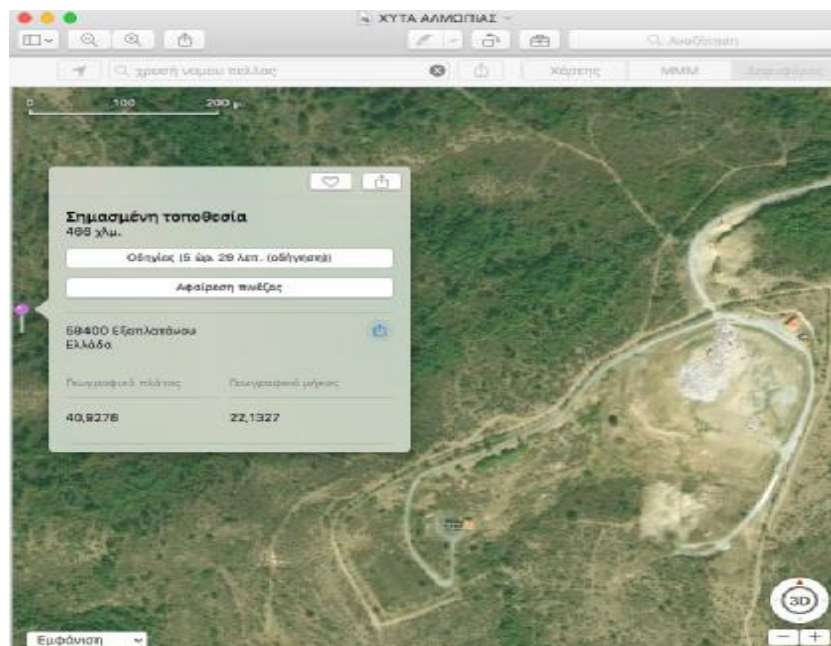
5.1 Εφαρμογή του Μοντέλου LANDGEM στο ΧΥΤΑ Αλμωπίας

Το μοντέλο Landfill Emissions Model (LandGEM) αποτελεί ένα αυτοματοποιημένο όργανο για την ποσοτικοποίηση των αέριων εκπομπών από χώρους διάθεσης αστικών απορριμμάτων Χ.Υ.Τ.Α και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των εκπομπών αέριων από το ΧΥΤΑ Αλμωπίας. Αναπτύχθηκε και διατίθεται το λογισμικό από το Κέντρο Ελέγχου Τεχνολογίας της Αμερικανικής Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (U.S. EPA), στην ηλεκτρονική διεύθυνση www.epa.gov/ttn/catc.

Οι αέριες εκπομπές από Χ.Υ.Τ.Α. αναφέρονται ως βιοαέριο, το οποίο παράγεται από την αποσύνθεση των απορριμμάτων. Αποτελείται βασικά από CH₄ και CO₂ και σε αρκετά μικρότερες συγκεντρώσεις από άλλους αέριους ρύπους.

Για την εκτίμηση των εκπομπών βιοαερίου από Χ.Υ.Τ.Α. το μοντέλο χρειάζεται τις ακόλουθες πληροφορίες:

- ▶ Τη χωρητικότητα για την οποία έχει σχεδιαστεί ο χώρος
- ▶ Την ποσότητα των απορριμμάτων που έχουν ήδη ταφεί ή τον ετήσιο ρυθμό αποδοχής απορριμμάτων
- ▶ Τη σταθερά του ρυθμού παραγωγής μεθανίου (k)
- ▶ Τη θεωρητική παραγωγή μεθανίου (L₀)
- ▶ Τη συγκέντρωση των συνολικών οργανικών μιγμάτων εκτός του μεθανίου (NMOCs)
- ▶ Τα έτη που ο χώρος βρίσκεται σε λειτουργία
- ▶ Αν ο χώρος έχει σχεδιαστεί ώστε να δέχεται και επικίνδυνα απορρίμματα ή όχι (disposal ή co-disposal).



Εικόνα 14: Χ.Υ.Τ.Α. Διαχειριστικής ενότητας Αλμωπίας (συνολικά διατιθέμενος χώρος εμβαδού 120.286 m²) σε ευθεία απόσταση 1,2km απο την Κοινότητα Χρυσής του Νομού Πέλλας.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί μια απλή πρώτης τάξης εξίσωση για την περιγραφή του ρυθμού αποδόμησης των απορριμμάτων. Αποφεύγεται η χρήση μιας πιο πολύπλοκης μεθόδου, επειδή συνήθως είναι περιορισμένες οι πληροφορίες σχετικά με την ποσότητα, την ηλικία και τη σύνθεση των απορριμμάτων.

Για τον υπολογισμό των εκτιμώμενων εκπομπών βιοαερίου, το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων είτε προκαθορισμένων (default) είτε επιλεγμένων από το χρήστη που βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου. Υπάρχουν δύο ομάδες προκαθορισμένων παραμέτρων, οι οποίες προέκυψαν από μετρήσεις και κανονισμούς που ισχύουν στις Η.Π.Α. για τα έτη 1991 και 1997, αντίστοιχα :

- ▶ Η πρώτη ομάδα (CAA default) χρησιμοποιείται για εκτιμήσεις εκπομπών με σκοπό να καθοριστεί η εφαρμοσιμότητα των κανονισμών του Clean Air Act (CAA) για εκπομπές από χώρους απόθεσης Α.Σ.Α. και πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή των κανόνων του New Source Performance Standards (NSPS) για νέους Χ.Υ.Τ.Α. και των οδηγιών για εκπομπές από υπάρχοντες Χ.Υ.Τ.Α.

- ▶ Η δεύτερη ομάδα προκαθορισμένων παραμέτρων εξασφαλίζει την εκτίμηση των τυπικών εκπομπών βιοαερίου. Οι τιμές των παραμέτρων της ομάδας αυτής βασίζονται στους συντελεστές εκπομπής από την U.S. Environmental Protection Agency's Compilation of Air Pollutant Emission Factor, AP-42.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούν να αποτυπωθούν είτε σε πίνακες ή σε γραφήματα και αναφέρονται στις συγκεντρώσεις όχι μόνο των βασικών ρύπων—μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα—αλλά και των ιχνοαερίων που αποτελούν λιγότερο από το 1% του παραγόμενου βιοαερίου, σε σχέση με το χρόνο. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται και στον υπολογισμό των NMOCs, που παίζουν σημαντικό ρόλο στις φωτοχημικές αντιδράσεις.

5.2 Σταθερές και μεταβλητές του προγράμματος

▶ Λειτουργία του μοντέλου

Το μοντέλο θεωρεί ότι η αποδόμηση των απορριμμάτων περιγράφεται από κινητική πρώτης τάξης και εκτιμά τις ετήσιες εκπομπές για όλες τις παραμέτρους του βιοαερίου για 200 έτη μετά από το κλείσιμο του χώρου και η τιμή αυτή δεν μπορεί να αλλάξει. Άλλωστε, βιοαέριο συνεχίζει να παράγεται από την αποσύνθεση των απορριμμάτων ακόμα και όταν σταματήσει η εισροή νέων απορριμμάτων. Οι συνολικές εκπομπές βιοαερίου εκτιμώνται από τον υπολογισμό της παραγωγής μεθανίου και διπλασιασμό της, διότι υποθέτεται ότι το βιοαέριο περιέχει 50% μεθάνιο και 50% διοξείδιο του άνθρακα, αν και αυτά τα ποσοστά μπορούν εύκολα να αλλάξουν. Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μεθανίου είναι:

$$Q=L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Όπου:

Q : οι εκπομπές μεθανίου ανά έτος, m³/yr

L₀ : η θεωρητική παραγωγή μεθανίου, m³CH₄/tn Α.Σ.Α.

R : ο ετήσιος ρυθμός ταφής απορριμμάτων, tn ΑΣΑ/yr

k : η σταθερά του ρυθμού παραγωγής μεθανίου, yr^{-1}

c : τα έτη που έχουν περάσει από το κλείσιμο του Χ.Υ.Τ.Α. ($c=0$ για ενεργούς Χ.Υ.Τ.Α.) (yr)

t : τα έτη που έχουν περάσει από την πρώτη εναπόθεση απορριμμάτων, yr

Αναλυτικότερα:

Θεωρητική παραγωγή μεθανίου, L_0 : είναι η σταθερά που αντιπροσωπεύει την εν δυνάμει ικανότητα των απορριμμάτων να παράγουν μεθάνιο και εξαρτάται από το ποσοστό κυτταρίνης και ημικυταρρίνης των απορριμμάτων, δηλαδή από το είδος των απορριμμάτων. Όσο μεγαλύτερο είναι το οργανικό κλάσμα στα απορρίμματα, τόσο υψηλότερη είναι η τιμή του L_0 . Η τιμή της σταθεράς κυμαίνεται μεταξύ 6,2 και $270\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{tn A.Σ.Α.}$, με βάση τη βιβλιογραφία. Στην πρώτη ομάδα προκαθορισμένων τιμών του μοντέλου, που βασίζονται στους κανονισμούς του Clean Air Act (CAA), η τιμή του L_0 λαμβάνεται ίση με $170 \text{m}^3 \text{CH}_4/\text{tn A.Σ.Α.}$, ενώ στη δεύτερη ομάδα, που βασίζεται στους συντελεστές εκπομπής της U.S. EPA (AP-42), η τιμή του L_0 είναι $100 \text{m}^3/\text{tn A.Σ.Α.}$. Προφανώς το 1997 οι κανονισμοί λειτουργίας υποχρέωσαν τους φορείς λειτουργίας των Χ.Υ.Τ.Α. να μειώσουν το οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων που εναποτίθεται, γι' αυτό και μειώθηκε το L_0 .

Σταθερά του ρυθμού παραγωγής μεθανίου, k : καθορίζει το ρυθμό παραγωγής μεθανίου. Υπολογίζει, δηλαδή, το πόσο γρήγορα μειώνεται ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου από τη στιγμή που θα φτάσει στο μέγιστο ρυθμό του. Το μοντέλο αποσύνθεσης πρώτης τάξης κάνει την παραδοχή ότι οι τιμές του k πριν και μετά το μέγιστο ρυθμό παραγωγής μεθανίου είναι ίδιες. Επίσης υποθέτεται ότι ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου γίνεται μέγιστος όταν ο Χ.Υ.Τ.Α. σταματήσει να λειτουργεί ή όταν τοποθετηθούν τα τελευταία απορρίμματα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του k , τόσο πιο γρήγορα παράγεται το μεθάνιο. Η τιμή της εξαρτάται από: την υγρασία των απορριμμάτων, τη διαθεσιμότητα θρεπτικών για τη μεθανογένεση, το pH και τη θερμοκρασία. Οι τιμές του k κυμαίνονται μεταξύ $0,003$ και $0,21 \text{yr}^{-1}$. Στην ομάδα προκαθορισμένων τιμών CAA, το k λαμβάνεται ίσο με $0,05 \text{yr}^{-1}$ και στην ομάδα AP-42 ίση με $0,04 \text{yr}^{-1}$.

► **Αέριες εκπομπές – Αποτελέσματα**

Οι αέριες εκπομπές από χώρους διάθεσης Α.Σ.Α. συμβάλλουν σημαντικά στην ατμοσφαιρική ρύπανση και κατ' επέκταση θέτουν σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία. Μερικά NMOC είναι γνωστό ή υπάρχουν υπόνοιες ότι είναι καρκινογενή, ή προκαλούν άλλες μη καρκινικές επιπτώσεις στην υγεία. Επίσης το μεθάνιο είναι γνωστό αέριο του θερμοκηπίου και συμβάλει στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι Ηνωμένες Πολιτείες συνέβαλαν με 8-16 teragrams ανά έτος (Tg/yr) μεθανίου στην ατμόσφαιρα το 1990, δηλαδή περίπου το 40% της παγκόσμιας ποσότητας μεθανίου που εκπέμπεται από Χ.Υ.Τ.Α. και ανοιχτές απορρίψεις. Ενδιαφέρον υπάρχει επιπλέον και για τις οσμές που προκαλούνται από το βιοαέριο, καθώς και για τους κινδύνους εκρήξεων ή πυρκαγιών εξαιτίας της διαφυγής μεθανίου εντός και εκτός του χώρου του Χ.Υ.Τ.Α..

Παρόλο που το NSPS απαιτεί εκτιμήσεις μόνο για τις συγκεντρώσεις των NMOCs, το μοντέλο παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης και των συγκεντρώσεων των βασικών συνιστωσών του βιοαερίου, μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, αλλά και των άλλων αέριων ρύπων που αποτελούν λιγότερο από το 1% του βιοαερίου.

Η συγκέντρωση των NMOC στο βιοαέριο είναι συνάρτηση του τύπου των απορριμμάτων και της έκτασης των αναερόβιων αντιδράσεων αποδόμησης των απορριμμάτων που παράγουν διάφορα μίγματα. Η συγκέντρωσή τους μπορεί να μετρηθεί με βάση τη μέθοδο 25 C της E.P.A. και στο μοντέλο εκφράζεται ως εξάνιο. Η συγκέντρωση των NMOC, όπως μετρήθηκε σε 23 χώρους διάθεσης απορριμμάτων στις Η.Π.Α., κυμαίνεται από 240 έως 14.300 ppmv. Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει τρεις προκαθορισμένες τιμές για τη συγκέντρωση των NMOC. Στην ομάδα CAA χρησιμοποιείται η τιμή 4.000 ppmv, στην ομάδα AP-42 και για Χ.Υ.Τ.Α. με συνδιάθεση επικίνδυνων απορριμμάτων χρησιμοποιείται η τιμή 2.420 ppmv και για Χ.Υ.Τ.Α. χωρίς συνδιάθεση 595 ppmv.

Οι εκπομπές των αερίων ρύπων βασίζονται στις συγκεντρώσεις τους στο βιοαέριο. Το μοντέλο περιέχει προκαθορισμένες συγκεντρώσεις για συγκεκριμένους αέριους ρύπους, αλλά ο χρήστης μπορεί να ορίσει συγκεντρώσεις που βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου,

όπου υπάρχουν. Υπάρχει μια λίστα 47 αέριων ρύπων που αναμένεται να εκπεμφθούν με το βιοαέριο, οι συγκεντρώσεις των οποίων έχουν προκύψει από μετρήσεις πεδίου. Οι προκαθορισμένοι αέριοι ρύποι που περιλαμβάνονται στο μοντέλο έχουν χαρακτηριστεί ως επικίνδυνοι αέριοι ρύποι (HAPs) ή πτητικά οργανικά μίγματα (VOCs), με τον χαρακτηρισμό HAP ή VOC μετά το χημικό τους όνομα.

5.3 Προετοιμασία και εξαγωγή των αποτελεσμάτων

Το LandGEM αποτελεί μοντέλο αποσύνθεσης (πρώτης τάξης) που μιμείται το ρυθμό παραγωγής του βιοαερίου στο εσωτερικό ενός χώρου ταφής. Οι αντιδράσεις πρώτης τάξεως, εξαρτώνται από την τιμή ενός μόνο αντιδραστηρίου, για αυτό και ακολουθούν εκθετική αποσύνθεση. Το εν λόγω πρόγραμμα χρησιμοποιεί διάφορες τιμές παραμέτρων για τον υπολογισμό των εκπομπών βιοαερίου. Οι σημαντικότερες εκ των παραμέτρων αυτών είναι το προβλεπόμενο ποσοστό παραγωγής μεθανίου (k), και η δυνητική ικανότητα παραγωγής μεθανίου (L). Για τους λόγους μοντελοποίησης, θεωρείται ότι η αναλογία μεθανίου–διοξειδίου του άνθρακα είναι 50%-50%.

Ο συντελεστής k μπορεί να λαμβάνει ευρύ φάσμα τιμών, οι οποίες εξαρτώνται από τέσσερις παράγοντες:

- ▶ Την περιεκτικότητα της μάζας των απορριμμάτων σε υγρασία.
- ▶ Του ποσοστού της οργανικής ύλης στα απόβλητα.
- ▶ Του pH της μάζας, που εξαρτάται από την υφιστάμενη υγρασία και το ποσοστό οργανικών.
- ▶ Της θερμοκρασίας της μάζας των αποβλήτων.

Η αυξημένη υγρασία των απορριμμάτων που εναποτίθενται σε ένα χώρο, συνεπάγεται αυξημένη τιμή του k και επομένως αυξημένο ρυθμό παραγωγής βιοαερίου.

Αναφορικά στην τιμή του L₀ εξαρτάται από την ποσότητα της κυτταρίνης των αποβλήτων. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται στο υπολογιστικό μοντέλο αντιστοιχούν στη μέση σύσταση των απορριμμάτων που εναποτίθενται σε έναν χώρο ταφής. Το L₀ μετράται σε κυβικά μέτρα φυσικού αερίου που παράγεται ανά megagram αποβλήτων.

Πίνακας 16 : Τιμές συντελεστών k, L₀ [76].

Τυπικές τιμές k (1^ο έτος)		
Προεπιλογή	Τύπος. Χωματερής	Τιμή k
CAA (πρότυπες τιμές)	Συμβατικός	0,05
CAA (πρότυπες τιμές)	Άνυδρη περιοχή	0,02
Καταγεγραμμένες τιμές	Συμβατικός	0,04
Καταγεγραμμένες τιμές	Άνυδρη περιοχή	0,02
Καταγεγραμμένες τιμές	Υψηλό ποσοστό υγρασίας	0,7
Τυπικές τιμές L₀ (1^ο έτος)		
Προεπιλογή	Τύπος. Χωματερής	τιμή L ₀
CAA (πρότυπες τιμές)	Συμβατικός	170
CAA (πρότυπες τιμές)	Άνυδρη περιοχή	170
Καταγεγραμμένες τιμές	Συμβατικός	100
Καταγεγραμμένες τιμές	Άνυδρη περιοχή	100
Καταγεγραμμένες τιμές	Υψηλό ποσοστό υγρασίας	96

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα για τον υπολογισμό της προβλεπόμενης παραγωγής μεθανίου είναι η παρακάτω:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^I kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kT_{i,j}}$$

Όπου:

Q_{CH₄}: η ετήσια παραγωγή μεθανίου σε κυβικά μέτρα

I:ετήσιο χρονικό βήμα

n : έτος υπολογισμού – έτος έναρξης αποδοχής αποβλήτων

j : πρόσθετη άθροιση

k : ρυθμός παραγωγής μεθανίου

L₀ : δυνητική ικανότητα παραγωγής μεθανίου (m³/mg)

M_i : εισερχόμενη ποσότητα αποβλήτων το έτος i

T_{ij} : ηλικία της ποσότητας μάζας στο έτος i

Η τιμή του προβλεπόμενου ρυθμού παραγωγής μεθανίου αποτελεί συνάρτηση της περιεκτικότητας σε υγρασία των αποβλήτων, της ποσότητας θρεπτικών ουσιών για τα αναερόβια μικρόβια, της τιμής pH των αποβλήτων και της θερμοκρασίας τους.

Η αύξηση της τιμής του k , συνεπάγεται αύξηση του ρυθμού παραγωγής, ο οποίος μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Η εν λόγω τιμή, θεωρείται σταθερή πριν και μετά την κορύφωση της παραγωγής που πραγματοποιείται στον όγκο της χωματερής. Παρ'όλο που επιτόπιες παρατηρήσεις δείχνουν ευρύ φάσμα πιθανών τιμών του k (από 0,003 ανά έτος σε άγονα κλίματα, έως και 0,70 ανά έτος σε χώρους υγειονομικής ταφής με σημαντικό ποσοστό υγρασίας), η τυπική τιμή που χρησιμοποιείται από το LandGEM είναι 0,05 ανά έτος.

Το πρόγραμμα LandGEM παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει δεδομένα που έχουν εξαχθεί από τον εκάστοτε χώρο ταφής ή να επιλέξει μεταξύ των προεπιλεγμένων παραμέτρων που δίδονται. Οι εν λόγω προκαθορισμένες παράμετροι αφορούν στον προσδιορισμό μίας μέσης τιμής εκπομπών, όπως έχει προκύψει από επιτόπιες μετρήσεις της EPA, και στην αποδοχή κατάλληλων συντελεστών. Ακόμη και στην περίπτωση των περισσότερων χωματερών στις οποίες παρατηρείται έλλειψη στοιχείων για τον προσδιορισμό των εκτιμώμενων ποσοτήτων παραγωγής βιοαερίου, το εν λόγω πρόγραμμα μπορεί να συμβάλλει στον υπολογισμό για τη σχεδίαση ολοκληρωμένου δικτύου διαχείρισης βιοαερίου.

Το LandGEM είναι λογισμικό το οποίο βασίζεται σε αλληλουχία υπολογιστικών φύλλων, τα οποία παρατίθενται στη συνέχεια:

Παρουσίαση:

Επισκόπηση του μοντέλου και σημαντικές σημειώσεις σχετικά με τη χρήση αυτού. Εδώ περιλαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με το τι πρέπει να εγγραφεί στο φύλλο εισόδου, μια σύντομη περιγραφή του μοντέλου και των δεδομένων προεπιλογής.

ΤΜΗΜΑ 1

USER INPUTS		Landfill Name or Identifier: <input type="text"/>
1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS		Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections
Landfill Open Year	<input type="text"/>	
Landfill Closure Year	<input type="text"/>	
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes <input checked="" type="radio"/> No	
Waste Design Capacity	<input type="text"/>	megagrams <input type="text"/>

Εικόνα 15: Εισαγωγή χαρακτηριστικών στο πρόγραμμα Lanfill.

Στην Εικόνα 15 καταγράφονται τα στοιχεία του εκάστοτε χώρου ταφής, η χρονολογία έναρξης απόρριψης απορριμμάτων, το προβλεπόμενο έτος παύσης λειτουργίας του χώρου, και τέλος η χωρητικότητα του. Επίσης, εισάγεται η προβλεπόμενη ετήσια ποσότητα απόθεσης.

ΤΜΗΜΑ 2

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS		Restore Default Model Parameters
Methane Generation Rate, k ($year^{-1}$)	<input type="text" value="CAA Conventional - 0.05"/>	
Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg)	<input type="text" value="CAA Conventional - 170"/>	
NMOC Concentration ($ppmv$ as hexane)	<input type="text" value="CAA - 4,000"/>	
Methane Content (% by volume)	<input type="text" value="CAA - 50% by volume"/>	

Εικόνα 16: Προσδιορισμός παραμέτρων μοντέλου.

Στην Εικόνα 16 δίδεται η δυνατότητα στους χρήστες να καθορίσουν τις παραμέτρους του μοντέλου, επιλέγοντας έως τέσσερα αέρια ή ρύπους και εισάγοντας τα ποσοστά αποδοχής αποβλήτων.

ΤΜΗΜΑ 3

Πίνακας 17 : Υπολογιστικό φύλλο ρυπαντών.

Gas/Pollutant	Concentration (ppmv)	Molecular Weight	Notes
Gases			
Total landfill gas	Not applicable	30.03	
Methane	Not applicable	16.04	
Carbon dioxide	Not applicable	44.01	
NMOCs	4,000 for CAA	86.18	
	600 for Inventory No or Unknown Co-disposal		
	2,400 for Inventory Co-disposal		
Pollutants:			
1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform)	0.48	133.41	A
1,1,2,2-Tetrachloroethane	1.1	167.85	A, B
1,1-Dichloroethane (ethylidene dichloride)	2.4	98.97	A, B
1,1-Dichloroethene (vinylidene chloride)	0.20	96.94	A, B
1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride)	0.41	98.96	A, B
1,2-Dichloropropane (propylene dichloride)	0.18	112.99	A, B
2-Propanol (isopropyl alcohol)	50	60.11	B
Acetone	7.0	58.08	
Acrylonitrile	6.3	53.06	A, B
Benzene	1.9 for No or Unknown Co-disposal	78.11	A, B
	11 for Co-disposal		
Bromodichloromethane	3.1	163.83	B
Butane	5.0	58.12	B
Carbon disulfide	0.58	76.13	A, B
Carbon monoxide	140	28.01	
Carbon tetrachloride	4.0×10^{-3}	153.84	A, B
Carbonyl sulfide	0.49	60.07	A, B
Chlorobenzene	0.25	112.56	A, B
Chlorodifluoromethane	1.3	86.47	
Chloroethane (ethyl chloride)	1.3	64.52	A, B
Chloroform	0.03	119.39	A, B
Chloromethane	1.2	50.49	B
Dichlorobenzene	0.21	147	B, C
Dichlorodifluoromethane	16	120.91	
Dichlorofluoromethane	2.6	102.92	B
Dichloromethane (methylene chloride)	14	84.94	A
Dimethyl sulfide (methyl sulfide)	7.8	62.13	B
Ethane	890	30.07	
Ethanol	27	46.08	B
Ethyl mercaptan (ethanethiol)	2.3	62.13	B
Ethylbenzene	4.6	106.16	A, B
Ethylene dibromide	1.0×10^{-3}	187.88	A, B
Fluorotrichloromethane	0.76	137.38	B
Hexane	6.6	86.18	A, B
Hydrogen sulfide	36	34.08	
Mercury (total)	2.9×10^{-4}	200.61	A
Methyl ethyl ketone	7.1	72.11	A, B
Methyl isobutyl ketone	1.9	100.16	A, B
Methyl mercaptan	2.5	48.11	B
Pentane	3.3	72.15	B
Perchloroethylene (tetrachloroethylene)	3.7	165.83	A
Propane	11	44.09	B
t-1,2-Dichloroethene	2.8	96.94	B
Toluene	39 for No or Unknown Co-disposal	92.13	A, B
	170 for Co-disposal		
Trichloroethylene (trichloroethene)	2.8	131.40	A, B
Vinyl chloride	7.3	62.50	A, B
Xylenes	12	106.16	A, B

A. Hazardous air pollutants (HAP) listed in Title III of the 1990 Clean Air Act Amendments.

B. Considered volatile organic compounds (VOC), as defined by U.S. EPA in 40 CFR 51.100(s).

C. Source tests did not indicate whether this compound was the para- or ortho- isomer. The para- isomer is a Title III-listed HAP.

Στον παραπάνω Πίνακα 17 είναι δυνατή η επεξεργασία συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων και των μοριακών τους βαρών, καθώς και η προσθήκη έως και 10 νέων ρυπαντών. Οι ρυπαντές αυτοί περιλαμβάνουν τους επικίνδυνους αέριους ρύπους που αναφέρονται στον ομοσπονδιακό νόμο των ΗΠΑ. Στο τέλος του φύλλου αυτού είναι δυνατή γρήγορη επισκόπηση των εισροών του χρήστη και τροποποιήσεις των δεδομένων.

ΤΜΗΜΑ 4

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1 Default pollutant parameters are currently being used by model.

Total landfill gas

Gas / Pollutant #2

Methane

Gas / Pollutant #3

Carbon dioxide

Gas / Pollutant #4

NMOC

Edit Existing or Add New Pollutant Parameters

Restore Default Pollutant Parameters

Description/Comments:

Εικόνα 17: Επιλογή αερίων/ρύπων.

Στην Εικόνα 17 μπορεί να επιλέξει ο χρήστης ανάμεσα στις τέσσερις επιλογές αερίων/ρύπων (μερικές ή όλες ακόμα και προσθήκη νέων) στο φύλλο εργασίας που εισάγει ο χρήστης.

ΤΜΗΜΑ

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units:

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Εικόνα 18: Εισαγωγή ποσότητας απορριμάτων

Στην Εικόνα 18 ο χρήστης εισάγει τα ετήσια ποσοστά αποδοχής για κάθε έτος από την υγειονομική ταφή των απορριμάτων κατά το έτος έναρξης και για το τρέχον έτος ή την υγειονομική ταφή των απορριμάτων το έτος κλεισίματος του ΧΥΤΑ.

ΤΜΗΜΑ 6

Microsoft Excel - LandGEM.V3.02 [Read-Only]

Landfill Name or Identifier: Example Landfill

LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year	1985
Landfill Closure Year (with 80-year limit)	2006
Actual Closure Year (without limit)	2006
Have Model Calculate Closure Year?	Yes
Waste Design Capacity	5,000,000 megagrams

MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k	0.050 year ⁻¹
Potential Methane Generation Capacity, L	170 m ³ /Mg
NMOC Concentration	4,000 ppmv as hexane
Methane Content	50 % by volume

GASES / POLLUTANTS SELECTED

Gas / Pollutant #1:	Total landfill gas
Gas / Pollutant #2:	Methane
Gas / Pollutant #3:	Carbon dioxide
Gas / Pollutant #4:	Mercury (total) - HAP

WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	(Mg/year)	(short tons/year)
1985	181,818	200,000
1986	181,818	200,000
1987	181,818	200,000
1988	181,818	200,000
1989	101,010	200,000
1990	181,818	200,000
1991	181,818	200,000
1992	101,010	200,000
1993	181,818	200,000
1994	181,818	200,000
1995	101,010	200,000
1996	181,818	200,000
1997	181,818	200,000
1998	181,818	200,000
1999	181,818	200,000
2000	181,818	200,000
2001	227,273	250,000
2002	272,727	300,000
2003	318,182	350,000

Εικόνα 19: Φύλλο επιθεώρησης δεδομένων

Στην παραπάνω Εικόνα 19 συνοψίζονται τα στοιχεία που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα από τον εκάστοτε χρήστη, για έναν επιπλέον έλεγχο.

ΤΜΗΜΑ 7

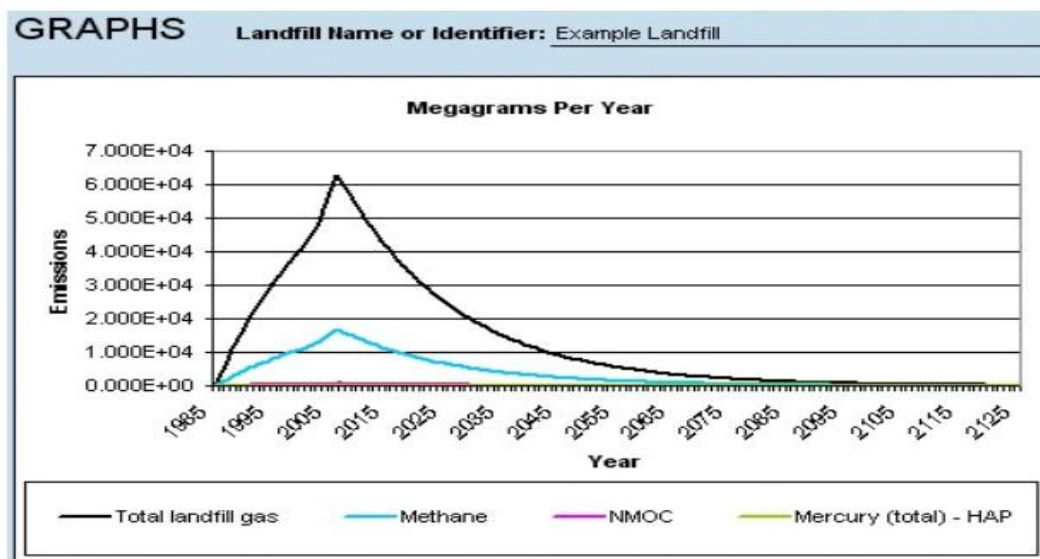
Year	Waste Accepted		Waste In-Place		Total landfill gas			Methane	
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)	(Mg/year)	(m³/year)	(av ft³/min)	(Mg/year)	(m³/y)
1986	181,818	200,000	0	0	0	0	0	0	0
1986	181,818	200,000	181,818	200,000	3.775E+03	3.022E+06	2.031E+02	1.008E+03	1.511E
1987	181,818	200,000	363,636	400,000	7.365E+03	5.097E+06	3.963E+02	1.967E+03	2.949E
1988	181,818	200,000	545,454	599,999	1.078E+04	8.632E+06	5.800E+02	2.880E+03	4.316E
1989	181,818	200,000	727,272	799,998	1.463E+04	1.123E+07	7.548E+02	3.747E+03	5.617E
1990	181,818	200,000	909,090	999,999	1.712E+04	1.371E+07	9.211E+02	4.573E+03	6.854E
1991	181,818	200,000	1,090,908	1,199,999	2.006E+04	1.606E+07	1.079E+03	5.358E+03	8.031E
1992	181,818	200,000	1,272,726	1,399,999	2.286E+04	1.830E+07	1.230E+03	6.105E+03	9.151E
1993	181,818	200,000	1,454,544	1,599,998	2.551E+04	2.043E+07	1.373E+03	6.815E+03	1.022E
1994	181,818	200,000	1,636,362	1,799,998	2.805E+04	2.246E+07	1.509E+03	7.491E+03	1.123E
1995	181,818	200,000	1,818,180	1,999,998	3.045E+04	2.438E+07	1.638E+03	8.134E+03	1.219E
1996	181,818	200,000	1,999,998	2,199,998	3.274E+04	2.622E+07	1.762E+03	8.746E+03	1.311E
1997	181,818	200,000	2,181,816	2,399,998	3.492E+04	2.796E+07	1.879E+03	9.327E+03	1.398E
1998	181,818	200,000	2,363,634	2,599,997	3.699E+04	2.962E+07	1.990E+03	9.001E+03	1.401E
1999	181,818	200,000	2,545,452	2,799,997	3.896E+04	3.120E+07	2.096E+03	1.041E+04	1.560E
2000	181,818	200,000	2,727,270	2,999,997	4.084E+04	3.270E+07	2.197E+03	1.081E+04	1.619E
2001	227,273	250,000	2,909,088	3,199,997	4.262E+04	3.413E+07	2.293E+03	1.138E+04	1.706E
2002	272,727	300,000	3,136,361	3,449,997	4.526E+04	3.624E+07	2.435E+03	1.209E+04	1.812E
2003	318,182	350,000	3,409,088	3,749,997	4.871E+04	3.901E+07	2.621E+03	1.301E+04	1.950E

Εικόνα 20: Φύλλο αποτελεσμάτων (εκπομπής αερίων)

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται πίνακας εκτίμησης των εκπομπών έως και τεσσάρων αερίων σε megagrams ανά έτος, σε κυβικά μέτρα ανά έτος, και στην επιλεγμένη από το χρήστη μονάδα μέτρησης (δίδεται επιλογή μεταξύ κυβικών ποδιών ανά λεπτό, κυβικών ποδιών ανά έτος).

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, δίδεται η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης αυτών (Εικόνα 21), με παρουσίαση μέσω τεσσάρων γραφημάτων που εντοπίζουν την παραγωγή ρύπων τόσο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του χώρου, όσο και μετά την παύση. Αυτό που παρατηρείται σε όλα τα γραφήματα είναι μια απότομη αύξηση, έως το μέγιστο βαθμό παραγωγής, η οποία όμως στη συνέχεια μετατρέπεται σε καμπύλη πτώση έως τη μηδαμινή παραγωγή βιοαερίου.

ΤΜΗΜΑ 8



Εικόνα 21: Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων

Στην παρακάτω Εικόνα 22 παρουσιάζονται σε πίνακα όλα τα συστατικά του παραγόμενου βιοαερίου και δίνεται η δυνατότητα, να παρουσιάζονται οι τιμές των εν λόγω συστατικών του βιοαερίου εισάγοντας την επιθυμητή χρονολογία.

ΤΜΗΜΑ 9

Microsoft Excel - LandGEM V3.02 [Read Only]

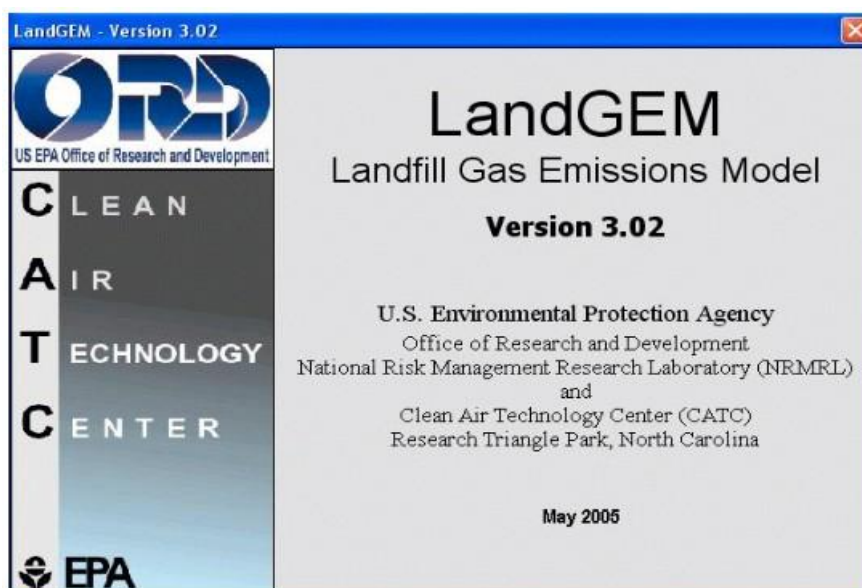
Landfill Name or Identifier: Example Landfill

Enter year of emissions inventory: 2004

Gas / Pollutant	Emission Rate				
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	(ft ³ /year)	(short tons/year)
Total landfill gas	5.294E+04	4.239E+07	2.849E+03	1.497E+09	5.824E+04
Methane	1.414E+04	2.120E+07	1.424E+03	7.486E+08	1.556E+04
Carbon dioxide	3.890E+04	2.120E+07	1.424E+03	7.486E+08	4.268E+04
NMOC	6.079E+02	1.896E+05	1.139E+01	5.998E+06	6.696E+02
1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform) - HAP	1.129E-01	2.035E+01	1.367E-03	7.186E+02	1.242E-01
1,1,2,2-Tetrachloroethane - HAP/VOC	3.256E-01	4.663E+01	3.133E-03	1.647E+03	3.591E-01
1,1-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	4.188E-01	1.017E+02	6.836E-03	3.593E+03	4.607E-01
1,1-Dichloroethene (vinylidene chloride) - HAP/VOC	3.419E-02	8.479E+00	5.697E-04	2.994E+02	3.760E-02
1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	7.154E-02	1.730E+01	1.160E-03	6.130E+02	7.070E-02
1,2-Dichloropropane (propylene dichloride) - HAP/VOC	3.586E-02	7.631E+00	5.127E-04	2.696E+02	3.945E-02
2-Propanol (isopropyl alcohol) - VOC	5.299E+00	2.133E+03	1.424E-01	7.486E+04	5.829E+00
Acetone	7.189E-01	2.968E+02	1.994E-02	1.048E+04	7.886E-01
Acrylonitrile - HAP/VOC	6.894E-01	2.671E+02	1.794E-02	9.432E+03	6.484E-01
Benzene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	2.617E-01	8.055E+01	5.412E-03	2.845E+03	2.879E-01
Benzene - Co-disposal - HAP/VOC	1.515E+00	4.663E+02	3.133E-02	1.647E+04	1.667E+00
Bromodichloromethane - VOC	0.955E-01	1.314E+02	0.030E-03	4.641E+03	9.051E-01
Butane - VOC	6.124E-01	2.130E+02	1.424E-02	7.486E+03	5.636E-01
Carbon disulfide - HAP/VOC	7.788E-02	2.459E+01	1.652E-03	8.683E+02	8.564E-02
Carbon monoxide	6.914E+00	5.935E+03	3.968E-01	2.096E+05	7.606E+00
Carbon tetrachloride - HAP/VOC	1.085E-03	1.696E-01	1.139E-05	5.988E+00	1.194E-03
Carbonyl sulfide - HAP/VOC	5.190E-02	2.077E+01	1.396E-03	7.336E+02	5.709E-02
Chlorobenzene - HAP/VOC	4.962E-02	1.060E+01	7.121E-04	3.743E+02	5.458E-02
Chlorodifluoromethane	1.987E-01	5.511E+01	3.703E-03	1.946E+03	2.197E-01

Εικόνα 22: Φύλλο απογραφής αποτελεσμάτων

ΤΜΗΜΑ 10



Summary Report

Εικόνα 23: Συνοπτική αναφορά αποτελεσμάτων

Στην Εικόνα 23 τελειώνουμε με απεικόνιση και εκτύπωση των αποτελεσμάτων του προγράμματος των παραγόμενων ποσοτήτων για όλα τα αέρια-ρύπους στο επιλεγμένο έτος που θα τεθεί από το χρήστη.

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων του ΧΥΤΑ που μελετάται και τον καθορισμό των επιθυμητών παραμέτρων, το μοντέλο παρουσιάζει τα προκύπτοντα ποσοστά παραγωγής αερίου, σε πίνακες και σε διαγράμματα. Σημειώνεται ότι στα διαγράμματα λαμβάνονται υπόψη τόσο τα μοριακά βάρη των ρυπαντών για την εκτίμηση των ρυπαντών σε megagrams ανά έτος, καθώς και το γεγονός ότι το μεθάνιο θεωρείται ίσο με 50% των συνολικών αερίων του χώρου ταφής (το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί το λοιπό 50%). Καθώς τα συστήματα διαχείρισης βιοαερίου είναι ιδιαίτερος ακριβά, λόγω του υψηλού κόστους για την εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη συντήρησή τους, ο βέλτιστος προσδιορισμός των μελλοντικά παραγόμενων ποσοτήτων βιοαερίου, δύναται να συμβάλει ουσιαστικά στη λήψη της καλύτερης και αποδοτικότερης τεχνικής συλλογής και εκμετάλλευσής τους. Για το σκοπό αυτόν, είναι απαραίτητη η χρήση των λογισμικών που αν και δεν μπορούν να εγγυηθούν ακριβή αποτελέσματα, ωστόσο προσομοιάζουν βέλτιστα τις παραγόμενες ποσότητες.

5.4 Περιγραφή των αποτελεσμάτων της έρευνας

Εισαγωγή χαρακτηριστικών του ΧΥΤΑ Αλμωπίας στο πρόγραμμα Lanfill Gas Emissions Model:

1. Έτος έναρξης λειτουργίας του χώρου: **2010**
2. Τρέχον έτος: **2016**
3. Έτος παύσης \equiv λειτουργίας του χώρου: **2025**
4. Χωρητικότητα: **100.000 tons**

Τα NMOCs (Non Methane Organic Compounds) βρίσκονται στο βιοαέριο ως ιχνοαέρια, και παράγονται μέσα από φυσικές, χημικές, και βιολογικές διεργασίες ενώ καταλαμβάνουν λιγότερο από 1% του όγκου του βιοαερίου. Η συγκέντρωση ενός τυπικού συστατικού των NMOCs μπορεί να κυμαίνεται από τιμές κάτω από το όριο ανίχνευσης έως και 1780ppm. Η μέση συγκέντρωση των συνολικών NMOCs είναι περίπου 4000 ppm.

Πίνακας 18 : Υπολογιστικό φύλλο αποτελεσμάτων εκπομπής αερίων NMOCs.

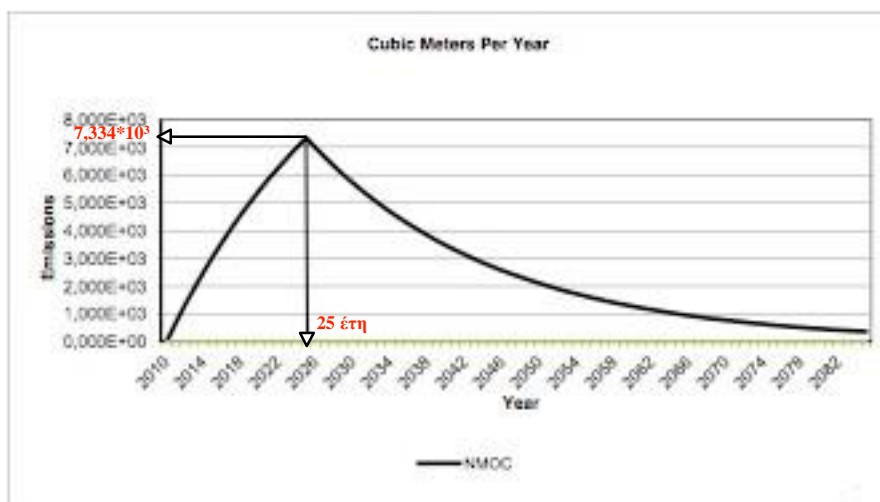
RESULTS Landfill Name or Identifier: ΧΥΤΑ Αλμωπίας

Closure Year (with 80-year limit) = 2025
Methane = 50 % by volume

Please choose a third unit of measure to represent all of the emission rates below.
User-specified Unit: short tons/year

Year	Waste Accepted		Waste-In-Place		NMOC		
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)	(Mg/year)	(m ³ /year)	(short tons/year)
2010	10.195	11.214	0	0	0	0	0
2011	10.195	11.214	10.195	11.214	2,430E+00	6,779E+02	2,673E+00
2012	10.195	11.214	20.389	22.428	4,741E+00	1,323E+03	5,215E+00
2013	10.195	11.214	30.584	33.642	6,940E+00	1,936E+03	7,634E+00
2014	10.195	11.214	40.778	44.856	9,031E+00	2,520E+03	9,934E+00
2015	10.195	11.214	50.973	56.070	1,102E+01	3,075E+03	1,212E+01
2016	10.195	11.214	61.167	67.284	1,291E+01	3,602E+03	1,420E+01
2017	10.195	11.214	71.362	78.498	1,471E+01	4,105E+03	1,618E+01
2018	10.195	11.214	81.556	89.712	1,643E+01	4,582E+03	1,807E+01
2019	10.195	11.214	91.751	100.926	1,805E+01	5,037E+03	1,986E+01
2020	10.195	11.214	101.945	112.140	1,960E+01	5,469E+03	2,156E+01
2021	10.195	11.214	112.140	123.354	2,108E+01	5,880E+03	2,318E+01
2022	10.195	11.214	122.335	134.568	2,248E+01	6,271E+03	2,473E+01
2023	10.195	11.214	132.529	145.782	2,381E+01	6,643E+03	2,619E+01
2024	10.195	11.214	142.724	156.996	2,508E+01	6,997E+03	2,759E+01
2025	0	0	152.918	168.210	2,629E+01	7,334E+03	2,892E+01
2026	0	0	152.918	168.210	2,501E+01	6,976E+03	2,751E+01
2027	0	0	152.918	168.210	2,379E+01	6,636E+03	2,616E+01
2028	0	0	152.918	168.210	2,263E+01	6,312E+03	2,489E+01
2029	0	0	152.918	168.210	2,152E+01	6,004E+03	2,367E+01
2030	0	0	152.918	168.210	2,047E+01	5,712E+03	2,252E+01
2031	0	0	152.918	168.210	1,947E+01	5,433E+03	2,142E+01
2032	0	0	152.918	168.210	1,852E+01	5,168E+03	2,038E+01
2033	0	0	152.918	168.210	1,762E+01	4,916E+03	1,938E+01
2034	0	0	152.918	168.210	1,676E+01	4,676E+03	1,844E+01
2035	0	0	152.918	168.210	1,594E+01	4,448E+03	1,754E+01
2036	0	0	152.918	168.210	1,517E+01	4,231E+03	1,668E+01
2037	0	0	152.918	168.210	1,443E+01	4,025E+03	1,587E+01
2038	0	0	152.918	168.210	1,372E+01	3,829E+03	1,510E+01
2039	0	0	152.918	168.210	1,305E+01	3,642E+03	1,436E+01
2040	0	0	152.918	168.210	1,242E+01	3,464E+03	1,366E+01
2041	0	0	152.918	168.210	1,181E+01	3,295E+03	1,299E+01
2042	0	0	152.918	168.210	1,124E+01	3,135E+03	1,236E+01
2043	0	0	152.918	168.210	1,069E+01	2,982E+03	1,176E+01
2044	0	0	152.918	168.210	1,017E+01	2,836E+03	1,118E+01
2045	0	0	152.918	168.210	9,671E+00	2,698E+03	1,064E+01
2046	0	0	152.918	168.210	9,199E+00	2,566E+03	1,012E+01
2047	0	0	152.918	168.210	8,750E+00	2,441E+03	9,625E+00
2048	0	0	152.918	168.210	8,324E+00	2,322E+03	9,156E+00
2049	0	0	152.918	168.210	7,918E+00	2,209E+03	8,709E+00
2050	0	0	152.918	168.210	7,531E+00	2,101E+03	8,285E+00

Παρατηρώντας το διάγραμμα στην Εικόνα 24 φαίνεται ότι η μέγιστη παραγωγή των NMOCs (οργανικών συστατικών εκτός μεθανίου) λαμβάνει χώρα το 2025, δηλαδή το πρώτο έτος που ο χώρος σταματά να δέχεται απορρίμματα, λαμβάνοντας τα αποτελέσματα εκπομπής αερίων NMOCs από τον Πίνακα 18 και μάλιστα ο όγκος είναι $7,334 \cdot 10^3$ m³/έτος. Από το έτος αυτό και μετά ο όγκος μειώνεται σταδιακά. Η νομοθεσία ορίζει ότι η περίοδος μεταφροντίδας ενός Χ.Υ.Τ.Α. είναι 15 έτη.



Εικόνα 24: Παραγόμενη ποσότητα NMOCs στο Χ.Υ.Τ.Α. Διαχειριστικής ενότητας Αλμωπίας

Επομένως το 2040 ο όγκος του παραγόμενου βιοαερίου μειώνεται στα $3,464 \cdot 10^3$ m³/έτος δηλαδή μειώνεται κατά 53% περίπου, ενώ το 2050 οι εκπομπές μειώνονται στα $2,101 \cdot 10^3$ m³/έτος, δηλαδή σε ποσοστό 71% περίπου.

5.5 Συμπεράσματα

Η οικονομικότητα μιας μονάδας βιοαερίου βασίζεται στο γεγονός ότι η πρώτη ύλη έχει μηδενική ή αρνητική αξία ενώ τα προϊόντα της έχουν αδιαμφισβήτητα εμπορική αξία [77].

Οι ΧΥΤΑ μετατρέπονται σε χώρους παραγωγής βιοαερίου, υψηλής περιεκτικότητας σε μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) λόγω των φυσικοχημικών και βιολογικών μεταβολών που επέρχονται στο οργανικό κλάσμα των απορριμμάτων μετά τον ενταφιασμό τους. Και τα δύο αέρια συμβάλλουν αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Επιπλέον παράγονται σε πολύ μικρότερες ποσότητες και πολλές άλλες οργανικές ενώσεις (Non-Methane Organic Compounds/NMOCs), οι οποίες είναι υπεύθυνες για την παραγωγή δυσάρεστων ενοχλητικών οσμών αλλά και τοξικών αερίων όταν διαφεύγουν στο περιβάλλον.

Υπό κανονικές συνθήκες, ο ρυθμός αποσύνθεσης, φτάνει στο μέγιστο κατά τα πρώτα 3-6 χρόνια της απόθεσης των απορριμμάτων και στη συνέχεια παρουσιάζει μείωση, συνεχίζοντας έως και 25 χρόνια μετά. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η εγκατάσταση δικτύου διαχείρισης βιοαερίου από τα πρώτα χρόνια λειτουργίας ενός χώρου, προκειμένου να αξιοποιηθεί η μέγιστη παραγωγή.

Τυπική σύσταση του βιοαερίου σε ΧΥΤΑ έχει αέρια με περιεκτικότητα όπως, το Μεθάνιο (CH_4) 35-60% , το Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2) 35-55%, το Άζωτο (N_2) 0-20%, το Οξυγόνο (O_2) 0-2,5%, τους Υδρατμούς (H_2O) 1-10% και άλλες Οργανικές Ενώσεις (NMOCs) 250-15000ppmv

Τα NMOCs (Non Methane Organic Compounds) βρίσκονται στο βιοαέριο ως ιχνοαέρια, και καταλαμβάνουν λιγότερο από 1% του όγκου του βιοαερίου. Η μέση συγκέντρωση των συνολικών NMOCs είναι περίπου 4000 ppm.

Από την απογραφή στο μοντέλο LandGEM (Παράρτημα,σελίδα 131-INVENTORY) για το ΧΥΤΑ Αλμωπίας παρατηρούμε παραγωγή NMOCs ίση με $1,291 \cdot 10^1$ Mg/year, $3,602 \cdot 10^3$ m³/year, $1,272 \cdot 10^5$ ft³/year, $1,420 \cdot 10^1$ short tons/year και **$2,420 \cdot 10^1$ av ft³/min**, που είναι μια ποσότητα πολύ κοντά με αυτή του μεθανίου **CH_4 $3,026 \cdot 10^1$ av ft³/min**.

Η συλλογή και μεταφορά του βιοαερίου στη μονάδα επεξεργασίας, μειώνει τις εκπομπές των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και εκμηδενίζει την πιθανότητα πυρκαγιάς στο χώρο απόθεσης, ενώ από την άλλη, συμβάλλει στην εξοικονόμηση χρημάτων, μέσα από την παραγωγή και εκμετάλλευση της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας που παράγεται. Το βιοαέριο αυτό, μπορεί επίσης να αντικαταστήσει τα συμβατικά καύσιμα στις μεταφορές ή μετά από επεξεργασία να διοχετευτεί στο δίκτυο του φυσικού αερίου για την εκμετάλλευση από σπίτια-κτίρια της περιοχής. Το στερεό οργανικό υπόλειμμα που παράγεται μπορεί με τη σειρά του να αποτελέσει επιπλέον πηγή εσόδων, καθώς μετά από κατάλληλη τροποποίηση μπορεί να μεταπωληθεί ως λίπασμα.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ–ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
Χ.Υ.Τ.Α. ΑΛΜΩΠΙΑΣ**

INTRODUCTION

LandGEM - Landfill Gas Emissions Model, Version 3.02

U.S. Environmental Protection Agency

Model Design:

Worksheet Name	Function
INTRO	Contains an overview of the model and important notes about using LandGEM
USER INPUTS	Allows users to provide landfill characteristics, determine model parameters, select up to four gases/pollutants (total landfill gas, methane, carbon dioxide, NMOC, and 46 air pollutants), and enter waste acceptance rates
POLLUTANTS	Allows users to edit air pollutant concentrations and molecular weights for existing pollutants and add up to 10 new pollutants
INPUT REVIEW	Allows users to review and print model inputs
METHANE	Calculates methane emission estimates using the first-order decomposition rate equation
RESULTS	Shows tabular emission estimates for up to four gases/pollutants (selected in the USER INPUTS worksheet) in megagrams per year, cubic meters per year, and user's choice of a third unit of measure (average cubic feet per minute, cubic feet per year, or short tons per year)
GRAPHS	Shows graphical emission estimates for up to four gases/pollutants (selected in the USER INPUTS worksheet) in megagrams per year, cubic meters per year, and user's choice of a third unit of measure (selected in the RESULTS worksheet)
INVENTORY	Displays tabular emission estimates for all gases/pollutants for a single year specified by users
REPORT	Allows users to review and print model inputs and outputs in a summary report

IMPORTANT NOTES!

The following user inputs **MUST** be completed in the USER INPUTS worksheet:

- Landfill open year
- Landfill closure year or Waste design capacity
- Annual waste acceptance rates from open year to current year or closure year

Other Important Notes:

- LandGEM is based on the gas generated from anaerobic decomposition of landfilled waste which has a methane content between 40 and 60 percent.
- When using LandGEM to comply with the CAA, the methane content of the landfill gas must remain fixed at 50% by volume (the model default value).
- Default pollutant concentrations used by LandGEM have already been corrected for air infiltration, as stated in AP-42. If a user-specified value for NMOC concentration is used based on site-specific data, then it must be corrected for air infiltration.
- When comparing results from LandGEM with measurements of extracted gas collected at a site, the landfill owner/operator must adjust for air infiltration prior to any comparisons.
- One megagram is equivalent to one metric ton.

About LandGEM:

LandGEM is based on a first-order decomposition rate equation for quantifying emissions from the decomposition of landfilled waste in municipal solid waste (MSW) landfills. The software provides a relatively simple approach to estimating landfill gas emissions. Model defaults are based on empirical data from U.S. landfills. Field test data can also be used in place of model defaults when available. Further guidance on EPA test methods, Clean Air Act (CAA) regulations, and other guidance regarding landfill gas emissions and control technology requirements can be found at <http://www.epa.gov/tstate01/landfil/landfilpg.html>

LandGEM is considered a screening tool — the better the input data, the better the estimates. Often, there are limitations with the available data regarding waste quantity and composition, variation in design and operating practices over time, and changes occurring over time that impact the emissions potential. Changes to landfill operation, such as operating under wet conditions through leachate recirculation or other liquid additions, will result in generating more gas at a faster rate. Defaults for estimating emissions for this type of operation are being developed to include in LandGEM along with defaults for conventional landfills (no leachate or liquid additions) for developing emission inventories and determining CAA applicability. Refer to the Web site identified above for future updates.

USER INPUTS

Landfill Name or Identifier: XYTA Αλμυπίας

Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year	2010	Waste Design Capacity entered is not used by the model unless 'Have Model Calculate Closure Year?' option is Yes.
Landfill Closure Year	2025	
Have Model Calculate Closure Year?	<input type="radio"/> Yes SE	<input checked="" type="radio"/> No
Waste Design Capacity	110.231	short tons

Restore Default Model Parameters

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k ($year^{-1}$)	0.05
Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg)	CAA Conventional - 170
NMOC Concentration ($ppmv$ as hexane)	CAA - 4,000
Methane Content (% by volume)	CAA - 50% by volume

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1	Default pollutant parameters are currently being used by model.	<p>Edit Existing or Add New Pollutant Parameters</p> <p>Restore Default Pollutant Parameters</p>
NMOC		
Gas / Pollutant #2		
Gas / Pollutant #3		
Gas / Pollutant #4		

Description/Comments:

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units: short tons/year

Year	Input Units (short tons/year)	Calculated Units (Mg/year)
2010	11.214	10.195
2011	11.214	10.195
2012	11.214	10.195
2013	11.214	10.195
2014	11.214	10.195
2015	11.214	10.195

POLLUTANTS

Landfill Name or Identifier: XYTA Αλιμωτίας

Enter New Pollutant Parameters

Edit Existing Pollutant Parameters

Default parameters will be used by model unless alternate parameters are entered.

Enter User-specified Pollutant Parameters for Existing Pollutants:

Gas / Pollutant Default Parameters:		Concentration (ppmv)	Molecular Weight	Notes	Enter User-specified Pollutant Parameters for Existing Pollutants:	
Compound					Concentration (ppmv)	Molecular Weight
Gases	Total landfill gas		30.03			
	Methane		16.04			
	Carbon dioxide		44.01			
	NMOC	4.000	88.18			
Pollutants	1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform) - HAP	0.48	133.41	A		
	1,1,2,2-Tetrachloroethane - HAP/VOC	1.1	167.85	A, B		
	1,1-Dichloroethane (ethylidene dichloride) - HAP/VOC	2.4	98.97	A, B		
	1,1-Dichloroethene (vinylidene chloride) - HAP/VOC	0.20	96.94	A, B		
	1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	0.41	98.96	A, B		
	1,2-Dichloropropane (propylene dichloride) - HAP/VOC	0.18	112.99	A, B		
	2-Propanol (isopropyl alcohol) - VOC	50	60.11	B		
	Acetone	7.0	58.08			
	Acrylonitrile - HAP/VOC	6.3	53.06	A, B		
	Benzene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	1.9	78.11	A, B		
	Benzene - Co-disposal - HAP/VOC	11	78.11	A, B		
	Bromodichloromethane - VOC	3.1	163.83	B		
	Butane - VOC	5.0	58.12	B		
	Carbon disulfide - HAP/VOC	0.58	76.13	A, B		
	Carbon monoxide	140	28.01			
	Carbon tetrachloride - HAP/VOC	4.0E-03	153.84	A, B		
	Carbonyl sulfide - HAP/VOC	0.49	60.07	A, B		
	Chlorobenzene - HAP/VOC	0.25	112.56	A, B		
	Chlorodifluoromethane	1.3	86.47			
	Chloroethane (ethyl chloride) - HAP/VOC	1.3	64.52	A, B		
	Chloroform - HAP/VOC	0.03	119.39	A, B		
	Chloromethane - VOC	1.2	50.49	B		
	Dichlorobenzene - (HAP for para isomer)/VOC	0.21	147	B, C		
	Dichlorodifluoromethane	16	120.91			
	Dichlorofluoromethane - VOC	2.6	102.92	B		
	Dichloromethane (methylene chloride) - HAP	14	84.94	A		
	Dimethyl sulfide (methyl sulfide) - VOC	7.8	62.13	B		
	Ethane	890	30.07			
	Ethanol - VOC	27	46.08	B		
	Ethyl mercaptan (ethanethiol) - VOC	2.3	62.13	B		
	Ethylbenzene - HAP/VOC	4.6	106.16	A, B		
	Ethylene dibromide - HAP/VOC	1.0E-03	187.88	A, B		
	Fluorotrichloromethane - VOC	0.76	137.38	B		
	Hexane - HAP/VOC	6.6	86.18	A, B		
	Hydrogen sulfide	36	34.08			
	Mercury (total) - HAP	2.9E-04	200.61	A		
	Methyl ethyl ketone - HAP/VOC	7.1	72.11	A, B		
	Methyl isobutyl ketone - HAP/VOC	1.9	100.16	A, B		
	Methyl mercaptan - VOC	2.5	48.11	B		
	Pentane - VOC	3.3	72.15	B		
	Perchloroethylene (tetrachloroethylene) - HAP	3.7	165.83	A		
	Propane - VOC	11	44.09	B		
	t-1,2-Dichloroethene - VOC	2.8	96.94	B		
	Toluene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	39	92.13	A, B		
	Toluene - Co-disposal - HAP/VOC	170	92.13	A, B		
	Trichloroethylene (trichloroethene) - HAP/VOC	2.8	131.40	A, B		
	Vinyl chloride - HAP/VOC	7.3	62.50	A, B		
	Xylenes - HAP/VOC	12	106.16	A, B		

POLLUTANTS - 1

- A. Hazardous air pollutants (HAP) listed in Title III of the 1990 Clean Air Act Amendments.
- B. Considered volatile organic compounds (VOC), as defined by U.S. EPA in 40 CFR 51.100(s).
- C. Source tests did not indicate whether this compound was the para- or ortho- isomer. The para- isomer is a Title III-listed HAP.

Source: Tables 2.4-1 and 2.4-2 of *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Volume 1: Stationary Point and Area Sources*, 5th ed., Chapter 2.4 Municipal Solid Waste Landfills. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC. November 1998. <http://www.epa.gov/ttn/chieff/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>

INPUT REVIEW

Landfill Name or Identifier: XYTA Αλωπτίας

LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year	2010	
Landfill Closure Year (with 80-year limit)	2025	
<i>Actual Closure Year (without limit)</i>	2025	
Have Model Calculate Closure Year?	No	
Waste Design Capacity	110.231	<i>short tons</i>

MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k	0,050	<i>year⁻¹</i>
Potential Methane Generation Capacity, L ₀	170	<i>m³/Mg</i>
NMOC Concentration	4.000	<i>ppmv as hexane</i>
Methane Content	50	<i>% by volume</i>

GASES / POLLUTANTS SELECTED

Gas / Pollutant #1: **NMOC**
 Gas / Pollutant #2:
 Gas / Pollutant #3:
 Gas / Pollutant #4:

Description/Comments:

WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	(Mg/year)	(short tons/year)
2010	10.195	11.214
2011	10.195	11.214
2012	10.195	11.214
2013	10.195	11.214
2014	10.195	11.214
2015	10.195	11.214
2016	10.195	11.214
2017	10.195	11.214
2018	10.195	11.214
2019	10.195	11.214
2020	10.195	11.214
2021	10.195	11.214
2022	10.195	11.214
2023	10.195	11.214
2024	10.195	11.214
2025	0	0
2026	0	0

METHANE

Landfill Name or Identifier: XYTA Αλμυπιάς

First-Order Decomposition Rate Equation:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}}$$

Where,

Q_{CH_4} = annual methane generation in the year of the calculation ($m^3/year$)

M_i = mass of waste accepted in the i^{th} year (Mg)

i = 1-year time increment

t_{ij} = age of the j^{th} section of waste mass M_i accepted in the i^{th} year (decimal years, e.g., 3.2 years)

n = (year of the calculation) - (initial year of waste acceptance)

j = 0.1-year time increment

k = methane generation rate ($year^{-1}$)

Model Parameters from User Inputs:

L_0 = potential methane generation capacity (m^3/Mg)

$k = 0,050 \text{ year}^{-1}$

$L_0 = 170 \text{ m}^3/Mg$

When Model Calculates Closure Year...

Final Non-Zero Acceptance Entered = 10.195 megagrams in 2015
 Waste Design Capacity = 100.210 megagrams
 Closure Year (with 80-year limit) = 2025
 Actual Closure Year (without limit) = 2025
 Model Waste Acceptance Limit = 80 years

RESULTS

Landfill Name or Identifier: XYTA Αλμυπιάς

Closure Year (with 80-year limit) = 2025
 Methane = 50 % by volume

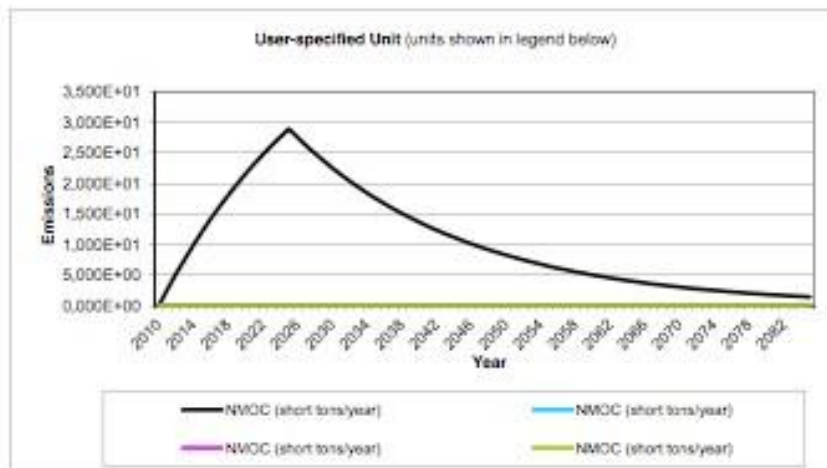
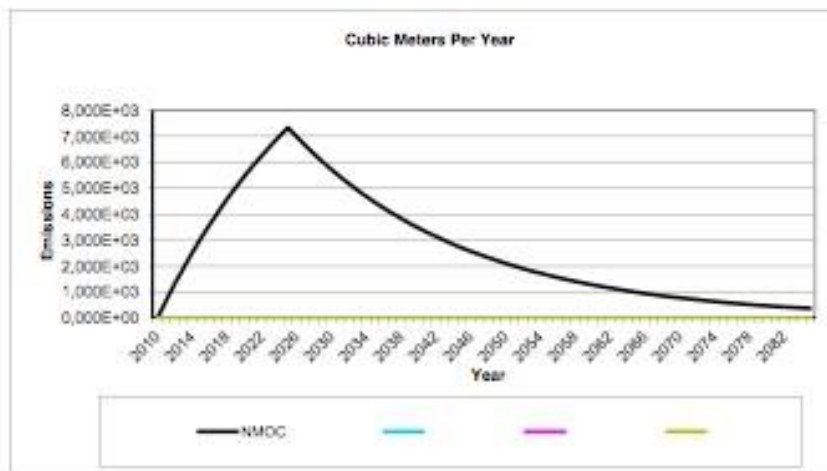
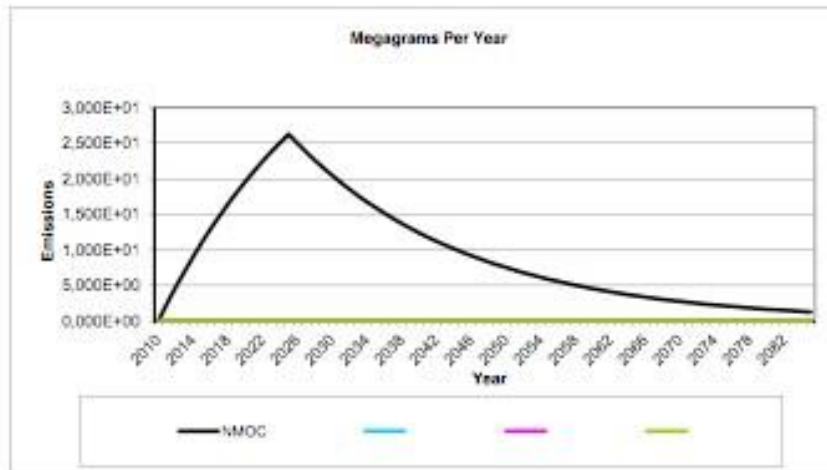
Please choose a third unit of measure to represent all of the emission rates below.

User-specified Unit:

Year	Waste Accepted		Waste-In-Place		NMOC		
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)	(Mg/year)	(m^3 /year)	(short tons/year)
2010	10.195	11.214	0	0	0	0	0
2011	10.195	11.214	10.195	11.214	2.430E+00	6.779E+02	2.673E+00
2012	10.195	11.214	20.389	22.428	4.741E+00	1.323E+03	5.215E+00
2013	10.195	11.214	30.584	33.642	6.940E+00	1.936E+03	7.634E+00
2014	10.195	11.214	40.778	44.856	9.031E+00	2.520E+03	9.934E+00
2015	10.195	11.214	50.973	56.070	1.102E+01	3.075E+03	1.212E+01
2016	10.195	11.214	61.167	67.284	1.291E+01	3.602E+03	1.420E+01
2017	10.195	11.214	71.362	78.498	1.471E+01	4.105E+03	1.618E+01
2018	10.195	11.214	81.556	89.712	1.643E+01	4.582E+03	1.807E+01
2019	10.195	11.214	91.751	100.926	1.805E+01	5.037E+03	1.986E+01
2020	10.195	11.214	101.945	112.140	1.960E+01	5.469E+03	2.156E+01
2021	10.195	11.214	112.140	123.354	2.108E+01	5.880E+03	2.318E+01
2022	10.195	11.214	122.335	134.568	2.248E+01	6.271E+03	2.473E+01
2023	10.195	11.214	132.529	145.782	2.381E+01	6.643E+03	2.619E+01
2024	10.195	11.214	142.724	156.996	2.508E+01	6.997E+03	2.759E+01
2025	0	0	152.918	168.210	2.629E+01	7.334E+03	2.892E+01
2026	0	0	152.918	168.210	2.501E+01	6.976E+03	2.751E+01

Year	User Waste Acceptance Inputs (Mg/year)	User Waste-In-Place (Mg)	Waste Acceptance (Mg/year)	Waste-In-Place (Mg)
2010	10.195	0	10.195	0
2011	10.195	10.195	10.195	10.195
2012	10.195	20.389	10.195	20.389
2013	10.195	30.584	10.195	30.584
2014	10.195	40.778	10.195	40.778
2015	10.195	50.973	10.195	50.973
2016	0	61.167	10.195	61.167
2017	0	61.167	10.195	71.362
2018	0	61.167	10.195	81.556
2019	0	61.167	10.195	91.751
2020	0	61.167	10.195	101.945
2021	0	61.167	10.195	112.140
2022	0	61.167	10.195	122.335
2023	0	61.167	10.195	132.529
2024	0	61.167	10.195	142.724
2025	0	61.167	0	152.918
2026	0	61.167	0	152.918

Graphs

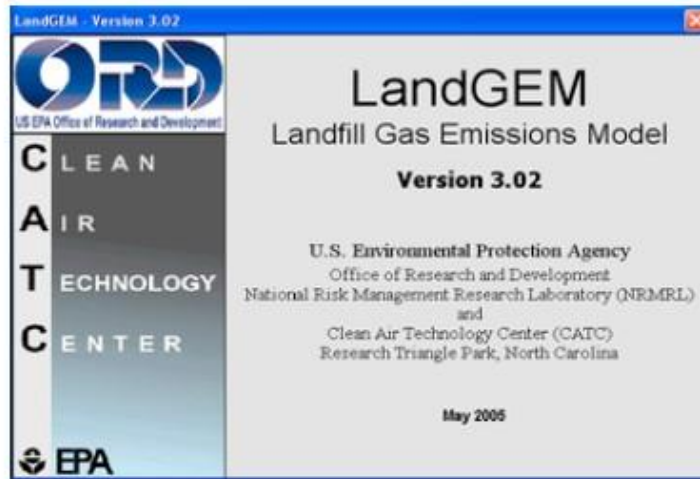


INVENTORY

Landfill Name or Identifier: XYTA Αλμυπιάς

Enter year of emissions inventory: 2016

Gas / Pollutant	Emission Rate				
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	(ft ³ /year)	(short tons/year)
Total landfill gas	1,125E+03	9,006E+05	6,051E+01	3,181E+07	1,237E+03
Methane	3,004E+02	4,503E+05	3,026E+01	1,590E+07	3,305E+02
Carbon dioxide	8,243E+02	4,503E+05	3,026E+01	1,590E+07	9,067E+02
NMOC	1,291E+01	3,602E+03	2,420E-01	1,272E+05	1,420E+01
1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform) - HAP	2,399E-03	4,323E-01	2,905E-05	1,527E+01	2,639E-03
1,1,2,2-Tetrachloroethane - HAP/VOC	6,916E-03	9,907E-01	6,656E-05	3,499E+01	7,608E-03
1,1-Dichloroethane (ethylidene dichloride) - HAP/VOC	8,898E-03	2,161E+00	1,452E-04	7,633E+01	9,787E-03
1,1-Dichloroethene (vinylidene chloride) - HAP/VOC	7,263E-04	1,801E-01	1,210E-05	6,361E+00	7,989E-04
1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	1,520E-03	3,692E-01	2,481E-05	1,304E+01	1,672E-03
1,2-Dichloropropane (propylene dichloride) - HAP/VOC	7,618E-04	1,621E-01	1,089E-05	5,725E+00	8,380E-04
2-Propanol (isopropyl alcohol) - VOC	1,126E-01	4,503E+01	3,026E-03	1,590E+03	1,238E-01
Acetone	1,523E-02	6,304E+00	4,236E-04	2,226E+02	1,675E-02
Acrylonitrile - HAP/VOC	1,252E-02	5,674E+00	3,812E-04	2,004E+02	1,377E-02
Benzene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	5,559E-03	1,711E+00	1,150E-04	6,043E+01	6,115E-03
Benzene - Co-disposal - HAP/VOC	3,219E-02	9,907E+00	6,656E-04	3,499E+02	3,540E-02
Bromodichloromethane - VOC	1,902E-02	2,792E+00	1,876E-04	9,860E+01	2,093E-02
Butane - VOC	1,089E-02	4,503E+00	3,026E-04	1,590E+02	1,197E-02
Carbon disulfide - HAP/VOC	1,654E-03	5,224E-01	3,510E-05	1,845E+01	1,819E-03
Carbon monoxide	1,469E-01	1,261E+02	8,472E-03	4,453E+03	1,616E-01
Carbon tetrachloride - HAP/VOC	2,305E-05	3,602E-03	2,420E-07	1,272E-01	2,536E-05
Carbonyl sulfide - HAP/VOC	1,103E-03	4,413E-01	2,965E-05	1,558E+01	1,213E-03
Chlorobenzene - HAP/VOC	1,054E-03	2,252E-01	1,513E-05	7,951E+00	1,160E-03
Chlorodifluoromethane	4,211E-03	1,171E+00	7,867E-05	4,135E+01	4,632E-03
Chloroethane (ethyl chloride) - HAP/VOC	3,142E-03	1,171E+00	7,867E-05	4,135E+01	3,456E-03
Chloroform - HAP/VOC	1,342E-04	2,702E-02	1,815E-06	9,542E-01	1,476E-04
Chloromethane - VOC	2,270E-03	1,081E+00	7,261E-05	3,817E+01	2,497E-03
Dichlorobenzene - (HAP for para isomer/VOC)	1,156E-03	1,891E-01	1,271E-05	6,679E+00	1,272E-03
Dichlorodifluoromethane	7,247E-02	1,441E+01	9,682E-04	5,089E+02	7,971E-02
Dichlorofluoromethane - VOC	1,002E-02	2,342E+00	1,573E-04	8,269E+01	1,103E-02
Dichloromethane (methylene chloride) - HAP	4,454E-02	1,261E+01	8,472E-04	4,453E+02	4,900E-02
Dimethyl sulfide (methyl sulfide) - VOC	1,815E-02	7,025E+00	4,720E-04	2,481E+02	1,997E-02
Ethane	1,002E+00	8,015E+02	5,386E-02	2,831E+04	1,103E+00
Ethanol - VOC	4,660E-02	2,432E+01	1,634E-03	8,587E+02	5,127E-02
Ethyl mercaptan (ethanethiol) - VOC	5,353E-03	2,071E+00	1,392E-04	7,315E+01	5,888E-03
Ethylbenzene - HAP/VOC	1,829E-02	4,143E+00	2,784E-04	1,463E+02	2,012E-02
Ethylene dibromide - HAP/VOC	7,038E-06	9,006E-04	6,051E-08	3,181E-02	7,742E-06
Fluorotrichloromethane - VOC	3,911E-03	6,845E-01	4,599E-05	2,417E+01	4,302E-03
Hexane - HAP/VOC	2,131E-02	5,944E+00	3,994E-04	2,099E+02	2,344E-02
Hydrogen sulfide	4,596E-02	3,242E+01	2,178E-03	1,145E+03	5,055E-02
Mercury (total) - HAP	2,179E-06	2,612E-04	1,755E-08	9,223E-03	2,397E-06
Methyl ethyl ketone - HAP/VOC	1,918E-02	6,394E+00	4,296E-04	2,258E+02	2,110E-02
Methyl isobutyl ketone - HAP/VOC	7,129E-03	1,711E+00	1,150E-04	6,043E+01	7,841E-03
Methyl mercaptan - VOC	4,505E-03	2,252E+00	1,513E-04	7,951E+01	4,956E-03
Pentane - VOC	8,919E-03	2,972E+00	1,997E-04	1,050E+02	9,811E-03
Perchloroethylene (tetrachloroethylene) - HAP	2,298E-02	3,332E+00	2,239E-04	1,177E+02	2,528E-02
Propane - VOC	1,817E-02	9,907E+00	6,656E-04	3,499E+02	1,998E-02
t-1,2-Dichloroethene - VOC	1,017E-02	2,522E+00	1,694E-04	8,905E+01	1,118E-02
Toluene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	1,346E-01	3,512E+01	2,360E-03	1,240E+03	1,481E-01
Toluene - Co-disposal - HAP/VOC	5,867E-01	1,531E+02	1,029E-02	5,407E+03	6,454E-01
Trichloroethylene (trichloroethene) - HAP/VOC	1,378E-02	2,522E+00	1,694E-04	8,905E+01	1,516E-02
Vinyl chloride - HAP/VOC	1,709E-02	6,574E+00	4,417E-04	2,322E+02	1,880E-02
Xylenes - HAP/VOC	4,772E-02	1,081E+01	7,261E-04	3,817E+02	5,249E-02



Summary Report

Landfill Name or Identifier: XYTA Αλμωπιάς

Date: Κυριακή, 27 Νοέμβριος 2016

Description/Comments:

About LandGEM:

First-Order Decomposition Rate Equation:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_o \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{i,j}}$$

Where,

Q_{CH_4} = annual methane generation in the year of the calculation ($m^3/year$)

i = 1-year time increment

n = (year of the calculation) - (initial year of waste acceptance)

j = 0.1-year time increment

k = methane generation rate ($year^{-1}$)

L_o = potential methane generation capacity (m^3/Mg)

M_i = mass of waste accepted in the i^{th} year (Mg)

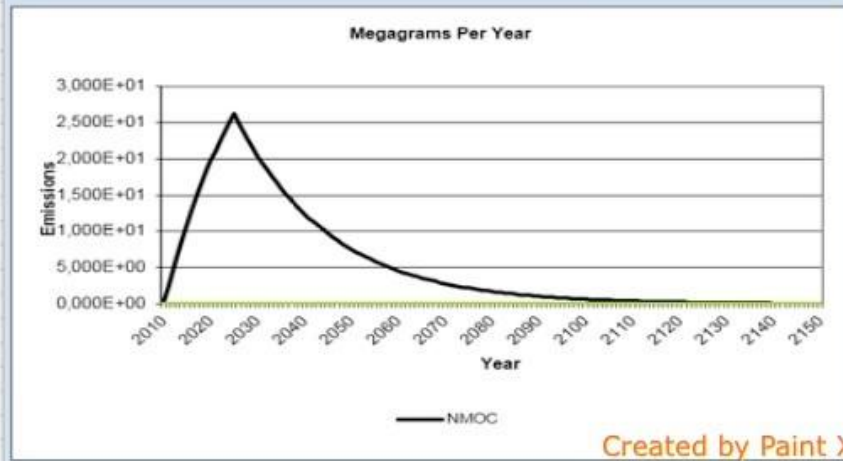
$t_{i,j}$ = age of the j^{th} section of waste mass M_i accepted in the i^{th} year (*decimal years*, e.g., 3.2 years)

LandGEM is based on a first-order decomposition rate equation for quantifying emissions from the decomposition of landfilled waste in municipal solid waste (MSW) landfills. The software provides a relatively simple approach to estimating landfill gas emissions. Model defaults are based on empirical data from U.S. landfills. Field test data can also be used in place of model defaults when available. Further guidance on EPA test methods, Clean Air Act (CAA) regulations, and other guidance regarding landfill gas emissions and control technology requirements can be found at <http://www.epa.gov/ttnatw01/landfill/landflpg.html>.

LandGEM is considered a screening tool — the better the input data, the better the estimates. Often, there are limitations with the available data regarding waste quantity and composition, variation in design and operating practices over time, and changes occurring over time that impact the emissions potential. Changes to landfill operation, such as operating under wet conditions through leachate recirculation or other liquid additions, will result in generating more gas at a faster rate. Defaults for estimating emissions for this type of operation are being developed to include in LandGEM along with defaults for conventional landfills (no leachate or liquid additions) for developing emission inventories and determining CAA applicability. Refer to the Web site identified above for future updates.

GRAPHS

Landfill Name or Identifier: ΧΥΤΑ Αλμωπιάς



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] (<http://esdak.gr/φωτογραφίες/>)/σελ.11
- [2] (Μούτσιου και Παναγιωτακόπουλος, 1998)/σελ.14-A procedure for generating landfill cost functions and estimating the degree of economies of scale. *Proceedings of the International Conference for the Protection and Restoration of the Environment, Vol. II, Halkidiki, Greece, July, pp 643–650.*
- [3]([//anos.com.gr/content/κατασκευη-χυτα-διαδυμα-κοζανη/](http://anos.com.gr/content/κατασκευη-χυτα-διαδυμα-κοζανη/))/σελ.14
- [4] (Κόλλιας, 2004)/σελ.16,17,18,19,20,21,70,73,76-Απορρίμματα, Αστικά – Βιομηχανικά. Λύχνος ΕΠΕ – Γραφικές Τέχνες, Αθήνα.
- [5] (Tchobanoglous et al., 1977)/σελ22-Solid wastes, McGraw – Hill New York.
- [6] (Παναγιωτακόπουλος 2007)/σελ.24
- [7](Christensen et al., 1994)/σελ24-Landfilling of waste: Biogas, E & FN Spon.
- [8](Παναγιωτακόπουλος, 2002)/σελ25,37,64-Βιώσιμη διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων, Ζυγός, Θεσσαλονίκη.
- [9] (Μούτσιου, 2002)/σελ.14,26-Συναρτήσεις κόστους ΧΥΤΑ – Οικονομίες κλίμακας, Τεχνική Έκθεση, Εργαστήριο Οργάνωσης και Προγραμματισμού, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΔΠΘ, Ξάνθη.
- [10] (Tchobanoglous et al., 1993)/σελ.29,36,57,59,60,83,84-Integrated solid waste management, McGraw Hill.
- [11] (Barlaz, 1988)/σελ.32,34,50,51-Microbiological and chemical dynamics during refuse decomposition in a simulated sanitary landfill, Ph.D. Dissertation, The University of Wisconsin–Madison.
- [12](Jerris and McCarty, 1965)/σελ33-The biochemistry of methane fermentation using C^{14} tracers, *Journal Pollution Control Feeration*, 37, 178.
- [13] Gaudy and Gaudy (1980), McInerney and Bryant (1981), Zehnder (1978)/σελ.33-Microbiology for environmental scientists and engineers, McGraw – Hill Book Company, New York, N.Y.

- [14] Christensen and Kjeldsen, 1989/σελ35-Basic biochemical in landfills, in *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, eds T.H. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann, Academic Press, London, UK, pp. 29-49.
- [15] McCarty, 1964, Schumacher, 1983/σελ.38,44-Anaerobic waste treatment fundamental, Parts 1 through 4, *Public Works*, September through December.
- [16] (Zeikus, 1983)/σελ.39-Metabolism of one carbon compounds by chemotrophic anaerobes, *Adv. Microb. Physiol.* 24, 215.
- [17] (Laanbroek and Veldkamp, 1982)/σελ39-Microbial interactions in sediment communities, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B*, 297, 533.
- [18] Boone, 1993/σελ39-Biological formation and consumption of methane, in *atmospheric methane: sources, sinks and role in global change*, NATO ASI Series, Springer-Verlag, Germany, Edited by M. A. K. Khalil.
- [19] (Lawrence et al., 1969)/σελ39-Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment, *J. Water Pollution Control Federation*, 41,
1-17
- [20] (Lawrence and McCarty, 1969)/σελ39,97-The effects of sulfides on anaerobic treatment, *Processings of the 19th Industrial Waste Conference*, Purdue University, pp. 345-357.
- [21] (Eastman and Ferguson, 1981)/σελ39,97-Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion, *J. Water Pollution Control Federation*, Vol. 53, 3, pp. 352-366.
- [22] (Kjeldsen et al., 1997)/σελ40-Attenuation of methane and nonmethane organic compounds in landfill gas affected soils, *Air and Waste Manage. Assoc.*, 47, pp. 1268 – 1275.
- [23] (Kjeldsen and Fischer, 1995)/σελ.41-Landfill gas migration-field investigations at Skellingsted landfill, Denmark, *Waste Management and Research* 13, 467-484.
- [24] (Boltze et al., 1997)/σελ.42,52-Monitoring gas emissions from landfill sites, *Waste Management and Research* 15, 463-467.

- [25] (Zehnder, 1978)/σελ.42-*Ecology of methane formation in water pollution microbiology*, Vol. 2, R. Mitchell (Eds) John Wiley & Sons, New York.
- [26] (McInerney and Bryant, 1981)/σελ.43-*Basic principles of bioconversions in anaerobic digestion and methanogenesis, in biomass conversion processes for energy and fuels*, S.S. Sofar and O. Zaborsky, Eds., Plenum Publishing Corp., New York
- [27] (Cecchi et al., 1993)/σελ.43-*Digesting the organic fraction of municipal solid waste: Moving from mesophilic (37 °C) to thermophilic (55 °C) conditions*, *Waste Management and Research* 11, 403–414.
- [28] (Zehnder et al., 1982)/σελ.43,44-*Microbiology of methane bacteria, in anaerobic digestion* Hedges et al., Eds., Elsevier Biomedical Press B.V.
- [29] (Τάγαρης, 2002)/σελ.44,57,67,108-*Παραγωγή και διασπορά μεθανίου στην ατμόσφαιρα σε μονάδες εδαφικής διάθεσης αποβλήτων (ΜΕΔΑ)*, Ph.D. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- [30] (Metcalf and Eddy, 1991)/σελ.45-*Wastewater engineering*, McGraw–Hill International Editions.
- [31] (Leckie et al., 1975)/σελ.45-*Other hones and garbage–design of self sufficient living*, Sierra Club Books, San Francisco.
- [32] (Senior, 1990)/σελ.46-*Microbiology of landfill sites*, CRC Press, Inc.
- [33] (<http://www.bact.wisc.edu/bact303/NutritionandGrowth/>)/σελ.46
- [34] (Thauer, 1998)/σελ.46-*Biochemistry of methanogenesis: A tribute to Marjory Stephenson*, *Microbiology*, 144, 2377–2406.
- [35] (EMCON, 1980)/σελ.47,109-*Methane generation and recovery from landfills*, Ann Arbor Science, Michigan.
- [36] (EMCON, 1982)/σελ.47
- [37] (Ramaswamy, 1970)/σελ.47-*Nutritional effects on acid and gas production in sanitary landfills*, PhD Thesis, West Virginia University, Morgantown, West Virginia.
- [38] (Rovers and Ferquhar, 1973)/σελ.48-*Infiltration and landfill behaviour*, *J. Env. Eng. Div., ASCE*, 99 (EE5): 671–690.

- [39] (DeWalle et al., 1978)/σελ.49-Gas production from solid waste in landfills, ASCE, *Journal of the Environmental Engineering Division*, 104, EE3, p. 415.
- [40] (El Fadel, 1991)/σελ.50,65,67,91-Modeling gas and heat generation and transport in a sanitary landfills (Gas generation and heat transport), Ph.D. Dissertation, Stanford University.
- [41] (Buivid, 1980, Rees and Grainer, 1982)/σελ.51-Rubbish dump or fermentor? Prospects for the control of refuse fermentation to methane in landfills, *Process Biochemistry*, Nov/Dec., p. 41
- [42] (1.Buivid, 1980, 2.Leckie et al., 1979, 3.Stegmann, 1983)/σελ/51,54-Laboratory simulation of fuel gas production enhancement from municipal solid waste landfills, Dynathech R&D Co., Cambridge, MA., Report No. 1948
- [43] (Barlaz et al., 1987)/σελ.51-Gas production parameters in sanitary landfill simulators, *Waste Management and Research* 5, 27–39
- [44] (Kinman et al., 1987)/σελ.51-Gas enhancement techniques in landfill simulators, *Waste Management and Research* 5, 13–25.
- [45] (Bogner et al., 1995)/σελ.52-Landfills as atmospheric methane sources and sinks, *Chemosphere*, 31 (9): pp 4119–4130.
- [46] (Muthuswamy and Nemerow, 1990)/σελ.53-Effects of plastics in anaerobic digestion of urban solid wastes, *Waste Management and Research* 8, 375–378.
- [47] (Schumacher, 1983)/σελ.54-Landfill methane recovery, Noyes Data Corporation, New Jersey.
- [48] (Barlaz et al., 1989)/σελ.54-Microbiology of solid waste, CRC Press, Inc.
- [49] (Pohland and Kang, 1974, Buivid, 1980, Tittlebaum, 1982)/σελ.54-Sanitary landfill stabilization with leachate recycle and residual treatment, *AICHE Symposium: Water II – Municipal waste treatment*, p. 308.
- [50] (Halvadakis, 1983)/σελ.55,65,67,85,93-Methanogenesis in solid waste landifill bioreactors, Ph.D. Dissertation, Stanford University.
- [51] (Χαλβαδάκης, 1998)/σελ.56-Διαχείριση στερεών αποβλήτων, Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.

- [52] (Φελεσκουρα & Παπαϊωαννου, 2004)/σελ.58,59-Σύγχρονες τεχνολογίες ανακύκλωσης απορριμμάτων διαχείριση και ενεργειακή αξιοποίηση απορριμμάτων, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Χαλκίδας.
- [53] (Gendebein et al., 1992)/σελ.61,63-Landfill gas – From environment to energy, Commission of the European Communities, Directorate – General Telecommunication, Information Industries and Innovation, Luxembourg.
- [54] (Hoather and Wright, 1989)/σελ.61-Landfill gas: site licensing and risk assessment, in *Landfill Gas and Anaerobic Digestion of Solid Wastes*, eds. Y. R. Alston and G. E. Richards, *Proceedings Conference Chester, UK. Harwell Laboratories, UK.*
- [55] (Young and Parker, 1983)/σελ.62,63-The identification and possible impact of trace gases and vapours in landfill gas. *Waste Management & Research*, 1, 213–226.
- [56] (Little et al., 1992)/σελ.62-Transport of subsurface contaminants into buildings. *Environmental Science and Technology*, 26, 2058–2066.
- [57] (Ward et al., 1992)/σελ.62-Changes in gas composition during migration from the Foxhall Landfill, Suffolk, *Technical Report WE/92/22, Fluid Processes Group, British Geological Survey, Nottingham, UK.*
- [58] (Petersen, 1988)/σελ.62-Human health risk assessment of landfill gas emission, in *Proceedings 11th Annual Madison Waste Conference–Municipal & Industrial Waste*, 13–14 September. Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin–Madison, Madison, WI, USA, 164–177.
- [59] (Rettenberger, 1985)/σελ.62-Emissionen aus Abfalldeponien im Hinblick auf Umweltrelevante Schadstoffe, in *Umweltteinflusse von Abfalldeponien und Sondermullbeseitigung*, *Prpc. Mulltechnisches Seminar und Fachgespräch Sondermull*, November 1984, Munchen, Germany, 40–56 (in German).
- [60] (Ham, 1979)/σελ.66-Predicting gas generation from landfills, *Waste Age*, November, pp. 50-58.
- [61] (Stone, 1978)/σελ.68
- [62] (Braker and Mosman 1971)/σελ.72

- [63] (<http://www.physics4you.gr>)/σελ.76-Ένωση Φυσικών Ελλάδας. Ημερομηνία τελευταίας πρόσβασης: 24/09/2007.
- [64] (Pfeffer, 1973)/σελ.79
- [65] (Gossett et al., 1982)/σελ.79-Heat treatment and anaerobic digestion of refuse. *J. Envir. Eng. Div., ASCE*, 108(E3): 437–454.
- [66](El-Fadel et al, 1989)/σελ.54,80
- [67] (Guger and Zehnder, 1983)/σελ.89-Conversion processes in anaerobic digestion, *Water Science Technology*, No., 15, 127–167. *Biotech. and Bioeng. Symp., New York*, No 11, pp. 301–313.
- [68] (Veeken and Hamelers, 1999)/σελ.90-Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components, *Bioresource Technology*, 69, 249–254.
- [69](McCarty, 1971)/σελ.97-Energetics and Kinetics of anaerobic treatment, in *anaerobic biological treatment processes, Advances in Chemistry Series, 105, American Chemical Society, Washington D.C.*
- [70] (Zoetemeyer et al., 1982 a,b)/σελ.97-pH influence on acidogenic dissimilation of glucose in an anaerobic digestion, *Water Res.*, 16, 303–311
- [71] (O'Rourke, 1968)/σελ.97-Kinetics of anaerobic treatment at reduced temperatures, *PhD Dissertation, Civil Engineering Department, Stanford University, Stanford, CA.*
- [72] (Montgomery, 1983)/σελ.97-Kinetics of methane fermentation in anaerobic digestion of urban solid wastes, *Waste Management and Research* 8, 375–378.
- [73] (Environmental Protection Agency, 2013)/σελ.106
- [74] (Παληκώρας Α., 2007), «Μοντελοποίηση Μηχανισμών Παραγωγής Βιοαερίου από Χώρους Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (XYTA), Μυτιλήνη.
- [75] (Κουτσιούκη Ευτυχία, 2005) Εκτίμηση αερίων εκπομπών από το Χώρο Διάθεση Απορριμμάτων (Χ.Δ.Α.) Πέρα Γαλήνων Ηρακλείου.,155-160.
- [76] (Σαββοπούλου Ελένη 2015) Διερεύνηση Ανάκτησης Βιοαερίου σε χώρο ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων–Το παράδειγμα της ενεργειακής αξιοποίησης του Χ.Δ.Α. Ταγαράδων Θεσσαλονίκης.,50-66.
- [77] http://www.cres.gr/kape/news/deltia/forma_biogas.htm/σελ.120
- [78] (Bilitewski et al., 1994)/σελ.65-Waste management, Springer

[79] *Landfill/σελ.65 (Pull – Out Information Sheet), WARMER, No. 72, May 2000*

[80] *(WARMER bulletin, 1998)/σελ.16-Sustainable waste management, Tzivilivakis, J.*

1998 In : Warmer Bulletin. 58, p. 20-21