

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ
ΑΠΟ ΧΩΡΟΥΣ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ
(Χ.Δ.Α.)»**

ΠΑΡΑΣΚΑΚΗ Ε. ΙΩΑΝΝΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δρ. ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ Μ. (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Δρ. ΓΚΕΚΑΣ Β.

Δρ. ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ Ν.

Χανιά

Ιούλιος 2003

Η εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου Μανόλη και Μαρία, στην αδερφή μου Στέλλα & στο Μανώλη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση του επιπέδου ατμοσφαιρικής ρύπανσης, από μέγιστες δυνατές εκπομπές βιοαερίου¹ που εκλύονται από χώρους διάθεσης απορριμμάτων (Χ.Δ.Α.), πάνω από ειδικούς αποδέκτες πέριξ του Χ.Δ.Α. Η μεθοδολογία πρόγνωσης τυπικών παραγόμενων φορτίων βιοαερίου και εκτίμησης διασποράς εκπομπών αέριων ρύπων που επιλέχθηκε από την επιστημονική βιβλιογραφία εφαρμόζεται στον παλαιό Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια”. Οι υπολογισμοί των εκπομπών των αέριων ρύπων για χρήση τους στην εφαρμογή του μοντέλου διασποράς είναι προσεγγιστικοί, ωστόσο παρέχουν τιμές που είναι δυσμενέστερες από τις πραγματικά αναμενόμενες. Αναφέρεται ότι οι σχετικές εκτιμήσεις των αέριων εκπομπών πραγματοποιήθηκαν σε Χ.Δ.Α. με ανεξέλεγκτες εκπομπές -χωρίς να λαμβάνεται υπόψη πρακτική χωματοκάλυψη των απορριμμάτων καθώς και η λειτουργία μηχανικού συστήματος συλλογής και αξιοποίησης βιοαερίου- και μέγιστη παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου.

Η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία προγνωστικής εκτίμησης τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης από Χ.Δ.Α. μπορεί να αποτελέσει κριτήριο αξιολόγησης καταλληλότητας θέσης του Χ.Δ.Α. (εκτίμηση αποδεκτής απόστασης μεταξύ συνόρων Χ.Δ.Α. και συνόρων οικιστικής περιοχής) με σκοπό την ασφάλεια και προστασία της δημόσιας υγείας καθώς επίσης μπορεί να συμβάλει στην πρόληψη υποβάθμισης του τοπικού ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος με την ελαχιστοποίηση των εκπομπών και την έγκαιρη λειτουργία συστήματος ελέγχου και αξιοποίησης βιοαερίου. Σημειώνεται επιπλέον ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να ενσωματωθεί στον κώδικα πρακτικής για τη μείωση της κοινωνικής αντίδρασης στη διαδικασία χωροθέτησης μονάδων διάθεσης απορριμμάτων.

¹ Στην εργασία, η εκτίμηση εκπομπών από Χ.Δ.Α. περιορίζεται στις βιογενείς εκπομπές (εκπομπές βιοαερίου) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές πτητικών συστατικών από την εξάχνωση στερεών αποβλήτων και την εξάτμιση του παραγόμενου εγχυλίσματος. Σημειώνεται επίσης ότι στις εκτιμήσεις αέριων εκπομπών από Χ.Δ.Α. δε λαμβάνονται υπόψη οι αέριες εκπομπές από αυταναφλέξεις και εκρήξεις καθώς και από τα μηχανήματα καύσης βιοαερίου, αν υπάρχουν.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

X.Δ.Α.	Χώρος διάθεσης απορριμμάτων
MSWLF	βιοαέριο δημοτικού χώρου διάθεσης απορριμμάτων, (municipal solid waste landfill gas)
T.B.Σ.	Ταχέως βιοαδιασπώμενο συστατικό
B.B.Σ.	Βραδέως βιοαδιασπώμενο συστατικό
NMOCs	Οργανικά συστατικά εκτός μεθανίου, (nonmethane organic compounds), ορίζεται ως κλάσμα βιοαερίου που περιέχει αέριους ρύπους
NMVOCs	Οργανικά πτητικά συστατικά εκτός μεθανίου, (nonmethane volatile organic compounds)
HAPs	Βλαπτικοί αέριοι ρύποι, (hazardous air pollutants)
PAHs	Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, (polycyclic aromatic hydrocarbons)
VOC	Volatile organic compound, ορίζεται ως:
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ο De Nevers, 1995 όρισε τα VOCs ως οργανικά υγρά ή στερεά που έχουν τάση ατμών μεγαλύτερη από 0,0007 atm (0,532 mmHg) και σημείο βρασμού λιγότερο από 260°C. 2. Ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας (WHO) όρισε ως VOCs κάθε οργανική ένωση που έχει τάση ατμών μεγαλύτερη από 0,0013 atm σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση. 3. Η EPA,1992 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 συμμετέχει στις ατμοσφαιρικές φωτοχημικές αντιδράσεις.”
EPA	Αμερικανική υπηρεσία περιβάλλοντος, (environmental protection agency)
LandGEM	landfill gas emission estimation model
AP-42	compilation of air pollutant emissions factors of EPA
CAA	Clean air act, νομοθεσία σχετική με τα όρια για τις αέριες εκπομπές από σταθερές και μη σταθερές πηγές
OAQPS	Office of Air Quality Planning and Standards
NSPS	Standards of Performance for New Municipal Solid Waste Landfills

EG	Emission Guidelines
IPCC	Intergovernmental panel for climate change
FCCC	framework convention on climate change, κατευθυντήρια οδηγία της IPCC για την ανάλυση και μελέτη των δεδομένων απογραφής ανά χώρα που δημοσιοποιήθηκε στα πλαίσια εργασίας για τη συμφωνία αλλαγής του κλίματος
EC DGXI	Department of environment of the European commission
NETCEN	National environmental technology centre (AEA Technology)
SWANA	Σύνδεσμος απορριμμάτων βόρειας Αμερικής (Solid waste association of North America)
WIAC	Waste industry air coalition, αποτελείται από το σύνδεσμο απορριμμάτων της βόρειας Αμερικής (SWANA) και τον εθνικό σύνδεσμο διαχείρισης απορριμμάτων (national solid wastes management association)
AWMA	Air and waste management association
ECOSIM	Ecological and environmental monitoring and simulation system for management decision support in urban areas
AIR-EIA	Air pollution and environmental impact assessment
EIIP	Emission inventory improvement program
Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.	Ενιαίος σύνδεσμος δήμων και κοινοτήτων νομού Αττικής
CHIEF	Clearinghouse for inventories and emission factors of EPA
Ε.Σ.Σ.Η.Θ.	Ελληνικός σύνδεσμος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού & θερμότητας
EFR	Emission factor rating, συντελεστής εκτίμησης αξιοπιστίας εκπομπών
Κ.Α.Π.Ε.	Κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, C.R.E.S., centre for renewable energy sources
EEA	European environment agency
IEA	International energy agency
LMOP	Landfill Methane Outreach Program
ATSDR	Agency for toxic substances and disease registry
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
OSHA	Occupational safety and health administration
WHO	World health organization
PEL	Permissible exposure limit

- TLV-TWA Threshold Limit Value, time weighted average, ανώτατη επιτρεπτή συγκέντρωση επανειλημμένης έκθεσης σε εργασιακό χώρο για κανονική 8ωρη μέρα εργασίας και 40ωρη εβδομαδιαία εργασία, με αναστρέψιμες επιπτώσεις στην υγεία των εργαζομένων.
- TLV-STEL Threshold Limit Value, short-time exposure limit, ανώτατη επιτρεπτή συγκέντρωση βραχυχρόνιας έκθεσης σε εργασιακό χώρο (για 15 min και όχι περισσότερο από 4 φορές την ημέρα) χωρίς να προκαλείται ερεθισμός, μείωση απόδοσης εργασίας, χρόνια ή μη αναστρέψιμη καταστροφή ιστών υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι η καθημερινή συγκέντρωση < TLV-TWA

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ -----	10 -
1.1.	Γενικά-----	10 -
1.2.	Ανάγκη διαχείρισης των αέριων εκπομπών από Χ.Δ.Α. -----	11 -
2.	Εκτίμηση συνολικών εκπομπών μεθανίου από χ.δ.α. στον ελλαδικό χώρο -----	16 -
2.1.	Απογραφή ομοειδών πηγών αέριας ρύπανσης (Χ.Δ.Α.) στον Ελλαδικό χώρο-----	16 -
2.2.	Εκτίμηση ετήσιων εθνικών εκπομπών μεθανίου από Χ.Δ.Α. στον Ελλαδικό χώρο -	18 -
3.	ΤΥΠΙΚΗ ποιοτική & ποσοτική συσταση βιοαερίου -----	20 -
3.1.	Γενικά-----	20 -
3.2.	Χαρακτηριστικά βιοαερίου -----	21 -
3.3.	Διεργασίες παραγωγής βιοαερίου-----	23 -
4.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας αναφορικά με τις συγκεντρώσεις συστατικών που βρίσκονται στο βιοαέριο -----	24 -
5.	Εκτίμηση εκπομπών συναρτήσει ισοζυγίου μάζας συστατικών του βιοαερίου στο Χ.Δ.Α. -----	31 -
5.1.	Μηχανισμοί ροής βιοαερίου στο εσωτερικό του Χ.Δ.Α. -----	31 -
5.2.	Ισοζύγιο μάζας βιοαερίου στο Χ.Δ.Α.-----	32 -
5.3.	Προφίλ ελεύθερης μονοδιάστατης ροής βιοαερίου σε κατακόρυφη στήλη που αποτελεί τμήμα Χ.Δ.Α.-----	35 -
6.	Εκτίμηση αέριων εκπομπών με χρήση Εμπειρικών μοντελών προσομοίωσης παραγωγής βιοαερίου και συντελεστών εκπομπής με Εφαρμογή στο Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” -	39 -
6.1.	Δυσκολία μαθηματικής προσομοίωσης της παραγωγής βιοαερίου-----	39 -
6.2.	Μαθηματικά μοντέλα ποσοτικοποίησης παραγωγής βιοαερίου -----	41 -
6.2.1.	Γενικά-----	41 -
6.2.2.	Περιγραφή μελετούμενου παλαιού Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” -----	41 -
6.2.3.	Εφαρμογή στοιχειομετρικού μοντέλου για τον υπολογισμό της συνολικής παραγωγής βιοαερίου κατά τη διάρκεια ενεργείας του κλειστού Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια” --	42 -
6.2.3.1.	Γενικά-----	42 -
6.2.3.2.	Εφαρμογή-Αποτελέσματα -----	43 -

6.2.4. Εφαρμογή εμπειρικού “τριγωνικού μοντέλου” εκτίμησης του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου στα “Α. Λιόσια” -----	46 -
6.2.4.1. Γενικά-----	46 -
6.2.4.2. Εφαρμογή-Αποτελέσματα -----	46 -
6.2.5. Εφαρμογή εμπειρικού μοντέλου της EPA για την εκτίμηση του τυπικού ετήσιου ρυθμού παραγωγής μεθανίου στο Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια” -----	50 -
6.2.5.1. Περιγραφή του μοντέλου-----	50 -
6.2.5.2. Εφαρμογή μοντέλου στην περίπτωση της χωματερής “Α.Λιόσια” -----	54 -
6.2.5.2.1. Αποτελέσματα-----	55 -
6.2.5.2.2. Αξιοπιστία αποτελέσματος του μοντέλου -----	59 -
6.3. Εκτίμηση εκπομπών από Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” -----	62 -
6.3.1. Γενικά-----	62 -
6.3.2. Προτεινόμενες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των τυπικών εκλυόμενων φορτίων συναρτήσει της παραγωγής βιοαερίου-----	63 -
6.3.2.1. Γενικά-----	63 -
6.3.2.2. Χρήση συντελεστών εκπομπής-----	64 -
6.3.2.3. Μοντέλο Thibodeux -----	65 -
6.3.2.4. Εξίσωσης συνέχειας στη διεπιφάνεια τελικής χωματοκάλυψης –ατμόσφαιρας -	66 -
6.3.3. Χρήση συντελεστών εκπομπής για την εκτίμηση ανεξέλεγκτων εκπομπών συστατικών βιοαερίου: NMVOCs, βενζολίου, βινυλοχλωριδίου & H ₂ S, στον παλαιό χώρο διάθεσης “Α.Λιόσια” εν έτει 2003 -----	68 -
6.3.3.1. Πιθανή ακρίβεια προβλεπόμενων εκπομπών – σύγκριση με μετρήσεις πεδίου -	69 -
7. Εκτίμηση Ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων αερίων ρύπων από το Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια” υπο δυσμενές σενάριο εκπομπών -----	70 -
7.1. Γενικά-----	70 -
7.2. Μετρήσεις ποιότητας αέρα στον παλαιό Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” το 1989-----	71 -
7.3. Εκτίμηση ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων αερίων ρύπων που εκλύονται από το Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” με εφαρμογή μοντέλου διασποράς εκπομπών εν έτει 2003-----	73 -
7.3.1. Περιγραφή μοντέλου -----	73 -
7.3.2. Δεδομένα εισαγωγής και παραδοχές-----	76 -
7.3.3. Αποτελέσματα υπολογισμών του μοντέλου -----	80 -
7.3.4. Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης από το Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” -----	83 -
7.3.4.1. Επιπτώσεις στην υγεία των εργαζομένων που βρίσκονται στο Χ.Δ.Α. -----	83 -
7.3.4.2. Επιπτώσεις στην υγεία των περίοικων – εκτίμηση αποδεκτής απόστασης μεταξύ συνόρων Χ.Δ.Α. και οικιστικής περιοχής-----	85 -
8. Συνοψη-Συμπεράσματα -----	89 -
9. ΑΝΑΦΟΡΕΣ-----	94 -

Παράρτημα Β	Αρχεία αποτελεσμάτων του CONCX
Παράρτημα Γ	Αρχείο πληροφοριών για τον παλαιό Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια” που εστάλη από τον Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.Γενικά

Υπάρχει όλο και περισσότερο ενδιαφέρον για τις εκπομπές αέριων ρύπων από χώρους διάθεσης απορριμμάτων (Χ.Δ.Α.) και τη συμβολή τους στην τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση. Οι εκπομπές από Χ.Δ.Α. μπορεί να μην είναι κυρίαρχες πηγές για τους περισσότερους συμβατικούς αέριους ρύπους, περιέχουν όμως σημαντικές ποσότητες μεθανίου, δύσοσμες ενώσεις καθώς επίσης και σημαντικούς βλαπτικούς και τοξικούς αέριους ρύπους με αποτέλεσμα να δημιουργούν τοπικό περιβαλλοντικό κίνδυνο με έντασή του όταν οι εκλύσεις αερίων από το Χ.Δ.Α. είναι ανεξέλεγκτες². Επιπλέον οι αέριες εκπομπές από χωματερές εκλύονται από χαμηλό ύψος (επιφάνεια του εδάφους) και πολλές φορές εντός κατοικημένων περιοχών με επιβαρυντικές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα και στην υγεία του γειτονικού πληθυσμού.

Η επιτόπια μέτρηση ('in situ') αέριων εκπομπών όσο καλά και αν γίνεται δεν μπορεί να ποσοτικοποιήσει την αέρια ρύπανση στο χώρο και στο χρόνο. Στην καλύτερη περίπτωση παρέχει μια ατελή αλλά χρήσιμη εικόνα της ποιότητας του περιβάλλοντος. Ειδικότερα η περίπτωση επιτόπιας μέτρησης και παρακολούθησης των εκπομπών αέριων ρύπων που εκλύονται από Χ.Δ.Α. προϋποθέτει κοστοβόρα τεχνική υποδομή λόγω της μεγάλης χωροχρονικής μεταβλητότητας των εκπομπών. Πράγματι κατά τη διάρκεια του χρόνου ενεργείας του χώρου διάθεσης απορριμμάτων (ελάχιστος 50 χρόνια) ο όγκος και η σύσταση των αποβλήτων μεταβάλλεται σημαντικά και σε συνδυασμό με τη χωρική ανομοιομορφία των εκπομπών, καθίσταται αναγκαία η λήψη ενός τεράστιου αριθμού δειγμάτων από πολλά σημεία του χώρου που να αντιπροσωπεύουν όλες τις χωρικές μεταβολές εκπομπών όπως και τις χρονικές μεταβολές ποσοτικής παραγωγής βιοαερίου. Σημειώνεται επίσης ότι οι εκπομπές αυτές μεταβάλλονται συνεχώς από μια σειρά παραγόντων όπως είναι μετεωρολογικοί παράμετροι, τρόπος λειτουργίας Χ.Δ.Α. κ.λπ. (αναλύονται στο κεφ.7.1), ενώ επεισόδια αυτανάφλεξης και καθίζησης της μάζας απορριμμάτων δυσκολεύουν την εργασία δειγματοληψίας στο Χ.Δ.Α. Έτσι σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι οι μετρήσεις πεδίου πρέπει να συμπληρώνονται με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης εκπομπών ώστε να επιτυγχάνεται έγκυρη πρόγνωση επιπέδων ρύπανσης και έκθεσης των περιοίκων καθώς και βελτιστοποίηση στρατηγικών ελέγχου των αέριων εκπομπών από Χ.Δ.Α.

² Απουσία συστήματος συλλογής και επεξεργασίας (φυσική -χωματοκάλυψη απορριμμάτων- και μηχανική) βιοαερίου στο Χ.Δ.Α.

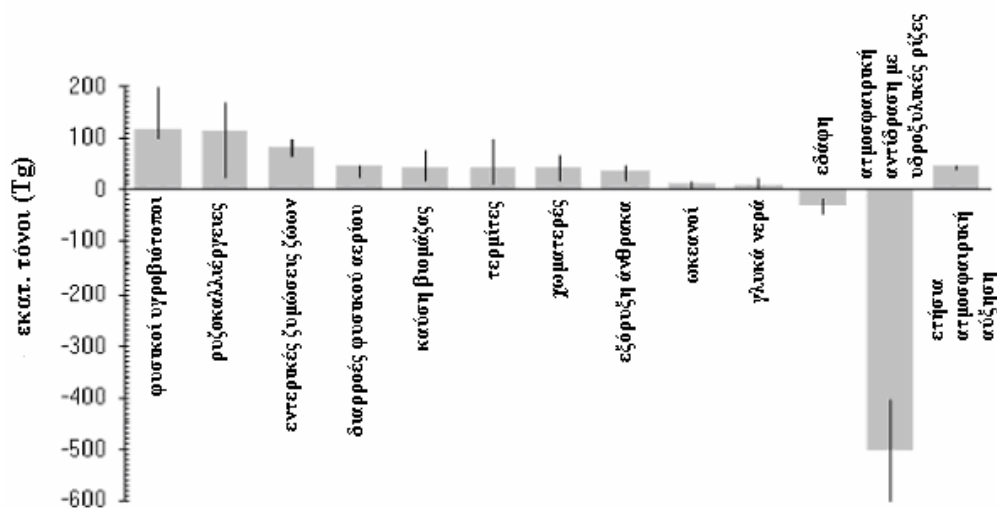
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιχειρείται η αποτίμηση της αέριας ρύπανσης που δημιουργεί η βιολογική δραστηριότητα οργανικών απορριμμάτων που βρίσκονται στο χώρο διάθεσης απορριμμάτων με τη βοήθεια κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων των οποίων η αξιοπιστία προβλέψεων συγκρίνεται με πραγματικά δεδομένα πεδίου. Περιοχή μελέτης αποτελεί ο Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” στον οποίο εφαρμόζονται μοντέλα προσομοίωσης ποσοτικής παραγωγής βιοαερίου (χρήση στοιχειομετρικού μοντέλου & δύο εμπειρικών μοντέλων) καθώς και μοντέλο διασποράς αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Οι μαθηματικές προσομοιώσεις -σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και χωρίς να απαιτείται πολυέξοδος εξοπλισμός-, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ιδιαιτερότητες του φαινομένου αποσύνθεσης της οργανικής μάζας, υπολογίζουν το ύψος των εκπομπών βιοαερίου από το Χ.Δ.Α. και δίνουν μία χρήσιμη εικόνα της ποιότητας της ατμόσφαιρας πάνω από γειτονικούς αποδέκτες.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία προγνωστικής εκτίμησης τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης από Χ.Δ.Α. που αναλύεται στην παρούσα εργασία, μπορεί να συμβάλει στην εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης ατμοσφαιρικής ρύπανσης από Χ.Δ.Α. στην περίπτωση που συνδυαστεί με εγκατάσταση τεχνικής υποδομής ή/και εφαρμογή νομικού καθεστώτος ή/και επιβολή μέτρων και άσκηση ελέγχου κ.λπ. Πράγματι ένα τέτοιο πρόγραμμα θα συνέβαλε στην αναβάθμιση της ποιότητας της ατμόσφαιρας του ευρύτερου αστικού περιβάλλοντος και στην προστασία της δημόσιας υγείας ενώ παράλληλα η αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου θα συνέδραμε σημαντικά στη λύση τοπικού ενεργειακού ελλείμματος όπως επίσης και στην επίλυση του προβλήματος κοινωνικής αποδοχής της θέσης διάθεσης αστικών απορριμμάτων. Πέρα όμως από τις επωφελείς άμεσες συνέπειες, η αξιοποίηση του βιοαερίου μπορεί να οδηγήσει σε μακροπρόθεσμες θετικές συνέπειες στο κλίμα, αφού η αξιοποίησή του θεωρείται αειφορική πρακτική που στόχο έχει την πρόληψη της εντατικοποίησης του φαινομένου του θερμοκηπίου με όλα τα συνεπακόλουθά του.

1.2.Ανάγκη διαχείρισης των αέριων εκπομπών από Χ.Δ.Α.

Τα αέρια μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, κύρια συστατικά του βιοαερίου, εισερχόμενα στην ατμόσφαιρα συνεισφέρουν σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (EPA 1999; Office of Air Quality Planning and Standards, EPA, AP-42, 1997). Σύμφωνα με το IPCC (2001), 1 gr μεθανίου έχει 21 φορές πιο μεγάλη κλιματική επίπτωση απ’ ό,τι 1 gr διοξειδίου του άνθρακα σε χρονική διάρκεια 100 χρόνων. Ερευνητικές μελέτες έδειξαν (IPCC, 1994) ότι οι εκπομπές μεθανίου από χώρους Δ.Α. αποτελούν το 33% των συνολικών

ανθρωπογενών εκπομπών μεθανίου στην Ε.Ε. Οι συνολικές εκπομπές μεθανίου από τη διάθεση απορριμμάτων στο χώρο της Ε.Ε. το 1994 ήταν 7,23 Tg (FCCC, 1994). Πιο πρόσφατες εκτιμήσεις των συνολικών εκπομπών CH₄ από Χ.Δ.Α. σε παγκόσμιο επίπεδο, οδήγησαν σε τιμές από 20 έως 70 Tg/yr (Bingemer and Crutzen, 1987; EPA, 1994), που είναι μεταξύ 5% έως 20% των συνολικών εκπομπών μεθανίου από ανθρωπογενείς πηγές σε παγκόσμια κλίμακα ίσες με 375 Tg/yr (IPCC, 1996).



Σχήμα 1: Εκτιμώμενες ετήσιες εκπομπές μεθανίου από ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές³ σε εκατ. τόνους σε παγκόσμια κλίμακα. Η μαύρη γραμμή δηλώνει το πεδίο αβεβαιότητας, (Milich, 1999; Aber, 1992).

Μετρήσεις πεδίου που έχουν πραγματοποιηθεί για τον υπολογισμό των συνολικών εκπομπών μεθανίου στο επίπεδο της επιφάνειας Χ.Δ.Α. έδωσαν ποικίλλες τιμές, από 390 (Lytwynyshyn et al. (1982) και Kunz και Lu (1979, 1980)), έως $1200 \frac{kg}{m^2 yr}$ (Fadel et al., 1997). Άλλες πάλι μετρήσεις έχουν δώσει ρυθμούς εκπομπής μεθανίου στην επιφάνεια της χωματοκάλυψης της χλωματελής από $0,0021$ έως $936 \frac{gr}{m^2 day}$ στους 18 °C, και από $0,132$ έως $1038 \frac{gr}{m^2 day}$ στους 48,8 °C. (C.Cardellini, et al., 2003). Παρατηρούμενοι ρυθμοί σε μεγάλο αριθμό χλωματερών κατά τη διάρκεια 1988-1994 κυμαίνονταν από 0,003 έως 1000

³ Ο κύριος φυσικός μηχανισμός απομάκρυνσης μεθανίου από την ατμόσφαιρα είναι η αντίδρασή του με τις υδροξυλικές ρίζες : $CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O$. Οι ρίζες CH₃ οξειδώνονται στη συνέχεια σε CO.

$\frac{gr}{m^2 day}$. Οι παρατηρούμενες διακυμάνσεις στους ρυθμούς σχετίζονται με την παρουσία/

απουσία φρεατίων συλλογής και αξιοποίησης βιοαερίου καθώς και τις φυσικές ιδιότητες χωματοκάλυψης (θερμοκρασία, υγρασία, περατότητα) (Bogner et al., 1995).

Ένας άλλος λόγος που θέτει αναγκαία τη διαχείριση του παραγόμενου βιοαερίου στις χωματερές, είναι τα NMOCs που παρόλη τη μικρή τους συγκέντρωση στο βιοαέριο, εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα προκαλώντας (Fadel et al., 1997; EPA, 1989-2001):

- Κίνδυνο στη δημόσια υγεία του γενικού πληθυσμού εξαιτίας των επιβλαβών και τοξικών αερίων που περιέχουν.
- Δυσάρεστες οσμές σε περιοχές που γειτνιάζουν με τη χωματερή.
- Ατμοσφαιρικά προβλήματα, όπως φωτοχημικό νέφος και σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος εξαιτίας της φωτοχημικής δραστηριότητας των VOCs.
- Συμβολή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Πράγματι οι εκλυόμενοι υδρογονάνθρακες VOCs που βρίσκονται στο βιοαέριο, και αντιπροσωπεύουν υποσύνολο των NMOCs με συγκέντρωση μικρότερη από 1% κατ'όγκο στο βιοαέριο, ενοχοποιούνται για το σχηματισμό του φωτοχημικού οξειδωτικού ρύπου όζον όπως δείχνεται στη συνολική αντίδραση: $RO_2 + O_2 + h\nu \rightarrow RO + O_3$ και θεωρούνται πρόδρομα των aerosol στα αστικά περιβάλλοντα., καθώς επίσης περιλαμβάνουν δύσοσμες και/ή τοξικές αρωματικές ενώσεις με αποτέλεσμα να σχετίζονται με προβλήματα υγείας και οσμών (EPA, 2001). Οι πιθανές εκπομπές οργανικών πτητικών συστατικών (VOCs) από Χ.Δ.Α. ποικίλλουν από 4×10^{-4} έως $1 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{day}$ (EPA, 1989).

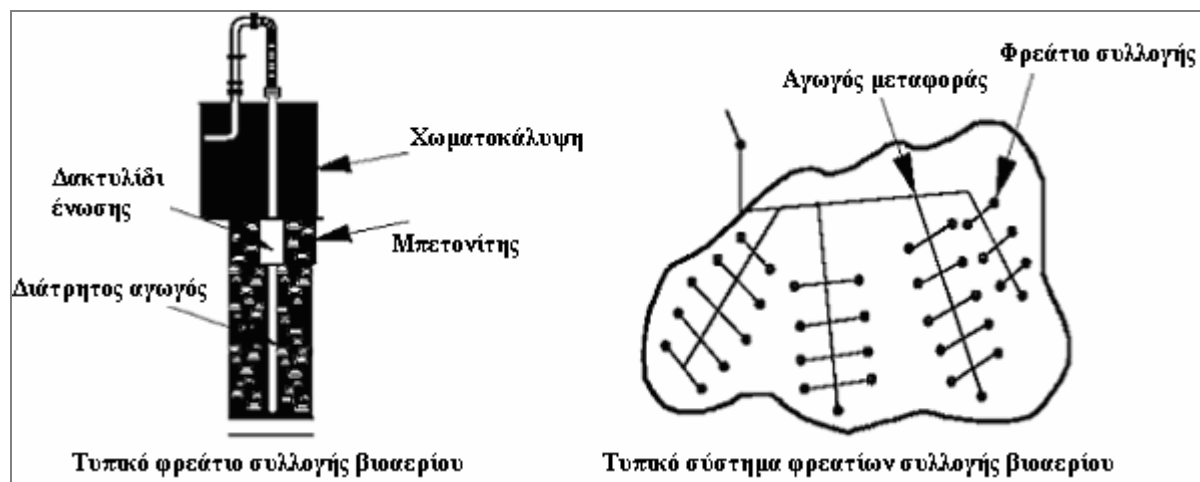
Χαρακτηριστικό του βιοαερίου που επιβάλλει τη διαχείρισή του για λόγους ασφάλειας είναι το γεγονός ότι το βιοαέριο είναι εύφλεκτο⁴ και σε συγκεντρώσεις μείγματος με αέρα ίσες με 5-15% κατ'όγκο αέρα, σχηματίζει εκρηκτικό μείγμα (η συγκέντρωση του παραγόμενου μεθανίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 25% του κατώτατου ορίου έκρηξης (lower explosive limit, LEL) μέσα στη χωματερή). Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη τις περισσότερες φορές η διαχείριση του παραγόμενου βιοαερίου είτε με φυσικά εμπόδια ελέγχου⁵ και σύστημα

⁴ Η θερμοκρασία αναφλέξεως για το μεθάνιο που περιέχεται στο βιοαέριο της χωματερής είναι 600°C.

⁵ Τα φυσικά εμπόδια είναι υλικά με πολύ μικρή περατότητα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των αερίων, τέτοια εμπόδια είναι πλαστικές μεμβράνες, μπετονίτης ή άργιλος, ενισχυμένο χώμα.

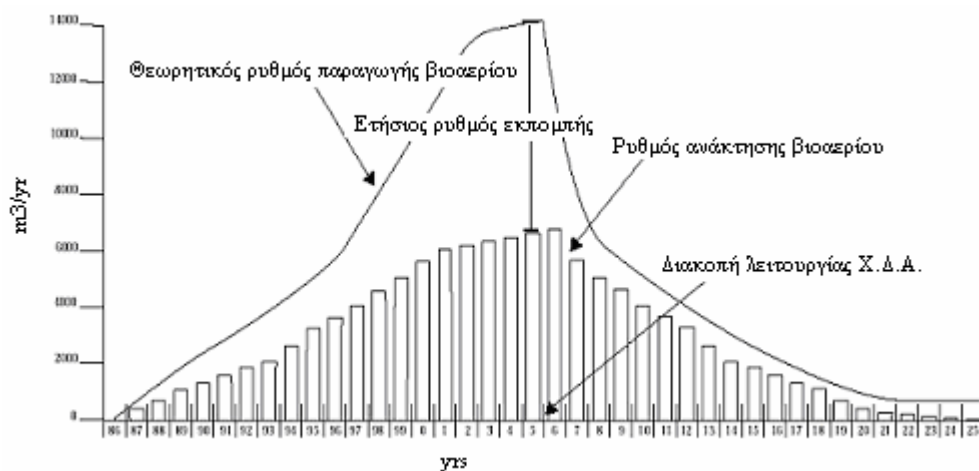
εκτόνωσης αερίου, είτε με ενεργό/μηχανικό σύστημα ελέγχου βιοαερίου αν η παραγόμενη ποσότητα του βιοαερίου είναι πλούσια σε μεθάνιο (πολύτιμη ενεργειακή πηγή). Στην περίπτωση έκρηξης/πυρκαγιάς (ανεξέλεγκτη παραγωγή βιοαερίου) το παραγόμενο βιοαέριο ως καύσιμη ύλη βοηθά στην διατήρηση της καύσης των απορριμμάτων με αποτέλεσμα να εκλύονται στην ατμόσφαιρα τοξικά αέρια όπως διοξίνες, φουράνες, και πολυκυκλικοί χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες (PCBs).

Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ένα τυπικό σύστημα συλλογής βιοαερίου σε Χ.Δ.Α.



Σχήμα 2: Τυπικό σύστημα συλλογής βιοαερίου σε Χ.Δ.Α. (EPA, 2000).

Στο σχήμα 3 δείχνεται ότι το μηχανικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας με απόδοση συλλογής βιοαερίου 50% μπορεί να μειώσει τις εκπομπές σε ποσοστό ίσο ή μικρότερο από 50% (αν θεωρήσουμε ότι τα πρηνή και ο πυθμένας της λεκάνης του χώρου εναπόθεσης είναι απόλυτα μονωμένα). Στο σχήμα 3 φαίνεται επίσης ότι η παραγωγή βιοαερίου θεωρείται σταθερή κατ' έτος ενεργείας του χώρου εναπόθεσης. Στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει εξαιτίας της συνεχής διεργασίας αποδόμησης των βιοαπορριμμάτων καθώς και της συνεχόμενης απόρριψης απορριμμάτων στη χωματερή.



Σχήμα 3: Τυπική καμπύλη παραγωγής βιοαερίου υποθετικού Χ.Δ.Α. με έναρξη λειτουργίας το 1986, (Fernandez et al., 1995).

Τέλος το σχηματιζόμενο βιοαέριο στους Χ.Δ.Α. δημιουργεί προβλήματα δυσάρεστων οσμών. Οι οσμές μπορεί να γίνουν φοβερά ενοχλητικές για τους περίοικους, όταν η απαιτούμενη αραίωση δεν επιτυγχάνεται λόγω των καιρικών συνθηκών. Αν και πολλά οσμηρά συστατικά του βιοαερίου μπορεί να είναι τοξικά, παρουσιάζονται περισσότερο ως δύσοσμα παρά ως βλαπτικά στην υγεία. Το πρόβλημα λοιπόν δυσάρεστων οσμών στο βιοαέριο οφείλεται σε ίχνη συγκεντρώσεων χημικών ενώσεων όπως εστέρες, υδρόθειο, οργανικές θειόλες ή μερκαπτάνες, αλκυλοβενζόλια, λεμονίνη και άλλους υδρογονάνθρακες, με συγκέντρωση μικρότερη από 1% της συνολικής συγκέντρωσης του βιοαερίου (Fadel et al., 1997). Πρέπει να σημειωθεί ότι αυξημένες συγκεντρώσεις οσμηρών συστατικών στο βιοαέριο συνδέονται με υψηλές συγκεντρώσεις μεθανίου και αντίστροφα. Young et.al., 1983 αποδέχτηκαν την μελέτη των Brinkman et al, 1982 και συμπέραναν ότι για μερικά αέρια της χωματερής απαιτείται αραίωση 10^6 φορές προκειμένου οι συγκεντρώσεις τους στον αέρα να είναι κάτω από το όριο ανίχνευσης. Σημειώνεται ότι η συνεργία μεμονωμένων οσμηρών ενώσεων που βρίσκονται σε συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα κάτω από το όριο ανίχνευσης, μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα οσμών (Tagaris et al., 2002).

Η Αμερικανική Υπηρεσία Περιβάλλοντος (EPA, 1995) θεώρησε τις «εκπομπές από Χ.Δ.Α.» ως σημαντικό αέριο ρύπο, με αποτέλεσμα τη θεσμοθέτηση σχεδίου νόμου το 1996 με δύο άρθρα για τα ανώτατα όρια έκλυσης VOCs από Χ.Δ.Α., NSPS (the Standards of Performance for New Municipal Solid Waste Landfills) για τους νέους, και EG (Emission Guidelines) για τους υφιστάμενους χώρους, με άμεσο στόχο τον έλεγχο της φωτοχημικής ρύπανσης. Όρια

ποιότητας για το μεθάνιο (CH_4), τους βλαπτικούς αέριους ρύπους (HAPs) και τις δύσσομες αέριες ενώσεις δε φαίνεται να λήφθηκαν στα σχέδια νόμων NSPS και Emission Guidelines (1996), έμμεσα όμως νομοθετήθηκαν όρια ποιότητας για τους εν λόγω ρύπους με την απαίτηση λειτουργίας και χρήσης της καλύτερης δυνατής τεχνολογίας μείωσης των εκπομπών (Best Demonstrated Technology, BDT (EPA, 1997)) με συλλογή, επεξεργασία βιοαερίου καθώς και συστήματος ελέγχου εκπομπών για Χ.Δ.Α. που εκλύουν περισσότερο από 55 ton/yr (ή 50 Mg/yr) NMOCs. Έτσι στην περίπτωση χώρων Δ.Α. με χωρητικότητα σχεδιασμού ίση ή μεγαλύτερη των 2,5 εκατ. Mg ή 2,5 εκατ m^3 , απαιτείται η κατασκευή και λειτουργία συστήματος συλλογής, ανάκτησης ενέργειας ή καύση του βιοαερίου. Αν μετά την εγκατάσταση του μηχανικού συστήματος συλλογής εκλύονται αέριες εκπομπές NMOCs ίσες ή μεγαλύτερες των 55 ton/yr, απαιτείται ο έλεγχος των εκπομπών.

Η EPA ελέγχει την τήρηση των θεσμοθετημένων ορίων αέριων εκπομπών από χώρους διάθεσης απορριμμάτων με εμπειρική μέθοδο προσεγγιστικής εκτίμησης των δυναμικών εκπομπών (μοντέλο LandGEM). Η εγκατάσταση μηχανικού εξοπλισμού για τη συλλογή και επεξεργασία βιοαερίου προσθέτει σημαντικό κόστος στη λειτουργία των χωματερών, γι' αυτό και πολλές φορές παρατηρούνται δυσκολίες/αντιδράσεις συμμόρφωσης με την οδηγία. Σημειώνεται ότι η αυστηρή εφαρμογή της νομοθεσίας της EPA έχει αναγκάσει πολλούς ιδιοκτήτες/διαχειριστές χωματερών να διακόψουν τη λειτουργία των χώρων διάθεσης με αποτέλεσμα ο αριθμός των εν λειτουργία χώρων διάθεσης στις ΗΠΑ μετά το 1997 να έχει περιοριστεί σημαντικά.

2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΜΕΘΑΝΙΟΥ ΑΠΟ Χ.Δ.Α. ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

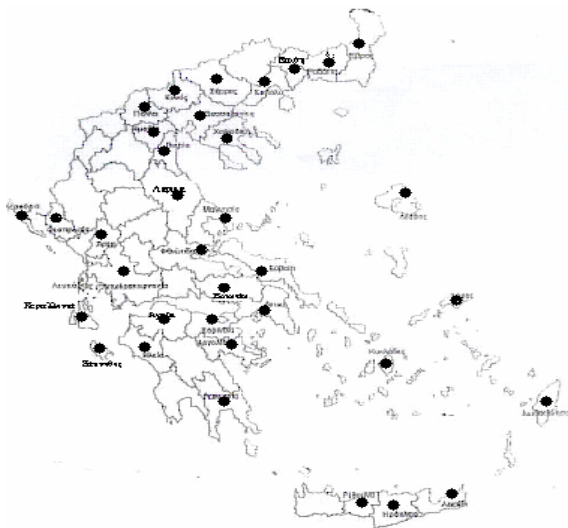
2.1. Απογραφή ομοειδών πηγών αέριας ρύπανσης (Χ.Δ.Α.) στον Ελλαδικό χώρο

Η απογραφή των παραγόμενων αέριων ρυπαντικών φορτίων από Χ.Δ.Α. στο σύνολο της χώρας είναι στοιχείο χρήσιμο για μια ολοκληρωμένη αποτύπωση της παραγόμενης αέριας ρύπανσης από Χ.Δ.Α. καθώς και για το σχεδιασμό και την εφαρμογή μιας πολιτικής μείωσης των αέριων εκπομπών και διαχείρισης ατμοσφαιρικής ρύπανσης που παράγεται απ' αυτές.

Στην Ελλάδα περίπου το 91% των συνολικά παραγόμενων απορριμμάτων διατίθενται σε περίπου 3.533 Χ.Δ.Α. ("Εθνικός σχεδιασμός διαχείρισης στερεών αποβλήτων, Ιούλιος

2002”). Η χαώδης κατάσταση που επικρατεί στο θέμα διάθεσης των απορριμμάτων με αριθμό ανεξέλεγκτων χώρων 3.500 και αριθμό οργανωμένων χώρων 33, εμποδίζει την έρευνα/μελέτη ποσοτικοποίησης των αέριων εκπομπών και καθορισμού επίδρασης των χώρων Δ.Α. στην ποιότητα της ατμόσφαιρας γειτονικών περιοχών. Οι Χ.Δ.Α. στον Ελλαδικό χώρο εκτιμάται ότι το έτος 2000 αποδέχονταν 4,5 έως 5 εκατομμύρια τόνους οικιακά απόβλητα (περιλαμβάνουν απόβλητα που περιέχονται από κατοικίες και από εμπορικά καταστήματα), εκ’ των οποίων τα μισά είναι οργανική μάζα. Η συνολική ποσότητα των ειδικά επικίνδυνων αποβλήτων (φάρμακα, υλικά καθαρισμού, χρώματα, βερνίκια, διαλυτικά, μπαταρίες και φυτοφάρμακα) που περιέχονται στα απορριπτόμενα οικιακά εκτιμάται 4.525 τόνους περίπου (0,12% επί των συνολικά παραγόμενων οικιακών αποβλήτων), (ΦΕΚ 723Β, 2000). Εκτός από τα οικιακά απορρίμματα, υπολογίζεται ότι παράγονται ετησίως 450.000 τόνοι επικίνδυνων βιομηχανικών αποβλήτων και 15.000 τόνοι μολυσματικών νοσοκομειακών αποβλήτων τα οποία πιθανώς οδηγούνται σε Χ.Δ.Α.

Η προσεγγιστική εκτίμηση της χωρικής κατανομής των εν λειτουργία Χ.Δ.Α. στον Ελλαδικό χώρο εν έτει 2002 (εικόνα 1) έγινε με τη βοήθεια του ΦΕΚ 723Β, 2000 και του εθνικού σχεδιασμού διαχείρισης στερεών αποβλήτων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, Ιούλιος 2002).



Εικόνα 1: Χαρτογράφηση των εν λειτουργία Χ.Δ.Α. στον Ελλαδικό χώρο

Οι δυναμικότητες των σημειούμενων Χ.Δ.Α. αναφέρονται αναλυτικά στο ΦΕΚ 723 Β, 2000.

2.2.Εκτίμηση ετήσιων εθνικών εκπομπών μεθανίου από Χ.Δ.Α. στον Ελλαδικό χώρο

Η εκτίμηση των ετήσιων εθνικών εκπομπών μεθανίου από υφιστάμενους Χ.Δ.Α. μπορεί να γίνει με την προτεινόμενη εξίσωση της IPCC, 1996. Η μέθοδος της IPCC έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί από αρκετές χώρες για την εκτίμηση των εθνικών εκπομπών μεθανίου από χώρους διάθεσης στερεών αποβλήτων (Irving et al., 1999).

Εξίσωση:

Εκπομπές μεθανίου (Gg/yr) = $(MSWT \times MSWF \times MCF \times DOC \times DOCF \times F \times (16 \text{ Gg CH}_4/12 \text{ Gg CO}_2) - R) \times (1-OX)$
--

όπου,

MSWT = συνολική ετήσια παραγόμενη ποσότητα MSW (Gg yr^{-1}),

MSWF = κλάσμα συνολικά παραγόμενων MSW που οδηγείται σε Χ.Δ.Α.,

MCF = συντελεστής διόρθωσης μεθανίου, (methane correction factor),

DOC = βιοαποδομήσιμο κλάσμα οργανικού άνθρακα ($\text{kg βιοδιασπώμενου C / kg C}$),
(degradable organic carbon (fraction)),

DOCF = κλάσμα βιοαεριοποιήσιμου οργανικού άνθρακα,

F = κλάσμα CH_4 στο βιοαέριο (προτεινόμενη τιμή: 0,5),

Συντελεστής μετατροπής= $(16 \text{ Gg CH}_4/12 \text{ Gg CO}_2)$,

R = ανακτούμενο CH_4 (Gg/yr),

OX = συντελεστής οξείδωσης⁶.

Ο συντελεστής διόρθωσης μεθανίου MCF προσδιορίζεται με βάση τον πίνακα 1.

⁶ Το μεθάνιο μπορεί να οξειδωθεί στην επιφανειακή χωματοκάλυψη των απορριμμάτων. Η ποσότητα του μεθανίου που οξειδώνεται είναι αβέβαιη, εξαρτώμενη από πολλούς παράγοντες (θερμοκρασία επιφανειακού χώματος, χαρακτηριστικά χώματος κλπ.). Η έρευνα πάνω στο θέμα ποσοτικοποίησης του οξειδούμενου μεθανίου στις χωματερές είναι περιορισμένη (Kjeldsen, Dalager and Broholm, 1997, Bogner, Spokas and Burton, 1997, Liptay, et al. 1997, and Bogner, Meadows, and Czepiel, 1997). Η EPA, 1998 θεωρεί ότι κατά τη μεταφορά του μεθανίου στην επιφάνεια της χωματελής, οξειδώνεται το 10% του παραγόμενου μεθανίου (EIPR, EPA, 1998 Vol.VIII 5.4-9).

Πίνακας 1: Κατάταξη Χ.Δ.Α. και συντελεστής διόρθωσης μεθανίου MCF (IPCC Guidelines, 1996).

Κατάταξη Χ.Δ.Α. και συντελεστής διόρθωσης μεθανίου	
Τύπος Χ.Δ.Α.	Τιμές MCF
Διαχείριση εκπομπών	1
Ανυπαρξία συστήματος διαχείρισης εκπομπών- βάθος $\geq 5\text{m}$ απορριμμάτων	0,8
Ανυπαρξία συστήματος διαχείρισης εκπομπών- βάθος $\leq 5\text{m}$ απορριμμάτων	0,4
Default τιμή – μη κατηγοριοποιήσιμος χώρος	0,6

Η εκτίμηση του κλάσματος του βιοαεριοποιήσιμου οργανικού άνθρακα DOCF, γίνεται με τη βοήθεια θεωρητικού μοντέλου που εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία στην αναερόβια ζώνη της χωματερής $\text{DOCF}=0,014T+0,28$ όπου, T = θερμοκρασία $^{\circ}\text{C}$, (Tabasaran, 1981). Με την παραδοχή ότι η θερμοκρασία στην αναερόβια ζώνη του Χ.Δ.Α. παραμένει σταθερή με μέση τιμή περίπου ίση με 35°C , ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, (Bingemer and Crutzen, 1987), η μέθοδος δίνει τιμή $\text{DOCF} = 0,77$ (IPCC,1996).

Η μεθοδολογία της IPCC βασίζεται στην υπόθεση ότι όλο το παραγόμενο μεθάνιο ελευθερώνεται το έτος διάθεσης των αποβλήτων καθώς επίσης θεωρεί σταθερή ποσότητα διάθεσης στερεών αποβλήτων ανά έτος. Η μεθοδολογία της IPCC δίνει υπερεκτιμημένες τιμές ετήσιας παραγωγής μεθανίου για το λόγο ότι θεωρεί σταθερή την ποσότητα των αποβλήτων που διατίθενται στη χωματερή κατά τη διάρκεια του χρόνου. Για καλύτερη προσέγγιση των ετήσιων εκπομπών μεθανίου, η εκτιμώμενη τιμή που προκύπτει με τη μεθοδολογία της IPCC μπορεί να πολλαπλασιαστεί με ένα συντελεστή διόρθωσης $(\text{CF}=\frac{1}{T \cdot \ln(1+R)} \cdot \left[1-\frac{1}{(1+R)^T}\right])$, όπου R : μέση ετήσια αύξηση των απορριμμάτων προς διάθεση και T : μέση διάρκεια παραγωγής μεθανίου (προτείνεται 30 χρόνια))

χρησιμοποιώντας μεταβλητές ποσότητες στερεών αποβλήτων κατά τη διάρκεια της ετήσιας διάθεσης απορριμμάτων (Irving W.,1999).

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της διορθωμένης εξίσωσης της IPCC στην περίπτωση της Ελλάδας είναι:

$$\text{MSWT} = 5000 \text{ Gg /yr}$$

$$\text{MSWF} = 0,92 \text{ , (ΦΕΚ Β 723, 2000)}$$

$$\text{MCF} = 0,6$$

$$\text{DOC} = 0,5$$

$$\text{DOCF} = 0,77$$

$$\text{F} = 0,5$$

$$\text{R} = 0$$

$$\text{OX} = 0,1$$

$$\text{CF} = 0,86 \text{ , (όπου μέση ετήσια αύξηση διατιθέμενων απορριμμάτων R=1% \& T=30 χρόνια).}$$

Με αντικατάσταση των παραπάνω τιμών στη διορθωμένη εξίσωση της IPCC (1996), οι εκπομπές μεθανίου από τους υφιστάμενους χώρους διάθεσης απορριμμάτων της Ελλάδας εκτιμώνται ίσες με:

$$(5.000 \times 0,92 \times 0,6 \times 0,5 \times 0,77 \times 0,5 \times 16/12) \cdot (1-0,1) \cdot 0,86 = 548 \text{ Gg / yr.}$$

Η εκτίμηση δείχνει ότι οι εκπομπές μεθανίου από τους ελληνικούς Χ.Δ.Α. (548 Gg/yr) αποτελούν το 7,6 % των ολικών εκπομπών μεθανίου από Χ.Δ.Α. που εκλύουν συνολικά οι χώρες της Ε.Ε. (7,23 Tg/yr).

3. ΤΥΠΙΚΗ ΠΟΙΟΤΙΚΗ & ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ

3.1.Γενικά

Οι αέριες εκπομπές από χωματερές, περιλαμβάνουν το βιοαέριο, τα πτητικά συστατικά στερεών αποβλήτων και τα πτητικά συστατικά διασταλάζοντων υγρών. Άλλες εκπομπές από τις χωματερές περιλαμβάνουν προϊόντα καύσης όπως CO, NO_x, SO_x, HCl, HAPs, κλπ. που προκύπτουν από τις μηχανές εσωτερικής καύσης καθώς και άλλες συσκευές ελέγχου του

βιοαερίου. Αιωρούμενα σωματίδια παράγονται από τους πλακόστρωτους και άστρωτους δρόμους εντός του Χ.Δ.Α. καθώς και από τις εκχωματώσεις που πραγματοποιούνται στο χώρο ταφής. Στην παρούσα εργασία περιοριζόμαστε στις εκπομπές βιοαερίου που σχηματίζονται κατά τη διάρκεια ενεργείας του Χ.Δ.Α.

3.2.Χαρακτηριστικά βιοαερίου

Το βιοαέριο ορίζεται ως το μείγμα των αερίων που παράγονται σε μια χωματερή και αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), τα οποία στην αναερόβια φάση παραγωγής μαζί αντιστοιχούν σε συγκέντρωση μεγαλύτερη από 90% κατ'όγκο παραγόμενο βιοαέριο (Fadel et al., 1997). Πέρα όμως από τα αέρια του θερμοκηπίου CH_4 και CO_2 , στο βιοαέριο περιέχονται σε μικρές ποσότητες και άλλα αέρια (ιχνοενώσεις). Το ποσοστό και η παρουσία των ιχνοενώσεων στο βιοαέριο εξαρτάται άμεσα από το είδος των προς διάθεση αποβλήτων, τις συνθήκες ταφής, την ηλικία των απορριμμάτων, κλιματολογικούς παράγοντες καθώς και άλλες μεταβλητές. Σύμφωνα με την EPA (2001) στο βιοαέριο περιέχονται σε μικρό ποσοστό έως 2% οργανικά μη μεθανικά συστατικά (NMOCs), που περιλαμβάνουν ποικίλους βλαπτικούς και οσμηρούς οργανικούς αέριους ρύπους όπως HAPs και οργανικά πτητικά συστατικά οργανικών απορριμμάτων (VOCs).

Η τυπική σύνθεση του βιοαερίου στη φάση μεθανογένεσης⁷ δίνεται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2: Τυπική σύνθεση του παραγόμενου βιοαερίου σε δημοτικά στερεά απόβλητα στη μεθανογενή φάση (SWANA, 2000).

Συστατικά	Όγκος (% ξηρό βάρος, εξαιρείται η περιεχόμενη υγρασία)
Μεθάνιο (CH_4)	45% έως 58%
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	32% έως 45%
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	0% έως 0,2%
Άζωτο (N_2)	0% έως 3%
Υδρογόνο (H_2)	ίχνη έως > 1%
Υδρόθειο (H_2S) και άλλες ενώσεις του θείου	ποικίλλει (10-200 ppm)
Υγρασία	έως 14% (αυξανόμενη με τη θερμοκρασία αέρα)
Οργανικά μη μεθανικά συστατικά (NMOCs)	0% έως 0,25%
Οργανικά πτητικά συστατικά (VOC) ⁸	0% έως 0,1%

⁷ Στις χωματερές επικρατούν κυρίως αναερόβια μεθανογενετικά περιβάλλοντα.

⁸ Τα VOCs αποτελούν το 39% των NMOCs στο MSWLF (EPA, AP-42).

Πίνακας 3: Ιχνοενώσεις στο βιοαέριο (Findikakis et al., 1995).

Κατηγορίες ιχνοενώσεων	Πεδίο συγκεντρώσεων στο βιοαέριο (mg/m ³)
Αλκοόλες	2-2500
Οργανικές θειόλες	3-240
Αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες	1-2900
Αρωματικοί υδρογονάνθρακες (βενζόλιο, τουλουόλη, ξυλόλη, στυρένιο κ.λπ)	30-1900
Αλδεΐδες	0-200
Κετόνες	0-50
Υδρογονάνθρακες:	
Αλκάνια	20-4500
Αλκένια	6-1100
Κυκλοαλκάνια	1-1000
Κυκλοαλκένια (π.χ. λεμονίνη)	8-600
Εστέρες	0-1300
Αιθέρες	0-250

Τα δεκαέξι χημικά συστατικά που περιέχονται στο βιοαέριο και διακρίνονται για το υψηλό δυναμικό τοξικότητάς τους, αναφέρονται κατά σειρά μείωσης δυναμικού τοξικότητας στον πίνακα 4.

Πίνακας 4: Ταξινόμηση συστατικών βιοαερίου βάσει βαθμού τοξικότητας (Environment agency, 2002).

benzene	Chloroethane	chloroethene	2-butoxy ethanol
arsenic	Mercury	Methanal	1,3-butadiene
1,1-dichloroethane	1,1-dichloroethene	Tetrachloromethane	Trichloroethene
tetrachlorodibenzodioxin	Furan	1,2-dichloroethene	carbon disulphide
hydrogen sulphide	Chloromethane		

Τα δώδεκα ιχνοστοιχεία που περιέχονται στο βιοαέριο και διακρίνονται για το υψηλό δυναμικό οσμηρότητάς τους, αναφέρονται κατά σειρά μείωσης δυναμικού οσμηρότητας στον πίνακα 5.

Πίνακας 5: Ταξινόμηση συστατικών βιοαερίου βάσει βαθμού οσμηρότητας (Environment agency, 2002).

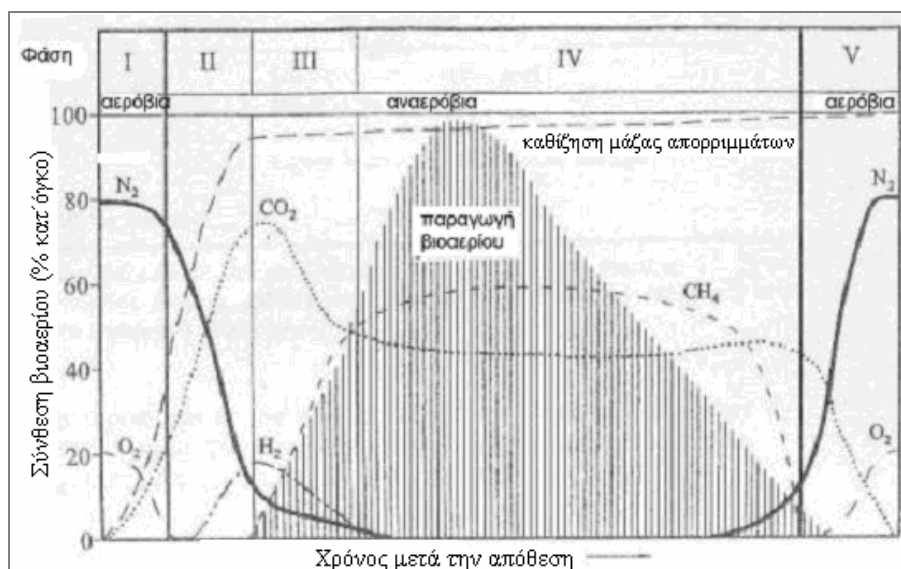
hydrogen sulphide	Methanethiol	butyric acid	ethanal
carbon disulphide	ethyl butyrate	1-propanethiol	dimethyl disulphide
ethanethiol	1-pentene	dimethyl sulphide	1-butanethiol

3.3.Διεργασίες παραγωγής βιοαερίου

Η παραγωγή βιοαερίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο που πραγματοποιείται σε όλους τους Χ.Δ.Α. κατά τη βιολογική διεργασία αποδόμησης του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων. Οι βιολογικές διεργασίες που περιλαμβάνουν την βιοαεροποίηση της οργανικής μάζας είναι αποτέλεσμα δημιουργίας και δυναμικής εξέλιξης ενός κυρίως αναερόβιου μεθανογενετικού μικροβιακού οικοσυστήματος που πραγματοποιείται μέσα στην υδατική φάση (υγρασία, εκχυλίσματα) των απορριμμάτων. Το οικοσύστημα αυτό αποτελείται από μεγάλο αριθμό διαφορετικών μικροοργανισμών που παράγουν κυρίως μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Η φάση μεθανογένεσης αποτελεί την κύρια χρονικά αναερόβια φάση της βιολογικής διεργασίας αποδόμησης στους Χ.Δ.Α. στην οποία σχηματίζεται η μεγαλύτερη ποσότητα του βιοαερίου. Στη διάρκεια της φάσης αυτής το βιοαέριο σταθεροποιείται ως προς τη σύσταση στο χώρο ταφής -υπολογίζεται ότι απαιτείται χρόνος από 80-500 ημέρες για να επιτευχθούν σταθερές συνθήκες- με κυρίως αέρια το μεθάνιο (CH_4), σε ποσοστό από 55-65% και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) σε ποσοστό από 35-45%. Η μεθανογενής φάση μπορεί να διαρκέσει από 10 έως 20 χρόνια. Οι 5 χρονικές φάσεις βιοαποδόμησης του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων Χ.Δ.Α. είναι (Σκορδίλης, 1993):

1. Φάση αερόβιας βιοαποδόμησης (μικρή χρονική διάρκεια, παρατηρείται τις πρώτες εβδομάδες μετά την ταφή των απορριμμάτων).
2. Φάση υδρόλυσης (έναρξη αναερόβιας βιοαποδόμησης με μετατροπή των πολυμερών- πρωτεΐνες, λιπίδια, πολυσακχαρίτες κ.λπ.- σε μόρια χαμηλότερου Μ.Β.- οξέα, αμινοξέα κλπ.- με χρονική διάρκεια μερικών μηνών μετά την ταφή απορριμμάτων).
3. Όξινη φάση.
4. Φάση μεθανογένεσης (σταθερή σύσταση του βιοαερίου σε μεθάνιο και διοξείδιο άνθρακα, από τη μέχρι σήμερα εμπειρία η μεθανογένεση βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη μετά από 2 χρόνια από την εναπόθεση και διαρκεί περίπου 20 χρόνια).
5. Φάση ωρίμανσης ή οξείδωσης (τελευταίο στάδιο ζωής της χωματερής με μειωμένη παραγωγή βιοαερίου).



Σχήμα 4: Καμπύλη παραγωγής βιοαερίου, (Williams, 1998).

Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά τη λειτουργία του χώρου διάθεσης συνυπάρχουν όλες οι παραπάνω φάσεις βιοαποδόμησης, ως αποτέλεσμα της συνεχούς απόθεσης απορριμμάτων. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι στο μεταβατικό στάδιο, κατά το οποίο η δράση στο χώρο από αερόβια γίνεται αναερόβια, υπάρχει αυξημένη παρουσία υδρογονοπαραγωγών, ενώ στη φάση μεθανογένεσης το υδρογόνο περιορίζεται σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις.

Το κλείσιμο του Χ.Δ.Α. δε συνοδεύεται με αδρανοποίηση των μικροβιολογικών διεργασιών στον χώρο ταφής. Η αδρανοποίηση παρατηρείται τουλάχιστον 20-30 χρόνια μετά το κλείσιμο του χώρου ταφής, με το χώρο να έχει υποστεί το 90% της τελικής καθίζησης⁹ (η καθίζηση ποικίλλει από μερικά εκατοστά σε αρκετά μέτρα) τα πρώτα πέντε χρόνια μετά το κλείσιμό του. Αυτό σημαίνει ότι το παραγόμενο βιοαέριο της χωματερής πρέπει να παρουσιάζει μέγιστη τιμή ανάμεσα στα πέντε χρόνια μετά το κλείσιμό του χώρου (Μανιός, 2001).

4. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΟΥ ΒΡΙΣΚΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΒΙΟΑΕΡΙΟ

Στο βιοαέριο της χωματερής έχουν ανιχνευθεί 120 έως 150 συστατικά και πρόσφατα αναπτύχθηκε βάση με 557 ιχνοενώσεις όπου ανιχνεύθηκαν ότι περιέχονται στο βιοαέριο πολυάριθμων χωματερών (Environment Agency, 2002).

⁹ Η καθίζηση της χωματερής πραγματοποιείται εξαιτίας της βιοαποδόμησης του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων.

Από τα δημοσιευμένα στοιχεία και πληροφορίες για την ποιοτική και ποσοτική σύνθεση του βιοαερίου που σχηματίζεται στους Χ.Δ.Α., ξεχωρίζουν για την πληρότητά τους εκείνα της Αμερικανικής Υπηρεσίας Απορριμμάτων (Solid Waste Association of North America, SWANA) καθώς και της EPA όπως φαίνεται στους πίνακες 6, 7, 8, 9 που συνοψίζουν τη διακύμανση και μέση συγκέντρωση των NMOCs που βρέθηκαν να περιέχονται σε ποικίλα δείγματα βιοαερίου από Χ.Δ.Α. παγκόσμια κλίμακα.

Πίνακας 6: Σύνοψη των διακυμάνσεων και μέσων συγκεντρώσεων των NMOCs σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων βιοαερίου από πολυάριθμους Χ.Δ.Α. σε παγκόσμια κλίμακα (EPA-SWANA, 2000).

Χημική ονομασία	VOC	Ελάχιστη συγκέντρωση (ppm)	Μέση συγκέντρωση (ppm)	Μέγιστη συγκέντρωση (ppm)	Αριθμός δειγμάτων που ποσοτικοποιήθηκαν
Carbon tetrachloride	*	<DL	1,85	68,3	37
Methyl ethyl sulfide		<DL	0,32	0,32	1
1,1,2-Trichloroethane	*	0	0	0,1	28
Dimethyl Disulfide	*	0,1	0,55	1	2
1-Butanol		100	100	100	1
Butane	*	<DL	3,68	32	26
2-Methyl propane	*	84	84	84	1
Chloroethane	*	<DL	2,03	9,2	29
2-Methyl-1-propanol		51	51	51	1
1,2- Dichloroethane	*	<DL	1,3	30,1	37
Trichlorofluoromethane		<DL	0,99	11,9	46
Chloromethane	*	<DL	1,38	10,22	30
2,5-Dimethyl furan		41	41	41	1
2- Methyl Furan		40	40	40	1
Chlorodifluoromethane	x	<DL	1,35	12,58	27
Propene	*	11,5	36	36	1
Hexone	**	36	1,38	11,5	26
Ethyl mercaptan	**	1	11,93	23,8	3
Dichlorofluoromethane		9	1,2	26,11	28
1,1,1-Trichloroethane	x	<DL	0,84	9	38
Tetrahydrofuran		30	30	30	1
Bromodichloromethane	*	<DL	0,71	7,85	29
Ethyl acetate		20	20	20	1
3-Methylhexane	*	20	20	20	1
Methylpropane		12	12	12	1
Chlorobenzene	*	<DL	0,38	10	29
Acrylonitrile	*	<DL	0,32	7,4	26
1,1-Dichloroethane	*	<DL	0,23	3,1	32
Methyl mercaptan	**	1	1,87	3,3	3
1,2- Dichloropropane	*	<DL	0,12	1,8	28
1-Propyl mercaptan		1	1,55	2,1	2
Chloroform	*	<DL	0,08	1,56	36
1,1,2,2-Tetrachloroethane	*	<DL	0,1	2,35	28
1,1,2,2-Tetracloroethene		<DL	0,08	2,25	28
2-Cloroethylvinyl Ether	x	<DL	252,63	1780	26
Ethane	*	0,05	1,33	2,6	2
Toluene	*	0,2	59,34	758	40
Dichloromethane	*	<DL	24,5	174	37
Hydrogen sulfide		11	252,97	700	3

Ethylbenzene	*	0,15	21,73	428	31
Xylene		3,7	333,85	664	2
1,2- Dimethyl benzene	*	588	588	588	1
Limonene		470	470	470	1
Total Xylene isomers	**	<DL	17,11	70,9	27
a-Pinene		446	446	446	1
Dichlorodifluoromethane F-12		<DL	13,1	43,99	31
Ethylester butanoic acid		398	398	398	1
Propane	*	<DL	13,59	86,5	26
Tetrachloroethane	*	<DL	8,43	77	39
Vinyl chloride	**	<DL	7,71	48,1	42
1,2-Dichloroethane	*	<DL	6,33	84,7	37
Methyl ethyl ketone	*	<DL	8,17	57,5	27
Thiobismethane	*	210	210	210	1
Methylcyclohexane	*	2,4	99,7	197	2
Trichloroethane	*	0,01	3,98	34	44
Nonane	*	167	167	167	1
Benzene	*	<DL	3,6	52,2	45
Ethanol		157	157	157	1
Acetone	x	<DL	5,94	32	26
2-Butanol		152	152	152	1
Octane	*	152	152	152	1
Pentane	*	<DL	5,64	46,53	26
Hexane	*	<DL	5,33	25	26
Methylester Acetic Acid		136	136	136	1
1-Methoxy-2-methyl propane		136	136	136	1
Boutanone-2		129	129	129	1
1,1-Dichloroethane	*	<DL	3,51	19,5	33
4-Methyl-2-Pentanone		89	89	89	1

Στον πίνακα 6 όπου <D.L σημαίνει χαμηλότερα από το όριο ανίχνευσης. όπου, (*) VOC σύμφωνα με τον ορισμό της EPA, (**) το συστατικό είναι πιθανώς VOC, (x) το συστατικό δεν είναι VOC σύμφωνα με τον ορισμό της EPA. Τα οργανικά πτητικά (VOCs) -ο ορισμός των πτητικών έγινε σύμφωνα με τον ορισμό της EPA για τα οργανικά πτητικά- που περιέχονται στο κλάσμα των NMOCs σημειώνονται με ένα */** στον πίνακα 6.

Πιο πρόσφατη έρευνα για τη συγκέντρωση των οργανικών μη μεθανικών ενώσεων NMOCs στο βιοαέριο αναφέρεται στον πίνακα 7.

Πίνακας 7: Συγκεντρώσεις NMOCs στο βιοαέριο (Huitric et al., 2000).

Χημική Ονομασία	Χημικός Τύπος	Αριθμός χώρων διάθεσης στους οποίους έγιναν δειγματοληψίες	AP-42 ppmV	WIAC-1(*) ppmV	WIAC-2(*) ppmV
Methyl -Chloroform	C ₂ Cl ₃ H ₃	46	0,48	0,168	0,168
1,1,2,2-Tetracloroethane	C ₂ H ₂ Cl ₄	19	1,11	0,070	0,005
1,1-Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	45	2,35	0,741	0,741
1-1-Dichloroethene	C ₂ H ₂ Cl ₂	45	0,2	0,092	0,092
1,2- Dicloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	47	0,41	0,120	0,120

1,2-Dichloropropane	C ₃ H ₆ Cl ₂	17	0,18	0,023	0,023
2-Propanol	C ₃ H ₈ O	3	50,1	7,908	7,908
Acetone	C ₃ H ₆ O	8	7,01	6,123	7,075
Acrylonitrile	C ₃ H ₃ N	3	6,33	<0,036	<0,036
Benzene (συνδιάθεση οικιακών με τοξικά)		3	11,1	10,376	10,376
Benzene (μόνο οικιακά)	C₆H₆	44	1,91	0,972	0,972
Bromodichloromethane	CHBrCl ₂	7	3,13	<0,311	<0,264
Carbon disulfide	CS ₂	31	0,58	0,320	0,221
Carbon tetrachloride	CCl ₄	37	0,004	<0,007	<0,007
Carbonyl sulfide	COS	29	0,49	0,183	0,183
Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	46	0,25	0,227	0,227
Chlorodifluoromethane	CHClF ₂	1	1,3	0,355	0,355
Chloroethane	C ₂ H ₅ Cl	21	1,25	0,239	0,448
Chloroform	CHCl ₃	45	0,03	0,021	0,010
Chloromethane	CH ₃ Cl	8	1,21	0,249	0,136
Chlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	34	0,21	1,607	1,448
Dichlorodifluoromethane	CCl ₂ F ₂	19	15,7	1,751	0,964
Dichloromethane	CH ₂ Cl ₂	47	14,3	3,395	3,395
Dimethyl sulfide	(CH ₃) ₂ S	34	7,82	6,809	6,809
Ethane	C ₂ H ₆	1	889	7,943	7,943
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	4	27,2	118,618	64,425
Ethylmercaptan	C ₂ H ₆ S	36	2,28	1,356	0,226
Ethylene dibromide	C ₂ Br ₂ H ₄	30	0,001	<0,046	<0,005
Fluorotrichloromethane	CCl ₃ F	25	0,76	0,327	0,327
Hexane	C ₆ H ₁₄	4	6,57	2,324	2,063
Hydrogen sulfide	H₂S	40	35,5	23,578	23,578
Methyl-ethyl ketone	C ₄ H ₈ O	8	7,09	10,557	12,694
Methyl isobutyl ketone	C ₆ H ₁₂ O	7	1,87	0,750	0,750
Methyl mercaptan	C ₂ H ₆ S	36	2,49	1,292	1,266
Tetrachloroethylene	C ₂ Cl ₄	48	3,73	1,193	1,193
Propane	C ₃ H ₈	1	11,1	14,757	19,858
Toluene (οικιακά σε συνδιάθεση με τοξικά)	C ₇ H ₈	3	165	37,456	37,456
Toluene (μόνο οικιακά)	C ₇ H ₈	43	39,3	25,405	25,405
Trans-1,2 Dichloroethene	C ₂ H ₂ Cl ₂	1	2,84	0,051	0,051
Trichloroethylene	C ₂ HCl ₃	48	2,82	0,681	0,681
Vinyl Chloride	C₂H₃Cl	46	7,34	1,077	1,077
Xylene	C ₈ H ₁₀	45	12,1	16,582	16,582

(*): WIAC-1 και WIAC-2 δείχνουν τις εκτιμήσεις των συγκεντρώσεων των NMOCs στο βιοαέριο βασισμένες στις μεθοδολογίες της EPA και WIAC αντίστοιχα.

Πίνακας 8: Συγκεντρώσεις NMOCs στο βιοαέριο (Landfill gas analysis, SCC - Source Classification Code: 50100402, 50300603 - EPA, 1998).

Συγκεντρώσεις ενώσεων του βιοαερίου		
Συστατικό	Συγκέντρωση (ppmV)	EFR
Methyl chloroform	0,48	B
1,1,2,2-Tetrachloroethane	1,11	C
1,1-Dichloroethane	2,35	B
1,1-Dichloroethene	0,20	B

1,2-Dichloroethane	0,41	B
1,2-Dichloropropane	0,18	D
2-Propanol	50,1	E
Acetone	7,01	B
Acrylonitrile	6,33	D
Bromodichloromethane	3,13	C
Butane	5,03	C
Carbon disulfide	0,58	C
Carbon monoxide	141	E
Carbon tetrachloride	0,004	B
Carbonyl sulfide	0,49	D
Chlorobenzene	0,25	C
Chlorodifluoromethane	1,30	C
Chloroethane	1,25	B
Chloroform	0,03	B
Chloromethane	1,21	B
Dichlorobenzene	0,21	E
Dichlorodifluoromethane	15,7	A
Dichlorofluoromethane	2,62	D
Dichloromethane	14,3	A
Dimethyl sulfide	7,82	C
Ethane	889	C
Ethanol	27,2	E
Ethyl mercaptan	2,28	D
Ethylbenzene	4,61	B
Ethylene dibromide	0,001	E
Fluorotrichloromethane	0,76	B
Hexane	6,57	B
Hydrogen Sulfide	35,5	B
Mercury	2,92x10 ⁻⁴	E
Methyl ethyl ketone	7,09	A
Methyl isobutyl ketone	1,87	B
Methyl mercaptan	2,49	C
Pentane	3,29	C
Tetracloroethylene	3,73	B
Propane	11,1	B
t-1,2-Dichloroethene	2,84	B
Trichloroethylene	2,82	B
Binyl chloride	7,34	B
Xylene	12,1	B

Η ακρίβεια των συντελεστών που παρέχονται δεν είναι ομοιόμορφη καθώς δεν εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ποιότητα, ποσότητα αποβλήτων, υγρασία, καθώς και από την έκταση και την ποιότητα των μετρήσεων που έχουν γίνει. Οι εκτιμήσεις ορισμένων συντελεστών από αυτούς βασίζεται σε σχετικά περιορισμένο αριθμό μετρήσεων με αποτέλεσμα να έχουν μειωμένη αξιοπιστία. Οι συντελεστές εκπομπής λοιπόν βαθμολογούνται ποιοτικά με ένα συντελεστή εκτίμησης αξιοπιστίας εκπομπών (Emission Factor Rating, EFR). Το EFR αναπτύχθηκε από την EPA καθώς και την Ευρωπαϊκή υπηρεσία περιβάλλοντος (EEA) στην προσπάθειά τους να καθορίσουν το βαθμό αξιοπιστίας των συντελεστών εκπομπής. Το σύστημα EFR είναι αυτό όπως ακολουθεί:

- A: ικανοποιητική ακρίβεια, αριθμός μετρήσεων >20
 B: σχεδόν ικανοποιητική ακρίβεια, αρ. μετρήσεων 10-19
 C: μέση ποιότητας ακρίβεια, αρ. μετρήσεων 6-9
 D: κάτω της μέσης ποιότητας ακρίβεια, αρ. μετρήσεων 3-5
 E: ανεπαρκής ακρίβεια, αρ. μετρήσεων <3
 U: μη έγκυρη τιμή.

Πίνακας 9: Συγκεντρώσεις βενζόλιου, NMOC και τουλουόλης στο βιοαέριο (Πηγή: Landfill gas analysis, EPA 1998).

Συγκεντρώσεις για το βενζόλιο, NMOC & τουλουόλη		
Ρύπος	Συγκέντρωση (ppmv)	EFR
Βενζόλιο, Συνδιάθεση οικιακών με τοξικά	:11,1	D
Διάθεση μόνο οικιακών απορριμμάτων	:1,91	B
NMOC (ως εξάνιο), Συνδιάθεση οικιακών με τοξικά	:2420	D
Διάθεση μόνο οικιακών απορριμμάτων	:595	B
Τουλουόλη, Συνδιάθεση οικιακών με τοξικά	:165	D
Διάθεση μόνο οικιακών απορριμμάτων	:39,3	A

Πίνακας 10: Μέσα και μέγιστα επίπεδα συγκεντρώσεων VOCs σε 66 χωματερές δημοτικών απορριμμάτων στην Καλιφόρνια, (Tchobanoglous et al., 1993).

VOC	Μέση τιμή ppmV*	Μέγιστη τιμή ppm*
Acetone	6,8	240
Benzene	2,1	39
Chloroform	245	12
Dichloromethane	25,7	620
Diethylene chloride	2,8	20
Ethyl benzene	7,3	87,5

Methyl ethyl ketone	3,1	130
Trichloroethylene	2,1	32
Toluene	34,9	280
Tetrachloroethylene	5,2	180
Vinyl chloride	3,5	32
Styrenes	1,5	87
Vinyl acetate	5,7	240
Xylenes	2,7	38

* Όλες οι συγκεντρώσεις αναφέρονται σε parts per million by volume (ppmv)

Πίνακας 11: Σύνθεση βασικών στοιχείων βιοαερίου (Σκορδύλης, 2001).

Μεθάνιο	0-85%
Διοξείδιο του άνθρακα	0-88%
Μονοξείδιο του άνθρακα	0-3%
Υδροθείο	0-70 ppm
Ακετόνη	100 ppm
Αιθυλομερκαπτάνη	0-120 ppm
Ακεταλδεΐδη	150 ppm
Βενζόλιο	0,6-32 ppm
Βινυλοχλωρίδιο	0,03-44 ppm
Χλωροφόρμιο	0,2-2 ppm
Διχλωρομεθάνιο	0,9-490 ppm
Τολουόλη	4-197 ppm
Ξυλόλη	2,3-139 ppm
Τριχλωροαιθυλένιο	1,2-116 ppm
Τετράχλωροαιθυλένιο	0,3-110 ppm
Αιθανόλη	16-1450 ppm
Προπάνιο	41-630 ppm
Βουτάνιο	2,3-626 ppm

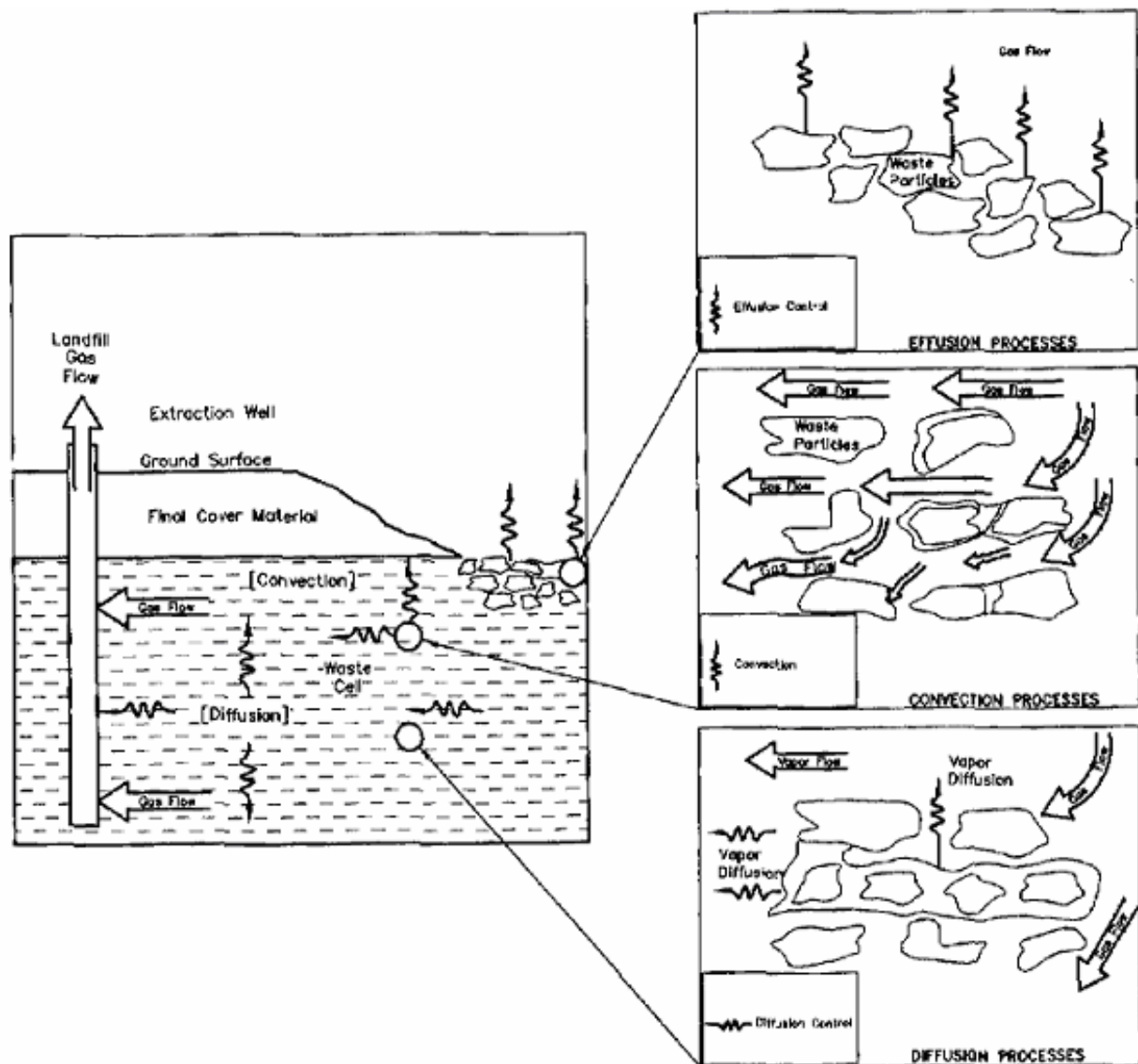
5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟ Χ.Δ.Α.

5.1.Μηχανισμοί ροής βιοαερίου στο εσωτερικό του Χ.Δ.Α.

Οι εκπομπές αέριων ρύπων είναι συνάρτηση των μηχανισμών μεταφοράς βιοαερίου (μοριακή διάχυση, συµμεταφορά). Η πίεση και η συγκέντρωση του παραγόμενου βιοαερίου που ποικίλλουν χωρικά και χρονικά κατά την ενεργή ζωή της χωµατερής ευθύνονται για τους μηχανισµούς συµμεταφοράς (convection) και μοριακής διάχυσης (diffusion) στο εσωτερικό της χωµατερής. Η μοριακή διάχυση και η συµμεταφορά εξαρτώνται κυρίως από το ρυθµό παραγωγής ή καταστροφής του βιοαερίου µέσω χηµικών αντιδράσεων ή βιολογικής δραστηριότητας, την απόδοση άντλησης βιοαερίου από το χώρο διάθεσης, την διαπερατότητα των απορριµμάτων, την εσωτερική θερμοκρασία της χωµατερής, την υγρασία, τον γειτονικό γεωλογικό σχηµατισµό, τις θερμοδυναµικές ιδιότητες βιοαερίου (διαλυτότητα, τάση ατμών, πυκνότητα, ιξώδες κ.λπ), (Tchobanoglous et al.,1993).

Στην περίπτωση που η κίνηση δεν γίνεται παθητικά¹⁰ αλλά ενεργά µε σύστημα άντλησης, παρατηρούνται σηµαντικές βαθµίδες πίεσης που οδηγούν στη συµμεταφορά συστατικών βιοαερίου κατάντη δηλαδή από υψηλότερες µερικές πιέσεις σε χαμηλότερες µερικές πιέσεις στο χώρο ταφής απορριµμάτων (Tchobanoglous et al.,1993). Η µεθανότροφη ζώνη οξείδωσης έχει πίεση ίση µε την ατµοσφαιρική πίεση, έτσι στη µεταβατική ζώνη από µεθανογενή σε µεθανότροφη, οι διαφορές πίεσης είναι αυξηµένες µε αποτέλεσµα να παρατηρείται έντονη κατακόρυφη διάχυση προς την κατάντη πίεση (V.Porron & Power, 2001). Σηµειώνεται ότι οι βαθµίδες συγκέντρωσης αποτελούν τη δρώσα δύναµη του µηχανισµού μοριακής διάχυσης. Τέλος η παραγωγή θερµότητας επίσης επηρεάζει τη µεταφορά αέριων συστατικών του βιοαερίου εξαιτίας της επίδρασής του στις θερμοδυναµικές ιδιότητες του ρευστού. Το αέριο ακολουθώντας το μονοπάτι της ελάχιστης παρεµπόδισης (ανομοιοµορφία στη συµπίεση των απορριµμάτων), κινείται είτε κατακόρυφα προς την ατµόσφαιρα είτε πέρα από τα σύνορα της χωµατερής σε γειτονικό υπέδαφος µε τελική έκλυσή του στην ατµόσφαιρα (Fadel et al., 1997; Miroslav 2001).

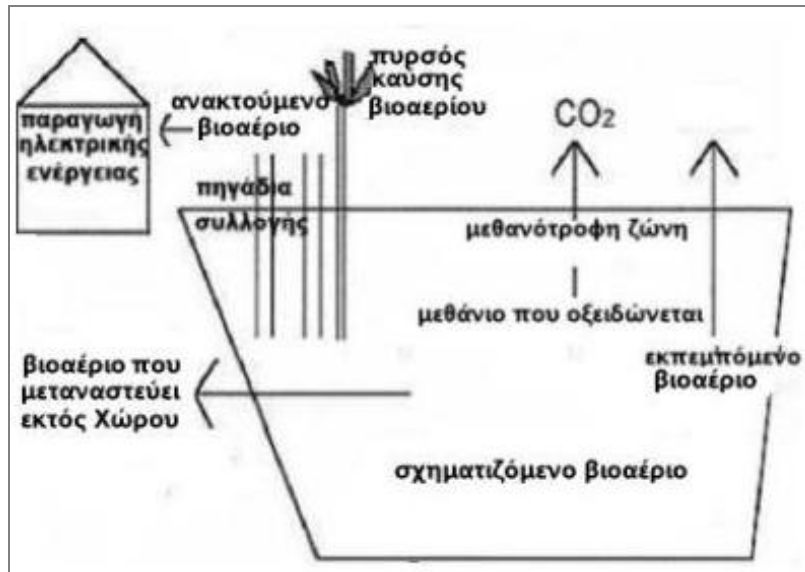
¹⁰ Στην παθητική κίνηση αερίων, η µεταφορά των αερίων δεν ελέγχεται από αντλίες συλλογής αερίων γιατί η παραγωγή αερίων µέσα στη χωµατερή είναι µικρή. Τα αέρια διέρχονται µέσα από υλικό µε µεγάλη περατότητα.



Σχήμα 5: Μηχανισμός μεταφοράς βιοαερίου (U.S. Army Corps of Engineers, 1995).

5.2.Ισοζύγιο μάζας βιοαερίου στο Χ.Δ.Α.

Το διάγραμμα ροής βιοαερίου (σχήμα 6) μας βοηθάει στην εφαρμογή του ισοζυγίου μάζας συστατικού του βιοαερίου, που σχηματίζεται στον ενεργό Χ.Δ.Α. (όγκος ελέγχου). Τα διάφορα ‘μονοπάτια’ στα οποία το παραγόμενο βιοαέριο κατανέμεται εντός του χώρου διάθεσης παρουσιάζονται στην σχήμα 6.



Σχήμα 6: Ισορροπία βιοαερίου στο Χ.Δ.Α. , (Bogner and Spokas, 1993).

Bogner and Spokas (1993) περιέγραψαν τη δυναμικό ισοζύγιο μάζας μεθανίου του βιοαερίου εντός του χώρου διάθεσης χρησιμοποιώντας το απλό μοντέλο που ακολουθεί:

Παραγόμενο μεθάνιο = Σ [μεθάνιο που εκλύεται στην ατμόσφαιρα+ μεθάνιο που ανακτάται για παραγωγή ενέργειας + μεθάνιο που οξειδώνεται + μεθάνιο που μεταναστεύει εκτός χώρου ταφής] + συσσωρευμένο μεθάνιο

Η μεταβολή συγκέντρωσης αέριου ρύπου μέσα στον όγκο ελέγχου (στρώμα αποτιθέμενων απορριμμάτων j) λόγω μεταφοράς έξω από τον όγκο ελέγχου, αντισταθμίζεται με τη μάζα η οποία παράγεται και αποδομείται από βιοχημικές αντιδράσεις μέσα στον όγκο ελέγχου και μεταφέρεται με συμμεταφορά και μοριακή διάχυση. Η μαθηματική περιγραφή σε σύστημα συντεταγμένων Euler του φυσικού φαινομένου κατακόρυφης μεταφοράς συστατικού βιοαερίου π.χ. $i = \text{CH}_4$ μέσα σε τρισδιάστατο πεδίο ροής οδηγεί στην παρακάτω μορφή εξίσωσης συνέχειας (Λαζαρίδης 2002; V. Popov & Power 2001; Jin-Sheng Lin, Lynn M. Hildemann, 1995):

$$\frac{\partial C_i^j}{\partial t} = D_z^j \frac{\partial^2 C_i^j}{\partial z^2} - \frac{\partial (C_i^j u_i^j)}{\partial z_j} + \frac{\partial S_i^j}{\partial t} - d \cdot C_i^j \quad (1)$$

όπου,

C_i^j συγκέντρωση αέριου συστατικού $i=\text{CH}_4$ στο βιοαέριο στο στρώμα (lift) j , [g m^{-3}],

D^j , συντελεστές διάχυσης μέσα στο πορώδες στρώμα j των απορριμμάτων, ($m^2 day^{-1}$),
 $1,691 \leq D^j \leq 3,5$ ($m^2 day^{-1}$),

$D_z^j \frac{\partial^2 C_i^j}{\partial z^2}$, όρος διάχυσης στο πορώδες στρώμα j στην κατακόρυφη διεύθυνση z ,
 ($g m^{-3} day^{-1}$),

S_i^j , συγκέντρωση αερίου μεθανίου που παράγεται μέσω βιοχημικών αντιδράσεων από στερεά και υγρή οργανική φάση που βρίσκεται στο στρώμα j ,
 z , βάθος στρώματος j , (m),

$\frac{\partial S_i^j}{\partial t}$, βιοχημικός ρυθμός παραγωγής μεθανίου από στερεή και υγρή οργανική μάζα που βρίσκεται στο στρώμα j τη μελετούμενη χρονική περίοδο ροής, ($g m^{-3} day^{-1}$),

d_i , σταθερά αποδόμησης αερίου ρύπου i στο στρώμα j , (day^{-1}),

$\frac{\partial (C_i^j u_i^j)}{\partial z_j}$, όρος συμμεταφοράς μεθανίου (μακροσκοπική κίνηση), όπου $\overline{u_i^j}$: ταχύτητα του

βιοαερίου στο στρώμα j , ($m day^{-1}$) που αντιστοιχεί στην ταχύτητα διήθησης (seepage velocity) –κριτήριο ισχύς της ροής Darcy: $Re \leq 10$ που σημαίνει ότι δεν ισχύει σε περιπτώσεις τυρβώδους ροής (συμβαίνουν κοντά στα φρεάτια άντλησης), (Καρατζάς, 2002)- που δίνεται από τη σχέση:

$$\overline{u}_j = -\frac{k^j}{\mu^j} \frac{\partial P_i}{\partial z_i} \quad (2)$$

όπου,

∂P_i , διαφορά πίεσης (Nm^{-2})

k^j : ειδική διαπερατότητα (intrinsic permeability) πορώδους στρώματος j η οποία είναι συνάρτηση μόνο του πορώδους μέσου, (m^2), (η τιμή περατότητας από ερευνητικές εργασίες προκύπτει ίσο με $2 \cdot 10^{-7} cm^2$, Σκορδίλης 1993),

μ^j : δυναμική συνεκτικότητα αερίου, ($N day m^{-2}$), $1,704 \times 10^{-10} \leq \mu \leq 1,746 \times 10^{-10} (N day m^{-2})$.

Τυπικές τιμές για την ταχύτητα συμμεταφοράς για τα κύρια αέρια στις χωματερές είναι από 1 έως 15 cm/day (Tchobanoglous et al., 1993).

Αν θεωρήσουμε ότι στις συνθήκες εσωτερικά της χωματερής το μεθάνιο συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο (υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλές πιέσεις), τότε η εξίσωση των ιδανικών αερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί : $PV = nRT$ ή $P = R \cdot T \cdot C_{i=CH_4}$

όπου,

V = όγκος αερίων, (m^3).

K = θερμοκρασία, (K).

R = παγκόσμια σταθερά αερίου, ($J K^{-1} kg^{-1}$).

Η εξίσωση συνέχειας στο στρώμα j της χωματερής (1) γράφεται μέσω της εξίσωσης (2):

$$D_z^j \frac{\partial^2 C_i^j}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z_j} \left[C_i^j \cdot \left(\frac{k^j}{\mu^j} \cdot \frac{\partial P_i^j}{\partial z_j} \right) \right] + \frac{\partial S_i^j}{\partial t} - d C_i^j - \frac{\partial C_i^j}{\partial t} = 0$$

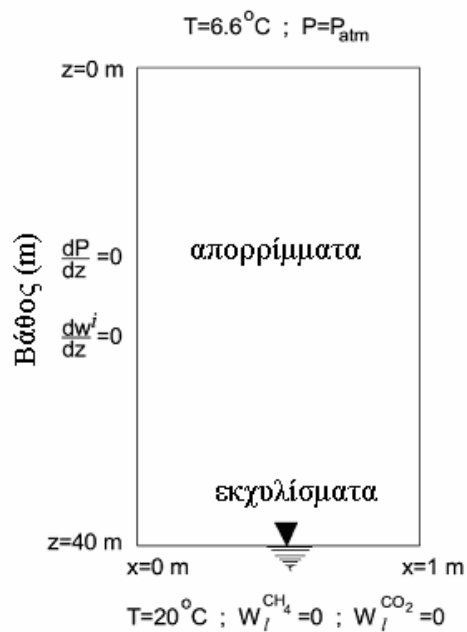
5.3. Προφίλ ελεύθερης μονοδιάστατης ροής βιοαερίου σε κατακόρυφη στήλη που αποτελεί τμήμα Χ.Δ.Α.

Το φυσικό φαινόμενο που εξετάζεται είναι η κίνηση του μεθανίου με συμμεταφορά και διάχυση, μέσα σε ένα κατακόρυφο πεδίο ελεύθερης ροής. Η αρχική συγκέντρωση του βιοαερίου είναι μηδενική σε όλο το χώρο διάθεσης (αρχική συνθήκη στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης). Γίνεται η απλοποίηση μονοδιάστατης ροής με τις εξής θεωρήσεις, ότι πρώτον η στήλη αντιπροσωπεύει τμήμα της χωματερής που έχει αδιαπέραστα πρανή ώστε η μονοδιάστατη προσέγγιση για την κατακόρυφη μεταφορά να είναι δικαιολογήσιμη και δεύτερον δεχόμαστε ότι απουσιάζει ενεργό σύστημα ανάκτησης βιοαερίου καθώς και χωματοκάλυψης (παρεμποδίζει την κατακόρυφη κίνηση), πράγμα που μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι το βιοαέριο έχει ανοδική κίνηση με παραδοχή κατακόρυφης μεταφοράς.

Ο υπολογιστικός χώρος αποτελεί τμήμα συνολικού χώρου υποθετικής χωματερής ο οποίος προσομοιώνεται με μονοδιάστατη κατακόρυφη στήλη απορριμμάτων που εκτείνεται από την επιφάνεια του εδάφους έως βάθος ίσο με 40 m, διαιρεμένη σε 20 μέρη (lifts) που έχουν ίσο όγκο με τιμή $2 m^3$ (σχήμα 7). Οι συνοριακές συνθήκες φαίνονται στο σχήμα 7. Στην επιφάνεια οι ατμοσφαιρικές συνθήκες χαρακτηρίζονται από θερμοκρασία ίση με $6,6^\circ C$, που είναι η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής. Στο κατώτατο σύνορο υπάρχει στρώμα

νερού όπου πραγματοποιείται μεταφορά μάζας ρευστών. Σ' αυτό το σύνορο θεωρείται μηδενική η μάζα του μεθανίου.

Το ξεκίνημα της προσομοίωσης αντιστοιχεί στο χρόνο όπου το μεθάνιο αρχίζει να σχηματίζεται. Ισχυριζόμαστε ότι η ηλικία των αποβλήτων είναι ομοιόμορφη στη στήλη αποβλήτων με χρήση ενός ομοιόμορφου ρυθμού παραγωγής βιοαερίου/μεθανίου. Για την έκταση της συγκεκριμένης στήλης προσομοίωσης, η ολική παραγωγή μεθανίου θεωρείται ίση με 5250 m^3 . Θεωρώντας πυκνότητα απορριμμάτων ίση με $0,76 \text{ tn/m}^3$, θεωρούμε αρχικό ρυθμό παραγωγής για τη στήλη απορριμμάτων ίσο με $288 \text{ m}^3/\text{year}$. Ο ρυθμός μειώνεται εκθετικά στη διάρκεια του χρόνου μετά το ξεκίνημα λειτουργίας, με το 93,6% του βιοαερίου να παράγεται τα πρώτα 50 χρόνια και του 99,5% μετά τα 100 χρόνια.

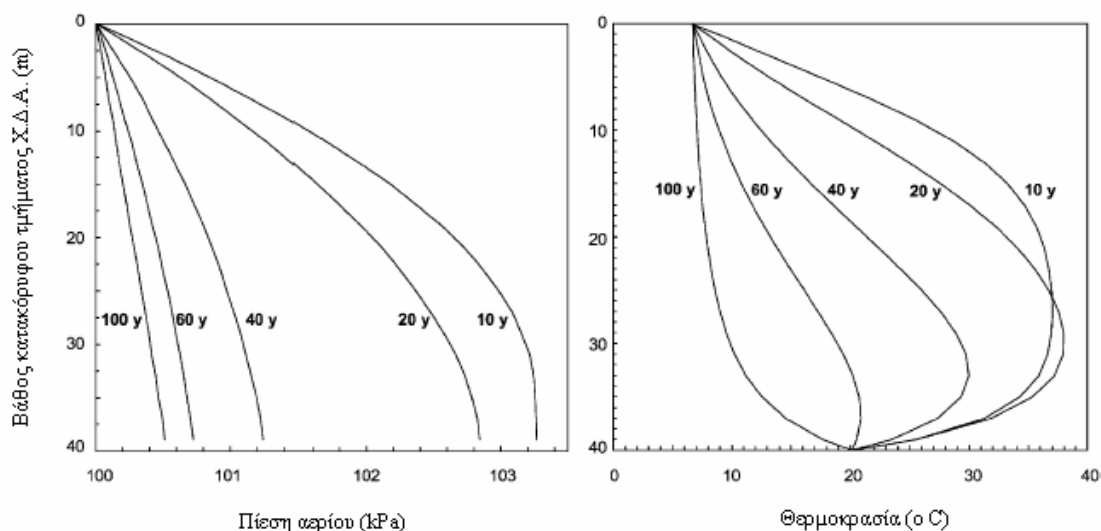


Σχήμα 7: Γεωμετρία και οριακές συνθήκες για το μονοδιάστατο κατακόρυφο μοντέλο σε Χ.Δ.Α. που αποτελεί τον υπολογιστικό χώρο και αποτελεί τμήμα του συνολικού χώρου διάθεσης (Miroslav, 2001).

Οι παραδοχές που γίνονται είναι (Miroslav, 2001):

- Μη ισοθερμική ροή μεθανίου στο εσωτερικό του Χ.Δ.Α. για περίοδο με σταθερή μετεωρολογία (μειωμένη επίδραση περιβαλλοντικών παραμέτρων (βροχόπτωση, υγρασία εδάφους, ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία)).
- Δεν υπάρχει χωματοκάλυψη, έτσι υπάρχει ελεύθερη άνοδος του αερίου.
- Δεν γίνεται εξαγωγή του βιοαερίου με αντλίες.
- Θεωρείται αμελητέα η αποδόμηση του μεθανίου στο εσωτερικό της χωματερής.
- Εξωτερικά της στήλης απορριμμάτων η πίεση και η συγκέντρωση βιοαερίου είναι σταθερές.

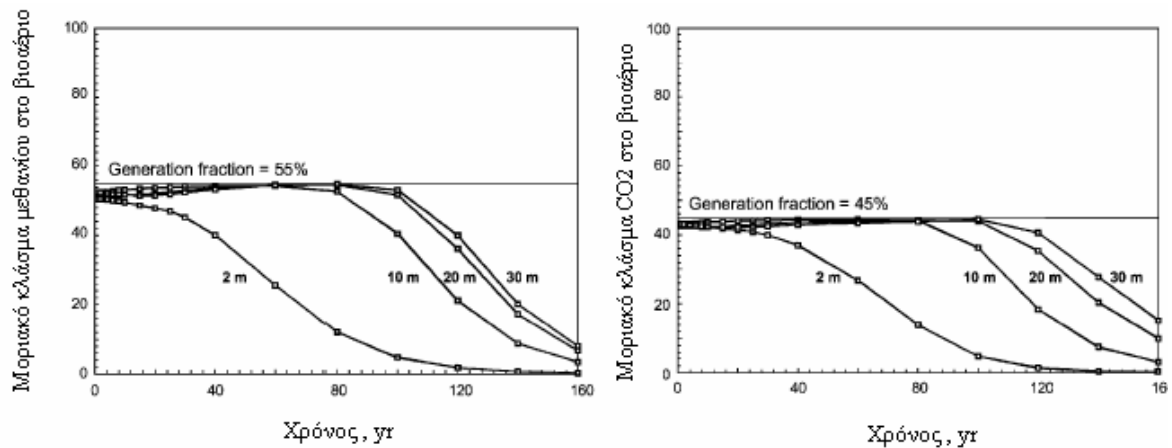
Η προσομοίωση καλύπτει χρονική περίοδο 160 χρόνων με προσομοίωση πίεσης και θερμοκρασίας του αερίου συναρτήσει του χρόνου όπως φαίνονται στο σχήμα 8. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8, η πίεση -συναρτήσεως του χρόνου- αυξάνει περισσότερο από 3 kPa πάνω από την ατμοσφαιρική πίεση, που είναι ίση με 100 kPa¹¹ μέχρι και τη στιγμή που το παραγόμενο βιοαέριο βρεθεί στο μέγιστο παραγωγής. Η πίεση παραμένει υψηλή τα πρώτα 20 χρόνια λειτουργίας της χωματερής και μετέπειτα μειώνεται σταθερά. Η θερμοκρασία ακολουθεί παρόμοια μεταβολή αφού αγγίξει την τιμή 35 °C στο χρόνο μέγιστης ποσότητας παραγωγής βιοαερίου.



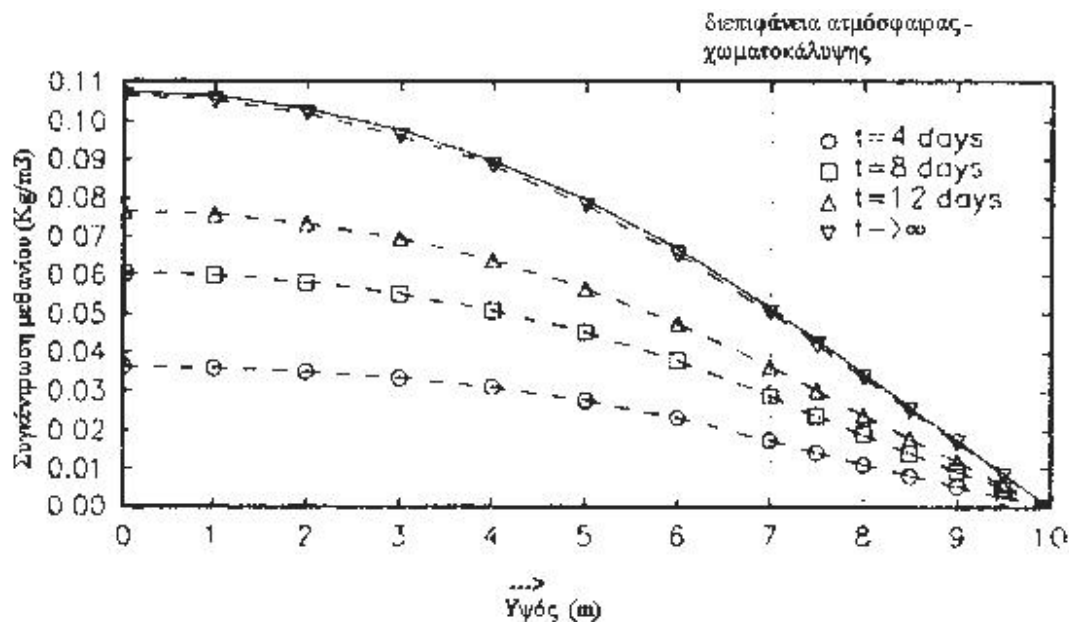
Σχήμα 8: Προσομοίωση κατακόρυφης κατανομής της πίεσης και της θερμοκρασίας στην στήλη της χωματερής, για χρόνο 10, 20, 40, 60, 100 έτη.

¹¹ 100 kPa= 1 atm.

Το σχήμα 9 δείχνει την εξέλιξη των συγκεντρώσεων μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα συναρτήσει του χρόνου σε διαφορετικά βάθη μέσα στη χωματερή. Στην αρχή σχετικά ομοιόμορφη συγκέντρωση μεθανίου διαμορφώνεται. Μετά 40 χρόνια όπου η παραγωγή βιοαερίου έχει μειωθεί, παρατηρείται μείωση της πίεσης του βιοαερίου με αποτέλεσμα οι εκπομπές βιοαερίου στην επιφάνεια της χωματερής να μειώνονται αισθητά.



Σχήμα 9: Εξέλιξη συγκεντρώσεων CH₄ και CO₂ συναρτήσει του χρόνου σε διαφορετικά βάθη μέσα στη χωματερή.



Σχήμα 10: Προφίλ συγκέντρωσης μεθανίου συναρτήσει του βάθους Χ.Λ.Α., στη φάση της μεθανογένεσης σταθερής παραγωγής βιοαερίου με συγκέντρωση στο βιοαέριο 50%.

6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ Χ.Δ.Α. “Α.ΛΙΟΣΙΑ”

6.1. Δυσκολία μαθηματικής προσομοίωσης της παραγωγής βιοαερίου

Η εκτίμηση των αέριων εκπομπών από τις χωματερές ενέχει ορισμένο βαθμό αβεβαιότητας εξαιτίας του ότι οι εκπομπές είναι ανάλογες της δυναμικής ποσοτικής και ποιοτικής παραγωγής βιοαερίου η οποία εξαρτάται από μια σειρά μεταβλητών παραγόντων. Οι κύριοι παράγοντες που υπεισέρχονται στην εκτίμηση της ποιότητας, ποσότητας και του ρυθμού παραγωγής του βιοαερίου στους Χ.Δ.Α. συνοψίζονται στον ακόλουθο κατάλογο (Σκορδίλης 1993; IPCC 1996; Fadel et al. 1997; Γεωργόπουλος 1998; Williams 1998; EPA 1997-2001):

1. Ποιοτική σύσταση των απορριμμάτων (οργανικά, διαφορετικές ταχύτητες αποδόμησης κάθε κλάσματος απορριμμάτων).
2. Περιεχόμενη υγρασία η οποία έχει μεγάλη επίδραση στην παραγωγή βιοαερίου, που ποικίλλει με το χώρο και το χρόνο και μετράται ή εκτιμάται με δυσκολία, έλλειψη υγρασίας = "στασιμότητα".
3. Βαθμός διήθησης όμβριων.
4. Ανακυκλοφορία διασταλάζοντων υγρών.
5. Υγρασία εδάφους και χωμάτινου σκεπάσματος.
6. pH μάζας απορριμμάτων που ευρίσκονται στο Χ.Δ.Α., που ποικίλλει στο χώρο και στο χρόνο και παρουσιάζει δυσκολία στην ακριβή μέτρηση pH, (βέλτιστο: 6,5 – 8).
7. Θερμοκρασία μάζας απορριμμάτων, που ποικίλλει στο χώρο και στο χρόνο (βέλτιστη παραγωγή βιοαερίου: α) μεσοφιλική περιοχή: 35 - 38 °C, β) θερμοφιλική περιοχή: 50 - 65 °C).
8. Παρουσία θρεπτικών, που ποικίλλει στο χώρο και στο χρόνο και εκτιμάται με δυσκολία.
9. Πυκνότητα οργανικών απορριμμάτων (όσο μεγαλύτερη τόσο υψηλότερη παραγωγή), ρυθμός εισαγωγής οργανικών αποβλήτων σε Χ.Δ.Α. (όσο πιο υψηλή, τόσο πιο γρήγορη αποσύνθεση).
10. Ηλικία απορριμμάτων (αισθητή μείωση παραγωγής μετά τα πρώτα χρόνια).
11. Τρόπος λειτουργίας Χ.Δ.Α. (τεμαχισμός, συμπίεση απορριμμάτων, απομάκρυνση στραγγισμάτων).

12. Χωρική κατανομή μικροοργανισμών.
13. Βάθος Χ.Δ.Α., (γενικότερα γεωμετρία χώρου διάθεσης).
14. Πάχος και διαπερατότητα του υλικού καθημερινής και τελικής κάλυψης.
15. Φυσικές και βιοχημικές ιδιότητες του χώματος που προορίζεται για επικάλυψη των απορριμμάτων.
16. Στοιχεία γεωλογίας, υδρογεωλογίας της περιοχής του Χ.Δ.Α.
17. Ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις της ατμοσφαιρικής πίεσης.
18. Εποχιακές διακυμάνσεις του ύψους των στραγγισμάτων.
19. Διαθεσιμότητα οξυγόνου στο εσωτερικό του χώρου (η ύπαρξη ελεύθερου οξυγόνου - αερόβια φάση - συνεπάγεται έντονη μικροβιακή δράση, αύξηση της θερμοκρασίας, έκλυση υδρατμών και διοξειδίου του άνθρακα).
20. Διήθηση αέρα (μπορεί να συμβεί με δύο διαφορετικούς μηχανισμούς: είσοδος αέρα στο εσωτερικό της χωματερής αν ο λόγος N_2/O_2 είναι μικρότερος ή ίσος από 4,0 ή/και είσοδος αέρα μέσα στη χωματερή έπειτα από υπερβολική άντληση βιοαερίου).
21. Παρουσία τοξικών ουσιών και μετάλλων στα απορρίμματα (ανασταλτικός παράγοντας στην παραγωγή βιοαερίου).
22. Παραγωγή τοξικών ιχνοστοιχείων στο παραγόμενο βιοαέριο δρα παρεμποδιστικά στην ανάπτυξη του μικροβιακού πληθυσμού
23. Πρόβλεψη ασφάλειας με αποφυγή συνδιάθεσης υλικών που παρουσιάζουν χημική ασυμβατότητα.
24. Θερμοκρασία περιβάλλοντος (τα κρύα κλίματα μειώνουν τον όγκο του παραγόμενου βιοαερίου γιατί δημιουργείται κρούστα στην επιφάνεια της χωματερής που εμποδίζει τη διαφυγή αερίων), (Maurice et al., 2003).
25. Άνεμος (επηρεάζει το ρυθμό διάχυσης μειώνοντας τις επιφανειακές συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων που παράγονται, δημιουργώντας συνθήκες συμμεταφοράς κοντά στην επιφάνεια).
26. Βροχοπτώσεις.
27. Τοπογραφία περιοχής.
28. Λειτουργία μηχανικού συστήματος ανάκτησης ενέργειας κ.λπ.

Η εξάρτηση της ποιότητας και ποσότητας παραγωγής βιοαερίου από τους αναφερόμενους παράγοντες αβεβαιότητας συντελεί στη δύσκολη πρόβλεψη του ρυθμού παραγωγής του βιοαερίου από το Χ.Δ.Α. Το μόνο στοιχείο που είναι δεδομένο είναι ό,τι η ποσότητα και ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου αυξάνονται όσο προχωράει η ενηλικίωση του χώρου

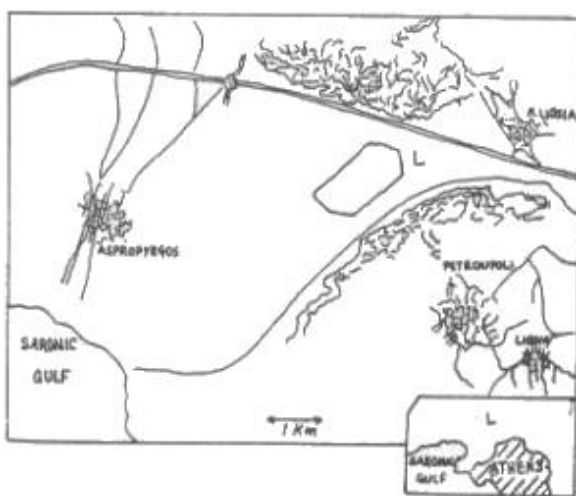
διάθεσης και κορυφώνονται θεωρητικά με την λήξη της ολικής πλήρωσης του Χ.Δ.Α. (συνήθως 20 έτη, ανάλογα με τον προβλεπόμενο σχεδιαστικά χρόνο ζωής του χώρου διάθεσης). Η δε παραγωγή του βιοαερίου συνεχίζεται με μειωμένο ρυθμό για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την ολοκλήρωση του χρόνου λειτουργίας του χώρου απόθεσης.

6.2. Μαθηματικά μοντέλα ποσοτικοποίησης παραγωγής βιοαερίου

6.2.1. Γενικά

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα ποσοτικοποίησης παραγωγής βιοαερίου (Halvadakis 1983; Cossu et al., 1996; Findikakis, Fadel, Leckie, 1997; EPA, 1998; EEA, 2002). Τα μοντέλα αυτά συνήθως περιλαμβάνουν στοιχειομετρικούς υπολογισμούς και κινητικούς υπολογισμούς. Οι στοιχειομετρικοί υπολογισμοί, δίνουν τη μέγιστη θεωρητική παραγωγή βιοαερίου από την αντίδραση της αναερόβιας αποσύνθεσης του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων (στατικοί υπολογισμοί). Οι κινητικοί υπολογισμοί δίνουν πληροφορίες για την διαχρονική εξέλιξη των ρυθμών παραγωγής βιοαερίου (δυναμικοί υπολογισμοί). Οι κινητικοί υπολογισμοί μπορεί να περιγράφονται με εμπειρικά μοντέλα που βασίζονται σε μαθηματικές εξισώσεις που προσομοιώνουν βασικές βιολογικές και φυσικοχημικές διεργασίες παραγωγής βιοαερίου που πραγματοποιούνται στο περιβάλλον μιας χωματερής κατά την αποδόμηση των διαφόρων βιοαποδομήσιμων συστατικών των απορριμμάτων.

6.2.2. Περιγραφή μελετούμενου παλαιού Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια”



Σχήμα 11: Κάτοψη παλαιάς χωματερής “Α.Λιόσια” (Loizidou et al., 1992).

Η ποσότητα των παραγόμενων οικιακών αποβλήτων στην περιφέρεια Αττικής αντιστοιχεί στο 38% της ετήσιας παραγωγής σε επίπεδο χώρας (ΦΕΚ 723 Β, 2000). Ο Χ.Δ.Α. στα Α.Λιόσια (Θριάσιο πεδίο) είναι ο μεγαλύτερος στην Ελλάδα με συνολική έκταση 173 ha από την οποία τα 87 ha έχουν καλυφθεί με απορρίμματα (ECOSIM, 1998), χωροθετημένος σε απόσταση

18 km από το κέντρο της Αθήνας (23,8° γεωγραφικό μήκος και 38,5° γεωγραφικό

πλάτος), και 6 km από τη θάλασσα, 4,5 km από το κέντρο του Ασπροπύργου και 1km από τα νεόκτιστα Ασπροπύργου. Το έτος έναρξης λειτουργίας του χώρου στα Λιόσια είναι το 1973 και το έτος κλεισίματος το 1999~2000. Η μέση ποσότητα αποβλήτων που αποτίθενται καθημερινά είναι 3.500 ton και η ετήσια παραγωγή αποβλήτων ανά κάτοικο εκτιμάται ίση περίπου 350 kg/year/capita με ετήσιο ρυθμό αύξησης 3,5% (ECOSIM, 1998), θεωρώντας δυναμικότητα χωματερής ίση με 1.500.000 tn/yr (Μαυριάς-Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.). Τα απόβλητα εναποτίθενται σε στρώματα ύψους 200-350 cm και επικαλύπτονται με χώμα/αμμοχάλικα και αργιλώδες υλικό ύψους 50-150 cm. Το βάθος της εναπόθεσης στο κέντρο της χωματερής υπερβαίνει τα 20 m (ECOSIM, 1998). Αναφέρεται ότι το 2001 λειτούργησε ο σταθμός συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από βιοαέριο το οποίο αντλείται από τον όγκο των απορριμμάτων του παλαιού χώρου διάθεσης απορριμμάτων “Άνω Λιόσια”. Ο σταθμός παράγει καθημερινά 15Mw θερμική ενέργεια και 14Mw ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μεταφέρεται κατευθείαν στο δίκτυο της ΔΕΗ. Η μονάδα έχει δυνατότητα να παρέχει 8.000 κυβικά μέτρα βιοαερίου την ώρα¹² (κος Μαυριάς (Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.); Ε.Σ.Σ.Η.Θ.).

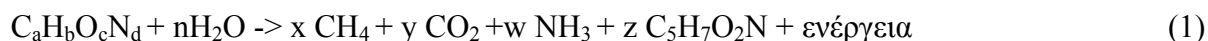
6.2.3. Εφαρμογή στοιχειομετρικού μοντέλου για τον υπολογισμό της συνολικής παραγωγής βιοαερίου κατά τη διάρκεια ενεργείας του κλειστού Χ.Α.Α. “Α. Λιόσια”

6.2.3.1. Γενικά

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της θεωρητικής συνολικής παραγωγής βιοαερίου στη χωματερή “Α.Λιόσια”, προϋποθέτει τη γνώση της περιεκτικότητας σε βιοαεροποιήσιμο άνθρακα των οργανικών ενταφιασμένων απορριμμάτων στα Α.Λιόσια. Η παραγωγή βιοαερίου λαμβάνεται ίση με το άθροισμα του παραγόμενου μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα. Τα στερεά απόβλητα έχουν τη σύσταση όπως αυτή παρουσιάζεται στον πίνακα 12 ο οποίος δόθηκε από τον Ενιαίο Σύνδεσμο Δήμων και Κοινοτήτων Νομού Αττικής (Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.), κύριος υπεύθυνος διαχείρισης της χωματερής.

Η χημική αντίδραση που αντιπροσωπεύει τη συνολική διεργασία βιοαεριοποίησης της οργανικής μάζας απορριμμάτων σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

¹²Ένα κυβικό μέτρο βιοαερίου υποκαθιστά 0,66lt ντίζελ ή 0,75lt πετρελαίου (ΚΑΠΕ, 2002).



όπου, $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ εμπειρική χημική διατύπωση του βιοαποδομήσιμου οργανικού υλικού που περιέχεται στα απορρίμματα και $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ χημικός τύπος του βακτηριακού κυττάρου. Αναφέρεται ότι με την αύξηση της υγρασίας ενισχύεται η βιολογική αποδόμηση με παράλληλη αύξηση της παραγωγής βιοαερίου. Έτσι για να επιτευχθεί μεγιστοποίηση της βιοαεριοποίησης πολλοί χώροι ταφής λειτουργούν με τη μορφή του βιοαντιδραστήρα με συνεχή ανακύκλωση νερού και διασταλάζοντων υγρών μέσα στο χώρο¹³. Σημειώνεται ότι στον κλειστό παλαιό Χ.Δ.Α. ‘Α.Λιόσια’ δεν υπάρχει σύστημα ανακυκλοφορίας διασταλάζοντων υγρών.

6.2.3.2.Εφαρμογή-Αποτελέσματα

Η οργανική μάζα CaHbOcNd που δίνει την στοιχειομετρική αναλογία των C, H, O, N στην οργανική μάζα, διακρίνεται σε ταχέως βιοδιασπώμενη (μέγιστο χρόνο αποδόμησης περίπου 5 χρόνια) και σε βραδέως βιοδιασπώμενη (5 έως 50 χρόνια διάρκεια αποδόμησης) (Tchobanoglous et al., 1993).

Πίνακας 12: Ποιοτική και ποσοτική σύσταση απορριμμάτων που διατίθενται στο Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” (Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.).

Παραγωγή βιοαερίου από ταχέως και βραδέως βιοδιασπώμενα συστατικά οργανικού κλάσματος απορριμμάτων στα Α.Λιόσια Αττικής									
Συστατικό	Στερεά Απόβλητα %	Υγρό βάρος kg	Υγρασία %	Ξηρό βάρος Kg	C kg	H kg	O kg	N kg	S kg
Ταχέως βιοδιασπώμενα συστατικά (Τ.Β.Σ.)									
Οργανικά	48,5	48,5	65	16,975	8,148	1,0864	6,3826	0,44135	0,0679
Χαρτί	11,25	11,25	6	10,575	4,60013	0,6345	4,653	0,031725	0,02115
Χαρτόνι	11,25	11,25	5	10,6875	4,7025	0,63056	4,766625	0,032063	0,0214
Πλαστικά	10	10	0	10	6	0,72	2,28	0	0
Υλικά κατεδάφησης	0	0	60	0	0	0	0	0	0
Σύνολο	81	81		48,2375	23,4506	3,07147	18,0822	0,50514	0,1104
Βραδέως βιοδιασπώμενα συστατικά (Β.Β.Σ.)									
Υφάσματα	1,5	1,5	10	1,35	0,7425	0,0891	0,4212	0,0621	0,002
Λάστιχο	1	1	2	0,98	0,7644	0,098	0	0,0196	0
Δέρμα	1	1	10,5	0,895	0,537	0,0716	0,10382	0,0895	0,004
Υλικά κατεδάφησης	0	0	60	0	0	0	0	0	0
Ξύλο	0	0	20	0	0	0	0	0	0
Σύνολο		3,5		3,225	2,0439	0,2587	0,52502	0,1712	0,006

¹³ Βέβαια το πολύ υψηλό ποσοστό σε νερό δε συντελεί στην αύξηση της παραγωγής μεθανίου γιατί στην περίπτωση αυτή ευνοείται η φάση υδρόλυσης παρά η μεθανογένεση (Barlaz).

Διαιρούμε τις μάζες των στοιχείων (πίνακας 12) με τα ατομικά τους βάρη για τον υπολογισμό του αριθμού των γραμμοατόμων (πίνακας 13):

Πίνακας 13: Υπολογισμός αριθμού γραμμοατόμων στοιχείων που βρίσκονται στα ταχέως και βραδέως αποδομήσιμα οργανικά συστατικά στα απορρίμματα της χωματερής “Α.Λιόσια”.

	C	H	O	N
Συνολικά moles	12	1	16	14
T.B.Σ. (gr- atoms)	1,9542	3,071465	1,1301	0,03608
B.B.Σ. (gr-atoms)	0,170325	0,2587	0,03281	0,0122286

Καθορισμός του μοριακού τύπου όπως δείχνεται στον πίνακα 14:

Πίνακας 14: Εύρεση μοριακού τύπου T.B.Σ. και B.B.Σ. στα απορρίμματα της χωματερής “Α.Λιόσια”.

Συστατικό	T.B.Σ.	B.B.Σ.
C	54	14
H	85	21
O	31	3
N	1	1

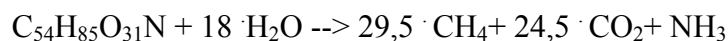
Οι μοριακοί τύποι όπως υπολογίζονται παραπάνω είναι:

T.B.Σ.: $C_{54}H_{85}O_{31}N$

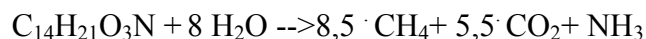
B.B.Σ.: $C_{14}H_{21}O_3N$

Η εκτίμηση της ποσότητας του βιοαερίου που μπορεί να εκλυθεί από το ταχέως και βραδέως βιοαδιασπώμενο οργανικό κλάσμα υπολογίζεται ως εξής:

Οι χημικές εξισώσεις για ταχέως και βραδέως βιοαδιασπώμενα υλικά είναι αντίστοιχα:



1243 324 472 1078 17



251 144 136 242 17

Καθορισμός του παραγόμενου όγκου μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα. Το ειδικό βάρος του μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα είναι $0,667 \text{ kg/m}^3$ και $1,977 \text{ kg/m}^3$, αντίστοιχα.

i) Τ.Β.Σ.:

$$\text{Μεθάνιο} = \frac{(472)(48,2375)}{(1243)(0,667)} = 27,46 \text{ m}^3$$

$$\text{Διοξείδιο του άνθρακα} = \frac{(1078)(48,2375)}{(1243)(1,977)} = 21,16 \text{ m}^3$$

ii) Β.Β.Σ.:

$$\text{Μεθάνιο} = \frac{(136)(3,225)}{(251)(0,667)} = 2,62 \text{ m}^3$$

$$\text{Διοξείδιο του άνθρακα} = \frac{(242)(3,225)}{(251)(1,977)} = 1,57 \text{ m}^3$$

Καθορισμός της συνολικής θεωρητικής ποσότητας παραγόμενου $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ανά μονάδα ξηρού βάρους αποδομήσιμου οργανικού υλικού:

iii) Τ.Β.Σ.: $\frac{27,46 + 21,16}{48,2375} = 1 \text{ m}^3 / \text{kg}$

iv) Β.Β.Σ.: $\frac{2,62 + 1,57}{3,225} = 1,3 \text{ m}^3 / \text{kg}$

Σύμφωνα με τον πίνακα 12 η ποσοτική σύσταση αφορά ταχέως και βραδέως βιοαποδομήσιμο ξηρό υλικό 48,2375 kg και 3,225 kg αντίστοιχα σε 100 kg απορρίμματα. Η συνολική ποσότητα απορριμμάτων στον παλαιό χώρο “Α.Λιόσια” θεωρείται ίση με 33.500.000 tn, άρα σε 33.500.000 tn απορρίμματα θα περιέχεται ταχέως και βραδέως βιοαποδομήσιμο ξηρό υλικό ίσο με 16.159.563 tn και 1.080.375 tn , αντίστοιχα.

Άρα από τα παραπάνω προκύπτει ότι η συνολική θεωρητική ποσότητα παραγόμενου $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ από Τ.Β.Σ. ξηρής οργανικής μάζας είναι ίση με 16.159.563.000 m^3 $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ και η συνολική θεωρητική ποσότητα παραγόμενου $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ από Β.Β.Σ. ξηρής οργανικής μάζας είναι ίση με 1.080.375.000 m^3 $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ή ο συνολικός όγκος παραγωγής $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ από τη βιοαποδομήσιμη μάζα των θαμμένων απορριμμάτων κατά τη διάρκεια ενεργείας του κλειστού χώρου “Α.Λιόσια” είναι περίπου ίση με $1,76 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$.

Η θεωρητική προσέγγιση εκτίμησης της παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου από βραδέως και ταχέως βιοδιασπώμενο υλικό της χωματερής κατά τη διάρκεια ζωής της γενικώς καταλήγει σε υπερεκτιμήσεις γιατί θεωρείται ότι η οργανική μάζα στο βιολογικό οικοσύστημα της χωματερής μετατρέπεται απευθείας σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Πράγματι κατά

τους υπολογισμούς θεωρούμε πλήρη βιοαεριοποίηση της ποσότητας του οργανικού άνθρακα σε βιοαέριο, πράγμα που δεν ισχύει στην πράξη γιατί ένα μέρος αυτού του οργανικού άνθρακα χρησιμοποιείται από τους μικροοργανισμούς για τη συντήρηση και την ανάπτυξή τους.

6.2.4. Εφαρμογή εμπειρικού “τριγωνικού μοντέλου” εκτίμησης του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου στα “Α. Λιόσια”

6.2.4.1. Γενικά

Το “τριγωνικό μοντέλο” (Halvadakis, 1983) θεωρεί την κατανομή της τελικής ποσότητας βιοαερίου που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα μάζας απορριμμάτων τριγωνική. Το μοντέλο είναι εμπειρικό και επιτρέπει τη δυνατότητα εκτίμησης του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου εν αντιθέσει με το στοιχειομετρικό μοντέλο που αναπτύξαμε παραπάνω. Η γνώση του χρόνου υστέρησης, του χρόνου μέγιστου ρυθμού παραγωγής, του χρόνου μετατροπής καθώς και της συνολικά παραγόμενης ποσότητας βιοαερίου είναι απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση του ρυθμού παραγωγής του βιοαερίου. Αυτή η προσέγγιση εκτίμησης θεωρείται αρκετά ικανοποιητική και χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα σε λογιστικά φύλλα. Το εμπειρικό μοντέλο βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$\text{Εμβαδό τριγώνου (συνολική παραγωγή βιοαερίου, m}^3\text{)} = \frac{1}{2} (\text{βάση τριγώνου, χρόνια παραγωγής βιοαερίου, yr}) \times (\text{ύψος, μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου, m}^3\text{/yr})$
--

6.2.4.2. Εφαρμογή-Αποτελέσματα

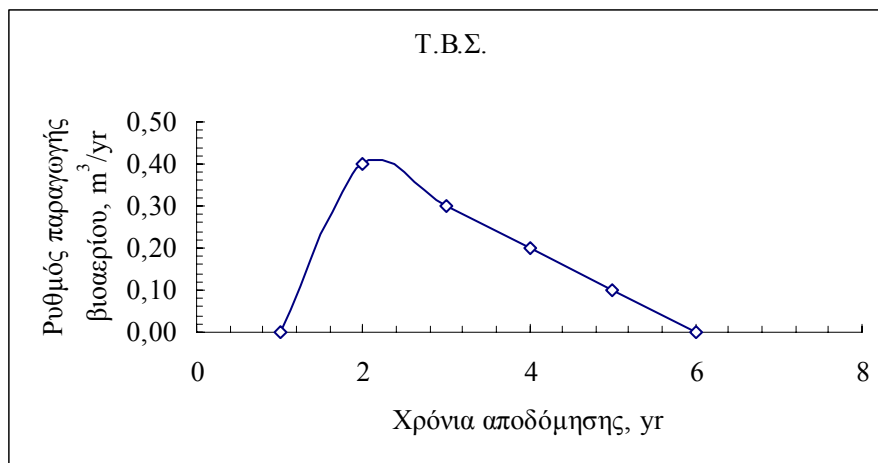
Για την εφαρμογή του στον κλειστό Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” θεωρούμε ότι ο μέγιστος ρυθμός βιοαποδόμησης για το ταχέως και βραδέως αποδομήσιμο συμβαίνει στον τέλος 1^{ου} και 5^{ου} χρόνου παραγωγής, αντίστοιχα αφού βέβαια ξεκινήσει η παραγωγή βιοαερίου. Η παραγωγή βιοαερίου θεωρείται ότι ξεκινάει στο τέλος του πρώτου πλήρους χρόνου λειτουργίας του Χ.Δ.Α. Επίσης θεωρούμε συνολική θεωρητική ποσότητα παραγόμενου CH₄+CO₂ ανά μονάδα ξηρού βάρους αποδομήσιμου οργανικού υλικού για ταχέως και βραδέως βιοαποδομήσιμο υλικό 1m³/kg Τ.Β.Σ. και 1,3m³/kg Β.Β.Σ. αντίστοιχα, ενώ θεωρούμε χρονική περίοδο πλήρους αποδόμησης ταχέως και αποδομούμενου οργανικού υλικού 5 και 15 χρόνια, αντίστοιχα.

i) Για 1kg T.B.Σ.:

Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου που συμβαίνει στο τέλος του 1^{ου} χρόνου παραγωγής βιοαερίου είναι ίσος με:

Μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου, $\text{m}^3/\text{yr} = 1 \text{ m}^3 \times (2/5\text{yr}) = 0,4 \text{ m}^3/\text{yr}$

Η σύνοψη αποτελεσμάτων του τριγωνικού μοντέλου για την ετήσια παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου ανά kg T.B.Σ. παρουσιάζεται στο διάγραμμα 1.



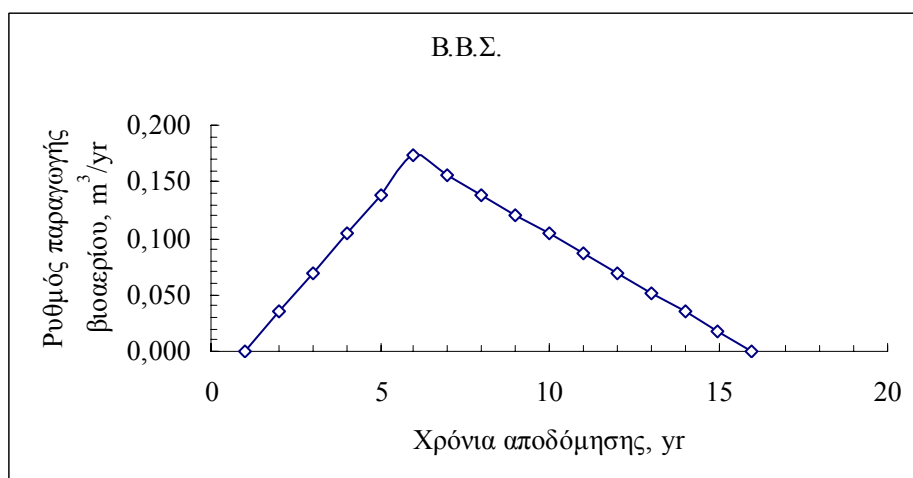
Διάγραμμα 1: Τριγωνική κατανομή παραγωγής βιοαερίου ανά kg T.B.Σ.

ii) Για 1kg B.B.Σ.:

Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου που συμβαίνει στο τέλος του 5^{ου} χρόνου παραγωγής βιοαερίου είναι ίσος με:

Μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου, $\text{m}^3/\text{yr} = 1,3 \text{ m}^3 \times (2/15\text{yr}) = 0,173 \text{ m}^3/\text{yr}$

Η σύνοψη αποτελεσμάτων του τριγωνικού μοντέλου για την ετήσια παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου ανά kg B.B.Σ. φαίνεται στο διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 2: Τριγωνική κατανομή παραγωγής βιοαερίου ανά kg B.B.Σ.

Θεωρούμε ότι από το Τ.Β.Σ. μόνο το 75% μπορεί να αποδομηθεί (π.χ. ορισμένα υλικά σε πλαστικές σακούλες δε μπορούν να αποδομηθούν, ορισμένα από τα υλικά είναι πολύ ξηρά που δε δύναται να υπάρξει βιολογική δραστηριότητα). Επίσης από το Β.Β.Σ. το 50% είναι διαθέσιμο για αποδόμηση (για τους ίδιους λόγους που αναπτύχθηκαν παραπάνω). Καθορισμός κλάσματος Τ.Β.Σ. και Β.Β.Σ. που βρίσκεται στη μάζα των απορριμμάτων της χωματερής, σε ξηρή βάση, αντίστοιχα:

- Κλάσμα απορριμμάτων που είναι ταχέως αποδομήσιμα:

$$(0,482375)(0,75) = 0,3618 \text{ kg T.B.Σ./kg απορρίμματα.}$$

- Κλάσμα απορριμμάτων που είναι βραδέως αποδομήσιμα:

$$(0,03225)(0,50) = 0,016125 \text{ kg T.B.Σ./kg απορρίμματα.}$$

Άρα:

- Συνολική ποσότητα παραγόμενου βιοαερίου από Τ.Β.Σ. ανά kg απορρίμματα:

$$0,3618 \text{ kg T.B.Σ./kg απορρίμματα} \times 1 \text{ m}^3 / \text{kg T.B.Σ.} = 0,3618 \text{ m}^3 / \text{kg απορρίμματα.}$$

- Συνολική ποσότητα παραγόμενου βιοαερίου από Β.Β.Σ. ανά kg απορρίμματα:

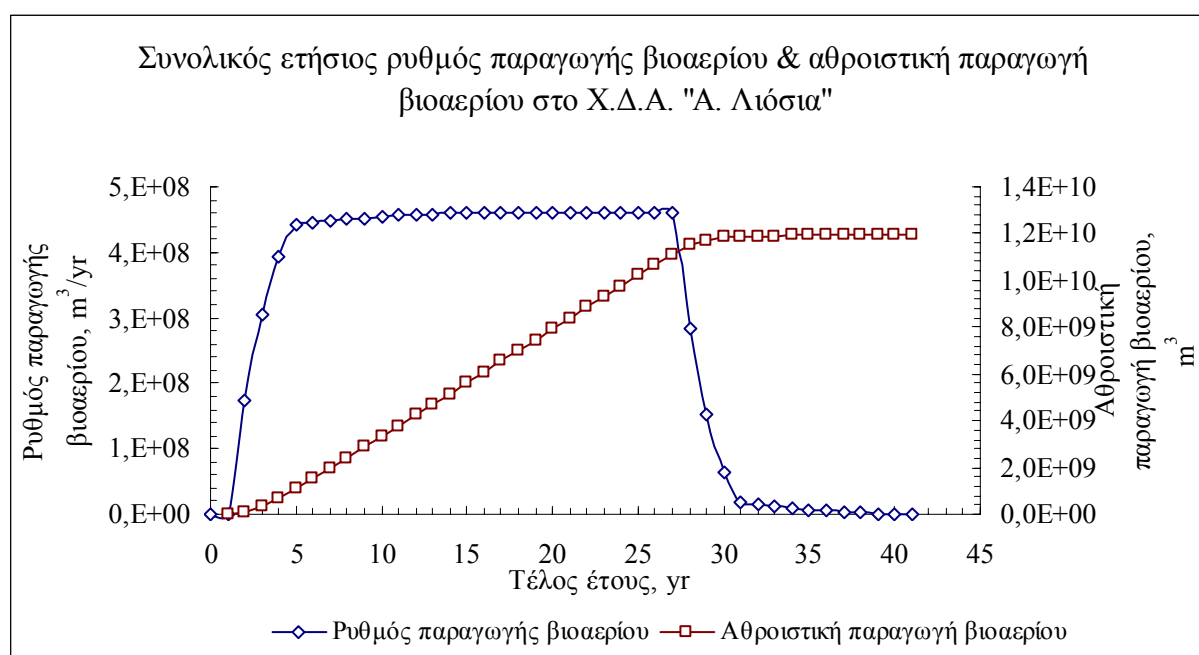
$$0,016125 \text{ kg T.B.Σ./kg απορρίμματα} \times 1,3 \text{ m}^3 / \text{kg T.B.Σ.} = 0,021 \text{ m}^3 / \text{kg απορρίμματα}$$

Πίνακας 15: Συνόψη ετήσιας ποσότητας παραγωγής βιοαερίου από Τ.Β.Σ. και Β.Β.Σ. ανά kg απορρίμματα.

Χρόνια αποδό- μησης, yr	Τ.Β.Σ./kg απορρίμματα		Β.Β.Σ./kg απορρίμματα		Συνολικά (Τ.Β.Σ. & Β.Β.Σ.)/kg απορρίμματα	
	Ρυθμός παραγωγής βιοαερίου, m ³ /yr	Συνολική παραγωγή βιοαερίου, m ³	Ρυθμός Παραγωγής Βιοαερίου, m ³ /yr	Συνολική Παραγωγή Βιοαερίου, m ³	Ρυθμός Παραγωγής Βιοαερίου, m ³ /yr	Συνολική Παραγωγή Βιοαερίου, m ³
0	0		0		0	
1	0	0,07236	0	0,000278963	0	0,072639
2	0,14472	0,12663	0,000557925	0,000836888	0,145278	0,127467
3	0,10854	0,09045	0,00111585	0,001394813	0,109656	0,091845
4	0,07236	0,05427	0,001673775	0,001952738	0,074034	0,056223
5	0,03618	0,01809	0,0022317	0,002510663	0,038412	0,020601
6	0		0,002789625	0,002650144	0,00279	0,00265
7			0,002510663	0,002371181	0,002511	0,002371
8			0,0022317	0,002092219	0,002232	0,002092
9			0,001952738	0,001813256	0,001953	0,001813
10			0,001673775	0,001534294	0,001674	0,001534
11			0,001394813	0,001255331	0,001395	0,001255
12			0,00111585	0,000976369	0,001116	0,000976
13			0,000836888	0,000697406	0,000837	0,000697
14			0,000557925	0,000418444	0,000558	0,000418
15			0,000278963	0,000139481	0,000279	0,000139
16			0		0	

Σύνολο		0,3618		0,021		0,382722

Θεωρούμε ότι ίσες ποσότητες στερεών αποβλήτων αποτίθενται κατά τη διάρκεια των χρόνων μελέτης με τιμή 1.200.000 tn/yr το χρόνο. Έτσι προκύπτουν τα διαγράμματα, του συνολικά ετήσιου ρυθμού παραγωγής βιοαερίου και της αθροιστικής ποσότητας παραγόμενου βιοαερίου από Τ.Β.Σ. & Β.Β.Σ. που διατίθενται στη χωματερή στη διάρκεια 26 χρόνων λειτουργίας της (1973-1999) (διάγραμμα 3).



Διάγραμμα 3: Συνολικός ετήσιος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου & αθροιστική παραγωγή βιοαερίου στο Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια" στη διάρκεια 26 χρόνων λειτουργίας της.

Βασικό πλεονέκτημα του τριγωνικού μοντέλου είναι ότι απλοποιεί τους υπολογισμούς αλλά απαιτεί αυθαίρετες τιμές για το χρόνο υστέρησης, το χρόνο που παρατηρείται μέγιστη παραγωγή και το συνολικό χρόνο μετατροπής υποστρώματος σε βιοαέριο (Tchobanoglous et al., 1993).

6.2.5. Εφαρμογή εμπειρικού μοντέλου της EPA για την εκτίμηση του τυπικού ετήσιου ρυθμού παραγωγής μεθανίου στο Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια”

6.2.5.1. Περιγραφή του μοντέλου

Από τα δημοσιευμένα επιστημονικά άρθρα¹⁴ για τον υπολογισμό των τυπικά ετήσιων παραγόμενων φορτίων στο σύνολο της εξεταζόμενης μονάδας εδαφικής διάθεσης απορριμμάτων, το υπολογιστικό μοντέλο που ξεχωρίζει είναι αυτό της EPA, LandGEM-Version 2.01- (Landfill Gas Emissions Model, EPA 1998)-. Το μοντέλο παρέχει σχετικά απλή προσέγγιση εκτίμησης της παραγωγής βιοαερίου στις χωματερές και έχει εφαρμοσιμότητα στις Ηνωμένες Πολιτείες στην απογραφή πηγών Χ.Δ.Α. καθώς και στη ρύθμιση εθνικού σχεδίου ορίων ποιότητας πτητικών συστατικών που εκλύονται από Χ.Δ.Α. Πρέπει να τονιστεί ότι το μοντέλο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του ρυθμού παραγωγής βιοαερίου και όχι για την εκτίμηση των εκλυόμενων φορτίων στην ατμόσφαιρα (EPA, 1998). Για τη μελέτη δυσμενούς σεναρίου εκπομπών από Χ.Δ.Α. μπορεί να θεωρηθεί ότι ο ρυθμός παραγωγής βιοαερίου ισούται με το ρυθμό εκπομπής βιοαερίου.

Το μοντέλο βασίζεται στη βιολογική αντίδραση αποδόμησης με ρυθμό πρώτης τάξης ως προς τη συγκέντρωση των οργανικών συστατικών των απορριμμάτων. Γίνεται θεώρηση σταθερής παραγωγής μεθανίου (steady state) στη διάρκεια κάθε έτους ενεργείας του Χ.Δ.Α., ενώ πρόσθετα γίνεται η υπόθεση χρόνου υστέρησης (lag time) διάρκειας ενός χρόνου πριν την επικράτηση αναερόβιων συνθηκών και έναρξη παραγωγής του βιοαερίου (EPA, 1999).

Η εξίσωση του μοντέλου και οι μεταβλητές του περιγράφονται παρακάτω:

$$Q_{CH_4}^t = L_o R_t (e^{-kc} - e^{-kt})$$

όπου,

$Q_{CH_4}^t$ = ρυθμός παραγωγής μεθανίου από το Χ.Δ.Α. τη χρονική στιγμή t [m^3/yr] ή [Mg/yr]

L_o = απόδοση μεθανογένεσης [$m^3 CH_4/Mg$ απορρίμματα]

¹⁴ Επίσης το μοντέλο GasSimLite της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2002), διακρίνεται στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση των ετήσιων ατμοσφαιρικών εκπομπών από Χ.Δ.Α. το οποίο όμως απαιτεί πολλά εξειδικευμένα δεδομένα εισόδου για να ‘τρέξει’ όπως διήθηση χωματοκάλυψης, υφιστάμενο σύστημα στεγάνωσης, στοιχεία για το σύστημα ενεργειακής αξιοποίησης κ.λπ. (www.gassim.co.uk).

R_t = μέσος ετήσιος ρυθμός διάθεσης απορριμμάτων κατά τη διάρκεια λειτουργίας του Χ.Δ.Α. (Mg/yr)

k = σταθερά βιολογικής αποδόμησης της οργανικής μάζας με παραγωγή μεθανίου [yr^{-1}]

t = χρόνος που έχει περάσει από την αρχική εναπόθεση απορριμμάτων [yrs]

c = χρόνος από το κλείσιμο της χωματερής ($c=0$ για εν λειτουργία χωματερές)

Το μοντέλο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση ετήσιων ρυθμών παραγωγής CH_4 , CO_2 , NMOCs καθώς και πολλών μεμονωμένων συστατικών του βιοαερίου, σε [m^3/yr ή Mg/yr ¹⁵].

Τα δεδομένα που απαιτούνται για την εκτίμηση της καμπύλης παραγωγής αέριου ρύπου i , στην περίπτωση που υπάρχουν είναι:

- Χωρητικότητα σχεδιασμού της χωματερής.
- Έτη κατά τα οποία η χωματερή βρίσκεται σε λειτουργία.
- Χρήση της χωματερής για τη διάθεση επικίνδυνων/τοξικών αποβλήτων.
- Ποσότητα των απορριμμάτων που εναποτίθενται στη χωματερή ή ετήσιος ρυθμός εναπόθεσης απορριμμάτων στη χωματερή.
- Απόδοση μεθανογένεσης άμεσα εξαρτώμενη από την περιεκτικότητα κυτταρίνης (cellulose) στα απορρίμματα.
- Σταθερά βιολογικής αποδόμησης της οργανικής μάζας με παραγωγή βιοαερίου.
- Συγκέντρωση του NMOC στο παραγόμενο βιοαέριο.
- Συγκέντρωση τοξικών αέριων ρύπων που βρίσκονται στο παραγόμενο βιοαέριο.
- Συγκέντρωση φωτοχημικά οξειδωτικών VOCs στο παραγόμενο βιοαέριο.

Αναφέρεται ότι συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για το χώρο της χωματερής ενσωματώνονται στις μεταβλητές R , c και t . Το μοντέλο μπορεί να τρέξει με δεδομένο σετ παραμέτρων στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μετρήσεις πεδίου. Το μοντέλο παρέχει δύο σετ δεδομένων παραμέτρων: Το ένα σετ είναι βασισμένο στις απαιτήσεις των νόμων NSPS και Emission Guidelines όπου δίνει συγκρατημένες εκτιμήσεις και το άλλο σετ είναι βασισμένο σε συντελεστές εκπομπής που προτείνει η EPA (Compilation of Air Pollutant Emissions Factors (AP-42), EPA, 1997) και το οποίο δίνει πιο αντιπροσωπευτικές εκτιμήσεις.

¹⁵ , όπου 1 Mg (μετρικός τόνος) = 1,1023 tons.

Προτεινόμενο πεδίο τιμών για την απόδοση μεθανογένεσης L_o , [m^3CH_4 /kg απορρίμματος] που παρουσιάζεται στην βιβλιογραφία: 0 έως 312 $m^3 CH_4$ / Mg απορρίμματος.

Οι προεπιλεγμένες τιμές της EPA:

Κατά τη νομοθεσία CAA (Clean Air Act): 170 (m^3CH_4 / Mg)

Κατά AP 42: 100 (m^3CH_4 / Mg)

Προτεινόμενο πεδίο τιμών για τη σταθερά βιολογικής αποδόμησης της οργανικής μάζας k , [yr^{-1}] με παραγωγή βιοαερίου που παρουσιάζεται στην βιβλιογραφία: 0,003 έως 0,4 (1/yr).

Αν θεωρήσουμε χρόνο ημιζωής¹⁶ $t_{1/2}=15$ yr, (¹⁷) τότε $k= 0,05$ yr^{-1}

Οι προεπιλεγμένες τιμές της EPA:

Κατά τη νομοθεσία CAA: 0,05 (1/yr)

Κατά AP 42 για υγρά κλίματα: 0,04 (1/yr)

Και για ξηρά κλίματα: 0,02 (1/yr)

Το μεγαλύτερο μέρος εκπομπών NMOC παράγεται κατά την βιοαεριοποίηση του οργανικού υλικού που περιέχεται στη χωματερή. Μετρήσεις πεδίου έχουν δείξει ότι υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις μέχρι και 4.400 ppmv για το συνολική ποσότητα NMOC στη χωματερή. Γι' αυτό στις εργασίες απογραφής εκπομπών NMOCs σε μελετούμενο χώρο ταφής απορριμμάτων πρέπει να πραγματοποιούνται in situ εκτιμήσεις περιεκτικότητας βιοαερίου σε NMOCs. Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατές οι μετρήσεις πεδίου, η τιμή των 2.420 ppmv ως εξάνιο προτείνεται για χωματερές στις οποίες είναι γνωστή η συνδιάθεση οικιακών με βιομηχανικά απορρίμματα. Αν είναι γνωστό ότι η χωματερή περιέχει μόνο οικιακά απορρίμματα, ή διαθέτει πολύ μικρό ποσοστό οργανικών από εμπορικά και βιομηχανικά απόβλητα, τότε χρησιμοποιείται η τιμή των ολικών NMOCs ίση με 595 ppmv ως εξάνιο.

Η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιείται στο μοντέλο της EPA, αν ο πραγματικός ετήσιος ρυθμός διάθεσης απορριμμάτων R_i για κάθε χρόνο λειτουργίας της χωματερής είναι γνωστός (EPA, 2000):

$$M_{NMOC} = \sum_{i=1}^n 2k L_o M_i (e^{-kt_i}) C_{NMOC} (3,6 \times 10^{-9})$$

¹⁶ Χρόνος που απαιτείται για την αποδόμηση του 50% της οργανικής μάζας και την παραγωγή 50% αερίου.

¹⁷ Το μοντέλο θεωρεί 1^η τάξης αντίδραση αποδόμησης του οργανικού κλάσματος, επομένως $k=\ln 2/t_{1/2}$.

όπου,

M_{NMOC} = ρυθμός παραγωγής από το σύνολο (με $i=n$ τμήματα) της χωματερής, Mg/yr

k = σταθερά παραγωγής μεθανίου, yr^{-1}

L_o = δυναμικό μεθανογένεσης, m^3/Mg αποβλήτων

M_i = μάζα αποβλήτων στο τμήμα i της χωματερής, Mg

t_i = ηλικία τμήματος i της χωματερής, yr

C_{NMOC} = συγκέντρωση NMOC, ppmbv ως εξάνιο

$3,6 \cdot 10^{-9}$ = συντελεστής μετατροπής

Η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιείται στο μοντέλο της EPA αν ο πραγματικός ετήσιος ρυθμός διάθεσης απορριμμάτων για κάθε χρόνο λειτουργίας της χωματερής είναι άγνωστος (EPA, 2000):

$$M_{NMOC} = 2 L_o R (e^{-kc} - e^{-kt}) C_{NMOC} (3,6 \cdot 10^{-9})$$

όπου,

M_{NMOC} = ρυθμός παραγωγής NMOC από τη χωματερή Mg/yr.

L_o = δυναμικό μεθανογένεσης απορριμμάτων, m^3/Mg αποβλήτων.

R = μέσος ετήσιος ρυθμός αποδοχής αποβλήτων στη χωματερή, Mg/yr.

k = σταθερά παραγωγής μεθανίου, yr^{-1} .

t = ηλικία χωματερής, yr.

C_{NMOC} = συγκέντρωση NMOC, ppmbv ως εξάνιο.

c = χρόνος από το κλείσιμο της χωματερής (για εν λειτουργία χωματερές $c=0$).

$3,6 \cdot 10^{-9}$ = συντελεστής μετατροπής.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν δεδομένα εισαγωγής (όπως ετήσιοι ρυθμοί διάθεσης απορριμμάτων) στο μοντέλο για ορισμένο χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο χρόνους λειτουργίας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη λειτουργία 'autocalc' του μοντέλου την οποία επιλέγουμε από το edit μενού, η οποία χρησιμοποιεί τη γραμμική παρεμβολή για να παράγει δεδομένα ετήσιου ρυθμού διάθεσης ανάμεσα στα δύο αυτά έτη. Συγκεκριμένα 'μαρκάρουμε' τα κελιά από το χρονικό έτος με το γνωστό ετήσιο ρυθμό διάθεσης μέχρι και το χρονικό έτος με την πάλι γνωστή τιμή του ετήσιου ρυθμού διάθεσης στερεών αποβλήτων,

και με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στα δύο αυτά έτη με τις γνωστές τιμές ετήσιου ρυθμού διάθεσης κατανέμεται η ποσότητα απορριμμάτων - εύρεση ζητούμενων τιμών-.

6.2.5.2.Εφαρμογή μοντέλου στην περίπτωση της χωματερής “Α.Λιόσια”

Με τη βοήθεια του μοντέλου παράγουμε την καμπύλη τυπικής παραγωγής βιοαερίου στο χώρο διάθεσης απορριμμάτων μέχρι και 30 χρόνια μετά το κλείσιμό του¹⁸. Η εφαρμογή πραγματοποιείται στον παλαιό χώρο διάθεσης απορριμμάτων “Α. Λιόσια” με χρήση δεδομένων που αφορούν χαρακτηριστικά για το χώρο διάθεσης και το ρυθμό διάθεσης αποβλήτων (δυναμικότητα χώρου ταφής, ρυθμός απόθεσης απορριμμάτων), χαρακτηριστικά για το βιοαέριο (σταθερά παραγωγής βιοαερίου, συγκέντρωση μεθανίου στο βιοαέριο, συγκέντρωση αέριων συστατικών στο βιοαέριο κλπ.) και χαρακτηριστικά για τα απορρίμματα όπως οργανικό δυναμικό απορριμμάτων. Αυτά τα δεδομένα τα εισαγάγουμε στο πρόγραμμα EPA LandGEM2 για την εκτίμηση της διαχρονικής εξέλιξης παραγωγής μεθανίου με έναρξη παραγωγής ένα έτος μετά την έναρξη λειτουργίας της χωματερής (στο πρόγραμμα υπάρχει η εξής λογική π.χ. στην περίπτωση των Α. Λιοσίων με έτος εκκίνησης λειτουργίας το 1973, το παράξιμο βιοαέριο του 1973, παρουσιάζεται ως βιοαέριο του 1974, που σημαίνει ότι το πρόγραμμα θεωρεί ότι το έτος 1973 η ποσότητα βιοαερίου που παράγεται είναι μηδενική θεωρώντας έτσι χρόνο υστέρησης το ένα έτος).

Το βιοαέριο που εκπέμπεται από το Χ.Δ.Α. στα Άνω Λιόσια περιέχει κατά 55% μεθάνιο (CH₄), κατά 44% διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και σε περιεκτικότητα λιγότερο 1% διάφορες άλλες ουσίες μεταξύ των οποίων μερικές ιδιαίτερα τοξικές και δύσσομες (δικτυακή σελίδα Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., “Περιβαλλοντική αποκατάσταση χωματερών Σχιστού και Άνω Λιοσίων”).

Οι τιμές εισαγωγής που χρησιμοποιούμε για να ‘τρέξουμε’ το μοντέλο για τον παλαιό Χ.Δ.Α. “Άνω Λιόσια”, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 16.

¹⁸ Αδρανοποίηση της χωματερής παρατηρείται τουλάχιστον 20-30 χρόνια μετά το κλείσιμο της χωματερής, (Williams, 1998).

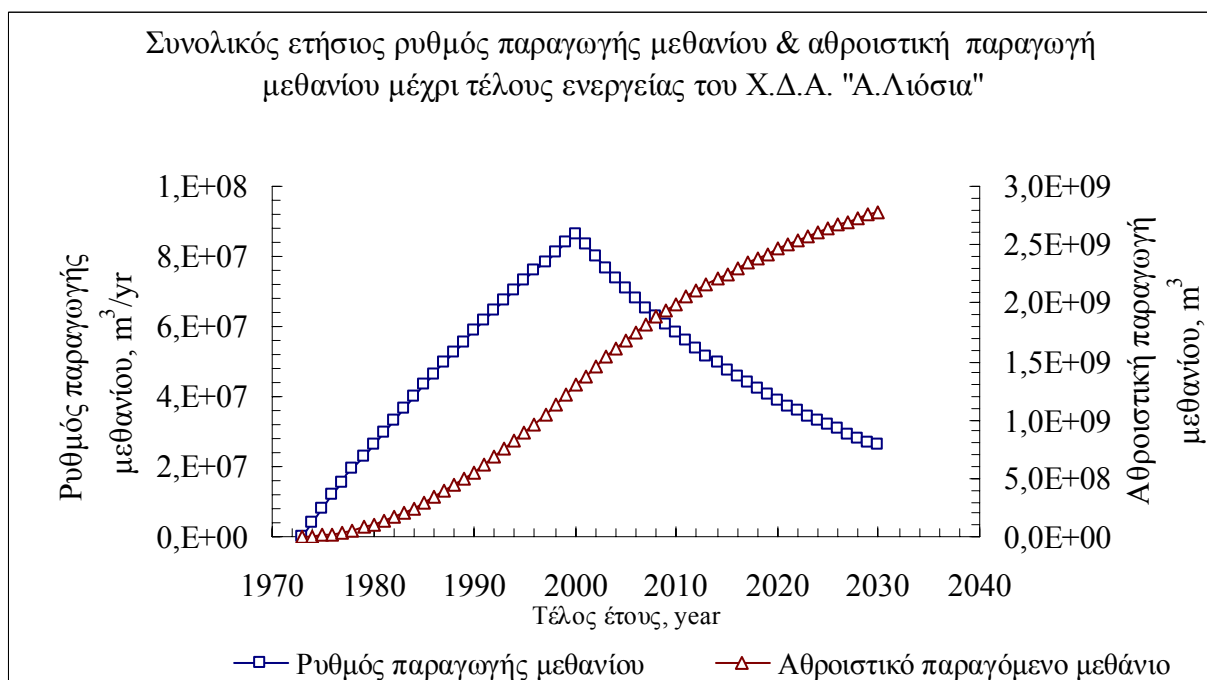
Πίνακας 16: Δεδομένα εισαγωγής στο LandGEM, (προσωπική επικοινωνία με κο Μαυριά (Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α)).

Στοιχεία που συλλέχθηκαν για την παλαιά χωματερή “Α.Λιόσια”:	
Δεδομένα εισαγωγής στο LandGEM	
Έτος έναρξης λειτουργίας του Χ.Δ.Α.	1973
Προγραμματισμένο έτος διακοπής λειτουργίας	Τέλη 1999~2000
Ετήσιος ρυθμός διάθεσης απορριμμάτων στο Χ.Δ.Α. / Δυναμικότητα Χ.Δ.Α. -χρησιμοποιώ γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στα έτη 1973 & 1999 με τους γνωστούς ρυθμούς διάθεσης απορριμμάτων-	Από 1.000.000 tn/yr το 1973 σε 1.500.000 tn/yr έως το 2000
Υπολογιζόμενη συνολική μάζα απορριμμάτων που μπορεί να διατεθεί στο Χ.Δ.Α.	33.500.000 tn
Ενεργή έκταση χωματερής	87 ha = 870.000 m ²
Βαθμός συμπίεσης απορριμμάτων στο Χ.Δ.Α.	Πρακτικά μηδενικός. Γινόταν απλή διάθεση των απορριμμάτων στον Χ.Δ.Α. Μέση πυκνότητα: 250 kg/m ³
Σταθερά βιολογικής αποδόμησης της οργανικής μάζας με παραγωγή βιοαερίου, k	0,04 1/yr (AP-42)
Απόδοση μεθανογένεσης/δυναμικό οργανικής μάζας απορριμμάτων, Lo	100 m ³ CH ₄ / tn απορριμ.
Ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο, %	55 %
Συγκέντρωση NMOC στο παραγόμενο βιοαέριο	2.420 ppmv ως εξάνιο
Γίνεται απόθεση βιομηχανικών και τοξικών αποβλήτων	

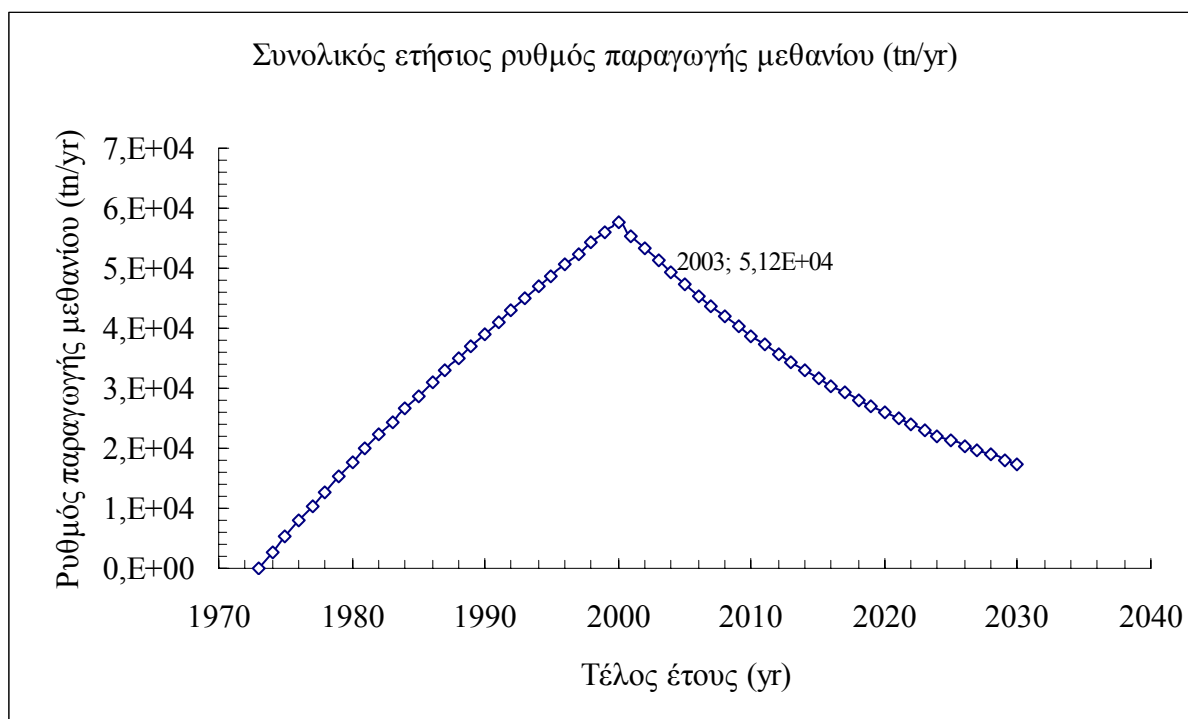
Αναφέρεται ότι η μέση παραγωγή μεθανίου είναι 100 m³ για κάθε τόνο απορρίμματα και σε διάρκεια 20 χρόνων (Σκορδίκης, 1993).

6.2.5.2.1. Αποτελέσματα

Τα διαγράμματα (4 και 5) που εξάγει το μοντέλο δείχνουν την διαχρονική εξέλιξη του παραγόμενου μεθανίου στον παλιό χώρο διάθεσης απορριμμάτων “Α.Λιόσια”, ο οποίος έχει τα χαρακτηριστικά όπως αυτά παρουσιάζονται παραπάνω στον πίνακα 16.



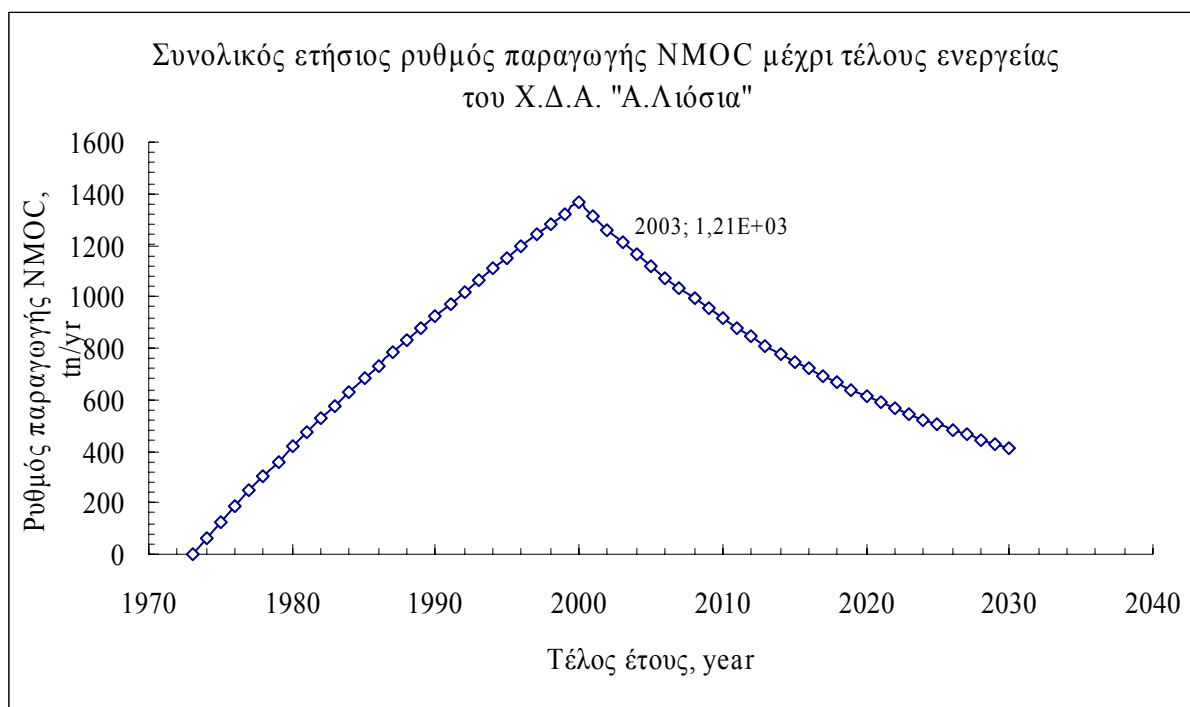
Διάγραμμα 4: Παραγωγή μεθανίου σε m^3/yr στον παλαιό κλειστό Χ.Δ.Α. "Α.Λιόσια" & αθροιστικό παραγόμενο μεθάνιο σε m^3 κατά την ενεργεία του παλαιού κλειστού Χ.Δ.Α. (θεωρείται συνδιάθεση οικιακών με τοξικά απόβλητα).



Διάγραμμα 5: Παραγωγή μεθανίου σε tn/yr στον παλαιό κλειστό Χ.Δ.Α. "Α.Λιόσια" (θεωρείται συνδιάθεση οικιακών με τοξικά απόβλητα).

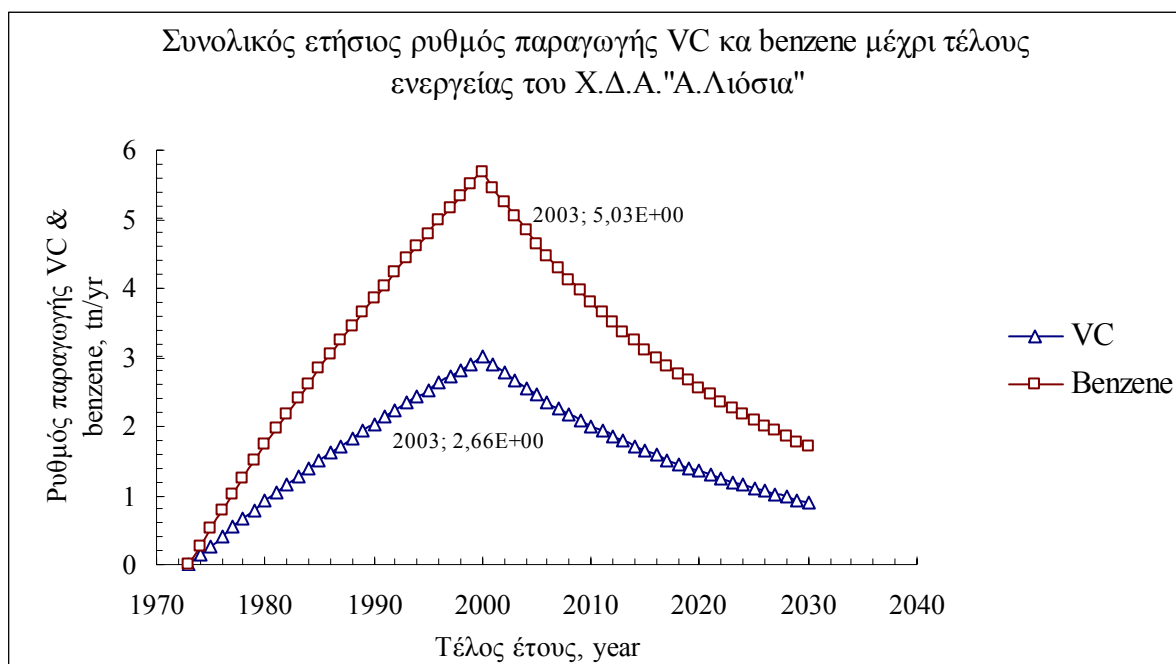
Το μοντέλο δίνει τυπική τιμή παραγωγής μεθανίου το έτος 2003 περίπου ίση με $5,12 \cdot 10^4$ tn/yr ή $7,68 \cdot 10^7$ Nm³/yr ⁽¹⁹⁾. Αν θεωρήσουμε τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα 55 % και 45 % αντίστοιχα, υπολογίζεται ετήσιο παραγόμενο βιοαέριο για το έτος 2003: $1,1 \cdot 10^8$ Nm³/yr (Κ.Σ.).

Η πιθανή ακρίβεια του αποτελέσματος ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου (2003) του LandGEM (301.370 Nm³/day) εκτιμάται με τη σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου που έχουν γίνει στο Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” οι οποίες δίνουν τιμή ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου στη χωματερή “Α.Λιόσια” 184.000 m³/day (ΚΑΠΕ, 2002). Η εκτιμώμενη τιμή του μοντέλου υπολογίζεται αυξημένη κατά 64 % από τη μετρούμενη τιμή του πεδίου.

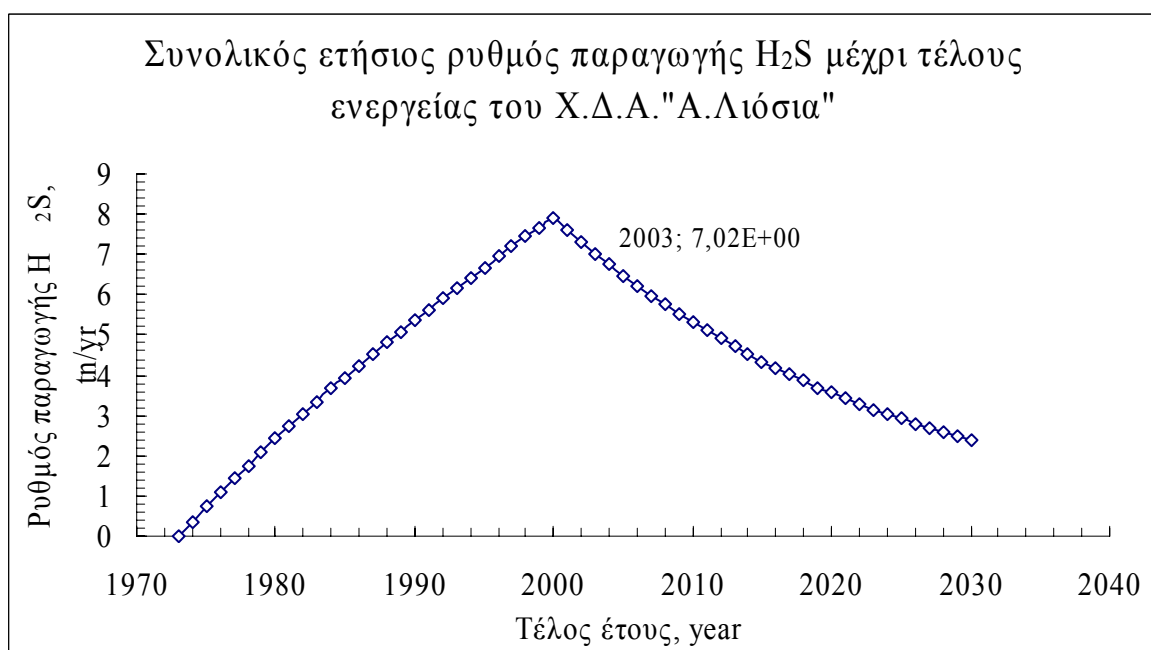


Διάγραμμα 6: Παραγωγή NMOC σε tn/yr στον παλαιό κλειστό Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια”, θεωρώντας συγκέντρωση NMOCs στο βιοαέριο ίση με 2420 ppmv ως εξάνιο (θεωρείται συνδιάθεση οικιακών με τοξικά απόβλητα).

¹⁹ Το μοντέλο θεωρεί σταθερή πυκνότητα μεθανίου στο βιοαέριο ίση με $0,667$ kg/m³ (η τιμή πυκνότητας μεθανίου στο βιοαέριο που χρησιμοποιείται στο LandGEM.)



Διάγραμμα 7: Παραγωγή Vinyl Chloride (HAP/VOC) και benzene (HAP/VOC) σε tn/yr στον παλαιό κλειστό Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια", θεωρώντας συγκέντρωση VC και benzene στο βιοαέριο 7,34 ppmV και 11,1 ppmV αντίστοιχα (θεωρείται συνδιάθεση οικιακών με τοξικά απόβλητα).



Διάγραμμα 8: Παραγωγή H_2S , βασική οσμική ουσία βιοαερίου, από Χ.Δ.Α. σε tn/yr στον παλαιό κλειστό Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια", θεωρώντας συγκέντρωση H_2S στο βιοαέριο ίση με 35,5 ppmV (συνδιάθεση οικιακών με τοξικά απόβλητα).

6.2.5.2.2. Αξιοπιστία αποτελέσματος του μοντέλου

Το μοντέλο υπόκειται στους παρακάτω τύπους σφαλμάτων κατά την εκτίμηση της ποσοτικής παραγωγής μεθανίου στη χωματερή “Α.Λιόσια”:

- Σφάλμα στη δομή του μοντέλου (βαθμός περιγραφής του οικοσυστήματος της χωματερής), (structural error).
- Σφάλματα στις μετρήσεις που χρησιμοποιούνται για να “τρέξει” το μοντέλο (input time series error).
- Σφάλματα στην εκτίμηση των παραμέτρων (σταθερές ρυθμού, συντελεστές αποδόμησης), (parameter error).

Αυτά τα λάθη δημιουργούν αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Οι προβλέψεις του προφίλ του ετήσιου ρυθμού παραγωγής βιοαερίου στον παλαιό χώρο ταφής “Α.Λιόσια”, προσεγγίζουν τις μετρήσεις πεδίου. Πράγματι από τη σύγκριση με δειγματοληπτικές μετρήσεις φάνηκε ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το LandGEM είναι αυξημένα κατά 64 %. Αναφέρεται ότι οι υπολογισμοί των παραγόμενων ποσοτήτων βιοαερίου του μοντέλου είναι προσεγγιστικοί, με πιθανή απόκλιση που κυμαίνεται από 38 % έως 492 % από τις πραγματικές τιμές στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δεδομένα AP-42 (Irving et al., 1999). Σημειώνεται επίσης ότι η προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης παραγωγής μεθανίου είναι καλύτερη σε ακρίβεια στις μεγάλες χωματερές απ’ότι στις μικρές χωματερές. Σε εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε στη χωματερή “Linköping” της Σουηδίας, δυναμικότητας 700.000 ton απορριμμάτων με περίοδο λειτουργίας 1960 ~ 1997, έδειξε ότι η τιμή του μοντέλου (987 tn/yr) είναι 215 % περίπου φορές μεγαλύτερη από τη μετρούμενη (465 tn/yr) η οποία υπολογίστηκε με τη μέθοδο ‘Time Correlation tracer’ βασισμένη στην φασματοσκοπία απορρόφησης στην υπέρυθρη περιοχή φάσματος (FTIR), (Galle et al., 2001).

Μερικές πηγές σφαλμάτων αναφορικά με την προτεινόμενη μεθοδολογία πρόγνωσης της καμπύλης παραγωγής βιοαερίου της EPA είναι ο συνολικός χρόνος μετατροπής του υποστρώματος σε βιοαέριο (conversion time). Η μελέτη παραγωγής βιοαερίου στο μοντέλο γίνεται για χρονική περίοδο μέχρι και 200 χρόνια μετά το έτος διακοπής λειτουργίας της χωματερής. Αυτή η θεώρηση μπορεί να οδηγεί σε υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση της παραγωγής. Δεύτερον ορίζονται αυθαίρετες τιμές για το χρόνο υστέρησης –θεωρείται ένα

έτος- και το χρόνο που παρατηρείται μέγιστη παραγωγή (peak time). Άλλες πηγές αβεβαιότητας στην εκτίμηση του βιοαερίου είναι η επίδραση του κλίματος στους ρυθμούς παραγωγής μεθανίου, η επίδραση χαρακτηριστικών του χώρου ταφής, το δυναμικό παραγωγής μεθανίου των βιομηχανικών αποβλήτων σε σχέση με αυτό των οικιακών, και η επίδραση του συστήματος ανάκτησης βιοαερίου στην αναερόβια ζώνη της μάζας των απορριμμάτων (η άντληση μπορεί να οδηγήσει περισσότερο αέρα μέσα στην αναερόβια ζώνη, με αποτέλεσμα να δρα ανασταλτικά στη μεθανογένεση). Ο ρυθμός αποδόμησης του οργανικού άνθρακα επίσης είναι αβέβαιος αφού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι η ποσότητα του σταθερού βιογενούς άνθρακα όπως είναι η λιγνίνη, η διαθεσιμότητα υγρασίας και θρεπτικών καθώς και άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με την βιοαποδόμηση της οργανικής ύλης.

Αναφέρεται ότι θεωρείται ομοιόμορφη ηλικία των απορριμμάτων στη χωματερή (το παραγόμενο βιοαέριο υπολογίζεται συνολικά και όχι ανά κύτταρο, στην περίπτωση της χωματερής στα Λιόσια δεν υπήρχε εφαρμογή σχεδίου εκμετάλλευσης του χώρου διάθεσης).

Αβεβαιότητα βέβαια υπάρχει και στα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο όπως είναι η ετήσια εναπόθεση απορριμμάτων (ποιότητα και ποσότητα) στο χώρο διάθεσης και ο βαθμός συμπίεσης ο οποίος είναι μεταβλητός κατά τη διάρκεια ζωής της χωματερής.

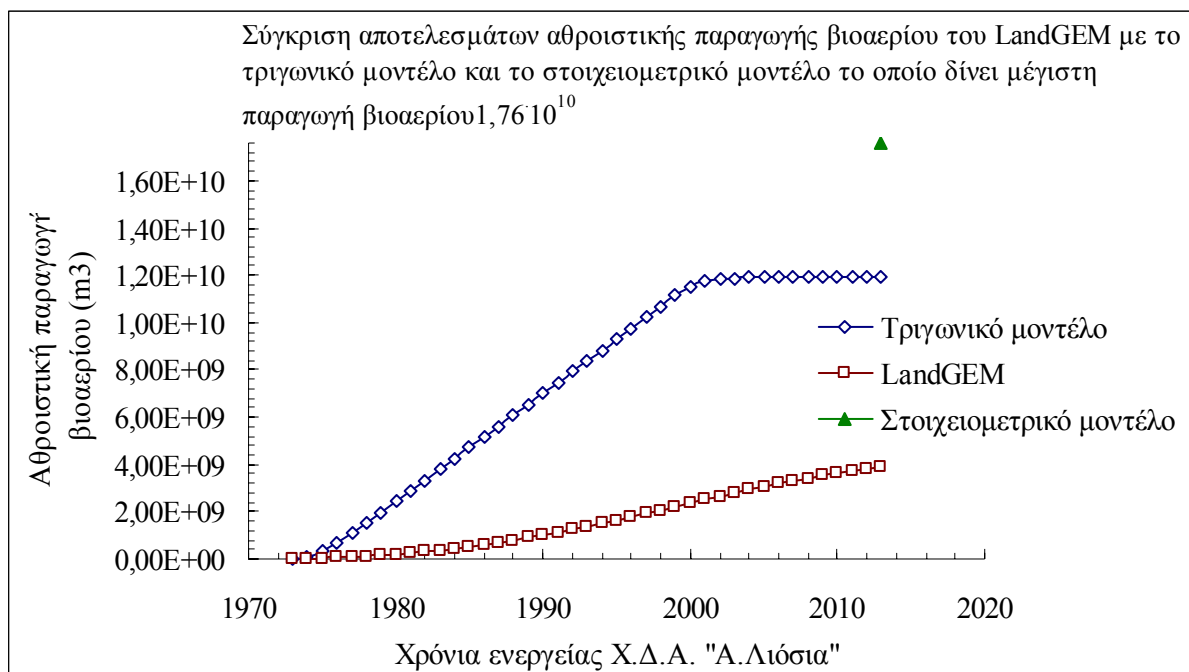
Ο πίνακας 17 δείχνει τη σύγκριση αποτελεσμάτων ρυθμών παραγωγής του μοντέλου της EPA σε διάφορες χωματερές σε σχέση με μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στις υπό μελέτη χωματερές.

Πίνακας 17: (EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, AP-42, 1997).

Σύγκριση αποτελεσμάτων ρυθμών παραγωγής βιοαερίου του μοντέλου με μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στις χωματερές					
X.Δ.Α.	Εκτίμηση ρυθμού παραγωγής CH ₄ μοντέλου 10 ⁶ m ³ /yr	Αποτελέσματα μοντέλου/ αποτελέσματα μετρήσεων πεδίου CH ₄	X.Δ.Α.	Εκτίμηση ρυθμού παραγωγής CH ₄ μοντέλου 10 ⁶ m ³ /yr	Αποτελέσματα μοντέλου/ αποτελέσματα μετρήσεων πεδίου CH ₄
a	37,6	0,68	u	4,62	0,63
b	39,9	0,77	v	10,5	1,44
c	31,8	0,73	w	4,28	0,72
d	49,8	1,51	x	5,62	0,96
e	12,1	0,53	y	2,39	0,44
f	17,3	0,82	z	9,59	1,84
g	23,6	1,28	aa	5,08	1,08

h	8,61	0,49	bb	4,93	1,15
i	14,9	0,93	cc	3,93	0,93
j	14,5	0,94	dd	2,74	1,03
k	14,2	0,96	ee	8,37	3,23
l	7,16	0,50	ff	117	0,83
m	18,0	1,31	gg	14,4	0,58
n	8,57	0,76	hh	23,0	1,44
o	4,56	0,48	ii	29,6	2,19
p	17,4	1,87	jj	19,3	1,47
k	10,2	1,21	kk	22,4	1,71
r	6,95	0,87	ll	41,3	4,00
s	2,29	0,29	mm	7,14	0,81
t	3,49	0,45	nn	1,07	0,29
Μέση τιμή:	1,10				
Μέγιστη τιμή:	3,23				
Ελάχιστη τιμή:	0,29				
Τυπική απόκλιση:	0,73				
Στους υπολογισμούς του μοντέλου θεωρήθηκε $k=0,04 \text{ 1/yr}$ (AP-42)					

Στο διάγραμμα 9 δείχνεται ότι το LandGEM δίνει καλύτερες εκτιμήσεις αθροιστικής παραγωγής βιοαερίου στο Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” συγκριτικά με το τριγωνικό μοντέλο. Το τριγωνικό μοντέλο προσεγγίζει την τιμή συνολικής παραγωγής βιοαερίου της χωματερής “Α.Λιόσια” του στοιχειομετρικού μοντέλου η οποία είναι αναμφισβήτητα υπερεκτιμημένη (χονδροειδής εκτίμηση).



Διάγραμμα 9: Σύγκριση αποτελεσμάτων αθροιστικής παραγωγής βιοαερίου που προκύπτουν από τα εμπειρικά μοντέλα LandGEM & ‘τριγωνικό μοντέλο’.

6.3.Εκτίμηση εκπομπών από Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια”

6.3.1. Γενικά

Πρέπει να τονιστεί ότι ο Χ.Δ.Α. είναι διάχυτη και συνεχής πηγή αέριων ρύπων, με μεταβλητούς ρυθμούς εκπομπής αέριων ρύπων κατά τη διάρκεια της ζωής του. Μάλιστα λόγω της βιογενούς φύσης των μελετούμενων εκπομπών και της ανομοιογένειας των απορριμμάτων καθώς και της χωματοκάλυψης, οι εκπομπές βιοαερίου παρουσιάζουν μεγάλη χωρική μεταβλητότητα. Αναφέρεται ότι στους Χ.Δ.Α. με σύστημα ανάκτησης βιοαερίου, ένα σημαντικό μέρος του παραγόμενου βιοαερίου συλλέγεται και αξιοποιείται ενεργειακά ενώ το υπόλοιπο διαφεύγει μέσω της επιφανειακής χωματοκάλυψης και/ή αεραγωγών (vents) στην ατμόσφαιρα, καθώς και στο γειτονικό γεωλογικό σχηματισμό μέσω του πυθμένα της χωματερής και/ή πλευρικών πρανών αφού ο έλεγχος εκπομπών βιοαερίου στις διάχυτες πηγές δε μπορεί να είναι 100% αποδοτικός.

Επίσης πρέπει να επισημανθεί ότι στο Χ.Δ.Α. υπάρχουν διαφορετικές πηγές εκπομπής αέριων ρύπων. Στην παρούσα εργασία περιοριζόμαστε στα αέρια που εκπέμπονται από το Χ.Δ.Α. και που προέρχονται από τη μικροβιακή αποδόμηση των απορριμμάτων (εκπομπές βιοαερίου). Τις πρόσθετες εκπομπές που ελευθερώνονται από πτητικά, όπως διαλυτικά που περιλαμβάνονται στα απορρίμματα και υδράργυρο καθώς και από τις χημικές αντιδράσεις ανάμεσα σε συστατικά των αποβλήτων, τις σωματιδιακές εκπομπές από τη λειτουργία των μηχανημάτων συμπίεσης στο χώρο διάθεσης και τις τοξικές εκπομπές σε περίπτωση αυτανάφλεξης των απορριμμάτων, δε τις λαμβάνουμε υπόψη στην εργασία. Επίσης εκλύονται δευτερεύουσες εκπομπές αερίων (NO_x , CO , CO_2 , PM , SO_2) από συστήματα έλεγχου των εκπομπών από την χωματερή (πυρσό καύσης, μηχανή εσωτερικής καύσης, τουρμπίνες, λέβητες) τις οποίες αδυνατούμε να υπολογίσουμε στη συγκεκριμένη εργασία όπως επίσης δεν ήμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε τις πτητικές σωματιδιακές εκπομπές που παράγονται από τις μετακινήσεις μηχανημάτων στην επιφάνεια του Χ.Δ.Α.

Σημειώνεται ότι ο προσδιορισμός των εκπομπών βασίστηκε κυρίως σε βιβλιογραφικά δεδομένα και αποτελέσματα ερευνών και πραγματικών μετρήσεων που έλαβαν χώρα σε διάφορες χωματερές ανά τον κόσμο.

Πίνακας 18: Ποσοστό συνεισφοράς στις εκπομπές αέριων ρύπων από απόβλητα (φρέσκα & ηλικιωμένα), βιοαέριο και διασταλάζοντα υγρά που παράγονται σε Χ.Δ.Α. έκτασης 210.000 m², (Davoli et al., 2003).

	Φρέσκα απόβλητα	Κάποιας ηλικίας απόβλητα	Βιοαέριο	Εκχυλίσματα
Limonene	40.20	0.44	0.01	0.06
p-Cymene	3.05	6.59	29.14	12.41
γ-Terpinene	0.58	0.00	0.00	0.00
Eucalyptol	0.40	0.30	0.14	13.10
Camphor	0.26	0.00	0.00	14.20
α-Pinene	2.45	2.61	2.19	0.65
Other terpenes	5.04	3.64	2.19	2.95
Chloro compounds	0.65	1.62	1.09	0.87
Toluene	3.16	6.48	3.63	6.96
Benzenes C2	4.76	8.04	5.29	4.35
Benzenes C3	2.06	4.88	6.58	6.76
Benzenes C4	0.53	0.57	0.05	0.97
Other arenes	0.00	0.00	0.32	0.42
Esters	1.88	0.56	0.43	0.03
Alcohols	1.36	3.76	0.86	2.19
Butanoic acid	0.10	0.00	0.00	0.00
Aldehydes	0.00	0.66	0.36	0.35
Ketones	0.00	2.06	1.98	1.88
Other oxo-compounds	18.42	37.87	30.38	23.97
Hydrocarbons	15.10	19.58	14.86	7.12
Other compounds	0.00	0.34	0.52	0.76

Στον πίνακα 18 δείχνεται ότι οι εκπομπές από τα φρέσκα απόβλητα (κατά τη διάρκεια της αποκομιδής) χαρακτηρίζονται από το συστατικό λεμονίνη (limonene) ενώ οι εκπομπές από ηλικιωμένα απόβλητα όπως επίσης και το βιοαέριο και τα διασταλάζοντα υγρά χαρακτηρίζονται από το συστατικό p-cymene. Επίσης παρατηρείται (πίνακα 18) ότι κατά τη διεργασία βιολογικής σταθεροποίησης των απορριμμάτων ο βαθμός οξείδωσης των συστατικών εμφανίζει αυξητική τάση.

6.3.2. Προτεινόμενες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των τυπικών εκλυόμενων φορτίων συναρτήσει της παραγωγής βιοαερίου

6.3.2.1. Γενικά

Στην τρέχουσα επιστημονική βιβλιογραφία δεν παρουσιάζονται αρκετά αξιόπιστες μεθοδολογίες ποιοτικής και ποσοτικής μέτρησης των εκπομπών βιοαερίου από την επιφάνεια Χ.Δ.Α., ενώ τα υφιστάμενα μακροσκοπικά εμπειρικά και/ή ημιεμπειρικά μοντέλα εκτίμησης εκπομπών στην ατμόσφαιρα που προτείνονται χρειάζονται περαιτέρω βελτίωση (καλύτερο επίπεδο ακρίβειας και αξιοπιστίας) (EPA, 2000).

6.3.2.2. Χρήση συντελεστών εκπομπής

Για τον υπολογισμό των εκλυόμενων φορτίων από την επιφάνεια του Χ.Δ.Α. χρησιμοποιούνται συντελεστές εκπομπής (tn αέριου ρύπου/ tn παραγόμενου βιοαερίου), οι οποίοι αντανακλούν την εμπειρία από υπάρχουσες μετρήσεις σε ομοειδείς πηγές. Οι συντελεστές εκπομπής συνδέονται με μια σειρά μεταβλητών παραμέτρων οι οποίες ήδη έχουν αναφερθεί (ποιότητα και ποσότητα αποβλήτων, θερμοκρασία, υγρασία κλπ). Η μέθοδος υπολογισμού εκπομπών συγκεκριμένου αέριου ρύπου προϋποθέτει τη γνώση της συγκέντρωσης του μελετούμενου εκλυόμενου αέριου ρύπου στο παραγόμενο βιοαέριο (EPA, 1997). Οι συντελεστές εκπομπής έχουν προκύψει από ένα πλήθος διαφορετικών βιβλίων, εκθέσεων και επιστημονικών άρθρων που έχουν διεθνώς δημοσιευτεί και η ακρίβειά τους έχει κατά το δυνατόν διασταυρωθεί και ελεγχθεί πριν γίνει η εισαγωγή τους στα μοντέλα υπολογισμού. Η αξιοπιστία των συντελεστών είναι στενά συνδεδεμένη με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Οι συντελεστές που δίνονται παρακάτω διαλέγονται έτσι ώστε να αντιπροσωπεύουν όσο το δυνατό περισσότερο, μέσες τυπικές συνθήκες.

Η εθνική υπηρεσία απογραφής ατμοσφαιρικών εκπομπών της Μ. Βρετανίας (National Atmospheric Emissions Inventory, NAEI) εκτιμά τις εκπομπές από Χ.Δ.Α βάσει της μελέτης Aitchison et al., 1996 όπου για την εκτίμηση εκπομπών NMVOC χρησιμοποιεί το συντελεστή εκπομπής 0,01t NMVOC/tn παραγόμενου μεθανίου που ισοδυναμεί με 5,65g NMVOC/m³βιοαερίου(Passant,1993)⁽²⁰⁾.

Η μεθοδολογική διαδικασία για τον υπολογισμό των τυπικά εκλυόμενων φορτίων συνοψίζεται στην κάτωθι εξίσωση:

$$E_{\text{αέριου ρύπου}} = EF \cdot P \cdot [1 - (ER/100)]$$

όπου,

$E_{\text{αέριου ρύπου}}$, τυπικός ημερήσιος ρυθμός εκπομπής μελετούμενου αέριου ρύπου ανά μονάδα επιφάνειας χώρου διάθεσης, (tn αέριου ρύπου/m²·day),

EF, τυπικός συντελεστής εκπομπών αέριου ρύπου, (tn αέριου ρύπου/ tn βιοαερίου),

P, ρυθμός παραγωγής CH₄, (tn CH₄ /m²·day),

²⁰ Κατά Passant, η πυκνότητα του μεθανίου στο βιοαέριο είναι 0,565 kg παραγ CH₄/m³ βιοαέριο.

ER, συνολική απόδοση μείωσης επιπέδου εκπομπών, %.

Η χωρική κατανομή των εκπομπών VOCs από την επιφάνεια της χωματερής θεωρείται ομοιόμορφη στο σύνολο της εμβαδικής πηγής (Χ.Δ.Α.).

Όπως φαίνεται από την εξίσωση της μεθοδολογίας υπολογισμού των εκλυόμενων φορτίων, για να εκτιμήσουμε τις ελεγχόμενες εκπομπές CH₄, CO₂, NMVOCs, πέρα από το ρυθμό παραγωγής του βιοαερίου καθώς και τη συγκέντρωση του μελετούμενου αερίου ρύπου στο βιοαέριο, πρέπει να γνωρίζουμε την απόδοση της τεχνολογίας μείωσης των επιπέδων εκπομπών κατά τη συλλογή βιοαερίου και την επεξεργασία του²¹. Αναφερόμενες συνολικές αποδόσεις ποικίλλουν από 60 έως 85% (EPA, 2001).

6.3.2.3. Μοντέλο Thibodeux

Για τον υπολογισμό των εκλυόμενων φορτίων, η EPA (1988, 1990) χρησιμοποιεί το ακόλουθο μοντέλο Thibodeux (1981) το οποίο εξέλιξε ο Hwang (1982):

$$\frac{E_i}{A} = V_y \frac{C_i^* - C_{io}}{\exp\left(\frac{d_{sc} V_y t}{D_i \varepsilon}\right) - 1} + V_y C_i^*$$

όπου,

E_i = ρυθμός εκπομπής συστατικού i του βιοαερίου (g/s)

C_i^{*} = συγκέντρωση συστατικού i στον πορώδη χώρο της χωματοκάλυψης (g/cm³)

C_{io} = συγκέντρωση συστατικού i πάνω από την επιφάνεια της χωματοκάλυψης, (g/cm³)

V_y = μέση ταχύτητα συμμεταφοράς, (cm/s)

A = έκταση χωματερής (cm²)

d_{sc} = βάθος χωματοκάλυψης (cm)

t = στρεβλότητα (tortuosity), ($\sqrt{3} = 1,73$ για σφαιρικά σωματίδια), (τυπική τιμή κατά

Tchobanoglous et al., 1993: t= 0,67),

ε = πορώδες της χωματοκάλυψης που υπολογίζεται από τη σχέση $\varepsilon = 1,73 P_a^{10/3} / P_t^2$.

²¹ Το ολικό σύστημα ελέγχου του παραγόμενου βιοαερίου πρέπει να περιλαμβάνει σύστημα συλλογής βιοαερίου και πυρσό καύσης και σύστημα επεξεργασίας βιοαερίου για την αφαίρεση VOCs και συμπεκνωμάτων.

Ο Thibodeaux (1981) παρέιχε πεδίο τιμών για την ταχύτητα συµµεταφοράς του βιοαερίου που εκλύεται στις χωµατερές που κυµαίνεται από $7,29 \times 10^{-4}$ cm/s έως $3,04 \times 10^{-3}$ cm/s µε τιµή µέσης ταχύτητας ίση µε $1,63 \times 10^{-3}$ cm/s.

Επειδή η τιµή C_{io} δεν είναι γνωστή, ο Hwang (1982) υπέδειξε την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{E_i}{A} = -(2,44 \times 10^4) k_{g,i} (C_{ioo} - C_{io})$$

όπου,

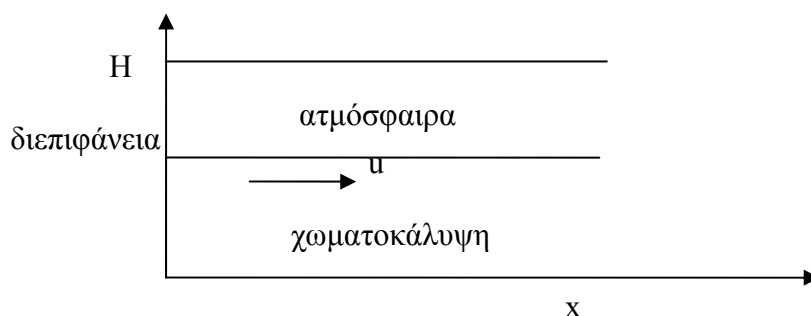
$k_{g,i}$ = συντελεστής µεταφοράς µάζας αέριου συστατικού i (cm/s)

C_{ioo} = συγκέντρωση συστατικού i στην ατµόσφαιρα μακριά από τη διεπιφάνεια ατµόσφαιρας-χωµατοκάλυψης, (g/cm³), (συνήθως ίση µε µηδέν).

Η εξίσωση Thibodeaux στην απλοποιηµένη µορφή της γράφεται: $E_i = C_i^* V_y A$

6.3.2.4.Εξίσωσης συνέχειας στη διεπιφάνεια τελικής χωµατοκάλυψης –ατµόσφαιρας

Ένας τρίτος τρόπος υπολογισµού των εκλυόµενων φορτίων (q) από τους Χ.Δ.Α. αναφέρεται στην εφαρµογή της εξίσωσης συνέχειας στη διεπιφάνεια τελικής χωµατοκάλυψης – ατµόσφαιρα στην οποία έχουµε διατήρηση της µάζας των αέριων ρύπων η οποία γράφεται ως εξής για τη συγκέντρωση αέριου ρύπου NMVOC στην διεπιφάνεια: ($H \cdot \Delta x \cdot \Delta y$), (Σχήµα 3). Η εφαρµογή της µεθοδολογίας αυτής προϋποθέτει τη γνώση της ατµοσφαιρικής συγκέντρωσης του ρύπου κοντά στην διεπιφάνεια.



Σχήµα 12: Διεπιφάνεια χωµατοκάλυψης-ατµόσφαιρας.

Στον όγκο της διεπιφάνειας που έχουµε, υπάρχει διατήρηση της µάζας των αέριων ρύπων VOCs που γράφεται ως εξής για τη συγκέντρωση του αέριου ρύπου VOC στον όγκο ($H \cdot \Delta x \cdot \Delta y$):

$$\frac{dC}{dt} = \frac{q}{H} + \frac{u}{\Delta x} (C^o - C)$$

Αναφέρεται ότι ο όρος των χημικών αντιδράσεων παραλείπεται διότι ο αέριος ρύπος θεωρούμε ότι δε χάνεται και/ή παράγεται λόγω χημικών αντιδράσεων.

όπου,

q, είναι οι εσωτερικές εκπομπές VOC ανά μονάδα επιφάνειας ($\frac{kg}{m^2 hr}$).

C^o είναι η συγκέντρωση πάνω από τη χωματοκάλυψη

C, συγκέντρωση κάτω από τη χωματοκάλυψη

U, ταχύτητα ανέμου = ταχύτητα συµµεταφοράς στη χωµατερή

Εάν θεωρήσουμε αμελητέα τη συσσώρευση αέριου ρύπου VOC στη διεπιφάνεια ο όρος

μηδενίζεται, καταλήγουμε στη σχέση: $(C-C^o) \cdot \frac{u}{\Delta x} = \frac{q}{H}$ ή $(C-C^o) \cdot \frac{u}{\Delta x} = \frac{q}{H}$ ή

$$C-C^o = \frac{q \Delta x}{H u} \quad \text{ή} \quad C=C^o + \frac{q \Delta x}{H u} \quad \text{ή} \quad q = (C-C^o) \cdot \frac{H u}{\Delta x}, \text{ (Λαζαρίδης, 2002).}$$

6.3.3. Χρήση συντελεστών εκπομπής για την εκτίμηση ανεξέλεγκτων εκπομπών συστατικών βιοαερίου: NMVOCs, βενζολίου, βινυλοχλωριδίου & H₂S, στον παλαιό χώρο διάθεσης “Α.Λιόσια” εν έτει 2003

Εφαρμόζουμε τη μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών όπως αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά στους πίνακες 19 & 20 για τους κρίσιμους ρύπους NMVOC, H₂S, βενζόλιο και βινυλοχλωρίδιο.

Πίνακας 19: Μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών NMVOC από τον παλαιό Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” εν έτει 2003.

Πηγή	Ρυθμός παραγωγής CH ₄ , (P)	Συντελεστής εκπομπών αέριου ρύπου i, (EF)	Ανεξέλεγκτο πιθανό μέγιστο φορτίο εκπομπής αέριου ρύπου i, (E)	Συντελεστής ελέγχου, (ER)	Μέγιστο πιθανό καθαρό φορτίο εκπομπής αέριου ρύπου i, (E)
“Α.Λιόσια”	5,12·10 ⁴ tn CH ₄ /yr	-	-	80 %	-
i=NMVOC	5,12·10 ⁴ tn CH ₄ /yr	10 Kg αέριου ρύπου i / tn CH ₄	512 tn /yr ή 16,24 gr/sec (4)	80 %	102,4 tn /yr ή 3,25 gr/sec

Σχόλια-Υπολογισμοί στον πίνακα 19:

- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το LandGEM, EPA, το 2003 παρατηρείται παραγωγή μεθανίου ίση με 5,12·10⁴ tn (θεωρήσαμε συγκέντρωση NMOCs στο βιοαέριο ίση με 2420 ppmv NMOC ως εξάνιο).
- Χρησιμοποιούμε το συντελεστή κατά Passant, 1993: 0,01tn NMVOC/ tn παραγόμενου μεθανίου ή 10 kg NMVOC/ tn παραγόμενου μεθανίου.
- Άρα οι ανεξέλεγκτες εκπομπές NMOC στα Α.Λιόσια, το 2003 είναι σύμφωνα με την 1^η μεθοδολογία εκτίμησης εκπομπών που αναπτύξαμε παραπάνω:
- $5,12 \cdot 10^4 \text{ (tn CH}_4\text{/yr)} \cdot 10 \text{ (kg NMVOC/ tn παραγόμενου CH}_4\text{)} = 512 \frac{\text{tn NMVOC}}{\text{yr}}$
- Για να μετατρέψουμε το ετήσιο τυπικό εκπεμπόμενο φορτίο, σε ωριαίο ρυθμό εκπομπής αμελήσαμε τις κλιματικές συνθήκες, θεωρώντας τις εκπομπές NMVOCs σταθερές για όλες τις ώρες του χρόνου.

- Σύμφωνα με στοιχεία που πήραμε από την Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. (βλέπε παράρτημα), θεωρήσαμε συνολικό συντελεστή ελέγχου εκπομπών 80% (συλλογή, επεξεργασία βιοαερίου και χωματοκάλυψη απορριμμάτων).

Πίνακας 20: Μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών αέριων ρύπων βινυλοχλωριδίου (VC), βενζολίου & H₂S από τον κλειστό Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” εν έτει 2003.

Πηγή	Ρυθμός παραγωγής αερίου i, (P)	Ανεξέλεγκτο πιθανό μέγιστο φορτίο εκπομπής αερίου ρύπου i, (E)	Συντελεστής ελέγχου, ER	Μέγιστο πιθανό καθαρό φορτίο εκπομπής αερίου ρύπου i, (E)
Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια”	tn/yr		80 %	-
i=βινυλοχλωρίδιο, VC	2,66 tn/yr (περιεκτικότητα στο βιοαέριο 7,34 ppmV)	2,66 tn/yr ή 0,084 gr/s	80 %	0,532 tn /yr ή 0,017 gr/s
i=βενζόλιο	5 tn/yr (περιεκτικότητα στο βιοαέριο 11,1 ppmV)	5 tn/yr ή 0,16 gr/s	80%	1 tn/yr ή 0,032 gr/s
i=H ₂ S	7 tn/yr (περιεκτικότητα στο βιοαέριο 35,5 ppmv)	7 tn/yr ή 0,22 gr/s	80 %	1,4 tn/yr ή 0,044 gr/s

6.3.3.1. Πιθανή ακρίβεια προβλεπόμενων εκπομπών – σύγκριση με μετρήσεις πεδίου

Στην εκτίμηση των εκπομπών δε λαμβάνεται υπόψη η οξείδωση των ρύπων στο χωμάτινο κάλυμμα αφού η επιστημονική βιβλιογραφία δεν έχει αρκετά μελετήσει το θέμα οξείδωσης αέριων ρύπων στη χωματοκάλυψη. Επίσης δε λαμβάνεται υπόψη σύστημα συλλογής μεθανίου στο Χ.Δ.Α. καθώς και καθημερινή χωματοκάλυψη τα οποία περιορίζουν σημαντικά τις εκπομπές με αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις εκπομπών να είναι υπερεκτιμημένες

Σημειώνεται ότι το βινυλοχλωρίδιο (VC) είναι αρκετά πτητικό συστατικό (το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του 73,4% είναι στην αέρια φάση) ενώ το βενζόλιο σε ποσοστό 80,3% βρίσκεται απορροφημένο στο έδαφος. Αυτή η ιδιαιτερότητα των συστατικών έχει σημαντικό αντίκτυπο στο πώς τα χημικά αυτά συμπεριφέρονται και μεταφέρονται έξω από τη χωματερή (Jin-Sheng Lin et al., 1995). Στην περίπτωσή μας δε λαμβάνεται υπόψη αυτή η ιδιαιτερότητα

των χημικών ενώσεων που αποτελούν το βιοαέριο με αποτέλεσμα η κατανομή εκπομπών για τα δύο μελετούμενα συστατικά να δίνεται παρόμοια.

Η δικτυακή σελίδα του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. με τίτλο “Περιβαλλοντική αποκατάσταση των χωματερών Σχιστός και Άνω Λιόσια” δίνει για τη χωματερή στα Λιόσια συνολική ποσότητα υδρογονανθράκων που εκλύεται στην ατμόσφαιρα ίση με 60.000 ton/yr. Εμείς υπολογίσαμε από τα παραπάνω ανεξέλεγκτο μέγιστο ετήσιο φορτίο εκπομπής NMVOCs ίσο με 512 tn /yr. Αν θεωρήσουμε ότι τα NMVOCs αποτελούν το 39% των NMOCs (EPA, 2001) τότε η συνολική ποσότητα NMOCs εκτιμάται ίση με 1313 tn /yr. Θεωρούμε ποσότητα εκπομπής μεθανίου περίπου ίση με $51.200 \cdot 0,9\% = 46.080$ tn /yr, αν υποθέσουμε ότι το 10 % της παραγωγής μεθανίου οξειδώνεται (EPA, ΕΠΡ, 1998). Επομένως από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι οι συνολικές εκπομπές υδρογονανθράκων από το Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” χωρίς σύστημα ανάκτησης βιοαερίου που εκτιμώνται είναι περίπου ίσες με $(1313+46.080)$ tn /yr = 47.393 tn /yr συγκρίσιμη τιμή με αυτή που δίνει το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. 60.000 ton/yr.

7. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΤΟ Χ.Δ.Α. “Α. ΛΙΟΣΙΑ” ΥΠΟ ΔΥΣΜΕΝΕΣ ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

7.1.Γενικά

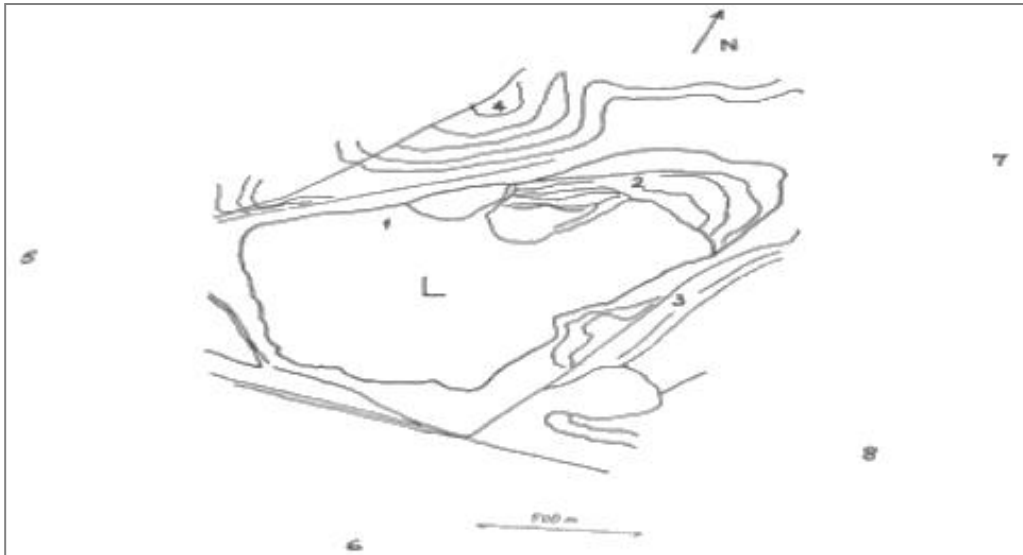
Οι σοβαρότερες επιπτώσεις από τη διαφυγή του βιοαερίου στην ατμόσφαιρα οφείλεται στη διασπορά των αέριων ρύπων σε γειτονικές περιοχές και οικισμούς. Η καθημερινή χωματοκάλυψη των απορριμμάτων του Χ.Δ.Α. έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων όπως είναι οι παραγόμενες οσμές. Η εκτίμηση της επίδρασης των αέριων εκπομπών NMVOCs από Χ.Δ.Α. στην ποιότητα της ατμόσφαιρα πέριξ της χωματερής μπορεί να οδηγήσει στην εύρεση της κρίσιμης ζώνης στην οποία παρατηρούνται παραβιάσεις ορίων ποιότητας αέριων ρύπων.

Το θέμα της πρόβλεψης της ατμοσφαιρικής διασποράς δεν είναι απλό πρόβλημα. Ο κύριος λόγος είναι η δυσκολία μαθηματικής προσομοίωσης των σύνθετων ατμοσφαιρικών συνθηκών, της τοπογραφίας της περιοχής και των εκπομπών αέριων ρύπων (ανομοιόμορφες εκλύσεις στο χώρο και στο χρόνο) από την επιφάνεια της χωματερής. Το δυσμενές σενάριο κατά το οποίο γίνεται η μελέτη διασποράς συγκεκριμένων αέριων ρύπων περιλαμβάνει μέγιστη παραγωγή βιοαερίου, δεδομένες μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τις

αυξημένες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις γειτονικά του Χ.Δ.Α., αμελητέες οξειδούμενες διεργασίες αέριων ρύπων στη χωματοκάλυψη καθώς και ανυπαρξία μηχανικού συστήματος ανάκτησης βιοαερίου στη χωματερή.

7.2.Μετρήσεις ποιότητας αέρα στον παλαιό Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” το 1989

Μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στο Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” το 1989, έδειξαν ότι οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις στον ενεργό χώρο διάθεσης απορριμμάτων είναι αρκετά υψηλές και στις περισσότερες περιπτώσεις πάνω από τα όρια ποιότητας αέρα, ενώ πέριξ του Χ.Δ.Α. οι συγκεντρώσεις είναι χαμηλές (πίνακα 21). Σημαντικό πρόβλημα δυσοσμίας δημιουργεί το H_2S και οι μερκαπτάνες, που ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, έχουν χαρακτηριστική οσμή που προκαλεί δυσφορία στους περίοικους (M.Loizidou et al., 1992).



Σχήμα 13: Σημεία μετρήσεις ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων αέριων ρύπων (Loizidou et al., 1992).

Πίνακας 21: Δειγματοληπτικές μετρήσεις ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων αέριων ρύπων από το Χ.Δ.Α.**“Α. Λιόσια”.**

Μέσες συγκεντρώσεις αέριων ρύπων <C>	Σημεία μετρήσεων όπως φαίνονται στο σχήμα 13. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το 1989 και καλύπτουν τους μήνες Μάιο, Ιούνιο και Οκτώβριο.							
	1	2	3	4	5	6	7	9
CH ₄ (mg/m ³)	329	925	44	10,29	1,58	0,917	3,3	0,933
H ₂ S (mg/m ³)	3,6	3,79	0,81	0,08	0,025	N.D.	0,02	N.D.
Μερκαπτάνες (μg/m ³)	700	825	152,5	16,67	10	21	30	N.D.
VOCs (μg/m ³):								
CH ₂ Cl ₂	9,775	11,775	4,7	-	-	-	-	-
C ₂ H ₄ Cl ₂	3,625	8,2	2,175	-	-	-	-	-
C ₂ HCl ₃	9,375	13,1	3,35	-	-	-	-	-
C ₂ Cl ₄	15,125	28,675	7,725	-	-	-	-	-

Οι μετρήσεις πεδίου συγκρίθηκαν με τα ισχύοντα όρια ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων αέριων ρύπων του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO, 1987) καθώς και με τα όρια από την Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 1981) για την περίπτωση εργαζομένων που δουλεύουν στο Χ.Δ.Α. Έτσι οι συγκεντρώσεις του μεθανίου στην ατμόσφαιρα στα σημεία μέτρησης 1 και 2 βρέθηκαν υψηλότερες από το όριο 50 ppm (33,5 mg/m³) που θέτει η OSHA προσεγγίζοντας την τιμή 925 mg/m³ (το σημείο μέτρησης 2 είναι κοντά σε πηγάδι εξαερώσεως). Τα σημεία 3 και 4 που βρίσκονται στα σύνορα της χωματερής δίνουν τιμές που παρουσιάζουν διακυμάνσεις, ξεπερνώντας κάποιες φορές τα όρια της OSHA. Τα δείγματα που λήφθηκαν από τα σημεία 6,7 και 8 σχετίζονται με πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις.

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις H₂S η WHO, 1987 πρότεινε ότι η ατμοσφαιρική τους συγκέντρωση δεν πρέπει να υπερβαίνει το όριο των 70 μg/m³ για μέσο χρόνο έκθεσης 30 min. Σύμφωνα προς την οδηγία της WHO, η παρουσία του H₂S στην ατμόσφαιρα στο επίπεδο των 15 mg/m³ ερεθίζει τα μάτια και στο επίπεδο των 70 mg/m³ μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα υγείας. Θεωρώντας συντελεστή ασφάλειας 100, το όριο ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης H₂S, για 24-h χρόνο έκθεσης είναι 0,15 mg/m³. Πρέπει να τονιστεί ότι η χαρακτηριστική οσμή του H₂S είναι αισθητή σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις έως και 8 μg/m³. Οι συγκεντρώσεις του H₂S στην ατμόσφαιρα στα σημεία μέτρησης 1 και 2 βρέθηκαν να είναι υψηλές όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 21. Τα σημεία 3 και 4 που

βρίσκονται στα σύνορα της χωματερής δίνουν τιμές μικρότερες απ' αυτές στα σημεία 1 και 2 αλλά και πάλι είναι αυξημένες αναφορικά με το όριο ανίχνευσης οσμής ενώ στα σημεία 5, 6, 7 και 8 έξω από το Χ.Δ.Α. αντιστοιχούν συγκεντρώσεις που παρουσιάζουν διακυμάνσεις γύρω από το όριο ανίχνευσης οσμής.

Παρόμοιο πρόβλημα οσμής με αυτό του H_2S παρουσιάζουν και οι μερκαπτάνες. Οι μετρήσεις για τις μερκαπτάνες όπως φαίνονται στον πίνακα 16, δείχνουν αυξημένες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αυτών έως και $825 \mu g/m^3$, ενώ η OSHA δίνει την τιμή των $20 mg/m^3$ ως όριο ποιότητας. Το όριο ανίχνευσης οσμής για τις μερκαπτάνες είναι $4 \mu g/m^3$ το οποίο ξεπερνάτε από όλες τις μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί.

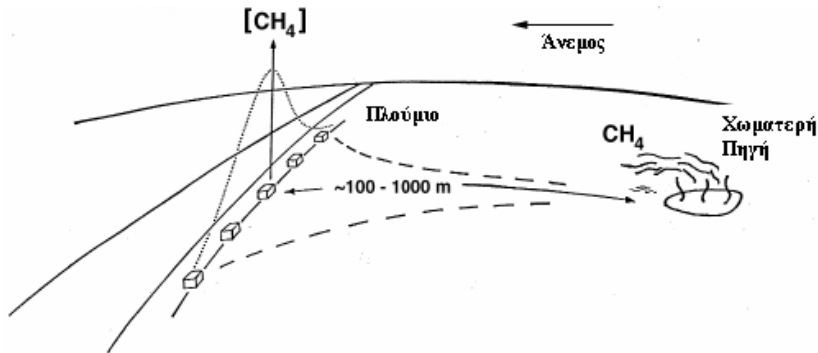
Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις των VOCs, συγκεκριμένα του CH_2Cl_2 , η WHO προτείνει ανώτατο επιτρεπτό όριο την τιμή των $3 \mu g/m^3$ λόγω του ότι η ένωση έχει καρκινογενή δράση. Η πτητική ένωση $C_2H_4Cl_2$ βρέθηκε μεταξύ 8,2 και $3,625 \mu g/m^3$. Η WHO προτείνει ως ανώτατη τιμή τα $700 \mu g/m^3$ για 24-h χρόνο έκθεσης. Σύμφωνα με την οδηγία της WHO η ένωση C_2HCl_3 έχει ανώτατο όριο στην ατμόσφαιρα $1 mg/m^3$. Τυπικές συγκεντρώσεις στην πόλη αναφέρεται ότι κυμαίνονται από 0,5 έως $3 \mu g/m^3$, ενώ στις βιομηχανοποιημένες ζώνες το επίπεδο είναι αυξημένο από $6 \mu g/m^3$ με υψηλότερη τιμή αυτή των $50 \mu g/m^3$ (Basemer 1984, EPA 1985). Τέλος οι τιμές ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης που μετρήθηκαν για την πτητική ένωση C_2Cl_4 είναι χαμηλές. Η οδηγία της WHO προτείνει ανώτατο επίπεδο τιμών αυτό των $5 \mu g/m^3$.

7.3.Εκτίμηση ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων αέριων ρύπων που εκλύονται από το Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” με εφαρμογή μοντέλου διασποράς εκπομπών εν έτει 2003

7.3.1. Περιγραφή μοντέλου

Χρησιμοποιώντας το γκαουσιανό μοντέλο CONCX (κανονική καμπύλη κατανομής εκπομπών αέριων ρύπων) που αφορά πηγές συνεχούς έκλυσης, θα εκτιμήσουμε τη μέγιστη πιθανή ατμοσφαιρική συγκέντρωση πάνω σε οποιονδήποτε αποδέκτη, που γειτνιάζει με την εμβαδική πηγή Χ.Δ.Α., υπό κρίσιμες μετεωρολογικές συνθήκες (ταχύτητα ανέμου και κατηγορία ατμοσφαιρικής σταθερότητας). Σημειώνεται ότι τα βασικά γκαουσιανά μοντέλα διασποράς εφαρμόζονται σε απλές σημειακές πηγές -point sources-, όπως μια καμινάδα,

αλλά μπορούν να ερμηνεύσουν την διασπορά ρύπων από εμβαδικές πηγές - area sources-, οι οποίες θεωρούνται ως μια μεγάλη ομάδα σημειακών πηγών.



Σχήμα 14: Ατμοσφαιρική διασπορά αέριων εκπομπών που εκλύονται από Χ.Δ.Α.

Το πρόγραμμα CONCX υπολογίζει τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων, κατάντη της διεύθυνσης του ανέμου, σε συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες επί του εδάφους που βρίσκονται σε διάφορες αποστάσεις από τη σημειακή πηγή, υπό επιλεγμένες μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τις αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων στην ατμόσφαιρα. Η μαθηματική εξίσωση των γκαουσιανών μοντέλων δίνει τη μαθηματική λύση του θεωρητικού προβλήματος σημειακής πηγής συνεχούς έκλυσης σε ένα άπειρο ιδεατό μέσο σταθεράς διάχυσης. Η βραχυχρόνια επίδραση που υπολογίζεται με το CONCX, ορίζεται ως εξής:

$$C(x, y, z) = \frac{Qe^{-\lambda t}}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \sum_{n=1}^3 \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H-2nL}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H-2nL}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H+2nL}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H+2nL}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \right\}$$

, όπου:

- (x, y, z): θέση σημειακού αποδέκτη με αρχή συντεταγμένων την επιφάνεια του εδάφους που βρίσκεται ο σημειακός αποδέκτης.

- x : απόσταση από την πηγή, άξονας παράλληλος στη διεύθυνση του ανέμου, m.
- Q : ρυθμός συνεχής έκλυσης αέριου ρύπου, g/s.
- H : ενεργό ύψος πλουμίου²² ($H = h + \Delta h$, όπου h το φυσικό ύψος της καμινάδας), m.
- λ : συντελεστής καθίζησης λόγω βροχής.
- t : χρόνος μεταφοράς, sec.
- u : μέση ταχύτητα μεταφοράς ανέμου (κατάντη της x διεύθυνσης ανέμου, m/s).
- σ_y : ο συντελεστής οριζόντιας διασποράς συγκέντρωσης αέριου ρύπου, m.
- σ_z : ο συντελεστής κατακόρυφης διασποράς, m.
- L : ύψος ανάμειξης, m.

Οι τιμές των σ_x και σ_y υπολογίζονται εμπειρικά, όπου ένας αριθμός πειραμάτων συνετέλεσε στον προσδιορισμό των σ_x και σ_y ως συνάρτηση της κατάστασης της ατμόσφαιρας και της απόστασης από την πηγή.

Υποθέτουμε ότι ο μηχανισμός συμμεταφοράς του ρύπου στη διεύθυνση μεταφοράς είναι μεγαλύτερος από αυτόν της τυρβώδους διάχυσης (turbulent diffusion)²³ ενώ επιπλέον θεωρούμε ότι επικρατούν σταθερές συνθήκες (steady state), που σημαίνει ότι όλες οι μεταβλητές και οι παράμετροι είναι σταθερές στο χρόνο. Λόγω της θεώρησης μειωμένης τυρβώδους διάχυσης, το γκαουσιανό μοντέλο θα πρέπει να χρησιμοποιείται για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες του 1 m/s. Η χρήση μιας σταθερής μέσης ταχύτητας μεταφοράς και μιας σταθερής διεύθυνσης ανέμου κατά την εφαρμογή του μοντέλου υποδηλώνει θεώρηση στατικού και ομογενούς οριζόντιου πεδίου ανέμων.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του γκαουσιανού μοντέλου είναι η απλότητά του για βραχυπρόθεσμη πρόγνωση επιπέδων ρύπανσης. Θεωρείται κατάλληλο σε εφαρμογές με απλές ατμοσφαιρικές συνθήκες, με επαρκή συνοπτικό άνεμο, επίπεδη εδαφική τοπογραφία αλλά είναι ακατάλληλο για πιο σύνθετες εφαρμογές όπως οι περιπτώσεις ανομοιογενούς τοπογραφίας και σύνθετων μετεωρολογικών συνθηκών. Αν και η γκαουσιανή εξίσωση διασποράς βασίζεται τόσο στη θεωρία όσο και σε πραγματικές μετρήσεις πεδίου, παραμένει ακόμα μια ατελής μορφή μοντέλου, του οποίου η ακρίβεια κυμαίνεται μεταξύ $\pm 50\%$, παρόλα αυτά όμως, είναι πολύ χρήσιμη και γενικά αποδεκτή.

²² Το ενεργό ύψος πλουμίου ισούται με το ενεργό ύψος της καμινάδας.

²³ Η τυρβώδης ή στροβιλώδης διάχυση είναι τάξεις μεγέθους ισχυρότερη από την μοριακή διάχυση και συντελεί στην διασπορά.

7.3.2. Δεδομένα εισαγωγής και παραδοχές

Τα δεδομένα εισαγωγής που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα 22:

Πίνακας 22: Δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο CONCX.

Σύμβολο	Μονάδα	Ερμηνεία	Εφαρμογή στο Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια”
NV		Αριθμός κλάσεων ανέμου	4
VM	m/sec	Μέση ταχύτητα ανέμου	VM
ZO	m	Ύψος μετεωρολογικών παρατηρήσεων πάνω από το επίπεδο του εδάφους	10
WET	pr.sec	Συντελεστής απομάκρυνσης λόγω βροχόπτωσης	0 (θεωρούμε ότι δεν βρέχει).
HMIX	m	Ύψος ανάμιξης	1000
X	m	Αποστάσεις κατάντη της διεύθυνσης του ανέμου	100, 300, 500, 800, 1000, 2000, 3000, 5000, 8000, 10.000 (Ο Δήμος Ασπροπύργου απέχει 1km από τα σύνορα της χωματερής)
Q = Q _{max} ενεργής σημειακής πηγής	g/sec	Παροχή της πηγής -πιν.17 &18-	16,24 gr NMVOC/ sec
			0,22 gr H ₂ S /sec
			0,16 gr βενζόλιο /sec
HS	m	Ύψος πηγής	1 , πλήρη ανάμιξη εκλυόμενου αέριου ρύπου με τον ατμοσφαιρικό αέρα.
TG	K	Θερμοκρασία των αερίων στο εσωτερικό της χωματερής	(35+273)=308
TA	K	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	(273+20)=293
W	m/sec	Ταχύτητα αερίων στο εσωτερικό της χωματερής	0,00003 (βλέπε Thibodeux).
D	m	Διάμετρος πηγής	100

Σημειώνεται ότι για να ‘τρέξει’ το μοντέλο δεν απαιτούνται τοπικά μετεωρολογικά στοιχεία, καθώς οι υπολογισμένες συγκεντρώσεις μεγιστοποιούνται σε σχέση με όλους τους αποδεκτούς συνδυασμούς ταχύτητας ανέμου, κατηγορίας ευστάθειας και ύψος ανάμειξης.

Η διεύθυνση ανέμου καθορίζει τη διεύθυνση κατά την οποία το πλούμιο θα μεταφερθεί επί της τοπικής περιοχής. Από την άλλη η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει την ανύψωση του πλουμίου με αποτέλεσμα άνεμοι με αυξημένη ταχύτητα μειώνουν το ενεργό ύψος και αυξάνουν το ρυθμό αραίωσης. Έτσι,

- Η μείωση του ύψους ανύψωσης του πλουμίου, οδηγεί στην αύξηση των συγκεντρώσεων κοντά στο έδαφος.
- Η ενίσχυση του μηχανισμού αραίωσης μειώνει τις συγκεντρώσεις κοντά στο έδαφος.

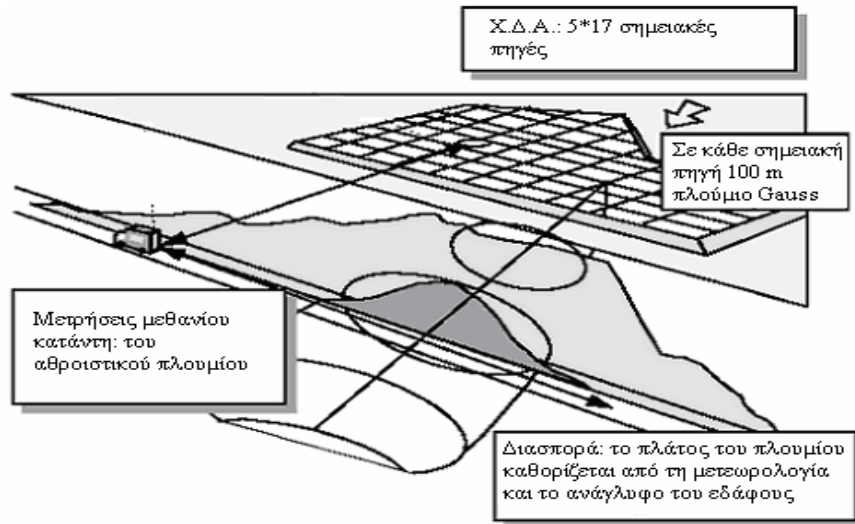
Η ανύψωση του πλουμίου υπολογίζεται στο μοντέλο χρησιμοποιώντας διαφορετική σταθερότητα (stability) ατμόσφαιρας, για ασταθείς, ουδέτερες συνθήκες και για ευσταθείς καταστάσεις ατμόσφαιρας²⁴. Η σταθερότητα σχετίζεται με την μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος καθώς και με την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία και τη νεφοκάλυψη. Ουδέτερη κατάσταση ατμόσφαιρας συμβαίνει όταν τυχόν φαινόμενα άνωσης είναι άνευ σημασίας (για ηλιακή ακτινοβολία μέτρα έως χαμηλή κατά τη διάρκεια της ημέρας). Στην περίπτωση ασταθούς ατμόσφαιρας υπάρχουν έντονες ανωστικές δυνάμεις και ισχυρές τυρβώδεις ροές (παρατηρείται στην περίπτωση δυνατής έως μέτριας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας) ενώ στην ευσταθή ατμόσφαιρα περιορίζεται η ανάμειξη ρύπων στον αέρα (κατάσταση ατμόσφαιρας όπου παρατηρείται το βράδυ όταν υπάρχει νέφωση).

Για την εφαρμογή του μοντέλου γκαουσιανής διασποράς των αερίων ρύπων από το μελετούμενο χώρο διάθεσης, είναι απαραίτητο να οριστούν οι παραδοχές με βάση τις οποίες “τρέχει” το μοντέλο. Συγκεντρωτικά οι παραδοχές βάσει τις οποίες ‘τρέχει’ το μοντέλο CONCX είναι:

- Θεωρούμε το Χ.Δ.Α. ως επιφανειακή πηγή που προσομοιώνεται με άθροισμα πολλών σημειακών πηγών. Η επιφάνεια του Χ.Δ.Α. (σχήμα 13) προσεγγίζεται με ορθογώνια έκταση εμβαδού $(0,5*1,7) \text{ km}^2 = 850.000 \text{ m}^2$ όπου ο συνολικός αριθμός σημειακών

²⁴ Η τάση που έχει η ατμόσφαιρα να αντιστέκεται ή να επιτείνει την κατακόρυφη μεταφορά αέριας μάζας.

πηγών εκπομπής αέριων ρύπων (point source) υπολογίζεται περίπου ίσος με 85 (850.000/10.000), διαμέτρου 100 m έκαστη πηγή.

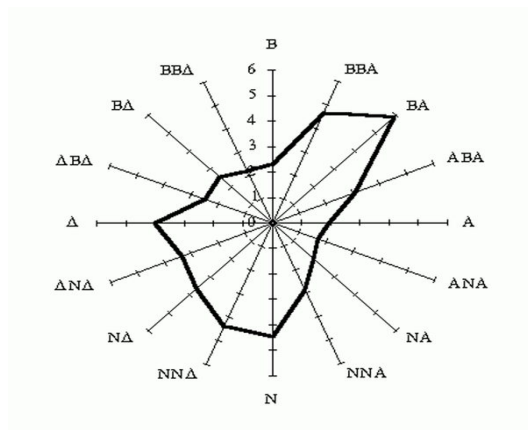


Σχήμα 15: Παρουσίαση του εκτιμούμενου αθροιστικού πλουμίου εκπομπών από το σύνολο της εμβαδικής πηγής.

- Η μελετούμενη σημειακή πηγή για την οποία εφαρμόζεται το CONCX βρίσκεται στα σύνορα της χωματερής.
- Γίνεται η θεώρηση κανονικής κατανομής της πυκνότητας των εκπομπών του αέριου ρύπου στην κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση της σημειακής πηγής.
- Η μελέτη διασποράς εφαρμόζεται για το δυσμενές σενάριο, δηλαδή για μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τις αυξημένες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων καθώς και τη μεγάλη διασπορά των αέριων ρύπων στην οριζόντια διεύθυνση.
- Η ποσότητα και σύσταση του βιοαερίου είναι οι δυσμενέστετες.
- Ως ύψος εκπομπής H , θεωρείται το υψόμετρο της περιοχής του Χ.Δ.Α. συν 1m όπου απαιτείται για να γίνει πλήρη ανάμειξη του εκλυόμενου αέριου ρύπου με τον ατμοσφαιρικό αέρα.
- Ο ρύπος που εξετάζεται είναι σχετικά αδρανής (δεν αντιδρά χημικά), ούτε συμβαίνει εναπόθεση και όταν χτυπήσει στο έδαφος δεν απορροφάται αλλά ανακλάται.
- Η ταχύτητα του ανέμου είναι σταθερή τόσο κατά τη διάρκεια του χρόνου, όσο και καθ' ύψος. Η χρήση μιας σταθερής μέσης ταχύτητας μεταφοράς και μιας σταθερής

- Η ταχύτητα ανέμου, η οποία χρησιμοποιείται είναι ανάλογη της κατάστασης σταθερότητας της ατμόσφαιρας.
- Η ευθεία πηγής - αποδέκτη ταυτίζεται με την διεύθυνση του ανέμου.
- Η διασπορά των ρύπων εξετάζεται για την περίπτωση μη ύπαρξης θερμοκρασιακής αναστροφής.
- Η περιοχή που εξετάζεται είναι επίπεδη ή ομαλά κεκλιμένη επιφάνεια.
- Υποθέτουμε ότι η συµµεταφορά του ρύπου κατά τη διεύθυνση της µεταφοράς είναι µεγαλύτερη από την τυρβώδη διάχυση (ελάχιστη τιμή ταχύτητας ανέμου τα 2 m/sec).
- Προκειµένου να υπολογιστεί η µέγιστη πιθανή συγκέντρωση οσµηρών και τοξικών αέριων ενώσεων στην ατµόσφαιρα αγνοείται η ξηρή και υγρή εναπόθεση αφού δεν αναµένεται να µειώσει σηµαντικά την ποσότητα των µελετούµενων αερίων σε διάρκεια χρόνου λίγων λεπτών ή λίγων ωρών.
- Επίσης η οξείδωση στη χωµατοκάλυψη αγνοείται αφού σκοπός µας είναι η εύρεση των µέγιστων δυνατών ατµοσφαιρικών συγκεντρώσεων οσµηρών και τοξικών αέριων ενώσεων.

- 79 -



Σχήμα 17: Ροδοδιάγραμμα ανέμου, Μέση ταχύτητα ανέμου (m/sec) ανά διεύθυνση (Δικτυακή σελίδα Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.).

Στην περίπτωση του μελετούμενου Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια”, δε μας ενδιαφέρουν οι επικρατούντες άνεμοι στο χώρο διάθεσης απορριμμάτων, αντίθετα μελετάμε όλες τις διευθύνσεις ανέμου για το λόγο ότι ο Χ.Δ.Α. βρίσκεται σε χαρακτηριστική θέση, περικλειόμενος από τα βουνά Πατέρας, Κιθαιρώνας, Πάστρα και Πάρνηθα (με τη σειρά από δυτικά προς ανατολικά) τα οποία λειτουργούν σαν τείχη εμποδίζοντας την οριζόντια διασπορά των ρύπων και παγιδεύοντας εύκολα τους ρύπους στην τοπική ατμόσφαιρα της περιοχής.

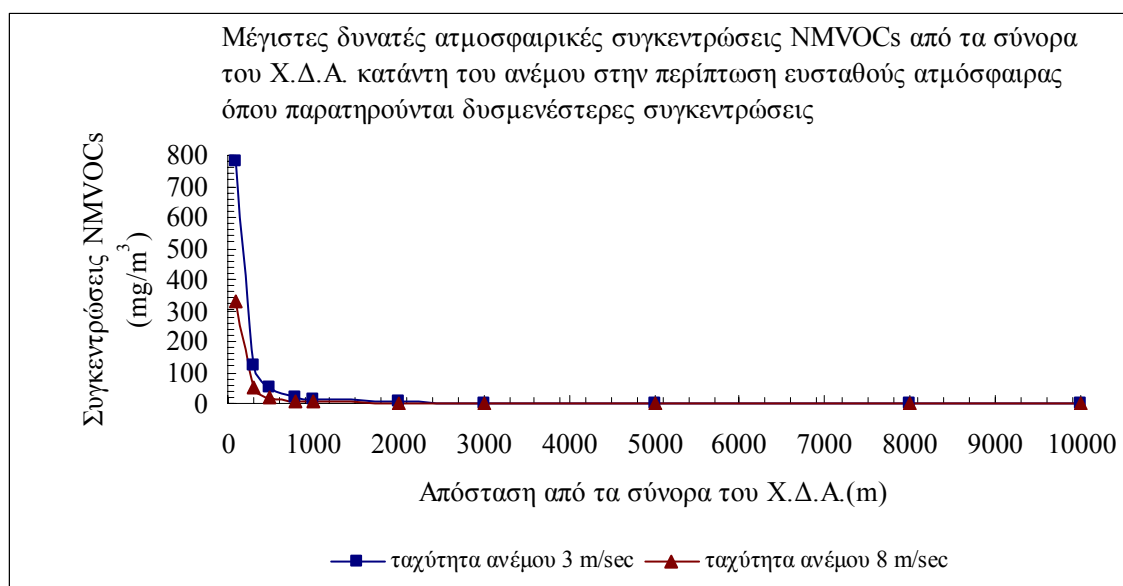
Πριν να γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων υπολογισμού στο Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” με τη βοήθεια του μοντέλου CONCX, πρέπει να τονιστεί ότι τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο για τις εκπομπές αέριων ρύπων είναι τα δυσμενέστερα δυνατά, αφού λαμβάνεται ποσότητα παραγόμενου βιοαερίου εκείνη κατά το κλείσιμο λειτουργίας της χωματερής όπου παρουσιάζεται μέγιστη παραγωγή βιοαερίου σύμφωνα με την καμπύλη παραγωγής βιοαερίου ενώ θεωρείται ρυθμός εκπομπής ίσος με το ρυθμό παραγωγής του αέριου ρύπου στο βιοαέριο.

7.3.3. Αποτελέσματα υπολογισμών του μοντέλου

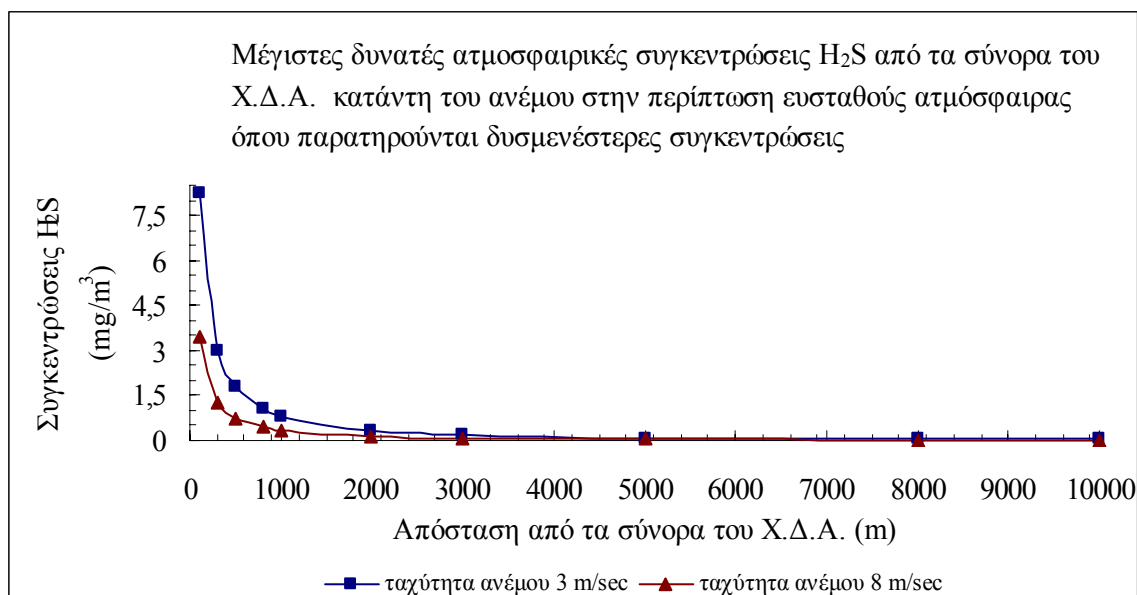
Η εξίσωση διασποράς Gauss χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της δυσμενέστερου σεναρίου αέριας ρύπανσης. Από τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό ότι η δυσμενέστερη κατάσταση από άποψη μέγιστης εκτιμώμενης τιμής ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης αέριου ρύπου παρουσιάζεται στην κατάσταση ευσταθούς ατμόσφαιρας (όπου οι ανωστικές δυνάμεις είναι αμελητέες) με χαμηλή ένταση ανέμου 3 m/sec (δηλαδή περίπου 3 Beaufort).

Οι υπολογισμοί του CONCX αφορούν ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων που εκλύονται από τη μελετούμενη σημειακή πηγή στα σύνορα της χωματερής. Για να υπολογίσουμε τις συγκεντρώσεις αέριων ρύπων που προέρχονται από το σύνολο της εμβαδικής πηγής στα σύνορα του Χ.Δ.Α., πολλαπλασιάζουμε τη συγκέντρωση ρύπων της εν λόγω σημειακής πηγής με την τιμή 10 για να πάρουμε συγκεντρώσεις ίδιας τάξης μεγέθους με τις πραγματικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων που παρουσιάζονται στα σύνορα του Χ.Δ.Α και που προκύπτουν από το σύνολο της εμβαδικής πηγής. Σημειώνεται ότι η χρήση του πολλαπλασιαστή 85 (αντί 10) -αριθμός σημειακών πηγών που αποτελούν το Χ.Δ.Α.- θα έδινε αρκετά υπερεκτιμημένες τιμές συγκεντρώσεων αφού οι εκπομπές υφίστανται αραιώση κατά τη μεταφορά τους στα σύνορα του Χ.Δ.Α.

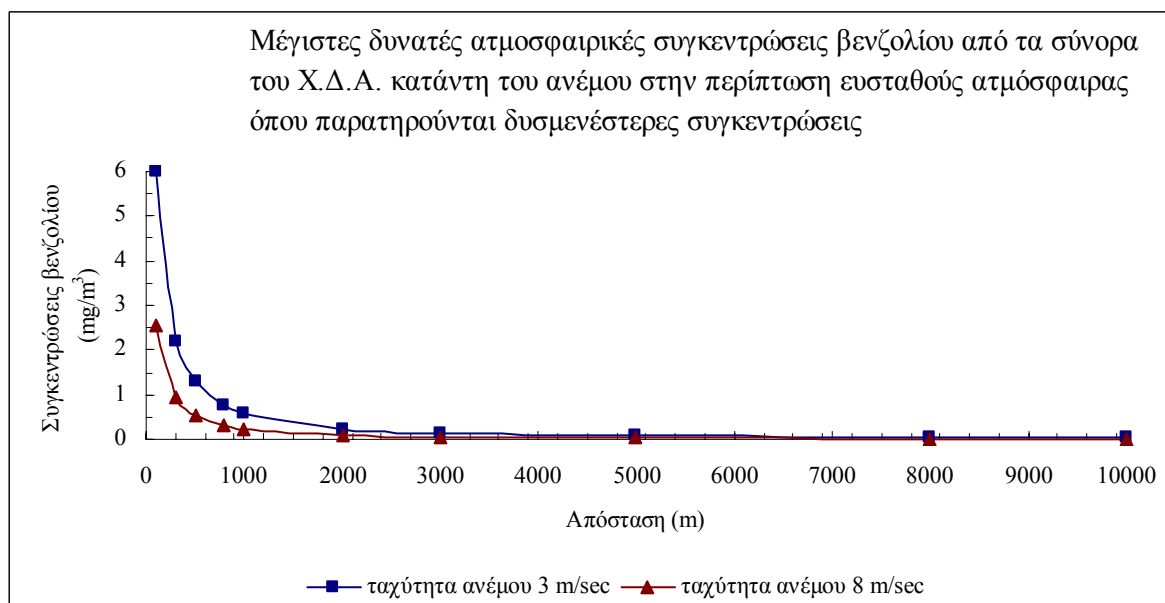
Έτσι αφού εισαγάγουμε τα δεδομένα στο μοντέλο και επεξεργαστούμε τα εξαγόμενα αποτελέσματα αυτού, απεικονίζουμε διαγραμματικά τα αποτελέσματα της συγκέντρωσης των NMVOC, βενζολίου και H_2S (εν έτει 2003) συναρτήσει της απόστασης από την ενεργή σημειακή πηγή διαμέτρου 100 m που τοποθετείται στα σύνορα της μελετούμενης χωματερής της οποίας η εκπομπή είναι πολλαπλασιασμένη επί 10 σύμφωνα με τα παραπάνω.



Διάγραμμα 10: Μέγιστες δυνατές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις NMVOC σε συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες από τα σύνορα της χωματερής για κατάσταση ευσταθούς ατμόσφαιρας και ταχύτητες ανέμου 2 m/sec και 8 m/sec.



Διάγραμμα 11: Μέγιστες δυνατές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις H_2S σε συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες από τα σύνορα της χωματερής για κατάσταση ευσταθούς ατμόσφαιρας και ταχύτητες ανέμου 2 m/sec και 8 m/sec.



Διάγραμμα 12: Μέγιστες δυνατές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις βενζολίου σε συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες από τα σύνορα της χωματερής για κατάσταση ευσταθούς ατμόσφαιρας και ταχύτητες ανέμου 2 m/sec και 8 m/sec.

Στα διαγράμματα 10, 11 & 12 δείχνεται καθαρά αυτό που αποδείχτηκε και στις επιτόπιες μετρήσεις πεδίου στο Χ.Δ.Α. (M.Loizidou et al., 1992), ότι δηλαδή οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων πολύ κοντά στον ενεργό χώρο διάθεσης απορριμμάτων (έως

300 m από τα σύνορα της χωματερής) είναι αρκετά υψηλές ξεπερνώντας ισχύοντα όρια ποιότητας αέρα, ενώ σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 300~500 m από τα σύνορα του Χ.Δ.Α. οι συγκεντρώσεις αέριων ρύπων είναι αρκετά μειωμένες.

7.3.4. Εκτίμηση επιπτώσεων αέριας ρύπανσης από το Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια”

7.3.4.1.Επιπτώσεις στην υγεία των εργαζομένων που βρίσκονται στο Χ.Δ.Α.

Στον πίνακα 23 παρουσιάζεται ο κίνδυνος σοβαρής επίπτωσης στην υγεία εργαζομένων σε Χ.Δ.Α. από επανειλημμένη (για πολύ καιρό έκθεση) κανονική δωρη έκθεση σε ορισμένα συστατικά του παραγόμενου βιοαερίου, όπως εκτιμήθηκε από το ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists).

Πίνακας 23: Προτεινόμενες ανώτατες επιτρεπτές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις για επιλεγμένες ουσίες του βιοαερίου στον εργασιακό χώρο (ACGIH, 1993-1994).

Χημική ονομασία	Χημικός τύπος	TLV-TWA (mg/m ³)	TLV-STEL mg/m ³
Chloroform	CHCl₃	49 A2	-
Carbon tetrachloride	CCl₄	31 A3	63
1,1-Dichloroethane	C ₂ H ₄ Cl ₂	405	-
Trichloroethane	C ₂ H ₃ Cl ₃	1910	2460
Vinyl chloride	C₂H₃Cl	13 A1	-
1,1-Dichloroethylene	C ₂ H ₂ Cl ₂	20	79
Trichloroethylene	C ₂ HCl ₃	269 A5	537 A5
Tetrachloroethylene	C ₂ Cl ₄	170 A3	685 A3
Hydrogen Sulfide	H₂S	14	21
1-Propyl alcohol	C ₃ H ₈ O	492	614
2-Butyl alcohol	C ₄ H ₁₀ O	303	455
Methyl mercaptan	CH ₄ S	0,98	-
Ethyl mercaptan	C ₂ H ₆ S	1,3	-
Methylene chloride	CH₂Cl₂	174 A2	-
Methyl chloride	CH ₃ Cl	103	207
Isopropyl benzene	C ₉ H ₁₂	-	-
Tetrahydrobenzene	C ₆ H ₁₀	-	-
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	434	543
Benzene	C₆H₆	32 A2	-
Toluene	C ₇ H ₈	188	-
Xylene	C ₈ H ₁₀	434	651
Nonane	C ₉ H ₂₀	1050	-
Octane	C ₈ H ₁₈	1400	1750
Heptane	C ₇ H ₁₆	1640	2050
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	1030	-

Hexane	C ₆ H ₁₄	176	-
Pentane	C ₅ H ₁₂	1770	2210
Propylene	C ₃ H ₈	-	-
Propane	C ₃ H ₈	-	-
Butylene	C ₄ H ₈	-	-
Butane	C ₄ H ₁₀	1900	-
Ethylene	C ₂ H ₄	-	-

A1: αποδεδειγμένη πρόκληση καρκίνου στον άνθρωπο.

A2: υπόπτο για καρκίνο στον άνθρωπο.

A3: καρκίνο στα ζώα.

A4: δεν ταξινομείται ως καρκινογενής ουσία για τον άνθρωπο.

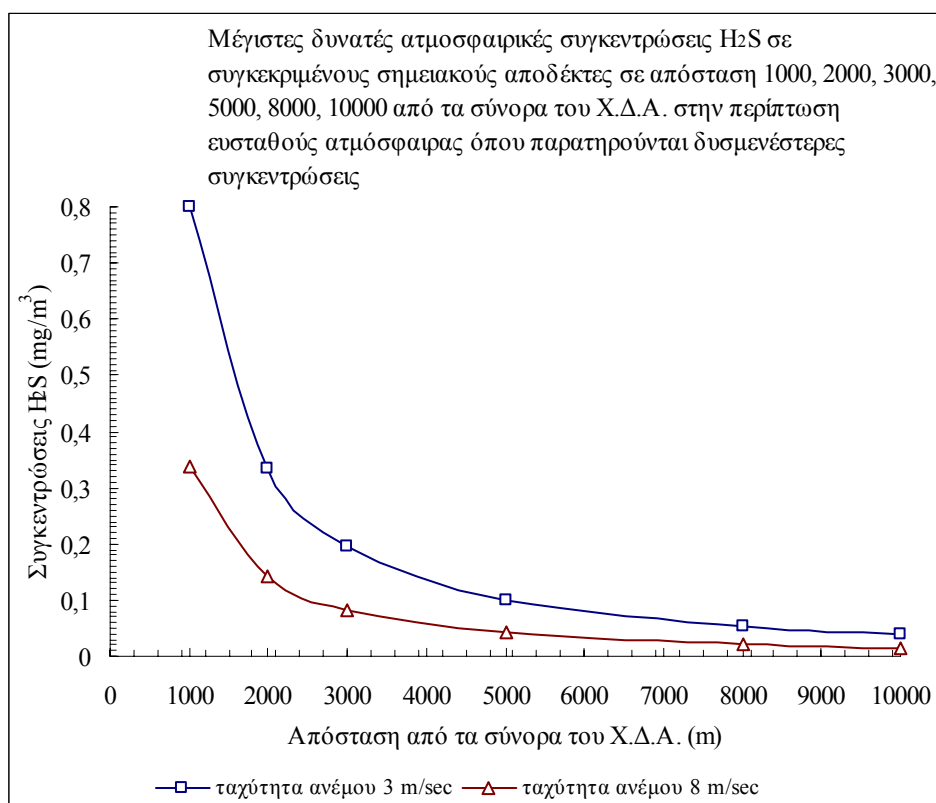
A5: δεν είναι ύποπτο για καρκίνο στον άνθρωπο.

Επιτρεπτά επίπεδα έκθεσης σε ολικά πτητικά οργανικά συστατικά (TVOCs) για γενικές βιομηχανίες που αναφέρονται στην εργασιακή νομοθεσία του Καναδά (Labour Canada legislation) για την προστασία των εργαζομένων από την τοξική επίδραση των TVOCs, κυμαίνονται από 100 έως 1000 mg/m³. Στην περίπτωση του μελετούμενου Χ.Δ.Α. και για δυσμενές σενάριο ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν παρατηρείται υπέρβαση πάνω από το ‘κατώφλι’ 1000 mg/m³.

Η δυσμενέστερη εκτιμώμενη τιμή ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης βενζολίου (στην ευσταθή ατμόσφαιρα σε κατάσταση σχετικής άπνοιας) και ίση με 6 mg/m³, δεν υπερβαίνει τα επίπεδα καθημερινής κανονικής δωρης έκθεσης TLS-TWA & TLV-STEL (πίνακας 23). Επίσης δεν παρατηρείται υπέρβαση ορίων και στην περίπτωση του H₂S στο Χ.Δ.Α. Η υπολογιζόμενη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση H₂S ίση με 8,24 mg/m³ είναι μικρότερη από το επίπεδο έκθεσης TLV-STEL & TLS-TWA που τίθεται από το ACGIH (πίνακας 23). Σημειώνεται ότι σε καμία κατάσταση σταθερότητας ατμόσφαιρας δεν παρατηρείται υπέρβαση των ορίων που προτείνει το ACGIH. Σε μακροχρόνια επίδραση υπάρχουν βάσιμες ανησυχίες ότι ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις το βενζόλιο και το υδρόθειο σχετίζονται με αυξημένη θνησιμότητα δίχως όμως να καταστεί δυνατό να προσδιοριστεί το κατώφλι των ελάχιστων προς τούτο συγκεντρώσεων.

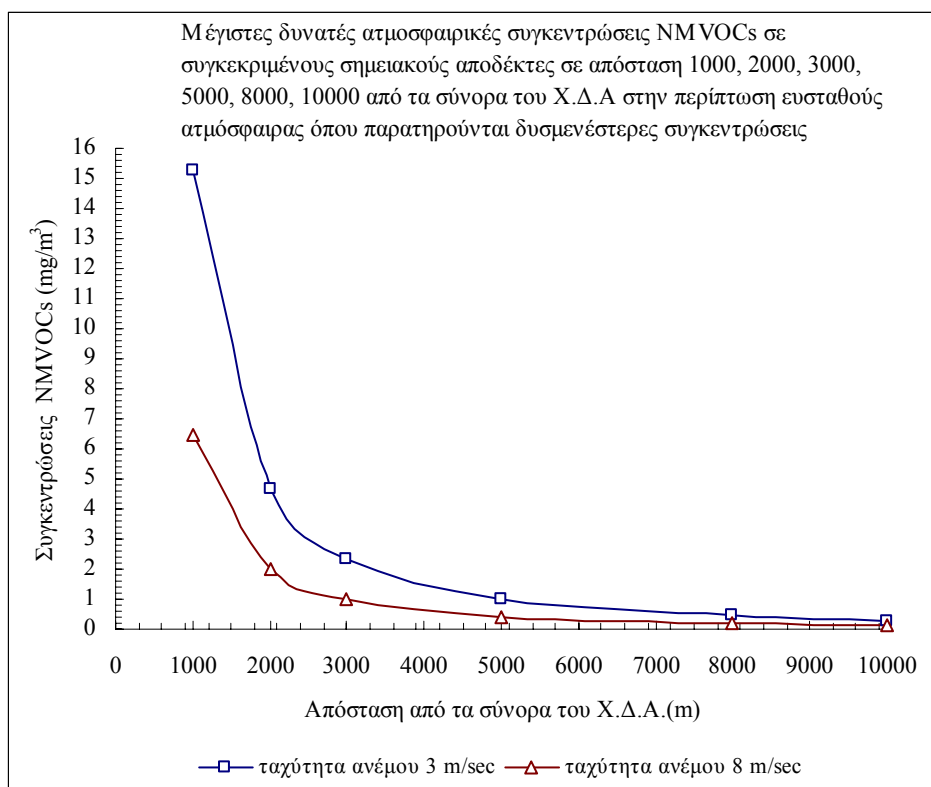
7.3.4.2.Επιπτώσεις στην υγεία των περίοικων – εκτίμηση αποδεκτής απόστασης μεταξύ συνόρων Χ.Δ.Α. και οικιστικής περιοχής

Στα διαγράμματα 13 & 15 φαίνονται οι δυσμενέστερες δυνατές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις H_2S και βενζολίου πάνω από συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες (κατάσταση ευσταθούς ατμόσφαιρας). Επιλέξαμε τον ρύπο H_2S ως αντιπροσωπευτικό ρύπο των οσμηρών συστατικών του βιοαερίου για το λόγο ότι κατατάσσεται ανάμεσα στα πιο σημαντικά δύσοσμα αέρια (πίνακας 5) ενώ παρουσιάζει μειωμένη χημική δραστικότητα στην ατμόσφαιρα (Tagaris, 2003). Επίσης διαλέξαμε τον αέριο ρύπο βενζόλιο για την εκτίμηση του κινδύνου που διατρέχει ο περίοικος διότι αποτελεί κυρίαρχο τοξικό ρύπο (πίνακας 4) και υπάρχει σε σημαντική ποσότητα (52,2 ppm – βλ. πίνακα 6-) στο παραγόμενο βιοαέριο της χωματερής στην οποία γίνεται συνδιάθεση οικιακών και επικίνδυνων στερεών αποβλήτων, (υπενθυμίζεται ότι στο μοντέλο εκτίμησης ποσοτικής παραγωγής βιοαερίου έχει συνυπολογιστεί ο παράγοντας συνδιάθεσης οικιακών με τοξικά απόβλητα).



Διάγραμμα 13: Μέγιστες δυνατές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις H_2S σε συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες (ο Δήμος Ασπροπύργου βρίσκεται 1 Km από τα σύνορα του Χ.Δ.Α.) από τα σύνορα της χωματερής για κατάσταση ευσταθούς ατμόσφαιρας και ταχύτητες ανέμου 2 m/sec και 8 m/sec.

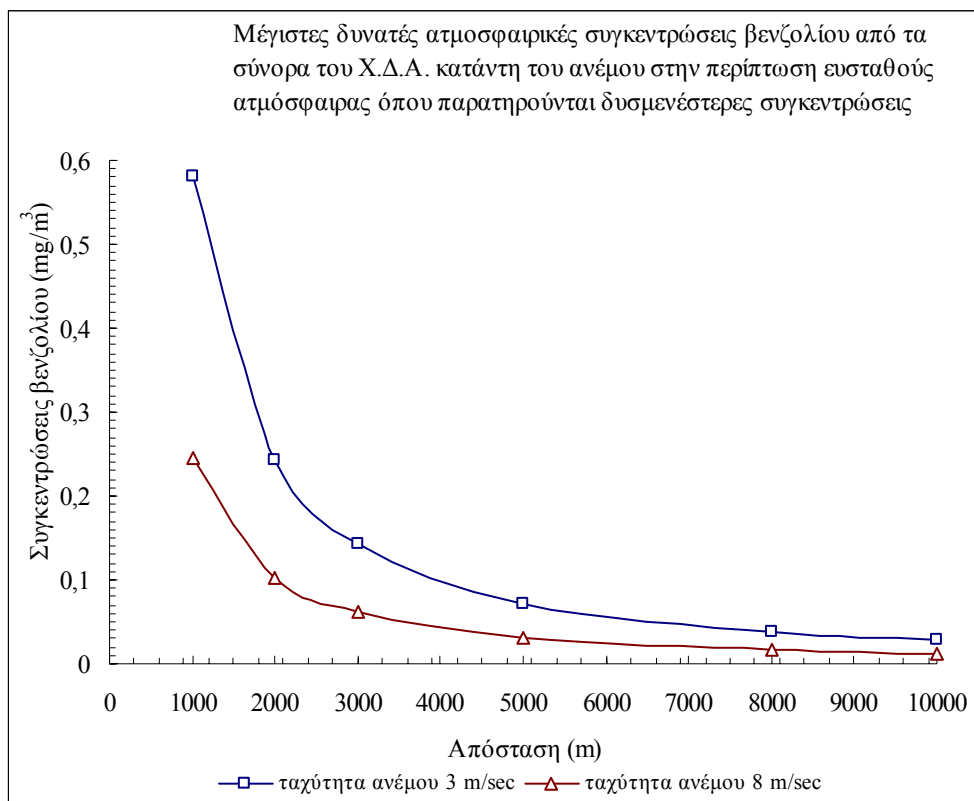
Η υπολογιζόμενη ατμοσφαιρική συγκέντρωση του H_2S για ευσταθή κατάσταση ατμόσφαιρας με ταχύτητα ανέμου 8 m/sec και σε απόσταση 1km από τα σύνορα της εμβαδικής πηγής είναι περίπου ίση με $0,338 \text{ mg/m}^3$, ενώ στην κατάσταση σχετικής άπνοιας και τις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες η υπολογιζόμενη ατμοσφαιρική συγκέντρωση προκύπτει ίση με $0,8 \text{ mg/m}^3$ (διάγραμμα 13). Η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας (WHO) προτείνει το όριο $8 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ (ή 6 ppb)²⁵ ως όριο ανίχνευσης οσμής για το H_2S . Με βάση αυτό το όριο διαπιστώνεται ότι στον Ασπρόπυργο παρουσιάζεται έντονο πρόβλημα οσμών σε ευσταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες εξαιτίας της υπέρβασης του επιπέδου ανίχνευσης οσμής στην περιοχή. Σε ασταθής κατάσταση ατμόσφαιρας (ηλιόλουστη μέρα) και σχετική άπνοια (3 m/sec) οι εκτιμήσεις δίνουν τιμή ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης H_2S στα 1000 m από τα σύνορα του Χ.Δ.Α. περίπου ίση με $20 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ τιμή πολύ κοντά στο όριο ανίχνευσης οσμής που θέτει η WHO.



Διάγραμμα 14: Μέγιστες δυνατές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις NMVOCs σε συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες (ο Δήμος Ασπροπύργου βρίσκεται 1 Km από τα σύνορα του Χ.Δ.Α.) από τα σύνορα της χωματερής για κατάσταση ευσταθούς ατμόσφαιρας και ταχύτητες ανέμου 2 m/sec και 8 m/sec.

²⁵ Στην Ελλάδα δεν υπάρχουν θεσμοθετημένα όρια για το H_2S που να αφορούν την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, αλλά σε συγκεντρώσεις άνω των 6 ppb το υδρόθειο γίνεται αντιληπτό ως δυσάρεστη οσμή.

Οι εκτιμήσεις για τις ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις NMVOCs το έτος 2003 στη θέση 1 km από το Χ.Δ.Α., στο Δ. Ασπροπύργου δίνουν τιμή περίπου ίση με 15,25 mg/ m³ και 6,44 mg/ m³ για ταχύτητα ανέμου 3 m/sec και 8 m/sec αντίστοιχα (διάγραμμα 14).



Διάγραμμα 15: Μέγιστες δυνατές ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις βενζολίου σε συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες (ο Δήμος Ασπροπύργου βρίσκεται 1 Km από τα σύνορα του Χ.Δ.Α.) από τα σύνορα της χωματερής για κατάσταση ευσταθούς ατμόσφαιρας και ταχύτητες ανέμου 2 m/sec και 8 m/sec.

Σύμφωνα με τη WHO το βενζόλιο σε μέση ατμοσφαιρική συγκέντρωση 5-20 μg/m³ προκαλεί λευχαιμία. Πάνω από το δήμο Ασπροπύργου εκτιμάται συγκέντρωση βενζολίου ίση με 0,6 mg/ m³ και 0,26 mg/ m³ για ταχύτητες ανέμου 3 m/sec και 8 m/sec αντίστοιχα υπό ευσταθή κατάσταση ατμόσφαιρας (διάγραμμα 15). Οι υπολογιζόμενες συγκεντρώσεις εκτιμώνται 16 και 30 φορές αντίστοιχα μεγαλύτερες από το ισχύον επιτρεπτό όριο της WHO. Σε ασταθείς συνθήκες και κατάσταση άπνοιας (ηλιόλουστη μέρα) και σε απόσταση 1km από το δήμο Ασπροπύργου οι συγκεντρώσεις βενζολίου υπολογίζονται ίσε με 15 μg/m³ πολύ κοντά στο ανώτατο επιτρεπτό όριο που προτείνει η WHO.

Η αποδεκτή απόσταση μεταξύ συνόρων Χ.Δ.Α. και οικιστικής περιοχής εκτιμάται με βάση την ατμοσφαιρική συγκέντρωση του κυρίαρχου τοξικού αερίου ρύπου που εκλύεται από το

σύνολο της χωματερής και χαρακτηρίζεται από σημαντική πτητικότητα. Συγκρίνεται η ατμοσφαιρική συγκέντρωση του ρύπου με επιτρεπόμενο όριο στην ατμόσφαιρα αναφερόμενο στο μελετούμενο αέριο ρύπο και καθορίζεται η αποδεκτή απόσταση μεταξύ συνόρων χωματερής και οικιστικής περιοχής. Για τη σύγκριση επιλέγονται ατμοσφαιρικές συνθήκες με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης κατ' έτος, δηλαδή ουδέτερη κατάσταση ατμόσφαιρας με ταχύτητα ανέμου 5 m/sec (περίπου 4 Beaufort) και ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας μέτρια έως χαμηλή. Η επιλογή ταχύτητας ανέμου για το Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια" βασίστηκε στα ροδοδιαγράμματα 16 & 17 όπου παρατηρείται ότι οι επικρατούντες άνεμοι έχουν μέση ταχύτητα ίση με 4-5 m/sec στο νομό Αττικής.

Έτσι σύμφωνα με τα παραπάνω στην περίπτωση του Χ.Δ.Α. "Α.Λιόσια" επιλέγεται ο αέριος ρύπος βενζόλιο (πίνακας 4) για την εκτίμηση της μέσης απόστασης συνόρων Χ.Δ.Α. από γειτονική οικιστική περιοχή. Για ουδέτερη κατάσταση ατμόσφαιρας εκτιμάται η διασπορά εκπομπής του βενζολίου από την πηγή εκπομπής. Εξάγεται λοιπόν ο πίνακας 24 στον οποίο παρατηρείται ότι η μέση απόσταση 2000 m θεωρείται ασφαλής για την υγεία των κατοίκων σύμφωνα με το όριο που προτείνει η WHO, 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για το βενζόλιο.

Πίνακας 24: Αποτελέσματα CONCX σε ουδέτερη ατμοσφαιρική κατάσταση με ταχύτητα ανέμου 5 m/sec (για ηλιακή ακτινοβολία μέτρια έως χαμηλή κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου ο ρύπος διασπείρεται σε σχετικά μεγάλη απόσταση από την πηγή εκπομπής).

Συγκεντρώσεις βενζολίου ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) σε ουδέτερη κατάσταση ατμόσφαιρας								
Απόσταση (m) από τα σύνορα της εμβαδικής πηγής με ταχύτητες ανέμου:	100	300	500	800	1000	2000	3000	5000
3 m/sec	1381	410	215	115	84	31	17	8
5 m/sec	885	263	138	73	54	20	11	5
8 m/sec	579	172	90	48	35	13	7	3

Επισημαίνεται ότι οι χρησιμοποιούμενες εκπομπές στην εφαρμογή του μοντέλου διασποράς είναι οι δυσμενέστερες δυνατές αφού δεν λαμβάνεται σύστημα ανάκτησης βιοαερίου που βεβαίως περιορίζει την ποσότητα των εκλυόμενων αέριων ρύπων. Επίσης δε λαμβάνονται υπόψη πιθανές καταβόθρες όπως έδαφος καθώς και μηχανισμοί καταστροφής ρύπων όπως είναι η αντίδραση οξείδωσης αυτών κατά την απελευθέρωσή τους προς την ατμόσφαιρα. Επειδή λοιπόν η ατμοσφαιρική συγκέντρωση αερίου ρύπου είναι ανάλογη της έντασης εκπομπής από την πηγή, η κατάλληλη διαχείριση των εκπομπών (σύστημα συλλογής βιοαερίου και διεργασίες καθαρισμού του καθώς και η πρακτική χωματοκάλυψης) μπορεί να

περιορίσει τις εκπομπές ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ατμοσφαιρική συγκέντρωση χωρίς επιπτώσεις στη δημόσια υγεία του γειτονικού πληθυσμού.

8. ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας η αναπτυχθείσα μεθοδολογία πρόγνωσης τυπικών παραγόμενων φορτίων βιοαερίου και εκτίμησης διασποράς εκπομπών αέριων ρύπων που επιλέχθηκε και εφαρμόστηκε στην περίπτωση του Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” παρήγαγε χρήσιμα αποτελέσματα για το σχεδιασμό στρατηγικής χωροθέτησης μονάδων διάθεσης απορριμμάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση επιπτώσεων από τις εκπομπές αέριων ρύπων στη δημόσια υγεία του γειτονικού πληθυσμού.

Οι υπολογισμοί των εκπομπών των αέριων ρύπων που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή του μοντέλου διασποράς είναι προσεγγιστικοί, ωστόσο παρείχαν τιμές που ήταν δυσμενέστερες από τις πραγματικά αναμενόμενες. Οι προσεγγιστικές εκτιμήσεις εκπομπών οφείλονται στους παράγοντες αβεβαιότητας που υπεισέρχονται στην ποσοτικοποίηση της παραγωγής βιοαερίου. Για την όσο το δυνατό καλύτερη προσέγγιση τιμών ποσοτικής παραγωγής βιοαερίου μοντέλου και τιμών επιτόπιων μετρήσεων, στην περίπτωση της χωματερής “Α. Λιόσια” χρησιμοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν τρία μοντέλα: το στοιχειομετρικό μοντέλο, το ‘τριγωνικό μοντέλο’ και το μοντέλο της EPA, LandGEM. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το στοιχειομετρικό μοντέλο καταλήγει σε ‘χονδροειδείς’ υπερεκτιμημένες προσεγγίσεις αθροιστικής παραγωγής βιοαερίου, αφού θεωρεί πλήρη βιοαεριοποίηση της ποσότητας του οργανικού άνθρακα σε βιοαέριο, οδηγηθήκαμε στην επιλογή του LandGEM για την περίπτωση του Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια” που έδωσε τιμή ίση με $4 \cdot 10^9$ βιοαέριο $< 10^{10}$ m³ βιοαέριο (‘τριγωνικό μοντέλο’) $< 1,76 \cdot 10^{10}$ m³ βιοαέριο (στοιχειομετρικό μοντέλο). Αναφέρεται ότι το μοντέλο LandGEM έχει εφαρμοσιμότητα ευρέως στη βιομηχανία ενεργειακής εκμετάλλευσης βιοαερίου καθώς επίσης χρησιμοποιείται από την EPA για τον έλεγχο τήρησης των θεσμοθετημένων ορίων αέριων εκπομπών από χώρους διάθεσης απορριμμάτων.

Οι εκτιμήσεις παραγόμενου βιοαερίου στην σύνθετη περίπτωση της χωματερής “Α.Λιόσια” με το εμπειρικό μοντέλο LandGEM θεωρήθηκαν σχετικά συγκλίνουσες με τις μετρήσεις πεδίου που σποραδικά πραγματοποιούνταν στον εν λόγω Χ.Δ.Α. Πράγματι για το έτος 2003 εκτιμήθηκε φορτίο παραγόμενου βιοαερίου περίπου ίσο με 301.370 Nm³/day σχετικά

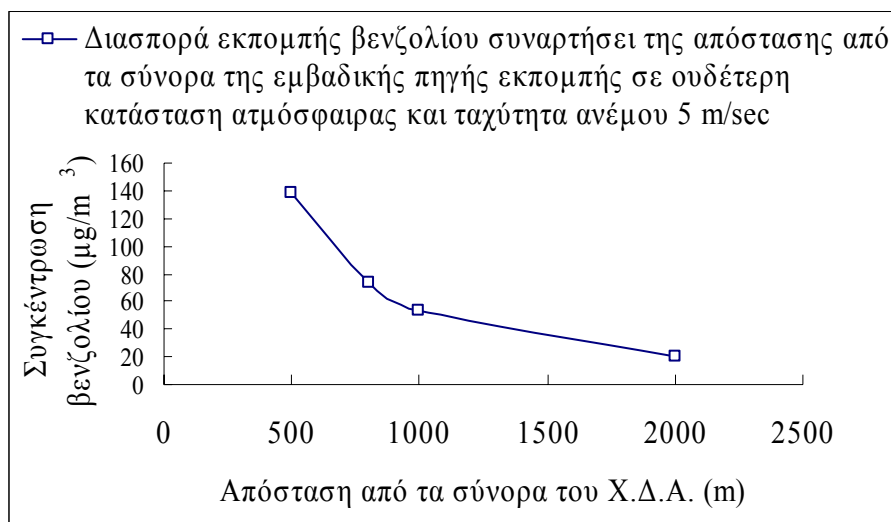
συγκρίσιμο με τη μέτρηση πεδίου που δίνει τιμή ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου το ίδιο έτος ίση με 184.000 m³/day (ΚΑΠΕ, 2002). Αναφέρεται ότι οι εκτιμήσεις των αέριων εκπομπών αφορούσαν συνθήκες ανεξέλεγκτων εκπομπών -χωρίς να λαμβάνεται υπόψη χωματοκάλυψη των απορριμμάτων καθώς και λειτουργία μηχανικού συστήματος ανάκτησης βιοαερίου-.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου διασποράς στον υπό μελέτη Χ.Δ.Α. “Α.Λιόσια” έδειξαν αυτό που αποδείχτηκε και από επιτόπιες μετρήσεις πεδίου στο Χ.Δ.Α. (Μ.Λοιζίδου et al., 1992), ότι δηλαδή οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων πολύ κοντά στον ενεργό χώρο διάθεσης απορριμμάτων (έως 300 m από τα σύνορα της χωματελής) είναι αρκετά υψηλές ξεπερνώντας ισχύοντα όρια ποιότητας αέρα, ενώ σε μεγαλύτερες αποστάσεις, πάνω από 500 m από τα σύνορα του Χ.Δ.Α., οι συγκεντρώσεις αέριων ρύπων είναι σχετικά μειωμένες. Σε ορισμένες όμως ακραίες καταστάσεις ατμόσφαιρας (ευσταθής ατμόσφαιρα με ταχύτητα ανέμου 3 & 8 m/sec) οι εκτιμήσεις έδειξαν ότι οι Χ.Δ.Α. έχουν σημαντική συνεισφορά στην τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση και χρήζουν ιδιαίτερης ανησυχίας λόγω της διασποράς και μεταφοράς αέριων ρύπων σε κατοικημένες περιοχές.

Στην περίπτωση εκτίμησης οχλήσεων από οσμές που παράγονται από το Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια” βασιστήκαμε στις συγκεντρώσεις του υδρόθειου το οποίο διακρίνεται για τον υψηλό βαθμό οσμηρότητας σε σχέση με τα υπόλοιπα δύσοσμα αέρια που περιέχονται στο βιοαέριο (πίνακας 5). Οι υπολογισμοί του γκαουσιανού μοντέλου στο Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια” έδωσαν ατμοσφαιρική συγκέντρωση H₂S, για ευσταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες (αντιπροσωπεύει δυσμενέστερο σενάριο αέριας ρύπανσης) με ταχύτητα ανέμου 8 m/sec και σε απόσταση 1km από τα σύνορα της εμβαδικής πηγής, ίση με 0,338 mg/m³ ενώ στην κατάσταση σχετικής άπνοιας και στις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες, η υπολογιζόμενη ατμοσφαιρική συγκέντρωση του H₂S προέκυψε ίση με 0,8 mg/m³. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι σαφώς μεγαλύτερες από την τιμή 8 μg/m³ όριο ανίχνευσης οσμής για το H₂S που θέτει η WHO. Από τις παραπάνω εκτιμήσεις αναγνωρίζεται το έντονο πρόβλημα οσμών στον Ασπρόπυργο σε περίπτωση ευσταθών ατμοσφαιρικών συνθηκών και γι’ αυτό τίθεται αναγκαία η πρακτική χωματοκάλυψης σε τέτοιες συνθήκες προκειμένου να περιοριστούν οι εκπομπές οσμηρών ενώσεων. Σε ασταθή πάλι κατάσταση ατμόσφαιρας (ηλιόλουστη μέρα) και σχετική άπνοια (3 m/sec) οι εκτιμήσεις έδωσαν τιμή ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης H₂S, στα 1000 m από τα

σύνορα του Χ.Δ.Α., περίπου ίση με $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, τιμή που προσεγγίζει τα επίπεδα ανίχνευσης οσμής της WHO.

Στην περίπτωση εκτίμησης επιπτώσεων στη δημόσια υγεία από εκλυσεις τοξικών που παράγονται από το Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια” χρησιμοποιήσαμε τον τοξικό αέριο ρύπο βενζόλιο (πίνακας 4). Το CONCX υπολόγισε συγκεντρώσεις βενζολίου υπό ευσταθή κατάσταση ατμόσφαιρας (αντιπροσωπεύει δυσμενέστερο σενάριο αέριας ρύπανσης κατά την συνολική περίοδο ενεργείας του Χ.Δ.Α.) πάνω από τον Ασπρόπυργο ίσες με $0,6 \text{ mg}/\text{m}^3$ (για ταχύτητα ανέμου $3 \text{ m}/\text{sec}$) και $0,26 \text{ mg}/\text{m}^3$ (για ταχύτητα ανέμου $8 \text{ m}/\text{sec}$) οι οποίες είναι 16 και 30 φορές αντίστοιχα μεγαλύτερες από το επιτρεπτό επίπεδο μέσης συγκέντρωσης βενζολίου που θέτει η WHO ίσο με $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Τέτοιο δυσμενές σενάριο αέριας ρύπανσης το οποίο παρατηρείται κατά το τέλος λειτουργίας του Χ.Δ.Α. και σε ευσταθή κατάσταση ατμόσφαιρας αντιμετωπίζεται με την επιβεβλημένη λειτουργία συστήματος συλλογής και επεξεργασίας καθαρισμού βιοαερίου πριν το αέριο απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Σε ασταθείς πάλι συνθήκες και κατάσταση άπνοιας (ηλιόλουστη μέρα) και σε απόσταση 1 km από τον Ασπρόπυργο η συγκέντρωση βενζολίου υπολογίστηκε ίση με $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, τιμή που προσεγγίζει το επιτρεπόμενο όριο που προτείνει η WHO. Για μέση κατάσταση ατμόσφαιρας δηλαδή ουδέτερη κατάσταση με ταχύτητα ανέμου $5 \text{ m}/\text{sec}$ (περίπου 4 Beaufort) και ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας μέτρια έως χαμηλή εκτιμήθηκε η διασπορά εκπομπής βενζολίου από τα σύνορα του Χ.Δ.Α. όπως φαίνεται στο διάγραμμα 16:



Διάγραμμα 16: Διασπορά εκπομπής βενζολίου συναρτήσεις της απόστασης από τα σύνορα του Χ.Δ.Α. σε ουδέτερη κατάσταση ατμόσφαιρας και ταχύτητα ανέμου $5 \text{ m}/\text{sec}$.

Από το διάγραμμα 16 παρατηρείται ότι η μέση απόσταση 2000 m θεωρείται ασφαλής για την υγεία των κατοίκων που γειτνιάζουν με τον παλαιό Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια” σύμφωνα με το επιτρεπόμενο επίπεδο συγκέντρωσης που προτείνει η WHO $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ για το βενζόλιο κάτω από το οποίο η μακροχρόνια επίδραση θεωρείται ασφαλής.

Η πρακτική χρησιμότητα της παρούσας μεθοδολογίας βασίζεται στο γεγονός ότι μπορεί να δώσει μια χρήσιμη εικόνα της έκτασης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από την ενεργεία του Χ.Δ.Α. Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η αναπτυχθείσα μεθοδολογία συμβάλλει:

- Στο σχεδιασμό στρατηγικής χωροθέτησης του Χ.Δ.Α. (εκτίμηση αποδεκτής απόστασης μεταξύ συνόρων Χ.Δ.Α. και συνόρων οικιστικής περιοχής) με σκοπό την ασφάλεια και προστασία της δημόσιας υγείας.
- Στην πρόληψη υποβάθμισης του τοπικού ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος με την ελαχιστοποίηση των εκπομπών και την έγκαιρη λειτουργία συστήματος ελέγχου και αξιοποίησης βιοαερίου.
- Στη μείωση της κοινωνικής αντίδρασης στη διαδικασία χωροθέτησης μονάδων διάθεσης απορριμμάτων με την ενσωμάτωση της μεθοδολογίας στον κώδικα πρακτικής βελτίωσης κοινωνικής αποδοχής του Χ.Δ.Α.
- Στην ανάπτυξη πολιτικής και προτεραιοτήτων σε ενέργειες διαχείρισης εκπομπών (πρακτική χωματοκάλυψης, εγκατάσταση συστήματος αξιοποίησης βιοαερίου, διεργασίες καθαρισμού εκλυόμενου βιοαερίου κ.λπ.).

Καταληκτικά πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει περιορισμένη επιστημονική βιβλιογραφία σε παγκόσμιο επίπεδο αναφορικά με την ποσοτικοποίηση των εκπομπών μεθανικών και οργανικών πτητικών συστατικών εκτός μεθανίου από την επιφάνεια εδάφους Χ.Δ.Α. και τον προσδιορισμό των επιπτώσεων (στη δημόσια υγεία, στο φυσικό περιβάλλον της γύρω περιοχής, ένταση και συχνότητα οχλήσεων από οσμές κ.λπ.) από την έκθεση γειτονικών αποδεκτών στην αέρια ρύπανση από βιογενείς εκπομπές που εκλύονται από Χ.Δ.Α.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή επιβλέποντα της εργασίας μου κο Μιχάλη Λαζαρίδη. Επίσης είμαι ευγνώμων στον κο Τάγαρη (Τμήμα Περιβάλλοντος-Πανεπιστήμιο

Αιγαίου) καθώς και στον κο Μαυριά (Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.) για τη βοήθειά τους στη διεκπεραίωση της εργασίας.

9. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- AEAT-3773: Issue 3, Options to Reduce Methane Emissions (Final Report), A report produced for DGXI, November 1998, DGXI - Department of Environment of the European Commission
- Bogner J., Spokas K., Burton E., Sweeney R., Corona V., "Landfills as atmospheric methane sources and sinks", *Chemosphere*, 31: 4119-4130, 1995
- Cardellini C., Ghiadini G., Frondini F., Granieri D., Lewicki J., Peruzzi J., "Accumulation chamber measurements of methane fluxes: application to volcanic-geothermal areas and landfills", *Geochemistry* 18:45-54, 2003
- Charles R. Rhyrer, Leander J. Schwartz, Robert B. Wenger, Mary G. Kohrell, *Waste Management and Resource Recovery*, 1995
- Cossu, R., Andreottola G. and Muntoni A. (1996) "Modelling Landfill Gas Production" in "Landfilling of Waste: Biogas", Edited by T.H. Christensen, R. Cossu and R. Segmann, E&FN Spon, London.
- Davoli E., M.L. Gangai, L. Morselli, D. Tonelli, "Characterisation of odorants emissions from landfills by SPME and GC/MS", Istituto Mario Negri, Via Eritrea 62, 20157 Milano, Italy, Dipartimento di Chimica Fisica ed Inorganica, Viale Risorgimento 4, 40136 Bologna, Italy, Dipartimento di Chimica Industriale e dei Materiali, Viale Risorgimento 4, 40136 Bologna, Italy, *Chemosphere* 51 (2003) 357-368
- Debra R. Reinhart "A review of recent studies on the sources of hazardous compounds emitted from solid waste landfills: A U.S. experience", *Waste Management and Research* (1993) 11,257-268, September 1992
- Department of the army U.S. Army Corps of Engineers ETL 1110-1-160 CEMP-RT Washington, D.C. 20314-1000, Technical Letter, No. 1110-1-160, 17 April 1995 Engineering and Design, landfill off-gas collection and treatment systems
- ECOSIM, Ecological and environmental monitoring and simulation system for management decision support in urban areas, Report on Validation Athens, EN 1006, Telematics Application Programme, 30 October 1998, Kostas Karatzas & Nicolas Moussiopoulos, Aristotle University Thessaloniki, Despo Fatta & Maria Loizidou, National Technical University of Athens, Leonidas Perivoliotis & Alex Lascaratos, University of Athens
- Environment Agency, Investigation of the Composition and Emissions of Trace Components in Landfill Gas, R&D Technical Report P1-438/TR T. Parker, J. Dottridge, and S. Kelly, 2002
- EPA, Methods for estimating greenhouse gas emissions from municipal waste disposal, Volume VIII: Chapter 5, Prepared by: ICF Consulting, Prepared for: Greenhouse Gas Committee Emission Inventory Improvement Program (EIIP), October 1999
- EPA, Emission factor documentation for AP-42 section 2.4, municipal solid waste landfills, Revised, Office of air quality planning and standards, Office of Air and Radiation, August 1997.
- EPA-454/R-95-015, revised, procedures for preparing emission factor documents, Office of Air Quality Planning and Standards, Office of Air and Radiation, U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC 27711, November 1997
- EPA-453/R-94-021, Air Emissions from municipal solid waste landfills -Background information for final standards and guidelines, Emission Standards Division, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, North Carolina 27711, December 1995
- Fadel Mutasem EI-, Angelos N. Findikakis and James O. Leckie "Environmental impacts of solid waste landfilling", *Journal of Environmental Management* (50), 1-25, 1997
- Fernandez et. al., "Production Potential of Biogas in Sanitary Landfills." Sardinia, Fifth International Landfill Symposium, 1995
- Galle B., Jerker Samuelsson, H. Svensson, Gunnar Borjesson, "Measurements of methane emissions from landfills using a time correlation tracer method based on FTIR absorption spectroscopy",

- Environmental Science and Technology, 35:21-25, 2001
- GasSimLite User Manual, Environmental Agency, 2002
- Mehrdad Hashemi, Halil I. Kavak, Theodore T. Tsotsis, Muhammad Sahimi, Chemical Engineering Science 57 (2002) 2475 – 2501, “Computer simulation of gas generation and transport in landfills— I: quasi-steady-state condition”
- Humer M., Lecher P., "Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills", Waste Management & Research, 17 (1999) 443-452
- IPCC Guidelines Revised 1996 for national Greenhouse gas inventories: Reference manual
- Irving William, Jonathan Woodbury, Michael Gibbs, Diana Pape, Vikram Bakshi, "Applying a correction factor to the IPCC default methodology for estimating national methane emissions from solid waste disposal sites", Waste management and Research, 17: 459-464, 1999
- Jin-Sheng Lin, Lynn M. Hildemann, "A nonsteady-state analytical model to predict gaseous emission of volatile organic compounds from landfill, Journal of hazardous materials 40, 1995
- Ki-Hyun Kim, Min-Young Kim, "The distribution of BTEX compounds in the ambient atmosphere of the Nan-Ji-Do abandoned landfill site in Seoul", Atmospheric Environment 36:2433-2446, 2002
- Koliopoulos Telemachus C., George Fleming, Adamantios Skordilis, "Variation of Landfill Gas Production according to the waste composition", 6th Int. Conf. on Environmental Science and Technology, Pythagorion, Samos, Greece 30/8-2/9/99
- Landfill Gas Emissions Model User Manual, Version 2.0, February 1998
- Loizidou M., Kapetanios E.G. "Study of the gaseous emissions from a landfill, The Science of the Total Environment 127 (Vol.3), 1992
- Manna L., Zanetti M.C., Genon G., “Modeling biogas production at landfill site”, Ressources, Conservation and Recycling 26, 1-14, 1999
- Maurice C., Lagerkvist A., “LFG emission measurements in cold climatic conditions: seasonal variations and methane emissions mitigation”, Cold Regions Science and Technology 36 (2003) 37– 46
- Mavropoulos Antonis, Kaliampakos Dimitris, "International report: uncontrolled landfill investigation - a case study in Athens", Waste Management & Research Vol. 17, 159-164, 1999
- Milich Lenard, Global Environmental Change 9 (1999) 179-201, "The role of methane in global warming: where might mitigation strategies be focused?"
- Miroslav Nastev, Therrien Rene, Lefebvre Rene, Pierre Gelinas, Journal of Contaminant Hydrology 52 2001 187-21, "Gas production and migration in landfills and geological materials", Geological Survey of Canada, Quebec Geoscience Centre, 880, Canada G1V 4C7
- Office of Air Quality Planning and Standards Technology Transfer Network Website (OAQPS TTN Web) in the Clearinghouse for Inventories and Emission Factors (CHIEF) technical area (URL <http://www.epa.gov/ttn/chief>).
- Petitioned Public health assessment, ATSDR, Yaworski landfill, Canterbury, Windham County, Connecticut
- Solid Waste Management and Greenhouse Gases, "A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks", 2nd edition, EPA 530-R-02-006, May 2002
- SWANA, Hamideh Soltani-Ahmadi /Hickman Intern, 2000, “A review of the literature regarding non-methane and volatile organic compounds in municipal solid waste landfill gas”
- Tagaris Efthimios, Rafaella-Eleni P.Sotiropoulou, Christodoulos Pilinis, Costantinos P.Halvadakis, "Atmospheric methane transport near landfill sites", Waste Management & Research Vol 61, 2003
- Tagaris Efthimios, Rafaella-Eleni P.Sotiropoulou, Christodoulos Pilinis, Costantinos P.Halvadakis, "A methodology to estimate odors around landfill sites: The use of methane as an odor index and its utility in landfill siting", Air and waste management association, Vol 53:629-634, 2003
- Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S., “Integrated solid waste management”, Engineering principles and management issues, 1993
- Thorneloe, S.A., A. Reisdorph, M. Laur, R. Pelt, R.L. Bass, and C. Burklin, The U.S. Environmental Protection Agency’s Landfill Gas Emission Model, Sardinia 99, Seventh International Waste

- Management and Landfill Symposium, Published in Proceedings, Vol IV, pages 11-18, October 1999
- Tregoures A., Beneito A., P.Berne, M.A. Gonze, J.C. Sabroux, D.Savanne, Z. Pokryszka, C. Tauziede, P. Cellier, P. Laville, R. Milward, A. Arnaud, F. Levy, R. Burkhalter, "Comparison of seven methods for measuring methane flux at a munixipal solid waste landfill site", Waste Management & Researc,17:453-458, 1999
- U. Desideri, F. Di Maria, D. Leonardi, S. Proietti,"Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study", Energy and Converion Management, 2002
- U.S.EPA, Landfill gas emissions model, version 2.01., January 1999, <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html>
- User's guide for the Gaussian type dispersion models CONCX and CONDEP, NILU, Trond Bohler, September 1987
- V. Camobreco, R.Ham, M. Barlaz, E.Repa, M. Felker, C. Rousseau, J. Rathle, "Life-cycle inventory of a modern municipal solid waste landfill", Waste Management & Research, No 17, pg: 394-408, 1999
- V. Popov and H. Power "DRM-MD approach for the numerical solution of gas, flow in porous media, with application to landfill", "Engineering Analysis with Boundary Elements", Vol23, issue, 2, Febr. 1999
- V. Popov, H.Power "Gases emission to the atmosphere from a multi layer landfill", Wessex Institute of Technology, Ashurst Lodge article from the book Air Pollution II Volume 2, Pollution Control and Monitoring, Editors: J.M. Baldasano, C.A. Brebbia, H. Power, P. Zannetti, Computational Mechanics Publication.
- Verschuere, K. Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals, John Wiley & Sons, NY, 1997 volume III: chapter 15, landfills Revised Final, January 2001, Prepared by Eastern Research Group, Inc. for the Area Sources Committee of Emission Inventory Improvement Program and for Charles Mann of the Air Pollution Prevention and Control Division,
- Waste Management Paper 26B, Landfill Design, Construction and Operational Practice, Department of the Environment, HMSO, London, 1995
- Williams Paul T., Waste Treatment and Disposal, Wiley, 1998
- Αλαβάνης Κωνσταντίνος, Τατση Αλεξάνδρα, Παραγωγή και σύσταση βιοαερίου στο χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων ανατολικού τομέα Θεσσαλονίκης, 2ο συνέδριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Μόλυβος Μυτιλήνης, 1991
- Αληβάνης Πολυχρόνης, Αλιβάνης Κωσταντίνος,"Υγειονομική ασφάλεια των εργαζομένων σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων", 3ο Συνέδριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Μόλυβος Λέσβου, 1993
- Γεωργακόπουλος Αριστ., Φραντζής Ι., "Υγειονομική Ταφή με την μέθοδο των κυττάρων", 2ο Συνέδριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας- Μόλυβος Μυτιλήνης, 1991
- Γεωργόπουλος Δ., Σημειώσεις για την εκτιμηση περιβαλλοντικων επιπτωσεων απο ΧΥΤΑ, Προγραμμα life: medact - aphrodite, Σεπτέμβριος 1998
- Ελληνικός Σύνδεσμος Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού & Θερμότητας (ΕΣΣΗΘ), Hellenic Association for the Cogeneration of Heat and Power (HACHP)
- Καρατζάς, Σημειώσεις μαθήματος "Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων", Τμήμα Μηχ. Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείου Κρήτης, 2002
- Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Βιοαέριο: Η ενέργεια του μέλλοντος - Νέο πρόγραμμα του ΚΑΠΕ, Νοέμβριος 2002
- Κωστοβασίλης Γ., Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π, Μηχανικού Περιβάλλοντος M.Sc. D.I.C. , μέλους της Συντονιστικής Γραμματείας της HELECO '03, τελευταία επίσημα στοιχεία Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. "Επικαιροποιημένος Εθνικός Σχεδιασμός Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ. Ε Ιούλιος 2002)"

- Λαζαρίδης Μ., "Μοντέλα Ποιότητας Αέρα", Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχ. Περιβάλλοντος, 2002
- Μανιός Θ., Διαχείριση και Επεξεργασία Αστικών Απορριμμάτων', Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχ. Περιβάλλοντος, 2001
- Μουσιόπουλος, Μαθηματικά μοντέλα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, 1997
- Μελέτη Διαχείρισης Χ.Υ.Τ.Α. Δ.Αττικής, Τεύχος 6, Διαχείριση Βιοαερίου, Κοινοπραξία "Κόρωνις Α.Ε. - UKPS LIMITED- ENVITEC Α.Ε", πηγή: Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α
- Οδηγός για τη διαχείριση των απορριμμάτων στην Ελληνική Περιφέρεια, Μ.Αλεξάκη, Αρχιτέκτων Μηχανικός, Ι. Αγαπητίδης, Πολιτικός Μηχανικός, Υγειονόλογος ΕΕΤΑΑ
- Ολοκληρωμένος Σχεδιασμός Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων στην Περιφέρεια Κρήτης, Πλαίσιο Σχεδιασμού Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων Ν. Χανίων, Μελετητής Ο.ΑΝ.Α.Κ, Μελετητής Παρασκευόπουλος, Γεωργιάδης, Οκτώβριος 2000
- Προσωπική επικοινωνία με κο Μαυριά (Μηχανολόγος μηχανικός του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.), 5-5-2003, (επισυνάπτεται στο παράρτημα)
- Σκορδίλης Α., "Τεχνολογίες διάθεσης απορριμμάτων, Η Υγειονομική Ταφή", Εκδόσεις Ίων, 1993
- Τάγαρης Ε. και Χαλβαδάκης Κ.Π., "Εκτίμηση Παραγωγής Βιοαερίου σε Μονάδες Εδαφικής Διάθεσης Απορριμμάτων", Διεθνές Συνέδριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης & Τεχνολογίας- Πυθαγόρειο Σάμου 30/8-2/9/99



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ
ΑΠΟ ΧΩΡΟΥΣ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ
(Χ.Δ.Α.)»**

ΠΑΡΑΣΚΑΚΗ Ε. ΙΩΑΝΝΑ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Δρ. ΛΑΖΑΡΙΔΗΣ Μ. (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Δρ. ΓΚΕΚΑΣ Β.

Δρ. ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ Ν.

Ιούλιος 2003



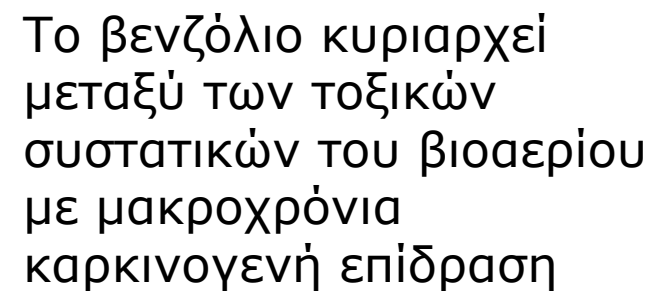
Στόχοι εργασίας

- Εκτίμηση αποδεκτής απόστασης αποδέκτη από σύνορα Χ.Δ.Α., για την προστασία της δημόσιας υγείας από τα τοξικά και οσμηρά αέρια που εκλύονται (κριτήριο χωροθέτησης Μ.Δ.Α.).
- Έγκαιρη πρόγνωση αέριας ρύπανσης από Χ.Δ.Α. η οποία μπορεί να συμβάλει στην πρόληψη υποβάθμι-σης του τοπικού ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος.

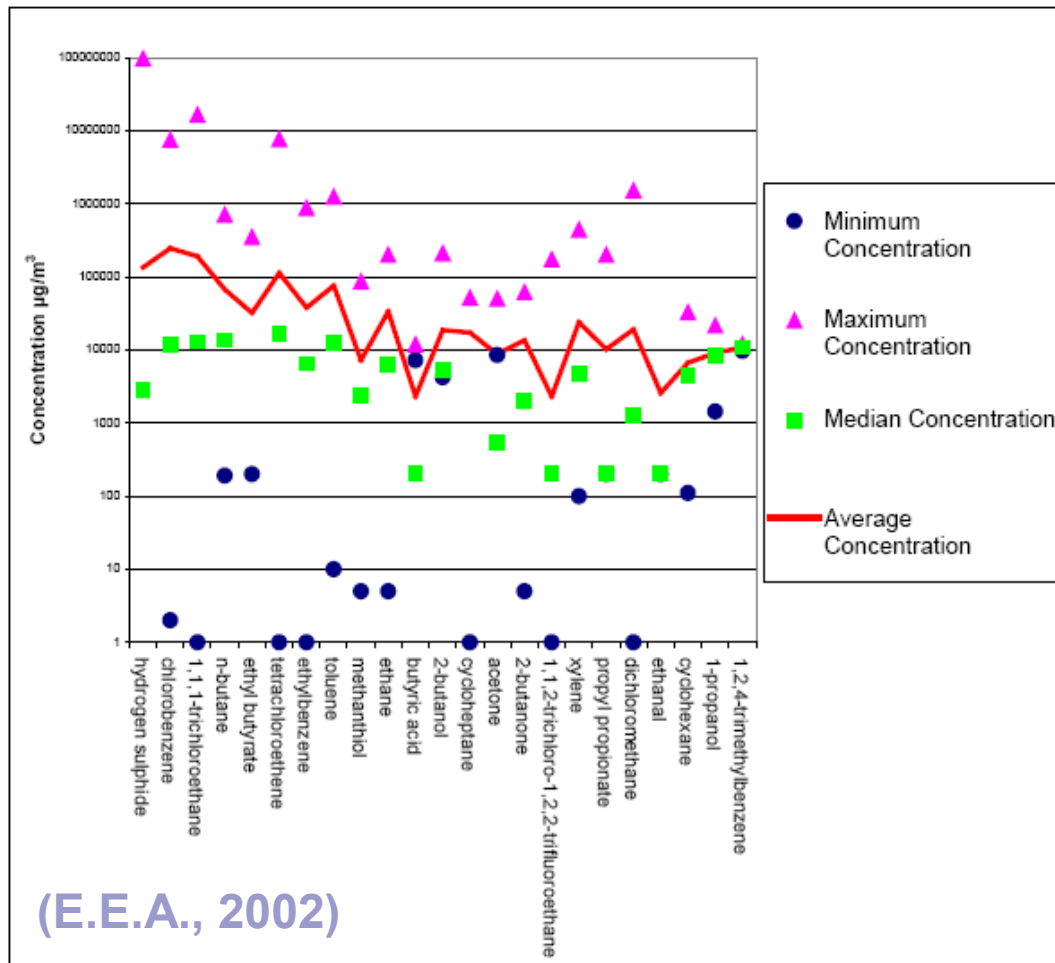


Μεθοδολογία εκτίμησης αέριας ρύπανσης

- **Βήμα 1:** Εκτίμηση καμπύλης παραγωγής τοξικών & οσμηρών αέριων συστατικών του βιοαερίου από το σύνολο του Χ.Δ.Α. κατά τη διάρκεια βιολογικής ενεργείας του.
- **Βήμα 2:** Εκτίμηση σεναρίου δυσμενών εκπομπών (εκπομπή \cong παραγόμενη ποσότητα).
- **Βήμα 3:** Εφαρμογή μοντέλου διασποράς εκπομπών τοξικών και οσμηρών αέριων ρύπων στα σύνορα του Χ.Δ.Α. υπό δυσμενές σενάριο ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- **Βήμα 4:** Σύγκριση μέγιστης ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης με μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο τοξικότητας /οσμών.
 - Βήμα 4Α: Υφιστάμενους Χ.Δ.Α.: Εκτίμηση έντασης οσμής & τοξικότητας σε γειτονικούς αποδέκτες.
 - Βήμα 4Β: Υπό χωροθέτηση Χ.Δ.Α.: Εκτίμηση της ασφαλούς απόστασης μεταξύ συνόρων Χ.Δ.Α. και συνόρων οικισμού.



Συγκεντρώσεις δύσσομων συστατικών βιοαερίου



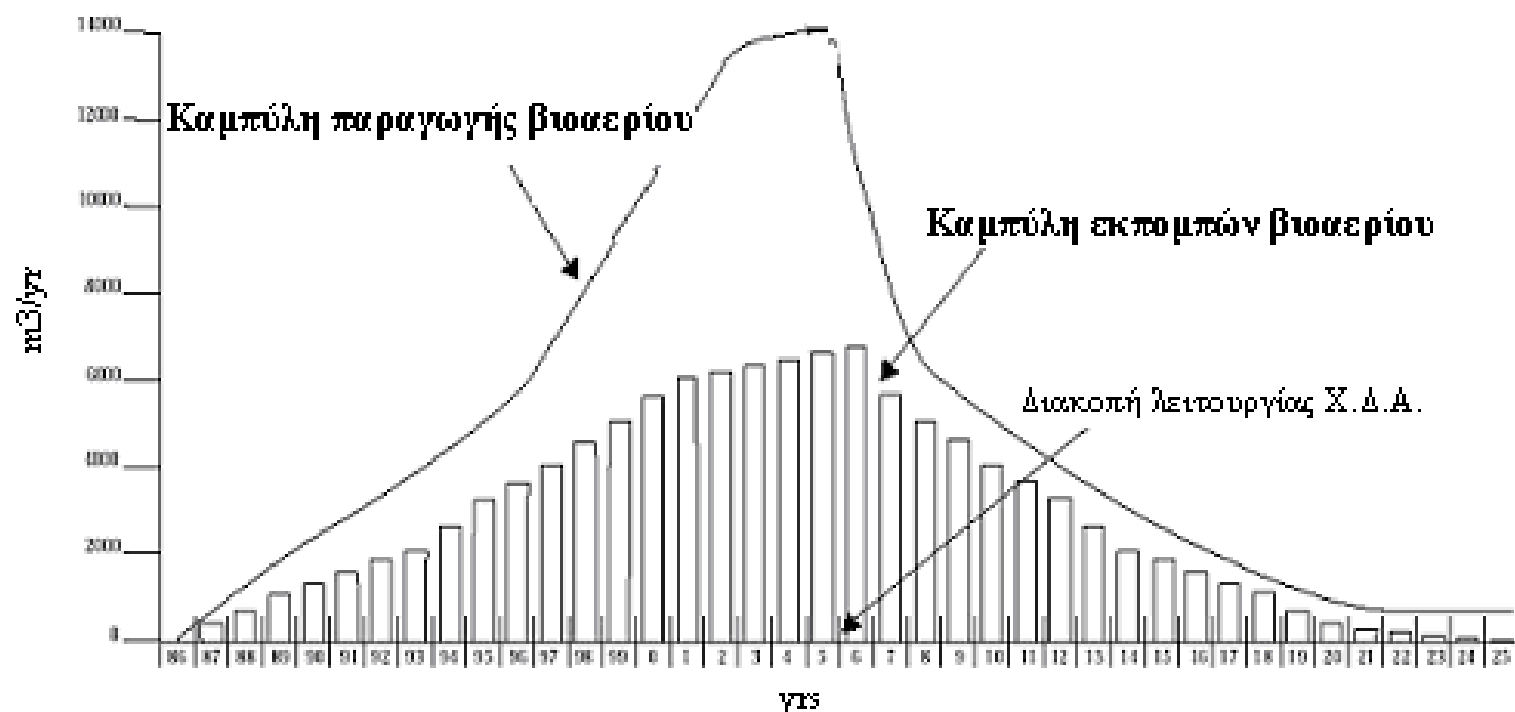
Το H_2S υπερिशχύνει σε συγκέντρωση δυσοσμίας μεταξύ των οσμηρών συστατικών του βιοαερίου



Μοντέλα εκτίμησης εκπομπών βιοαερίου

- Ισοζύγιο μάζας συστατικού βιοαερίου
- 'Τριγωνικό μοντέλο'
- LandGEM (EPA, 1998)

Τυπικές καμπύλες παραγωγής και εκπομπής βιοαερίου από Χ.Δ.Α.



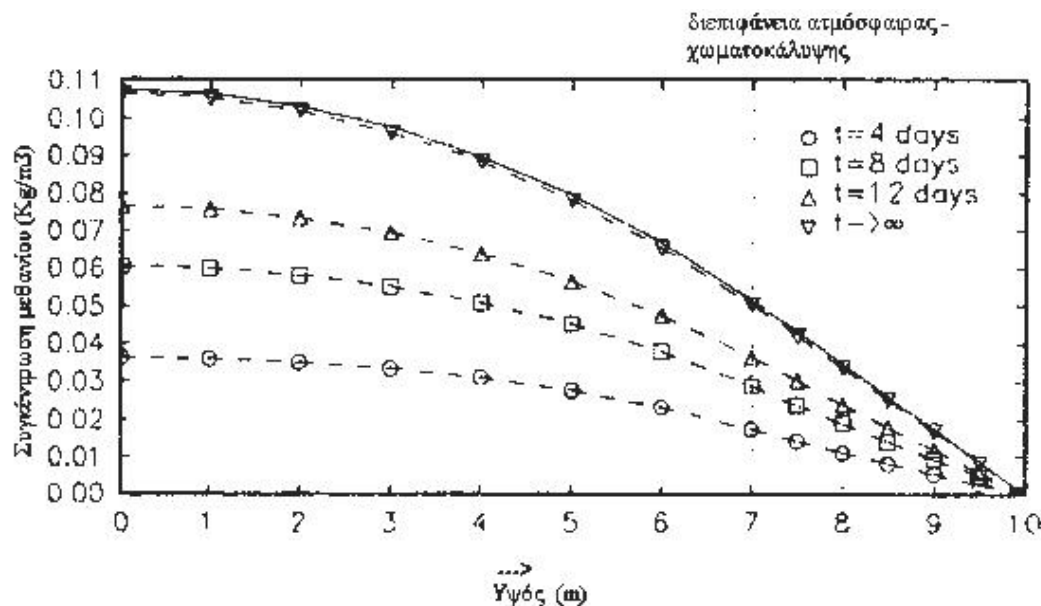
- Η συλλογή βιοαερίου και οι διαφυγές μειώνουν τα επίπεδα εκπομπών
- Μέγιστες εκπομπές παρατηρούνται την περίοδο λήξης λειτουργίας του Χ.Δ.Α.

Ισοζύγιο μάζας σε συστατικό βιοαερίου

$$D_z^j \frac{\partial^2 C_i^j}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial z_j} \left[C_i^j \cdot \left(\frac{k^j}{\mu^j} \cdot \frac{\partial P_i^j}{\partial z_j} \right) \right] + \frac{\partial S_i^j}{\partial t} - d \cdot C_i^j - \frac{\partial C_i^j}{\partial t} = 0$$

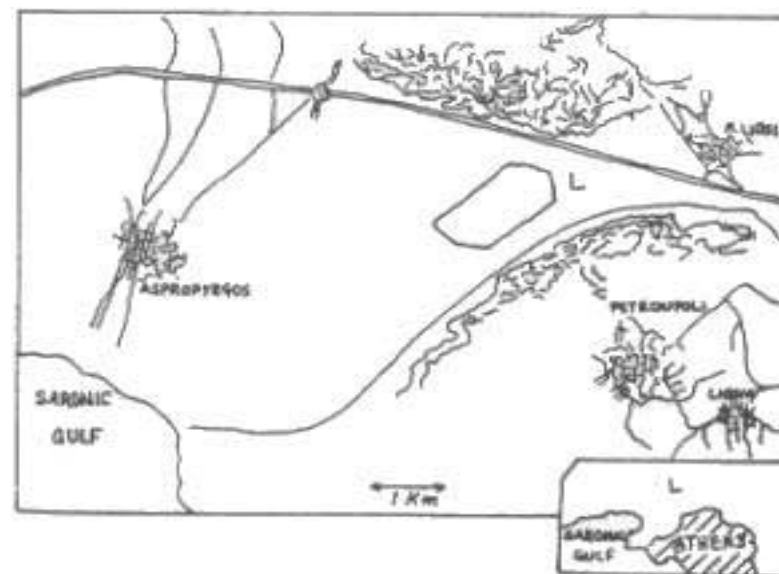
- Θεώρηση ελεύθερης & κατακόρυφης ροής:

Χωροχρονική εξέλιξη
συγκέντρωσης
μεθανίου στο Χ.Δ.Α.



Εφαρμογή εμπειρικών μοντέλων εκτίμησης παραγωγής βιοαερίου στο Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια"

- Έναρξης λειτουργίας: 1973
- Έτος διακοπής λειτουργίας: 1999
- Μέσος ετήσιος ρυθμός διάθεσης απορριμμάτων: 1.300.000 tn/yr
- Συνολική μάζα απορριμμάτων στο Χ.Δ.Α.: 33.500.000 tn
- Ενεργή έκταση χωματερής: 870.000 m²
- Δυναμικό μεθανογένεσης: 100 m³CH₄/ tn στερεού απόβλητου
- Σταθερά βιοαποδόμησης: 0,04 yr⁻¹
- Μέγιστο ποσοστό μεθανίου στο βιοαέριο 55 %
- Συγκέντρωση NMOCs στο παραγόμενο βιοαέριο 2.420 ppmV ως εξάνιο
- Συνδιάθεση οικιακών με τοξικά απόβλητα

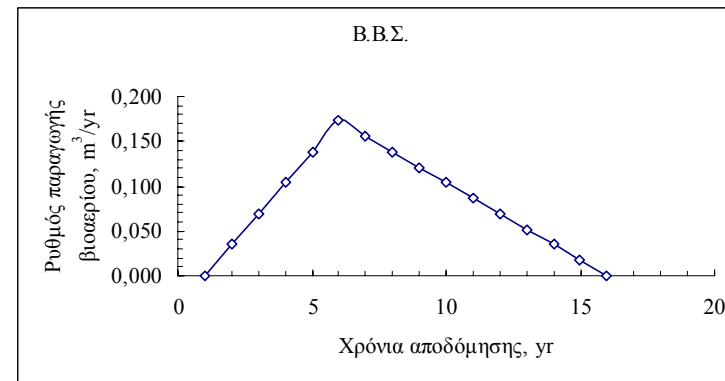
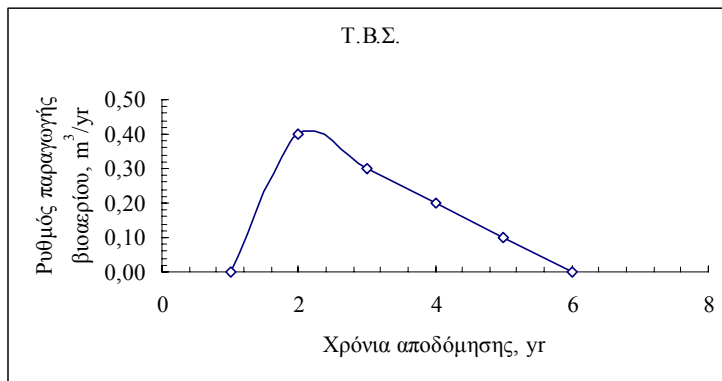


Παλαιός Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια"

Τριγωνικό μοντέλο – Εφαρμογή στο Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια"

Εμβαδό τριγώνου (συνολική παραγωγή βιοαερίου, m^3) = $\frac{1}{2}$ (βάση τριγώνου, χρόνια παραγωγής βιοαερίου, yr) x (ύψος, μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου, m^3/yr)

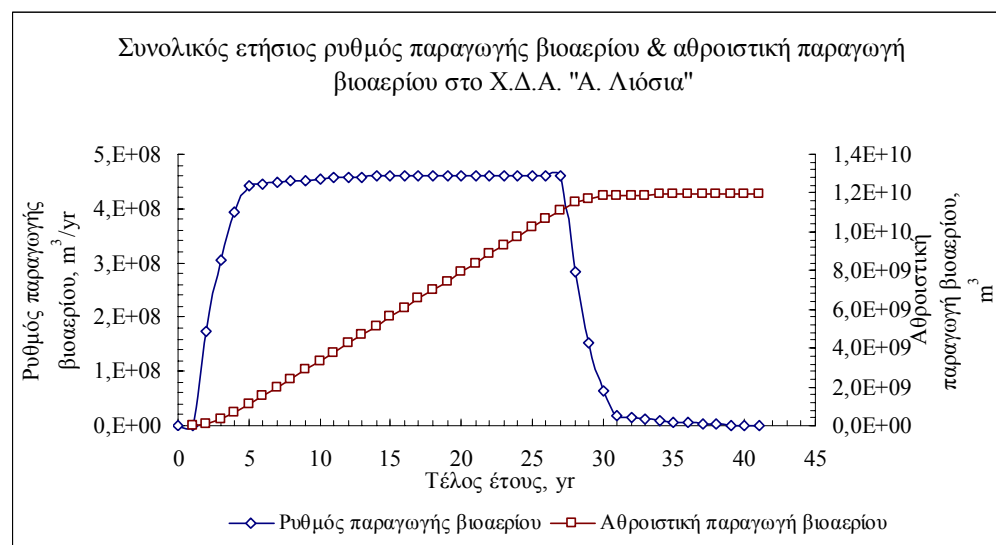
Τριγωνική κατανομή παραγωγής βιοαερίου ανά kg Β.Β.Σ.:



Συνολική θεωρητική ποσότητα παραγόμενου βιοαερίου ανά μονάδα ξηρού βάρους Τ.Β.Σ.: $1m^3/kg$ & Β.Β.Σ.: $1,3 m^3/kg$ (από εφαρμογή στοιχειομεντρικού μοντέλου στο Χ.Δ.Α.).

Αποτελέσματα εφαρμογής τριγωνικού μοντέλου στα "Α. Λιόσια"

Συνολικός ετήσιος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου & αθροιστική παραγωγή βιοαερίου στο Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια" στη διάρκεια 26 χρόνων λειτουργίας της



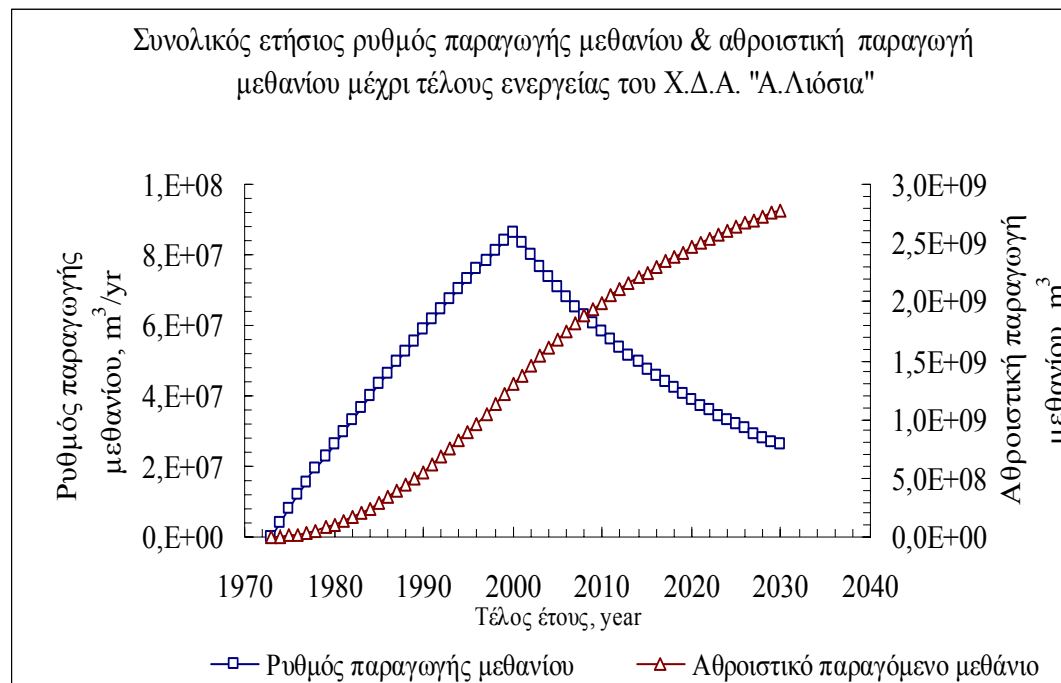
Μοντέλο LandGEM – Εφαρμογή στο Χ.Δ.Α. “Α. Λιόσια”

Εξίσωση του μοντέλου: $Q_{CH_4}^t = L_o R_t (e^{-kc} - e^{-kt})$

- Q: ρυθμός παραγωγής μεθανίου από το Χ.Δ.Α. τη χρονική στιγμή t (tn/yr)
- L_o : δυναμικό μεθανογένεσης [$m^3 CH_4$ /tn απορρίμματα]
- R_t : μέσος ετήσιος ρυθμός διάθεσης απορριμμάτων (tn/yr)
- k : σταθερά βιοαποδόμησης [yr^{-1}]
- t : χρόνος που έχει περάσει από την αρχική εναπόθεση απορριμμάτων [yr]
- c : χρόνος από το κλείσιμο της χωματερής (c=0 για τις εν λειτουργία χωματερές)

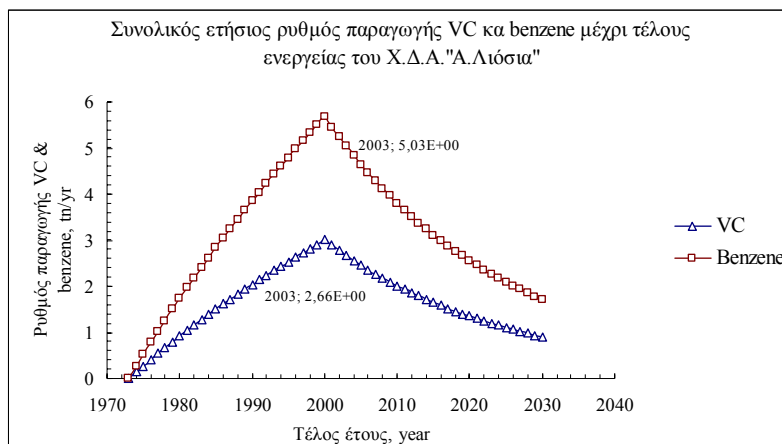
Αποτελέσματα του LandGEM στο Χ.Δ.Α. "Α. ΛΙΟΣΙΑ"

Παραγωγή μεθανίου (2003) ίση με $5,12\text{E}+04$ tn/yr ($0,667$ kg/m³)

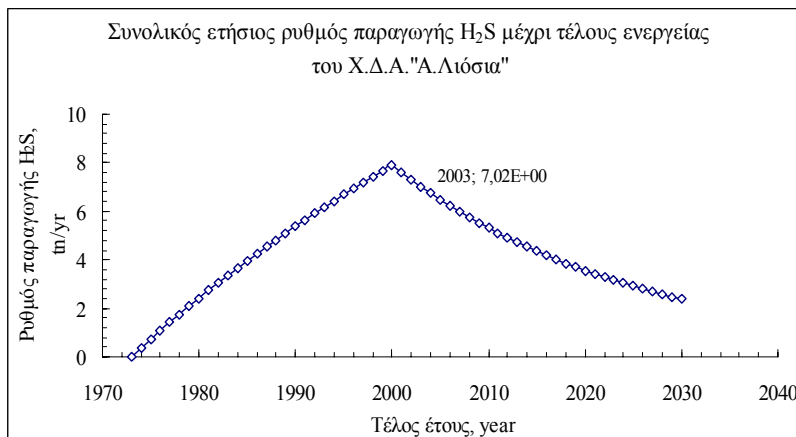


Συνέχεια: Αποτελέσματα LandGEM

- Καμπύλη παραγωγής τοξικών αερίων: VC & βενζόλιο με συγκέντρωση στο βιοαέριο 7,34 ppmn και 11,1 ppmn

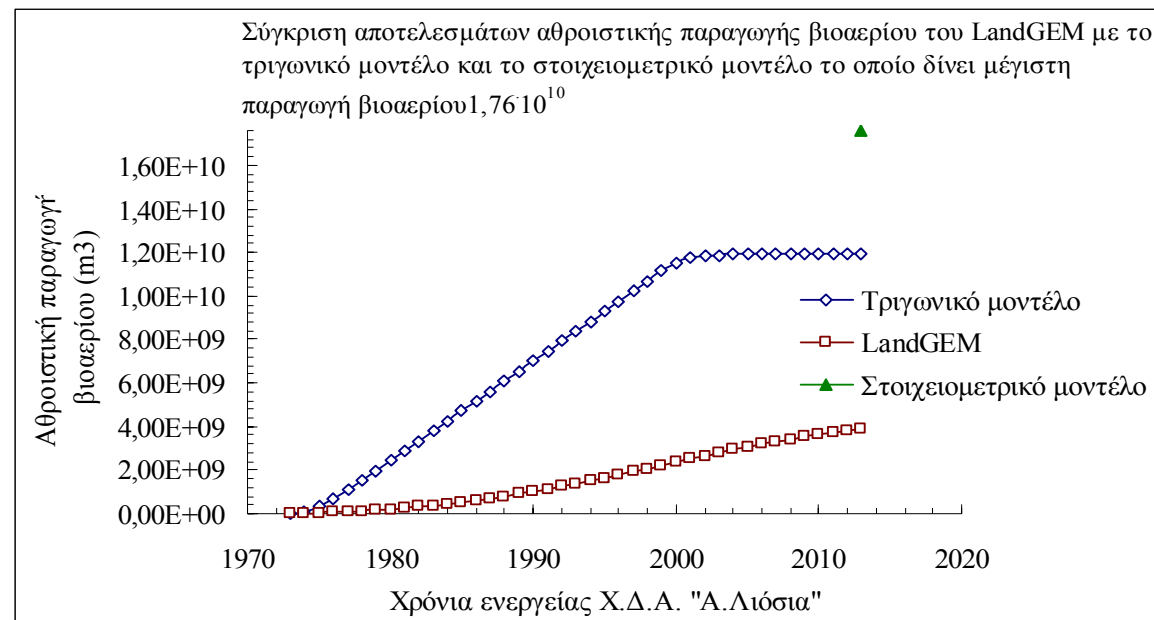


- καμπύλη παραγωγής οσμηρής αέριας ένωσης H_2S με συγκέντρωση στο βιοαέριο ίση με 35,5 ppmn



Σύγκριση μοντέλων στην περίπτωση του Χ.Δ.Α. "Α.Λιόσια"

- Το τριγωνικό μοντέλο προσεγγίζει την υπερεκτιμημένη τιμή του στοιχειομετρικού μοντέλου $2 \cdot 10^{10} \text{ m}^3 (\text{CH}_4 + \text{CO}_2)$
- Επιλογή LandGEM για εκτιμήσεις εκπομπών αέριων ρύπων





Αξιοπιστία τιμών μοντέλου LandGEM

- Αποτέλεσμα ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου (2003) του LandGEM: 301.370 m³/day.
- Τιμή ημερήσιας παραγωγής βιοαερίου στη χωματερή “Α.Λιόσια” έπειτα από μέτρηση πεδίου στο Χ.Δ.Α.: 184.000 m³/day (ΚΑΠΕ, 2002).


Η εκτιμώμενη τιμή του μοντέλου υπολογίζεται αυξημένη κατά 64 % από τη μετρούμενη τιμή του πεδίου.



Εκτίμηση εκπομπών αέριων ρύπων από Χ.Δ.Α.

- Προσεγγιστική εκτίμηση εκπομπών (*)
- Τιμές δυσμενέστερες από τις πραγματικές.

(*) υπεισέρχονται παράγοντες αβεβαιότητες:
ποιοτική σύσταση αποβλήτων, υγρασία, ιδιότητες
/πάχος χωματοκάλυψης, θερμοκρασία, παρουσία
θρεπτικών, τρόπος λειτουργίας Χ.Δ.Α., παρουσία
τοξικών κ.λπ.



Απόκλιση παραδοχής: εκπομπές βιοαερίου ίσες με παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου στο Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια"

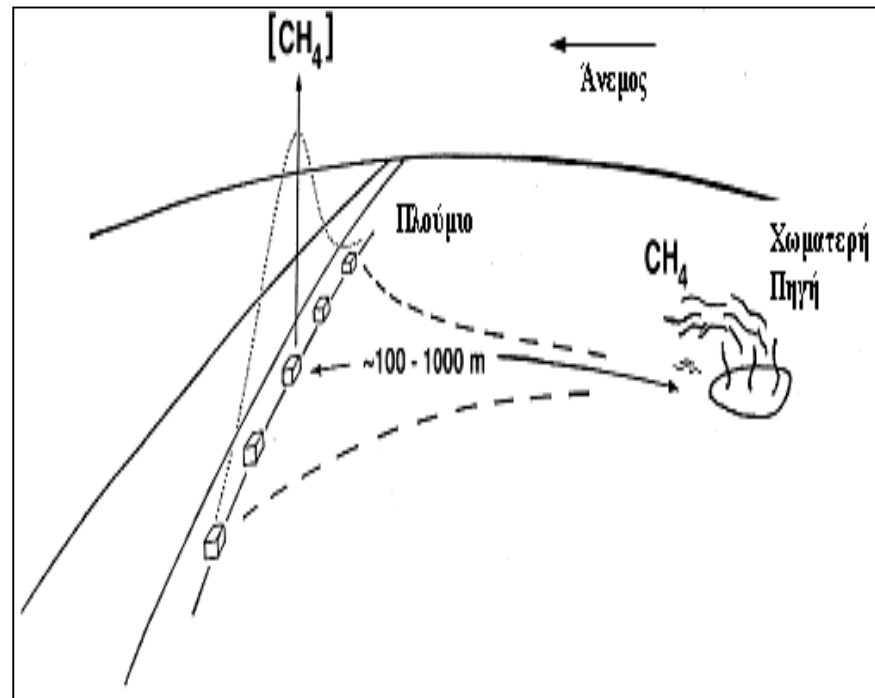
Οι συνολικές εκπομπές υδρογονανθράκων από το Χ.Δ.Α. "Α.Λιόσια":

- Εκτίμηση LandGEM : 47.393 tn /yr
- Εκτίμηση που δίνει το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. : 60.000 tn/yr

Ατμοσφαιρική διασπορά αέριων εκπομπών που εκλύονται από Χ.Δ.Α.

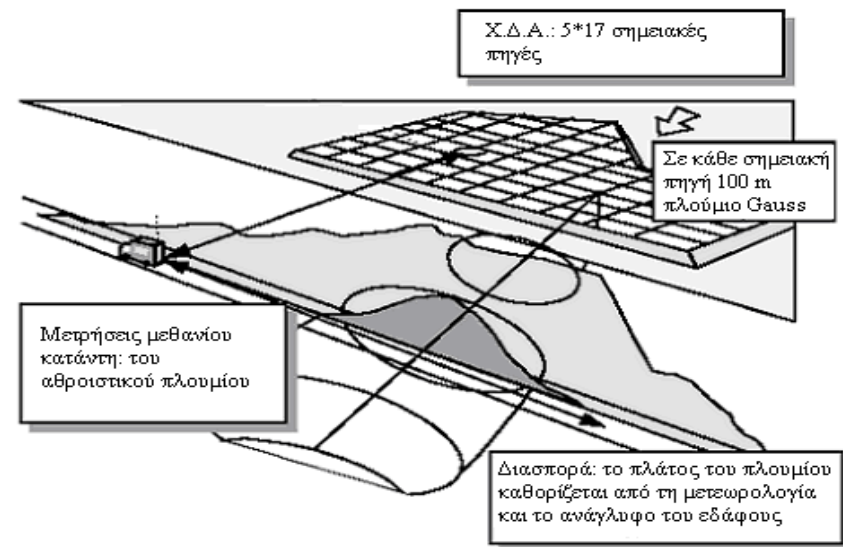
Χρήση γκαουσιανού μοντέλου CONCX:

- Αφορά σημειακές πηγές συνεχούς έκλυσης.
- Υπολογίζει δυσμενές σενάριο αέριας ρύπανσης, κατάντη της διεύθυνσης του ανέμου σε συγκεκριμένους σημειακούς αποδέκτες.



Παραδοχές στην εφαρμογή του μοντέλου διασποράς στο Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια"

- Θεωρούμε το Χ.Δ.Α. ως επιφανειακή πηγή που προσομοιώνεται με άθροισμα πολλών σημειακών πηγών. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια του Χ.Δ.Α. προσεγγίζεται με ορθογώνια έκταση εμβαδού $(0,5 \times 1,7) \text{ km}^2 = 850.000 \text{ m}^2$ όπου ο συνολικός αριθμός σημειακών πηγών εκπομπής αέριων ρύπων υπολογίζεται περίπου ίσος με 85 $(850.000/10.000)$, πλευράς 100 m έκαστη πηγή.





Συνέχεια ...παραδοχές μοντέλου

- Η μελετούμενη σημειακή πηγή για την οποία εφαρμόζεται το CONCX βρίσκεται στα σύνορα της χωματερής.
- Η συγκέντρωση που διασπείρεται ακολουθεί κανονική κατανομή.
- Η ποσότητα και η σύσταση του βιοαερίου είναι οι δυσμενέστερες δυνατές.
- Η περιοχή που εξετάζεται είναι σχετικά επίπεδη.
- Εξετάζονται σχετικά χημικά αδρανείς αέριοι ρύποι.
- Αγνοείται η ξηρή και υγρή εναπόθεση κατά τη μεταφορά των αέριων ρύπων.
- Η ταχύτητα ανέμου είναι ανάλογη της κατάστασης σταθερότητας της ατμόσφαιρας.
- Ως ύψος εκπομπής θεωρείται το υψόμετρο της περιοχής του Χ.Δ.Α. συν ένα μέτρο για την πλήρη ανάμειξη του εκλυόμενου αερίου ρύπου με τον αέρα.



Σημειώνεται...

Στην περίπτωση του Χ.Δ.Α. "Α. Λιόσια"

- όλες οι διευθύνσεις μεταφοράς πλουμίου είναι δυνατές → ο Χ.Δ.Α. περικλείεται από βουνά από δυτικά προς ανατολικά (Πατέρας, Κιθαιρώνας, Πάστρα, Πάρνηθα) → δεν υπάρχει κυρίαρχη διεύθυνση ανέμου.



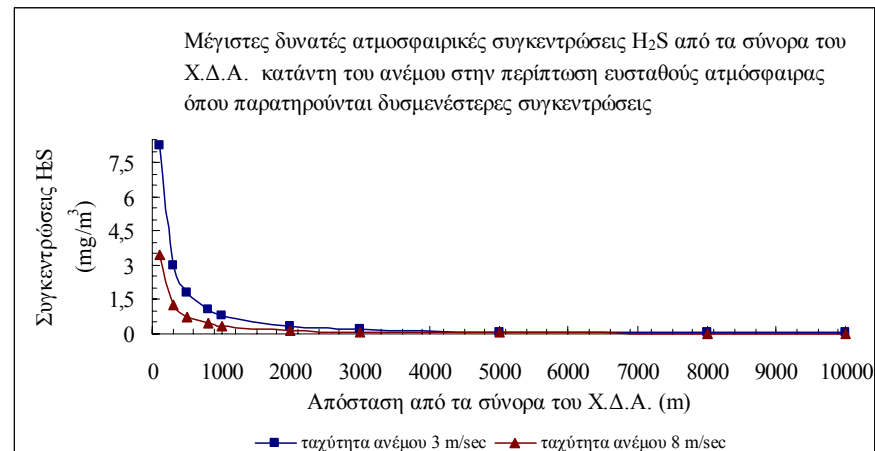
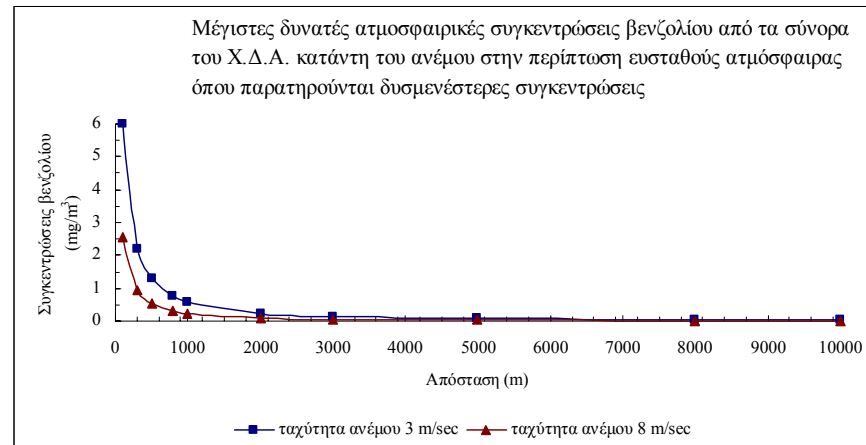
Κατάσταση ατμόσφαιρας

Η μελέτη διασποράς εφαρμόζεται για κάθε σενάριο κατάσταση ατμόσφαιρας:

- Ασταθής ατμόσφαιρα (ηλιόλουστη μέρα)
- Ουδέτερη ατμόσφαιρα (μέτρια έως χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία)
- Σχετικά ευσταθής ατμόσφαιρα / Ευσταθής ατμόσφαιρα
→ αντιπροσωπεύει δυσμενές σενάριο ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Βράδυ με νέφωση → αμελητέα κατακόρυφη μεταφορά αέριας μάζας)

Αποτελέσματα CONCX στο Χ.Δ.Α. "Α. ΛΙΟΣΙΑ"

- Οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις αέριων ρύπων πολύ κοντά στον ενεργό χώρο διάθεσης απορριμμάτων (έως 500 m από τα σύνορα της χωματερής) είναι αρκετά υψηλές ξεπερνώντας ισχύοντα όρια ποιότητας αέρα, ενώ σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 500 m από τα σύνορα του Χ.Δ.Α. οι συγκεντρώσεις αέριων ρύπων μειώνονται αρκετά.

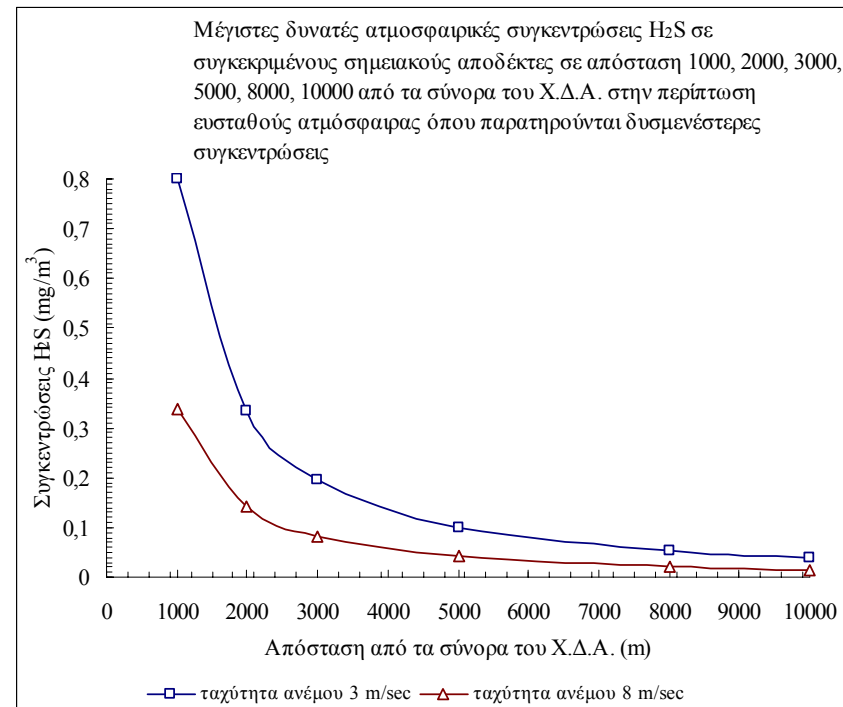


Εκτίμηση έντασης οσμής την περίοδο λήξης λειτουργίας του Χ.Δ.Α. σε γειτονικές οικιστικές περιοχές

Η WHO θέτει όριο ανίχνευσης οσμής 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

- Σε απόσταση 1km (Ασπρόπυργος) από τα σύνορα του Χ.Δ.Α. η μέγιστη συγκέντρωση είναι ίση με 0,8 mg/m^3 και 0,338 mg/m^3 για άπνοια και ταχύτητα ανέμου 8 m/s αντίστοιχα.
- Σε ασταθή κατάσταση ατμόσφαιρας και άπνοια οι συγκεντρώσεις 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1000 m από τα σύνορα) πλησιάζουν το όριο ανίχνευσης οσμής H_2S .

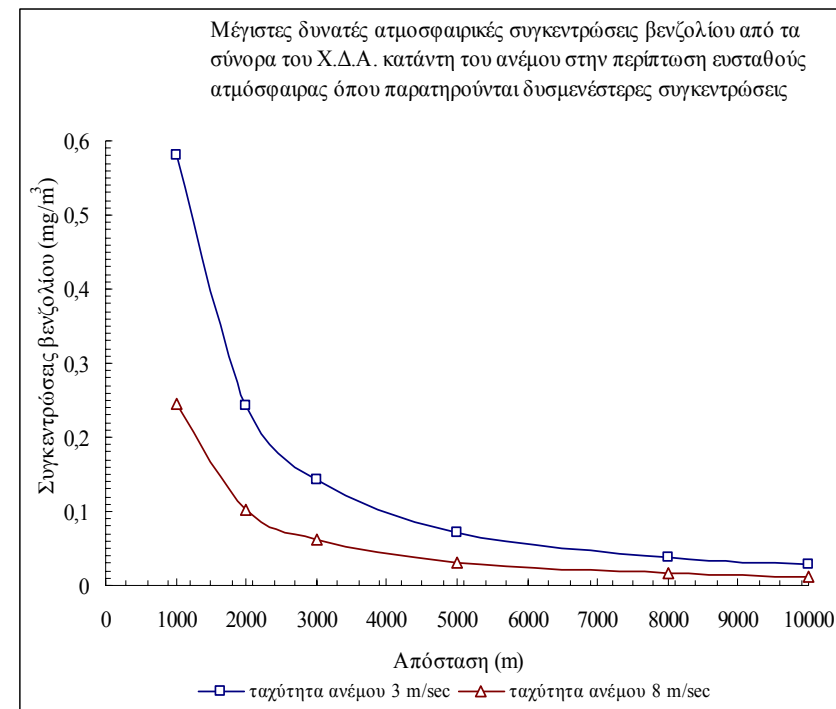
→ έντονο πρόβλημα δυσοσμίας στη γειτονική περιοχή κατά τη λήξη λειτουργίας του Χ.Δ.Α. στην ουδέτερη κατάσταση ατμόσφαιρας.
→ επιβεβλημένη πρακτική ελέγχου οσμών.




Εκτίμηση επιπέδου τοξικότητας την περίοδο λήξης λειτουργίας του Χ.Δ.Α. σε γειτονικούς οικισμούς

Η WHO θέτει ασφαλές όριο για την υγεία των κατοίκων τη μέση συγκέντρωση 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για το βενζόλιο

- Σε απόσταση 1km (Ασπρόπυργος) από τα σύνορα του Χ.Δ.Α. η μέγιστη συγκέντρωση είναι ίση με 0,6 mg/m^3 και 0,26 mg/m^3 για άπνοια και ταχύτητα ανέμου 8 m/s αντίστοιχα.
- Εκτιμώνται συγκεντρώσεις 16 και 30 φορές μεγαλύτερες αντίστοιχα από το ισχύον επιτρεπτό όριο της WHO.
→ επιβεβλημένη εγκατάσταση συστήματος συλλογής και επεξεργασίας εκπομπών.
- Σε ασταθείς συνθήκες και κατάσταση άπνοιας και σε απόσταση 1 km από τα σύνορα της πηγής υπολογίζονται συγκεντρώσεις βενζολίου ίσες με 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ πολύ κοντά στο ανώτατο επιτρεπτό όριο που θέτει η WHO.





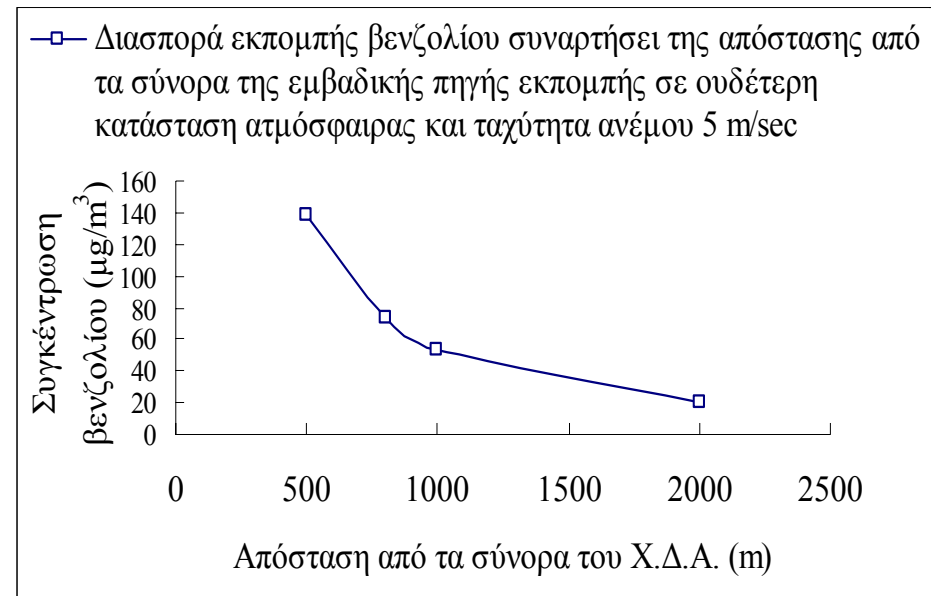
Επιλογή σεναρίου ατμοσφαιρικών συνθηκών για την εκτίμηση της αποδεκτής απόστασης μεταξύ συνόρων Χ.Δ.Α. και συνόρων οικισμού

Επιλέγονται μέσες ατμοσφαιρικές συνθήκες:

- μέση κατάσταση ατμόσφαιρας: ουδέτερη &
- μέση ταχύτητα ανέμου: 5 m/sec → Μειωμένο ενεργό ύψος πλουμίου → επιτείνεται η οριζόντια διασπορά & περιορίζεται ο βαθμός αραίωσης.

Εκτίμηση αποδεκτής / ασφαλούς απόστασης οικιστικής περιοχής από τα σύνορα του Χ.Δ.Α.

- Ασφαλής για την υγεία των γειτονικών κατοίκων η μέση απόσταση 2000 m.
- Προτείνεται η εκτιμώμενη απόσταση με την προϋπόθεση μηδενικής συγκέντρωσης υποβάθρου βενζολίου στην περιοχή που βρίσκεται ο Χ.Δ.Α.

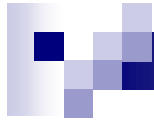




ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η αναπτυχθείσα μεθοδολογία συμβάλλει:

- Στο σχεδιασμό στρατηγικής χωροθέτησης του Χ.Δ.Α. με σκοπό την ασφάλεια και προστασία της δημόσιας υγείας.
- Στη μείωση της κοινωνικής αντίδρασης στη διαδικασία χωροθέτησης μονάδων διάθεσης απορριμμάτων με την ενσωμάτωση της μεθοδολογίας στον κώδικα πρακτικής βελτίωσης κοινωνικής αποδοχής του Χ.Δ.Α.
- Στην ανάπτυξη πολιτικής και προτεραιοτήτων σε ενέργειες διαχείρισης εκπομπών (πρακτική χωματοκάλυψης, εγκατάσταση συστήματος αξιοποίησης βιοαερίου, διεργασίες καθαρισμού εκλυόμενου βιοαερίου κ.λπ.).



Ευχαριστίες

- Κο Λαζαρίδη Μ.
- Κο Τάγαρη Ε.
- Κο Μαυριά Γ.(Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.),
για τη βοήθειά τους στη διεκπεραίωση της
εργασίας

Ευχαριστώ για την υπομονή σας ☺





ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ