



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

«Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση Τεχνολογιών Ενεργειακής Αξιοποίησης Βιοαερίου στο ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων Ηρακλείου Κρήτης»

Διπλωματική Εργασία Κωνσταντίνου Τσαφαντάκη



Εξεταστική Επιτροπή: Αν. Καθηγητής Πέτρος Γκίκας (Επιβλέπων)
Αν. Καθηγητής Στέλιος Ροζάκης
Καθηγητής Θεοχάρης Τσούτσος

Χανιά, Ιούλιος 2017

Αυτή η σελίδα αφήνεται σκοπίμως κενή

ΑΦΙΕΡΩΝΕΤΑΙ στους γονείς μου,
Εμμανουήλ Τσαφαντάκη & Μαρία Κουβαράκη

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον καθηγητή μου, κύριο Πέτρο Γκίκα, που με εμπιστεύτηκε και μου ανέθεσε τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, αλλά και που με την αμέριστη βοήθεια, συμπαράσταση και πολύτιμη καθοδήγησή του συνέβαλε τα μέγιστα για την εκπόνηση και ολοκλήρωση αυτής.

Οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως και τον Υποψήφιο Διδάκτορα, κύριο Ιωάννη Παλόγο, για τις εξαιρετικά χρήσιμες συμβουλές και πληροφορίες που μου παρείχε μέσα από τη συνεργασία μας, καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας και συγγραφής της τεχνοοικονομικής μου μελέτης.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές, κυρίους Θεοχάρη Τσούτσο και Στέλιο Ροζάκη, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική μου επιτροπή και για τη συνεισφορά τους στην τελική διαμόρφωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες και στην κυρία Μυρσίνη Χρήστου (Προϊσταμένη Τμήματος Βιομάζας του «ΚΑΠΕ»), καθώς επίσης και στους κυρίους Χρήστο Ζαφείρη (Υπεύθυνος Δέσμης Έργων Βιοαερίου του «ΚΑΠΕ») και Ιωάννη Μπούκη (Διευθυντής Ενεργειακών Θεμάτων του Ομίλου «ΗΛΕΚΤΩΡ») για την πολύτιμη βοήθεια και παροχή πληροφοριών.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην εκθειάσω το γεγονός ότι χωρίς την ατέρμονη πίστη, στήριξη, κατανόηση, συμπαράσταση και ενθάρρυνση της συντρόφου μου, των συγγενών και φίλων και πάνω απ' όλων των γονιών μου, δεν θα είχα φτάσει εδώ που βρίσκομαι σήμερα, συνεπώς τους είμαι ευγνώμων και τους ευχαριστώ διπλά για την ανιδιοτελή και απλόχερη αγάπη και προσφορά τους προς το πρόσωπό μου όλα αυτά τα χρόνια.

Κωνσταντίνος Τσαφαντάκης

Αυτή η σελίδα αφήνεται σκοπίμως κενή

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	3
Πίνακας Περιεχομένων.....	5
Σκοπός	7
Περίληψη	8
Abstract	11
Εισαγωγή.....	14
Πίνακας Συντομογραφιών & Συμβολισμών	17
Κεφάλαιο 1. Παραγωγή και Αξιοποίηση Βιοαερίου	19
1.1. Ενεργειακή Αξιοποίηση Βιοαερίου στην Ελλάδα	19
1.2. Τα δεδομένα για το Βιοαέριο και τη Βιοενέργεια στην Ευρώπη	26
1.3. Ανανεώσιμη Ενέργεια, Βιοενέργεια και Βιοαέριο στον Παγκόσμιο Χάρτη	31
1.4. Βιοαέριο από ΧΥΤΑ	38
1.4.1. Σύσταση Βιοαερίου	38
1.4.2. Φάσεις Αποσύνθεσης της Οργανικής Ύλης και Παραγωγής Βιοαερίου	39
1.4.3. Ποσοτικά Χαρακτηριστικά Βιοαερίου	46
1.4.4. Καθαρισμός και Αναβάθμιση Βιοαερίου	50
Κεφάλαιο 2. Εξεταζόμενες Τεχνολογίες Αξιοποίησης Βιοαερίου για Ηλεκτροπαραγωγή: Τεχνική Ανάλυση	52
2.1. Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (MEK)	52
2.2. Αεριοτουρμπίνες (AT).....	58
2.3. Μικροτουρμπίνες (MT)	62
2.4. Τεχνολογίες Βαθμιαίας Οξειδωσης (Gradual Oxidizers-GO)	68
2.5. Κυψέλες Καυσίμων (Fuel Cells – FC)	73
2.6. Συνοπτική Σύγκριση και Αξιολόγηση των Τεχνολογιών.....	77
Κεφάλαιο 3. ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων	79
3.1. Περιγραφή και Χαρακτηριστικά ΧΥΤΑ.....	79
3.2. Σύνθεση των ΑΣΑ.....	81
3.3. Ποσότητες Εισερχόμενων Απορριμμάτων	82
3.4. Σύστημα Διαχείρισης Βιοαερίου (Υφιστάμενη Κατάσταση).....	84
3.5. Δίκτυο Συλλογής Βιοαερίου	85
3.5.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Ρευμάτων Βιοαερίου	86
3.5.2. Προβλήματα στο Δίκτυο Συλλογής Βιοαερίου.....	94
Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση Παραγωγής Βιοαερίου - Εκτίμηση Κλάσματος Μεθανίου και Ποσότητας Βιοαερίου	100
4.1. Θεωρητική Εκτίμηση του Παραγόμενου Βιοαερίου	100

4.2. Υπολογισμός του Παραγόμενου Βιοαερίου με Βάση το Μοντέλο LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) v3.2 της EPA.....	103
4.2.1. Εισαγωγή.....	103
4.2.2. Περιγραφή και Δυνατότητες του Μοντέλου LandGEM.....	105
4.2.3. Εφαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου για την εκτίμηση του παραγόμενου Βιοαερίου από τους ΧΑΔΑ Α' και Β' και τα κύτταρα Α', Β'.....	108
4.3. Μοντελοποίηση της Ελάττωσης του Κλάσματος του Μεθανίου (CH ₄) στο Βιοαέριο σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο LandGEM.....	109
4.3.1. Επιλογή Δυναμικού Παραγωγής και Σταθεράς της Κινητικής Παραγωγής για τους ΧΑΔΑ και τα Κύτταρα Α' και Β'.....	112
4.3.2. Εφαρμογή του Υπολογιστικού Μοντέλου για την εκτίμηση του Παραγόμενου Βιοαερίου από τη Σταθεροποιημένη Ιλύ.....	113
4.3.3. Αποτελέσματα Μοντελοποίησης για κάθε Τμήμα του ΧΥΤΑ σύμφωνα με το Μοντέλο LandGEM της EPA και με το Τροποποιημένο LandGEM.....	114
4.3.4. Μακροχρόνια πρόβλεψη του ποσοστού του CH ₄ στο Βιοαέριο σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο LandGEM.....	117
Κεφάλαιο 5. Δυνατότητα Ηλεκτροπαραγωγής στο ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων και Οικονομική Ανάλυση.....	119
5.1. Εξεταζόμενα Σενάρια: Εγκατεστημένη Ισχύς Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής, Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου και Οικονομική Απόδοση.....	119
5.1.1. Σενάριο 1: Χρήση 3 Μηχανών Εσωτερικής Καύσης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1500 kW (500 kW η καθεμία) για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ'.....	127
5.1.2. Σενάριο 2: Χρήση 2 Μηχανών Εσωτερικής Καύσης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1000 kW (500 kW η καθεμία) για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ'.....	134
5.1.3. Σενάριο 3: Χρήση 4 Gradual Oxidizers (GO) συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1000 kW (250 kW έκαστος) για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ'.....	141
5.1.4. Σενάριο 4: Χρήση 3 Gradual Oxidizers (GO) συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 750 kW (250 kW έκαστος) για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ'.....	148
5.1.5. Σενάριο 5 (Συνδυαστικό): Χρήση 1 Gradual Oxidizer (GO) 250 kW για τους ΧΑΔΑ Α' και Β' και 2 Μηχανών Εσωτερικής Καύσης 1000 kW (500 kW έκαστη) για τα Κύτταρα Α', Β' & Γ' - Εγκατεστήμενη Ισχύς 1250 kW.....	155
5.2. Προκρινόμενο Σενάριο.....	163
Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	166
Βιβλιογραφία.....	169
Ιστοσελίδες.....	173
Παράρτημα.....	174

Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει την ενεργειακή αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου στο ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων, Ηρακλείου Κρήτης, από διάφορες τεχνολογίες, με στόχο τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση της επένδυσης, μέσω διαφορετικών τεχνοοικονομικών σεναρίων. Μελετήθηκαν, λοιπόν τα τεχνικά χαρακτηριστικά Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, Αεριοτουρμπίνων και Μικροτουρμπίνων, Κυψελών Καυσίμου, καθώς επίσης Τεχνολογιών Σταδιακής Οξειδωσης (Gradual Oxidizers) και τα οικονομικά αποτελέσματα από τη χρήση ορισμένων εξ' αυτών.

Περίληψη

Το βιοαέριο θεωρείται πολύτιμη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η ποιότητα και ο ρυθμός παραγωγής του συνιστούν καθοριστικούς παράγοντες για την επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα όμως, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η περιβαλλοντική νομοθεσία, σχετικά με την εκπομπή καυσαερίων, το αποτύπωμα άνθρακα και την ωριμότητα της εκάστοτε τεχνολογίας. Η πιο κοινή και ευρέως διαδεδομένη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο είναι η χρήση της Μηχανής Εσωτερικής Καύσης, η οποία μπορεί να λειτουργήσει εάν η συγκέντρωση του μεθανίου είναι περίπου πάνω από 40%. Από την άλλη πλευρά, μία καινοτόμος τεχνολογία, ο καταλυτικός Gradual Oxidizer (τεχνολογία που προσφέρεται από πολύ μικρό αριθμό κατασκευαστών), ο οποίος βασίζεται στη διαδικασία σταδιακής οξείδωσης του εισερχόμενου αερίου καυσίμου, μπορεί να λειτουργήσει σε χαμηλή συγκέντρωση μεθανίου έως και 1,5%.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει, με την χρήση μοντέλων προσομοίωσης, την τεχνοοικονομική εφαρμογή των παραπάνω ενεργειακών τεχνολογιών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο στο ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων, Ηρακλείου Κρήτης. Ο ΧΥΤΑ αποτελείται από 4 κύρια τμήματα, δύο παλιά και δύο νέα. Το 1^ο τμήμα (ΧΑΔΑ Α') άρχισε να λειτουργεί το 1992 και έκλεισε το 1997. Η διάθεση απορριμμάτων στο 2^ο τμήμα (ΧΑΔΑ Β') ξεκίνησε το 1998 και έκλεισε το 2008. Το 3^ο τμήμα (κύτταρο Α' του ΧΥΤΑ), είναι υπερκείμενο του ΧΑΔΑ Β' και δέχθηκε τις αποθέσεις από το 2009 έως και το 2012 και το 4^ο τμήμα (κύτταρο Β' του ΧΥΤΑ) είναι υπερκείμενο τμήμα του ΧΑΔΑ Α' και υποδέχθηκε απορρίμματα από το 2012 έως τις

αρχές του 2016. Ήδη από το καλοκαίρι του 2016 έχει κατασκευαστεί το κύτταρο Γ', το οποίο δέχεται τις ποσότητες των απορριμμάτων από τα τέλη του 2016.

Αναφορικά, λοιπόν, με τα μοντέλα προσομοίωσης, η συγκεκριμένη μελέτη συνυπολογίζει το ρυθμό παραγωγής μεθανίου και την μακροπρόθεσμη συγκέντρωση του κλάσματος του βιοαερίου, μοντελοποίηση της οποίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του υπολογιστικού μοντέλου LandGEM (εισάγοντας τις διαθεσίμες ποσότητες ΑΣΑ ανά τμήμα του ΧΥΤΑ και των παραμέτρων L_0 δυναμικού παραγωγής του βιοαερίου και της σταθεράς k της κινητικής παραγωγής του), που τροποποιήθηκε κατάλληλα για να λαμβάνει υπόψη τη μείωση του μεθανίου με το χρόνο, κυρίως λόγω της εισχώρησης αέρα στο σώμα του ΧΥΤΑ. Με την εκτίμηση, λοιπόν, της ανακτώμενης ποσότητας του μεθανίου στο κλάσμα του βιοαερίου, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί της ηλεκτρικής απόδοσης του βιοαερίου, και σε συνάρτηση με τα κόστη (εξοπλισμού, λειτουργίας, συντήρησης και αποκατάστασης), την ετήσια λειτουργική διαθεσιμότητα και τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ της εκάστοτε εξεταζόμενης τεχνολογίας, τον κύκλο εργασιών και το σύνολο της αρχικής επένδυσης, προέκυε ο χρόνος απόσβεσης και οι οικονομικοί δείκτες (ΚΠΑ και Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης) για τα παρακάτω εξεταζόμενα σενάρια.

Καθώς ο χώρος υγειονομικής ταφής αποτελείται από κύτταρα και τμήματα απόρριψης αποβλήτων που έχουν κλείσει σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, τόσο η ποσότητα όσο και η ποιότητα του βιοαερίου πρέπει να αξιολογούνται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τεχνολογίας για ηλεκτροπαραγωγή. Εξετάσθηκαν 5 διαφορετικά σενάρια ενεργειακής αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου, για τους ΧΑΔΑ Α και Β' και για τα κύτταρα Α', Β' και Γ', με τους παρακάτω συνδυασμούς,

αναζητώντας την προσφορότερη οικονομική και ενεργειακή απόδοση. Σενάρια 1 & 2: Χρήση 3 και 2 Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, αντιστοίχως, 500 kW έκαστη, για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ' (Σύνολο ΧΥΤΑ). Σενάρια 3 & 4: Χρήση 4 και 3 Gradual Oxidizers, αντιστοίχως, 250 kW έκαστος, για το σύνολο του ανακτώμενου βιοαερίου από τον ΧΥΤΑ και 5. Συνδυαστικό Σενάριο: Χρήση 1 Gradual Oxidizer για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και 2 ΜΕΚ για τα Κύτταρα Α', Β' & Γ'. Η μοντελοποίηση έδειξε ότι η χρήση τριών μηχανών εσωτερικής καύσης, χωρητικότητας 500kW η καθεμία, αποδίδει την υψηλότερη Καθαρή Παρούσα Αξία ΚΠΑ =4,16 εκ.€ και Εσωτερικό Συντελεστή Απόδοσης IRR =19% , ακολουθούμενη από το συνδυαστικό σενάριο με τη χρήση 1 Gradual Oxidizer και 2 Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, με οικονομικούς δείκτες: ΚΠΑ =4,06 εκ.€ και IRR =19%.

Για καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης, απαιτείται να γίνουν μετρήσεις στο πεδίο σε σχέση με την ποσότητα και ποιότητα του παραγόμενου βιοαερίου, από τη στιγμή που όλα τα αποτελέσματα της εργασίας στηρίζονται στην εφαρμογή των υπολογιστικών μοντέλων. Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα μετά από επαλήθευση και ρύθμιση των μοντέλων με τις εν λόγω μετρήσεις.

Abstract

Landfill Gas (Biogas) is considered as a valuable source of renewable energy. Its quality and production rate are demined factors for the selection of the optimal technology for electric energy production. In addition, environmental legislation, flue gas emissions, carbon footprint and maturity of technology should also be considered. The most common and widespread process for electric energy production from biogas is the use of Internal Combustion Engines (ICE), which can operate if the methane (CH_4) concentration is approximately above 40%. On the other hand, a novel technology, determining Gradual Oxidizer (GO), based on the process of gradual oxidation of the incoming gas fuel, can operate at methane concentration as low as 1,5%(technology with small commercial availability).

The present dissertation examines, through certain simulation models, the techno-economical applicability of the above mentioned power technologies for electricity production from biogas at the landfill of Pera Galines in Heraklion of Crete. The landfill consists of 4 main sections, two old and two new ones. The first division (dump site A') started operating in 1992 and was closed in 1997. The disposal of waste in the 2nd section (dump site B') started in 1998 and was closed in 2008. The 3rd section (cell A' of the landfill) is supernatant of dump site B 'and received the deposits from 2009 until 2012 and the 4th section (cell B' of the landfill) is an overhead part of the dump site A' and has received waste from 2012 until the beginning of 2016. In the summer of 2016, cell C' has been built, which has been receiving the quantities of waste from the end of 2016 until today.

Moreover, concerning the simulation models, this particular study takes into account not only the methane production rate, but also the long term methane concentration in landfill gas, and its modeling was carried out using the LandGEM computational model (introducing the available quantities of MSW by part of the landfill and the parameters L_0 of the biogas production potential and the k kinetic biogas production constant), which has been appropriately modified to consider the reduction of methane over time, mainly due to the intrusion of air inside the landfill body. By estimating the amount of methane recovered in the biogas fraction, calculations of the electrical efficiency of biogas were carried out and, depending on the costs (capital, O&M and replacement costs), the annual operational availability and the total installed power of the considering technology, its turnover and the total initial investment, the payback period and the economic results (NPV and IRR) of the following scenarios were obtained.

As the landfill site consists of cells and waste disposal segments (dump sites), which have closed during different times, both the quantity and the quality of landfill gas should be evaluated equally for determining the best technology for electricity generation. 5 different scenarios for electric energy production from dump sites A' and B' and from cells A', B' and C' have been examined, with the following combinations of technologies, looking for the most convenient scenario, taking into account, both financial and energy efficiency. Scenarios 1 & 2: Use of 3 and 2 ICE engines (500 kW each), respectively, for dump sites A' & B' and cells A', B' & C' (Landfill body). Scenarios 3 & 4: Use of 4 and 3 GO engines (250 kW each), respectively, for the total of CH_4 produced. (Combined) Scenario 5: Use of one 250 kW GO engine for dump sites A' & B' and 2 ICE engines 500 kW each for cells A', B' & C'. Modeling indicated that the use of 3 ICE engines, with capacity 500 kW

each, yields the highest Net Present Value NPV =4,16 M€ and IRR =19%, followed by the combined scenario with the use of 1 GO engine and 2 ICE engines, with financial indicators: NPV =4,06 M€ and IRR =19%. For better evaluation of modeling results, field measurements need to be made in relation to the quantity and quality of the biogas produced, since all the results of the present dissertation are based on the implementation of the LandGEM computational models. In this way, safer conclusions can be made after verifying and adjusting the models with those measurements.

Εισαγωγή

Στα πρώτα δεκαεπτά χρόνια του 21^{ου} αιώνα και πιο έντονα κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας παρατηρείται μία στροφή προς τις ΑΠΕ και γενικώς τις νέες ενεργειακές τεχνολογίες και παράλληλη μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων, ως διέξοδο στην αντιμετώπιση και περιορισμό των περιβαλλοντικών προβλημάτων και προκλήσεων (Li et al., 2009). Η ενεργειακή πολιτική, λοιπόν, βρίσκεται αντιμέτωπη με δύο σημαντικές προκλήσεις: την εξασφάλιση της ενεργειακής επάρκειας και τον κατά δύναμη περιορισμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής (W&CC, 2010). Το σενάριο της διασφάλισης των φυσικών πόρων σε συνδυασμό με την αξιοποίηση ΑΠΕ θα προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας και αυξημένη ενεργειακή απόδοση και μπορεί να διαδραματίσει κομβικό ρόλο στην αντιμετώπιση των παραπάνω προκλήσεων.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση στην προσπάθειά της να οδηγήσει σε άμβλυνση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής προχωράει σε ενέργειες προκειμένου να ενισχύσει την ενεργειακή ασφάλεια και να θέσει δεσμευτικούς στόχους για τη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα μέχρι το 2020 (Danchev et al., 2010) και την καθιέρωσή τους έως το 2030 (Monni et al., 2006), με το μερίδιο ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας για το έτος 2020 να είναι 20% και 10% στον τομέα των μεταφορών (Ζαφείρης, 2010).

Το βιοαέριο αποτελεί μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ένα βιογενούς προέλευσης αέριο και συνεπώς η καύση του για την παραγωγή ενέργειας, αντί των ορυκτών καυσίμων, μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Pawłowska, 2014). Μέχρι σήμερα, το βιοαέριο συνιστά μία εκ των ελαχίστων πλήρως τεχνολογικά εδραιωμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η οποία

προσφέρει τη δυνατότητα ενεργειακής αξιοποίησής της για παραγωγή θερμότητας, ατμού, ηλεκτρισμού και καυσίμου οχημάτων. Είναι, με την πραγματική έννοια της λέξης, μία ιδιαιτέρως ευέλικτη πηγή ενέργειας (EBA/Biogas Brochure, 2011). Αξίζει να σημειωθεί ότι, η ανάπτυξη και η εγκατάσταση τεχνολογιών βιοαερίου αποτελεί εναλλακτική λύση με σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς προσφέρει περιβαλλοντικά φιλική ενέργεια και ταυτόχρονα αντιμετωπίζει το θέμα της ανάκτησης και ανακύκλωσης των στερεών αποβλήτων (Ζαφείρης, 2007). Τα οφέλη από την υγειονομική ταφή των αποβλήτων για το παγκόσμιο κλίμα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το είδος των ορυκτών καυσίμων που αναμένεται να αντικατασταθεί από το βιοαέριο (W&CC, 2010).

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Monni et al., (2006) υπολογίζεται ότι όσον αφορά την πρόβλεψη για το 2030 για αντικατάσταση του φυσικού αερίου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το βιοαέριο, θα επέλθει μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από 16 μέχρι 49 τετραγραμμάρια (Tg) CO₂ eq (ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα), ανάλογα με τον τύπο του σεναρίου διαχείρισης των αποβλήτων. Επίσης, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και το γεγονός ότι υψηλή μείωση των εκπομπών, που κυμαίνεται σε 42 με 126 Tg CO₂ eq, μπορεί να επιτευχθεί με αντικατάσταση του άνθρακα από βιοαέριο σε διάφορες τεχνολογίες.

Οι τεχνολογίες που βασίζονται σε ΑΠΕ και ειδικότερα στην ενεργειακή αξιοποίηση βιοαερίου, εξελίσσονται διαρκώς, με συνέπεια να θεωρούνται αξιόλογοι ανταγωνιστές και η χρήση τους να είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Παρόλα αυτά, ακόμα δεν έχουν πλήρως ενσωματωθεί στον ενεργειακό τομέα. Υπάρχουν όμως τεχνολογίες ΑΠΕ που σε μικρό χρονικό διάστημα έχουν καταφέρει να συγκεντρώσουν ένα σημαντικό μερίδιο της αγοράς. Είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός

όμως, ότι η συνεχής εξάπλωσή τους ενισχύει την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού και τη μη εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, με τη συνακόλουθη μείωση των αλόγιστων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αλλά και προώθηση της τεχνολογικής εξέλιξης και καινοτομίας (Bakos, 2009 ; Ζαφείρης, 2010).

Πίνακας Συντομογραφιών & Συμβολισμών

ΧΥΤΑ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων
ΧΑΔΑ	Χώρος Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων
CH₄	Μεθάνιο
CO₂	Διοξείδιο του Άνθρακα
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΜΕΚ	Μηχανές Εσωτερικής Καύσης
ICE	Internal Combustion Engines
ΑΤ	Αεριοτουρμπίνες
GT/TU	Gas Turbines/Turbines
MT	Μικροτουρμπίνες
MT	Micro-Turbines
GO	Gradual Oxidation/Oxidizer
FC	Fuel Cells
CHP	Combined Heat & Power
ORC	Organic Rankine Cycle
ΑΣΑ	Αστικών Στερεών Απόβλητα
LandGEM	Landfill Gas Emissions Model
ΚΠΑ	Καθαρή Παρούσα Αξία
NPV	Net Present Value
IRR	Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης
ΡΑΕ	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας

RAE	Regulatory Authority for Energy
ΕΕΛ	Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων
EBA	European Biogas Association
AEBIOM	The European Biomass Association
IRENA	International Renewable Energy Agency
CRES	Center of Renewable Energy Sources
EPA	Environmental Protection Agency
IEA	International Energy Agency
EEA	European Environment Agency
EIA	Energy Information Administration

Κεφάλαιο 1. Παραγωγή και Αξιοποίηση Βιοαερίου

1.1. Ενεργειακή Αξιοποίηση Βιοαερίου στην Ελλάδα

Στον ελληνικό χώρο, τη δεκαετία του '80, έλαβαν χώρα ορισμένες προσπάθειες για ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου παραγόμενου από επεξεργασία ζωικών και οργανικών αποβλήτων, οι οποίες τελικά επέβησαν άκαρπες. Κύριες αιτίες αυτής της κατάληξης ήταν η έλλειψη πληροφόρησης, η απουσία κατάλληλης υποδομής και κρατικού ενδιαφέροντος και η ανεπάρκεια οικονομικών κινήτρων (Ζαφείρης, 2007).

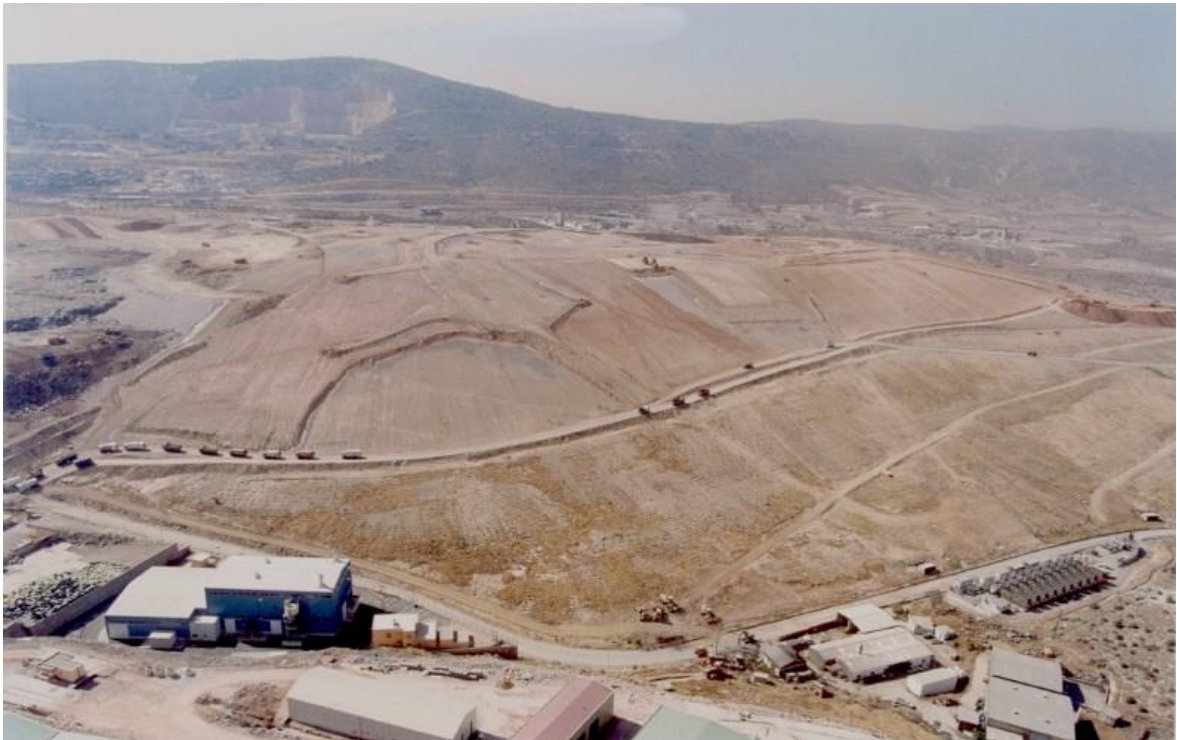
Έως τις αρχές του Ιουνίου του 2010, που ξεκίνησε στην Ελλάδα να παρατηρείται μία πιο συνεπής αδειοδότηση και λειτουργία μονάδων βιομάζας και βιοαερίου, παράλληλα με τη δημοσίευση στην εφημερίδα της κυβέρνησης του Ν.3851/2010, η εγκατεστημένη ισχύς των εν λόγω μονάδων συμπαραγωγής ήταν περίπου 40,1 MW με ελάχιστες αιτήσεις για χορήγηση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να υπάρχουν στην ΡΑΕ εκείνη την περίοδο για διευθέτηση (Ζαφείρης, 2012).

Η εξέλιξη του θεσμικού πλαισίου και η σταδιακή εναρμόνισή του με την κοινοτική νομοθεσία (κατάλληλο νομοθετικό πλαίσιο), με τη συνακόλουθη συντονισμένη προσπάθεια έγκρισης μονάδων λιπασματοποίησης και μονάδων βιομάζας, η εξέλιξη των οικονομικών εργαλείων η αύξημένη διαθεσιμότητα πρώτης ύλης, οι συνεχώς αυξανόμενες επιλογές χωροθέτησης μονάδων συμπαραγωγής βιοενέργειας, η βελτίωση των οικονομικών εργαλείων (όχι όμως και των κοινωνικοοικονομικών συνθηκών), σε συνδυασμό με την απελευθέρωση της ενεργειακής αγοράς (Ζαφείρης, 2011) και η προσπάθεια ενημέρωσης όλο και περισσότερου κόσμου και η ευαισθητοποίησή του πάνω σε θέματα σημαντικότητας των ΑΠΕ και συγκεκριμένα βιοενέργειας, δημιουργούν τις προϋποθέσεις και την

απαραίτητη υποδομή για την δημιουργία μονάδων βιοαερίου σε μεγάλη και συνεχώς επεκτεινόμενη κλίμακα σε όλο και περισσότερα σημεία της χώρας.

Εν έτει 2016, σύμφωνα με τον Zafiris, (2016), η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των έργων βιοαερίου, παραγόμενου κυρίως από ΧΥΤΑ και ΕΕΛ, ανέρχεται στα 47,34 MW. Από αυτά, τα 42,4 MW αντιστοιχούν σε ενεργειακή αξιοποίηση βιοαερίου που παράγεται από ΧΥΤΑ και ΕΕΛ, ενώ τα εναπομείναντα 4,94 MW σε βιοαέριο προερχόμενο από την αναερόβια χώνευση αγροκτηνοτροφικών αποβλήτων.

Τα σημαντικότερα έργα βιοαερίου στην Ελλάδα (CRES, 2016 ; Zafiris, 2016) συναντώνται στους ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων στην Αττική (Εικόνα 1.1) και Ταγαράδων στη Θεσσαλονίκη (Εικόνα 1.3) , όπου λειτουργούν δύο σημαντικές επενδύσεις συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου, με εγκατεστημένη ισχύ 23,5 MW (σε ΜΕΚ) και 5 MW, αντιστοίχως. Είναι γεγονός, ότι οι περισσότεροι ΧΥΤΑ παραμένουν αναξιοποίητοι, με αποτέλεσμα να χάνονται τεράστια ποσά ενέργειας, κυρίως ηλεκτρικής, αλλά και θερμικής. Επιπλέον, υπάρχει ήδη εγκατεστημένο αντίστοιχο έργο της ΕΥΔΑΠ στην Ψυττάλεια (Εικόνα 1.2) για την ενεργειακή αξιοποίηση της παραγόμενης ιλύος από τη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, με συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, εγκατεστημένης ισχύος 11,4 MW.



Εικόνα 1.1: Γενική άποψη ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων (Μονάδα ηλεκτροπαραγωγής από βιοαέριο εγκατεστημένης ισχύος 23,5 MW)

(Πηγή: ΗΛΕΚΤΩΡ Α.Ε.)



Εικόνα 1.2: Γενική άποψη ΕΕΛ Ψυττάλειας (Σύστημα ηλεκτροπαραγωγής από βιοαέριο εγκατεστημένης ισχύος 11,4 MW)

(Πηγή: ΕΥΔΑΠ)



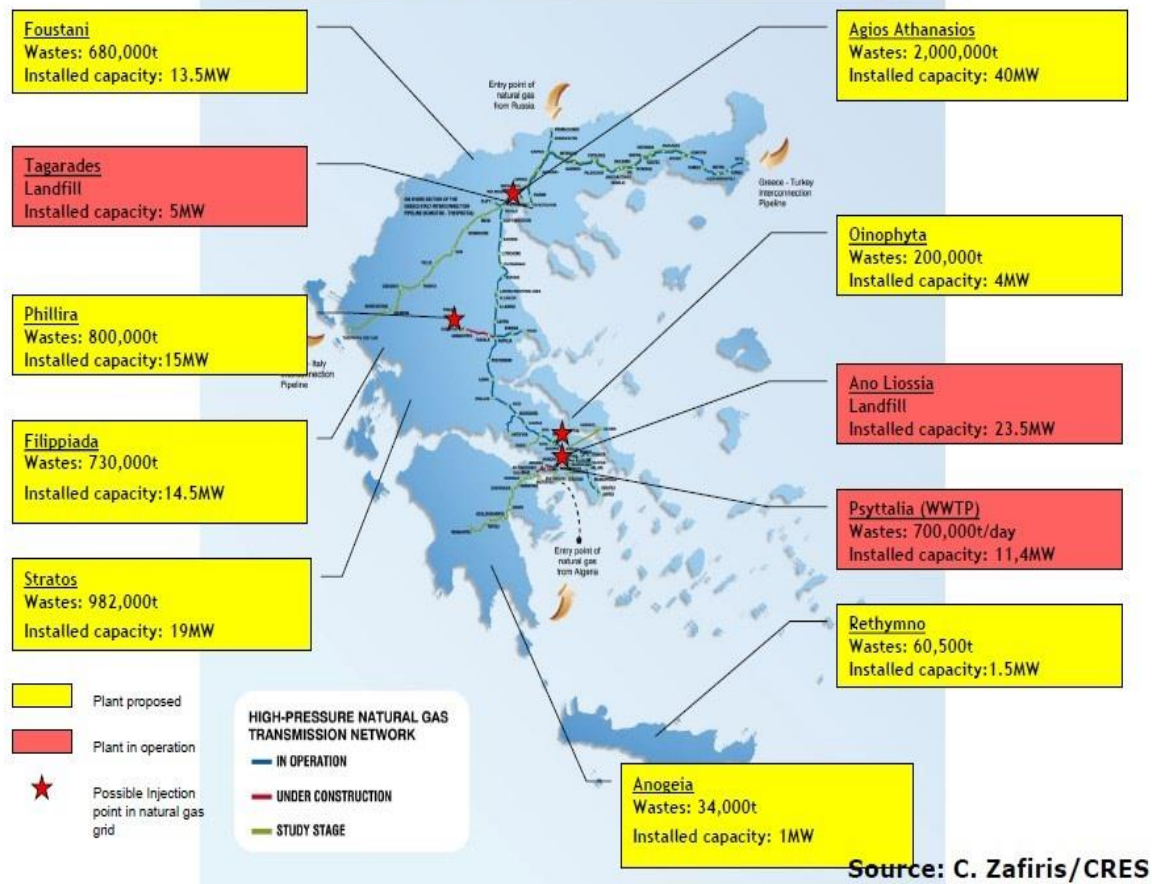
*Εικόνα 1.3: Μονάδα βιοαερίου στο ΧΥΤΑ Ταγαράδων εγκατεστημένης ισχύος 5 MW
(Πηγή: ΗΛΕΚΤΩΡ Α.Ε.)*

Μέχρι και τον Ιούνιο του 2016, η ΡΑΕ έχει προχωρήσει στην έκδοση 83 αδειών για παραγωγή βιοηλεκτρισμού, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 441,4 MW, και συγκεκριμένα (ΡΑΕ, 2016 ; Zafiris, 2016):

- ❖ 146,5 MW (46 έργα) από την αξιοποίηση βιοαερίου
 - 7 άδειες χρήσης για ΧΥΤΑ (41,33 MW)
 - 7 άδειες για ΕΕΛ (17,06 MW)
 - 26 άδειες για αγροτικά/ζωικά απόβλητα (72 MW)
 - 3 άδειες για γεωργικά απόβλητα (12 MW)
 - 3 άδειες για απόβλητα κτηνοτροφίας (4,12 MW)
- ❖ 294,9 MW (37 έργα) αναφέρονται σε εγκαταστάσεις καύσης βιομάζας

Στο χάρτη της εικόνας 1.4 (C. Zafiris/CRES) που ακολουθεί, παρουσιάζεται μία δυνητική χωρική κατανομή στο ελληνικό τοπίο των έργων βιοαερίου, για τα οποία υπάρχει μία μελλοντική σκέψη υλοποίησης, παρά τις δυσκολίες που υπάρχουν για τις εν λόγω κατασκευές.

Potential spatial distribution of biogas plants



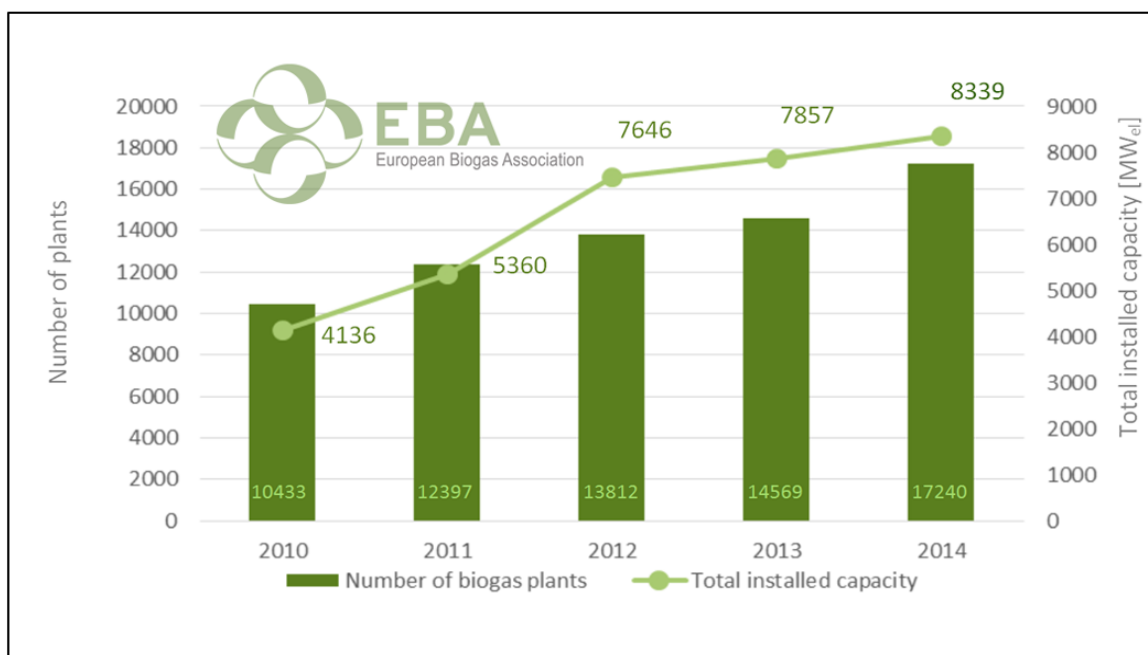
Εικόνα 1.4: Δυνητική χωρική κατανομή έργων βιοαερίου στην Ελλάδα

Ωστόσο, ορισμένα εμπόδια και σημαντικές αντιξοότητες (Zafiris, 2016), όπως η έλλειψη ευαισθητοποίησης του κοινού σε μεγάλο βαθμό πάνω σε θέματα βιοενέργειας και η συνακόλουθη μη αποδοχή εγκαταστάσεων βιοαερίου, η πολύπλοκη γραφειοκρατία με την περίεργη δομή των δημόσιων υπηρεσιών και οι σύνθετες περιβαλλοντικές αδειοδοτήσεις, η μερική αναποτελεσματικότητα του ελληνικού πλαισίου πολιτικής, η απουσία ξεκάθਾਰου χωροταξικού σχεδιασμού για τις μονάδες βιομάζας, η μη διαθεσιμότητα, προμήθεια και μεταφορά πρώτων υλών και κυρίως η έλλειψη οικονομικών κινήτρων στην ελληνική κοινωνία της ύφεσης, καθιστούν τις εν λόγω περιπτώσεις, για την ώρα, δύσκολα πραγματοποιήσιμες.

1.2. Τα δεδομένα για το Βιοαέριο και τη Βιοενέργεια στην Ευρώπη

Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία της πενταετίας 2010-2014 των European Biogas Association (EBA) και The European Biomass Association (AEBIOM), εντός της ΕΕ υπάρχουν περίπου 17.240 μονάδες βιοαερίου με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 8.339 MW (Γράφημα 1.1) και συμπαραγωγή άνω των 100.000 GWh ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, στο τέλος του 2014 (ENERGIA, 2016). Οι δύο χώρες που εμφανίζουν με διαφορά από τις υπόλοιπες τη μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου στην Ευρώπη (Γράφημα 1.2) είναι η Γερμανία με 10.786 μονάδες βιοαερίου εγκατεστημένης ισχύος περίπου 3.500 MW και η Ιταλία με 1.491 μονάδες βιοαερίου εγκατεστημένης ισχύος 1100 MW και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περί τις 9.000 GWh (EBA, 2016 ; AEBIOM, 2016).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει, ότι ο αριθμός των εργαζομένων στον τομέα του βιοαερίου έχει φτάσει ήδη στις 68.500 θέσεις εργασίας, ενώ όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η μεγαλύτερη αγορά έχει δημιουργηθεί στη Γερμανία, με κύκλο εργασιών που ανέρχεται στα 6,9 δισ. Ευρώ (ENERGIA, 2016). Επίσης, ένας ενδεικτικός καταμερισμός εργασίας στον τομέα της βιοενέργειας, για τα τέλη του 2013, φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 1.5.

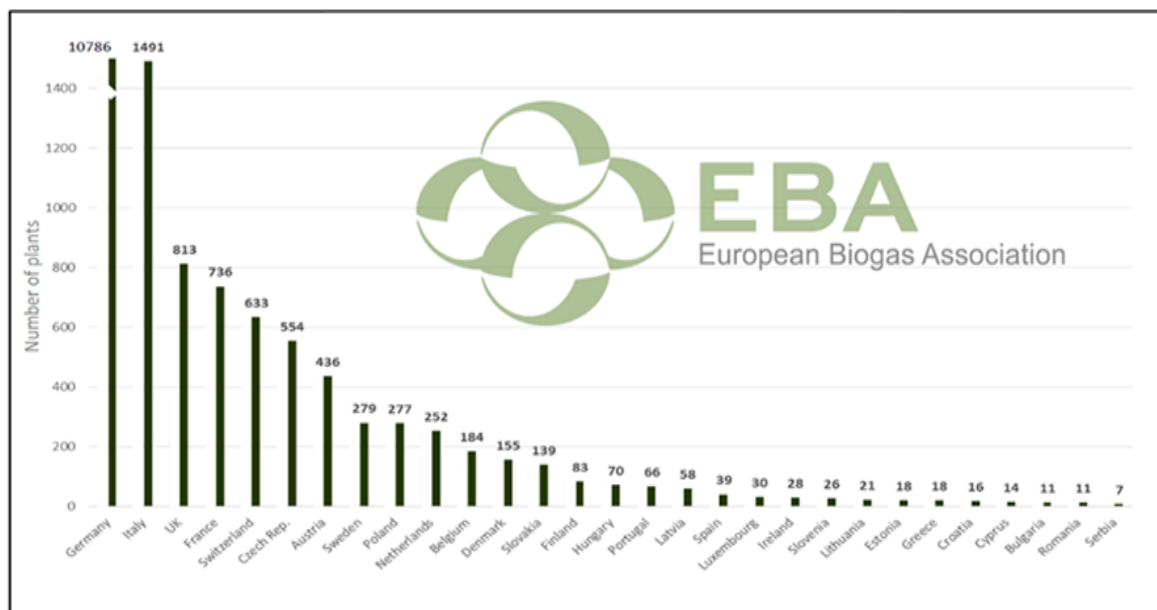


Number of biogas plants and total installed capacity in Europe 2010 -2014

Γράφημα 1.1: Καταμέτρηση έργων βιοαερίου και συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη 2010-2014

(Πηγή: EBA)

Στο Γράφημα 1.1 αντανακλάται το ρεκόρ ανάπτυξης στην Ευρώπη από την άποψη του αριθμού των έργων βιοαερίου και την παραγωγή. Ο αριθμός των 17.240 μονάδων αντιπροσωπεύει αύξηση 18%, σε σύγκριση με το 2013, ενώ επίσης, όπως αναφέρεται στο Bioenergy Annual Report 2015 του International Energy Agency, η ανάπτυξη της βιομηχανίας βιομεθανίου παρουσιάζει εξαιρετικά αποτελέσματα, με 367 μονάδες, μία αύξηση της τάξης του 23% σε σχέση με το προηγούμενο έτος.



17 240 biogas plants in Europe (31/12/2014)
Total installed capacity of 8 293 MW_{el}

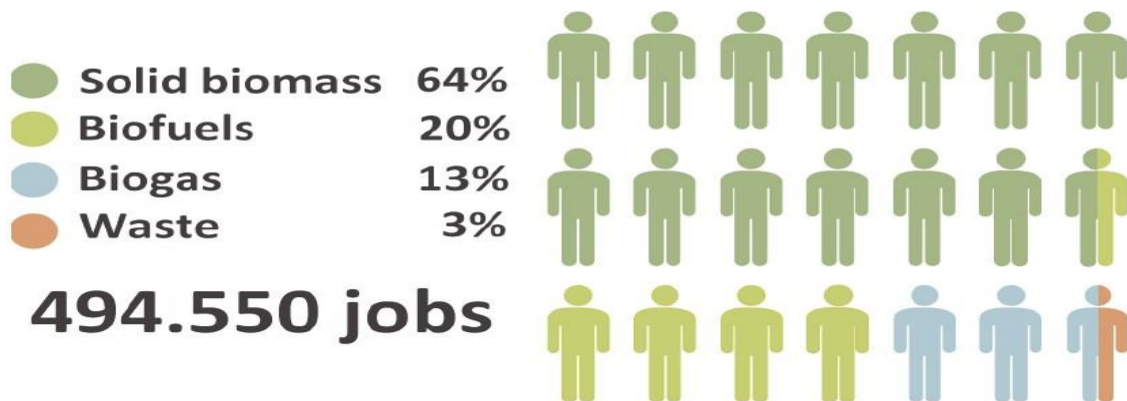
Γράφημα 1.2: Καταμέτρηση έργων βιοαερίου στην Ευρώπη ανά χώρα το 2014

(Πηγή: EBA)

Ωστόσο, η συνολική αύξηση του αριθμού των μονάδων βιοαερίου έχει ακολουθήσει δύο διαφορετικά σενάρια: από τη μία πλευρά είναι οι χώρες που δεν έχουν προχωρήσει σε νέες εγκαταστάσεις και έχουν προβεί μόνο σε μικρές εξελίξεις και τροποποιήσεις, όπως η Αυστρία, η Τσεχία και η Ουγγαρία, και από την άλλη είναι οι χώρες που αύξησαν κατακόρυφα τον τομέα ενεργειακής αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου τους με ένα σημαντικό αριθμό νέων εγκαταστάσεων βιοαερίου, όπως δηλαδή το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γαλλία και το Βέλγιο, μεταξύ άλλων. Το Ηνωμένο Βασίλειο μάλιστα, σύμφωνα με την EBA/Biogas Report 2015, έχει αυξήσει τις μονάδες βιοαερίου του σε τέτοιο βαθμό που διπλασιάστηκαν μέσα σε ένα χρόνο. Όσον αφορά την παραγωγή βιοαερίου, οι εθνικοί οργανισμοί και τρίτοι παρατηρητές ποσοτικοποιούν τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε από βιοαέριο σε 63,3 TWh, μέγεθος που αντιστοιχεί στην ετήσια κατανάλωση 14,6 εκατομμυρίων ευρωπαϊκών νοικοκυριών, που τροφοδοτούνται με ενέργεια από βιοαέριο.

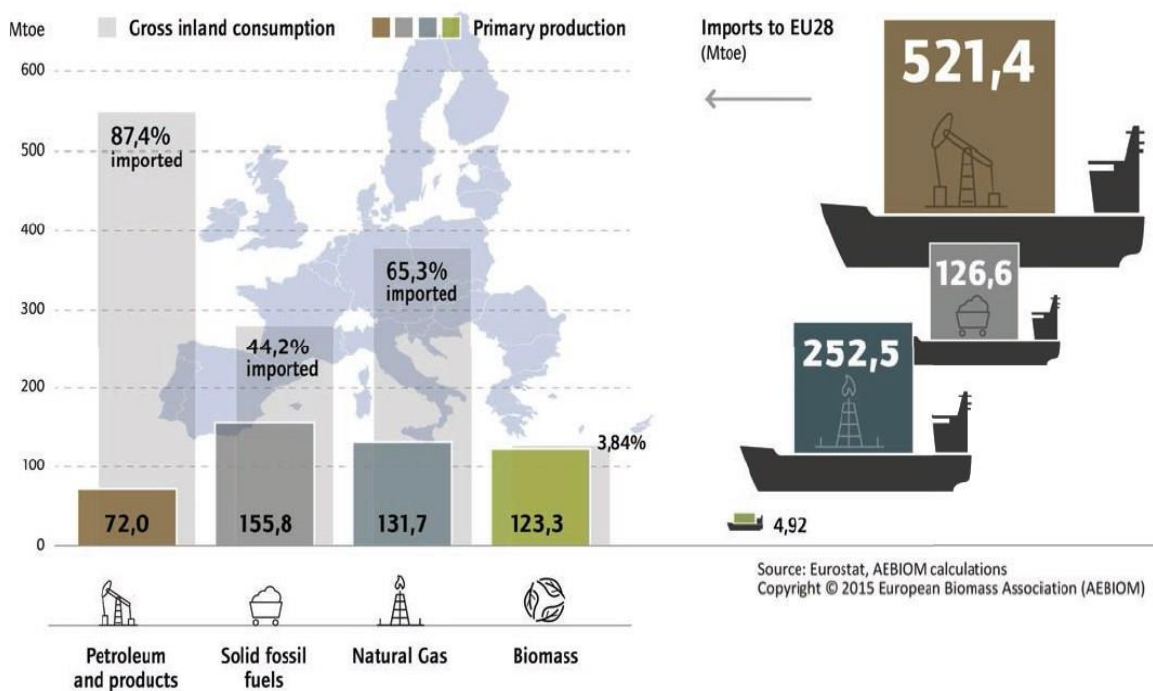
EU28 Job distribution in the Bioenergy sector in 2013 (%)

Source: 14th EurObserver Report on the State of Renewable Energies in Europe



Εικόνα 1.5: Καταμερισμός εργασίας στην Ευρώπη για τον τομέα της βιοενέργειας το 2013
(Πηγή: AEBIOM/Annual Report 2015)

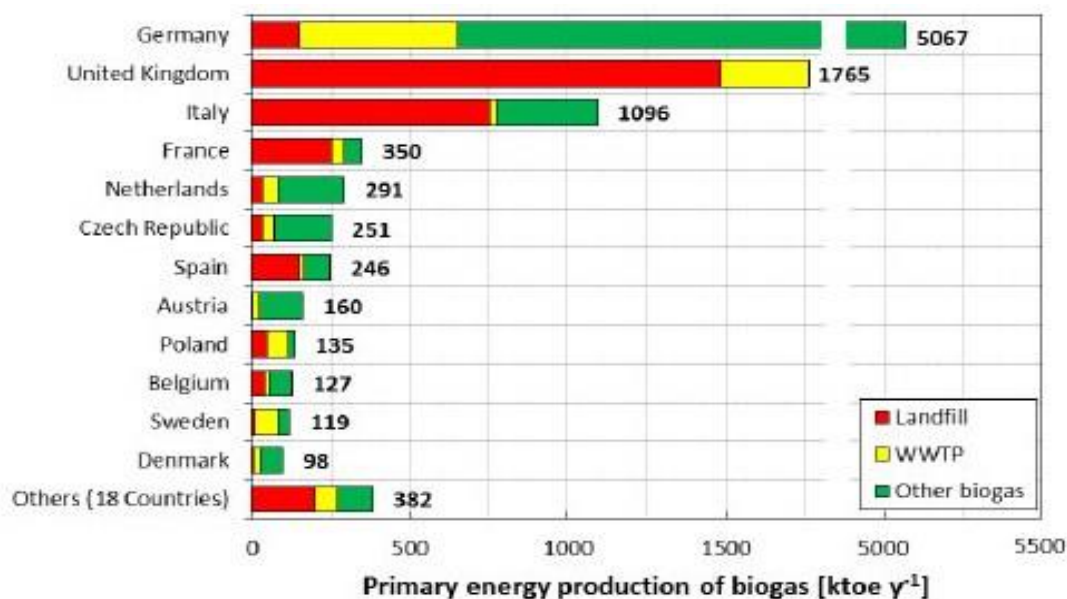
European Energy Dependency



Γράφημα 1.3: Απεικόνιση της ευρωπαϊκής ανεξαρτησίας σε επίπεδο ενέργειας το 2013
(Πηγή: AEBIOM/Annual Report 2015)

Επιπλέον, όπως διαφαίνεται από το Γράφημα 1.3, η ενεργειακή ανεξαρτησία της Ευρώπης στον τομέα της βιοενέργειας (ποσοστό εισαγωγών 3,84%), που υπολογίζεται ως οι καθαρές εισαγωγές δια του αθροίσματος της ακαθάριστης εσωτερικής κατανάλωσης ενέργειας (AEBIOM, 2016), είναι δεδομένη και αποδεικνύει την ισχυροποίηση της στην ενεργειακή αξιοποίηση βιοαερίου, βιομάζας και βιοκαυσίμων, εν αντιθέσει, με τα υψηλά ποσοστά εισαγωγών πετρελαίου, στερεών ορυκτών καυσίμων και φυσικού αερίου. Άλλωστε, δεν είναι λίγες οι χώρες που επιθυμούν να επενδύσουν όσο το δυνατόν περισσότερο στη βιοενέργεια για να καλύψουν τις ανάγκες τους και την απαίτηση-στόχο που έχει θέσει η ΕΕ για ανανεώσιμη ενέργεια μέχρι το 2020 και το 2030.

Τέλος, αναφορικά με την προέλευση του βιοαερίου στις διάφορες χώρες της Ευρώπης, μία αντιπροσωπευτική απεικόνιση της κατάστασης για το έτος 2011 υπάρχει στο Γράφημα 1.4, με το βιοαέριο σε αρκετές περιπτώσεις να παράγεται και να αξιοποιείται σε αρκετά μεγάλο βαθμό από ΧΥΤΑ (Landfills) και αγροκτηνοτροφικές εγκαταστάσεις (αγροτικά και κτηνοτροφικά απόβλητα), όπως για παράδειγμα στην Ολλανδία, στη Γαλλία, στην Ιταλία και στην Τσεχία, ενώ σε άλλες χώρες, όπως στη Γερμανία, στην Πολωνία, στη Σουηδία και στο Ηνωμένο Βασίλειο, εμφανίζεται και μεγάλη παραγωγή βιοαερίου σε ΕΕΛ (Waste Water Treatment Plants-WWTP).



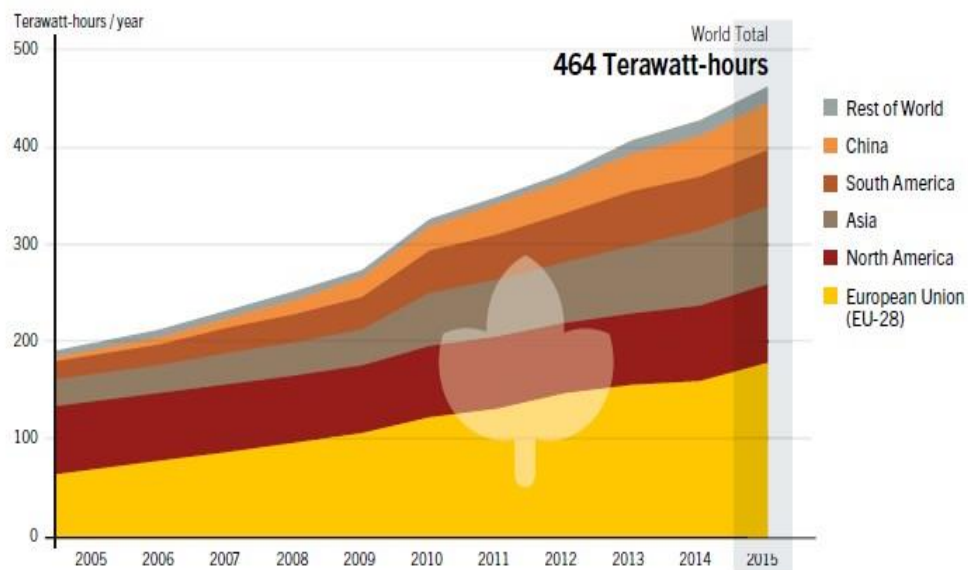
Γράφημα 1.4: Παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας από βιοαέριο, 2011

(Πηγή: EEA)

1.3. Ανανεώσιμη Ενέργεια, Βιοενέργεια και Βιοαέριο στον Παγκόσμιο Χάρτη

Μία συγκριτική απεικόνιση της βιοενέργειας ανά τον κόσμο παρουσιάζεται στο παρακάτω Γράφημα 1.5, στο οποίο φαίνεται η υπεροχή των Ευρωπαϊκών χωρών έναντι των Ασιατικών και ειδικότερα της Κίνας, όπως επίσης και της Αμερικής, στην παραγωγή ενέργειας από την αξιοποίηση κυρίως βιομάζας αλλά και -αρκετά μικρότερο ποσοστό- βιοαερίου, σε βάθος δεκαετίας (2005-2015), κατά την οποία η συνολική καταγεγραμμένη παραγωγή ενέργειας αντιστοιχεί σε 464 TWh. Το μεγαλύτερο, λοιπόν, εύρος παραγωγής και λειτουργίας παρατηρείται στην Ευρώπη, ενώ η Βόρεια Αμερική και η Ασία -σύμφωνα πάντα με το Γράφημα 1.5 του REN21- είναι εκείνες που ακολουθούν έχοντας μικρότερη συμμετοχή.

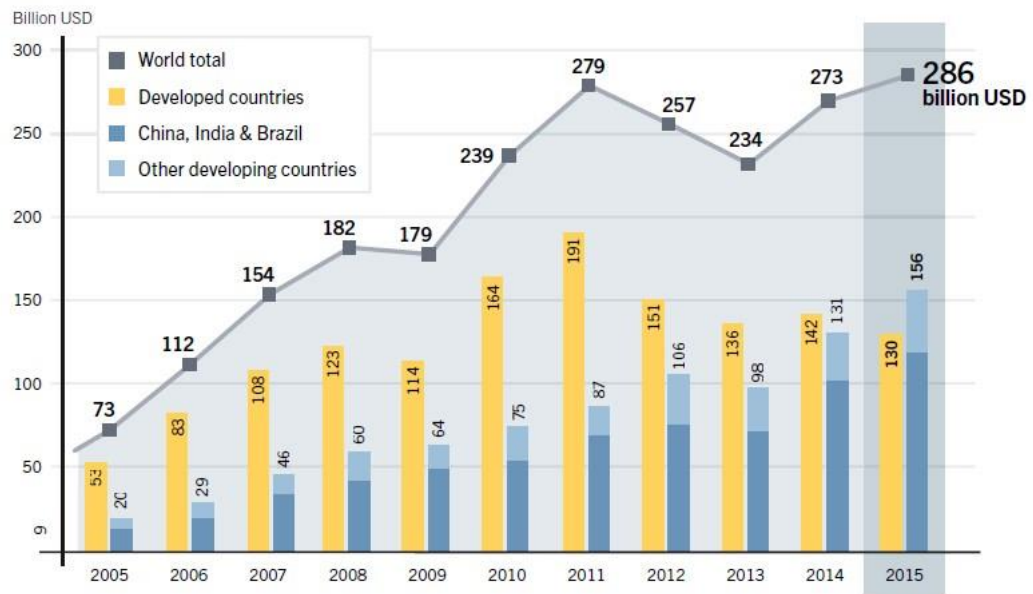
Global Bio-power Generation, by Country/Region, 2005-2015



Γράφημα 1.5: Παγκόσμια παραγωγή βιοενέργειας ανά ήπειρο
(Πηγή: REN21/Renewables 2016/GSR)

Επιπροσθέτως, μία γενική εικόνα των χρηματικών επενδύσεων για ανανεώσιμη ενέργεια και (βιο)καύσιμα σε παγκόσμιο επίπεδο, παρουσιάζεται στο Γράφημα 1.6, σε βάθος δωδεκαετίας (2004-2015), με το συνολικό ποσό επένδυσης για το 2015 να φτάνει τα 286 δισεκατομμύρια αμερικάνικα δολάρια (billion USD) και τις χρονιές του 2011 και 2014 να ακολουθούν με μία σχεδόν εξίσου υψηλή διάθεση χρημάτων.

Global New Investment in Renewable Power and Fuels, Developed, Emerging and Developing Countries, 2004-2015



Γράφημα 1.6: Παγκόσμια επένδυση στην ανανεώσιμη ενέργεια και τα (βιο)καύσιμα, 2004-2015

(Πηγή: REN21/Renewables 2016/GSR)

Όσον αφορά την παραγωγή βιοαερίου σε παγκόσμιο επίπεδο, αναμένεται σημαντική αύξηση κυρίως στην Ευρώπη, με την Βόρεια Αμερική και την Ασία να ακολουθούν κατά σειρά.

Όπως αναφέρει η ecoprolog GmbH, με τη δημοσίευσή της “Biogas to Energy – The World Market for Biogas Plants” (ecoprolog GmbH, 2016), η παγκόσμια κατασκευή νέων μονάδων βιοαερίου θα συνεχιστεί μέσα στα επόμενα δεκαετία. Μεταξύ 2016 και 2025, η εγκατεστημένη ισχύς θα αυξηθεί από περίπου 7.000 MW_{el} με 9.600 MW_{el}, ενώ ο αριθμός των μονάδων βιοαερίου προβλέπεται να αυξηθεί από περίπου 12.000 έως 15.000.

Βασική κινητήρια δύναμη για αυτή την εξέλιξη παραμένουν οι επιδοτήσεις για την ηλεκτρική ενέργεια, τη θερμότητα ή τα καύσιμα που παράγονται σε εγκαταστάσεις βιοαερίου. Ωστόσο, είναι ευνόητο ότι από τη στιγμή που πολλές χώρες (κυρίως ευρωπαϊκές) έχουν περιορίσει σε μεγάλο βαθμό έως διακόψει τα προγράμματα στήριξής τους, η εξέλιξη αυτή δεν θα είναι τόσο δυναμική όσο υπήρξε στις αρχές της δεκαετίας του 2010. Οι μειώσεις αυτές δείχνουν τις πιο σοβαρές επιπτώσεις στη μέχρι πρότινος κυρίαρχη γερμανική αγορά.

Η συγκεκριμένη κατάσταση λοιπόν, οδηγεί πολλούς παράγοντες της αγοράς να εξερευνήσουν νέους τρόπους δραστηριοποίησης. Εκτός από την αξιοποίηση νέων διεθνών αγορών πωλήσεων, πολλοί τεχνολογικοί πάροχοι αναπτύσσουν σήμερα την επιχειρηματική τους δραστηριότητα με τη βελτιστοποίηση των υφιστάμενων εγκαταστάσεων, μια διαδικασία που αναφέρεται ως “repowering” (ecoprolog GmbH, 2016).

Στη συνέχεια, παρατίθενται ορισμένα επίσημα στατιστικά στοιχεία του διεθνούς πρακτορείου ανανεώσιμης ενέργειας, IRENA, και το δίκτυο REN21 σχετικά με τους τομείς επαγγελματικής απασχόλησης στις ΑΠΕ σε όλο τον κόσμο, για το 2014-2015.

Πίνακας 1.1: Εκτιμώμενες άμεσες και έμμεσες θέσεις εργασίας στην ανανεώσιμη ενέργεια σε όλο τον κόσμο, ανά βιομηχανία/τομέα απασχόλησης, 2014-2015

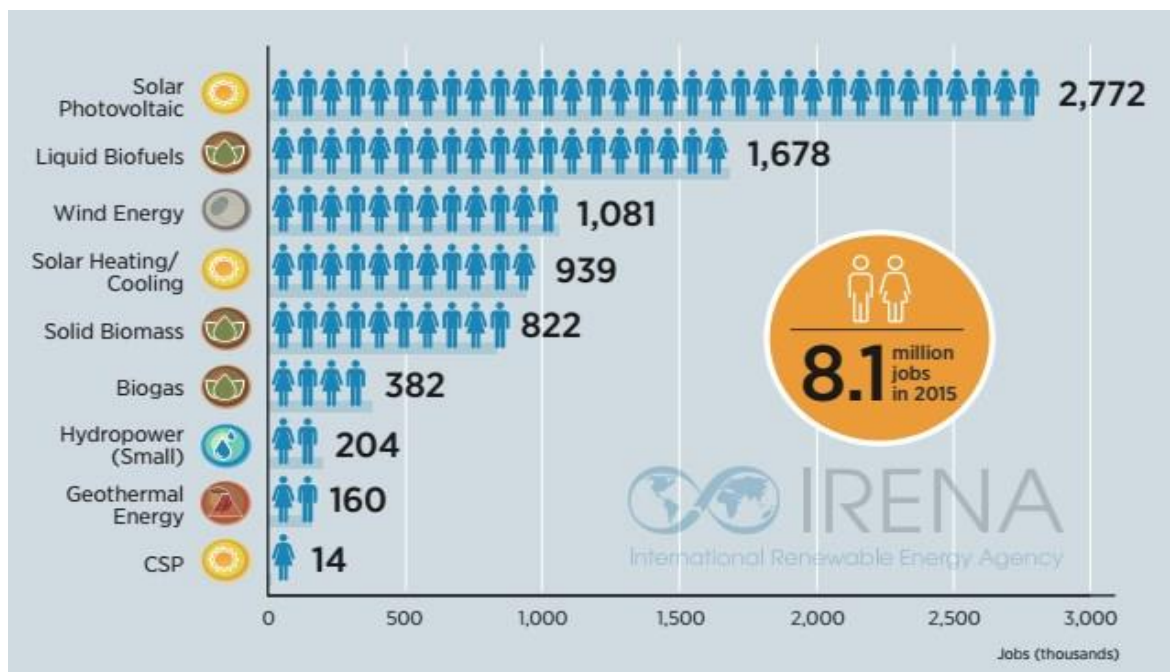
(Πηγή: REN21/Renewables 2016/GSR)

Estimated Direct and Indirect Jobs in Renewable Energy Worldwide, by Industry

	World	China	Brazil	United States	India	Japan	Bang-ladesh	European Union ¹		
								Germany	France	Rest of EU
	THOUSAND JOBS									
 Solar PV	2,772	1,652	4	194	103	377	127	38	21	84
 Liquid biofuels	1,678	71	821 ^c	277 ^r	35	3		23	35	47
 Wind power	1,081	507	41	88	48	5	0.1	149	20	162
 Solar heating/cooling	939	743	41 ^d	10	75	0.7		10	6	19
 Solid biomass ^{a,g}	822	241		152 ^e	58			49	48	214
 Biogas	382	209			85		9	48	4	14
 Hydropower (small-scale) ^b	204	100	12	8	12		5	12	4	31
 Geothermal energy ^a	160			35		2		17	31	55
 CSP	14			4				0.7		5
Total	8,079^h	3,523	918	769	416	388	141	355ⁱ	170	644^k

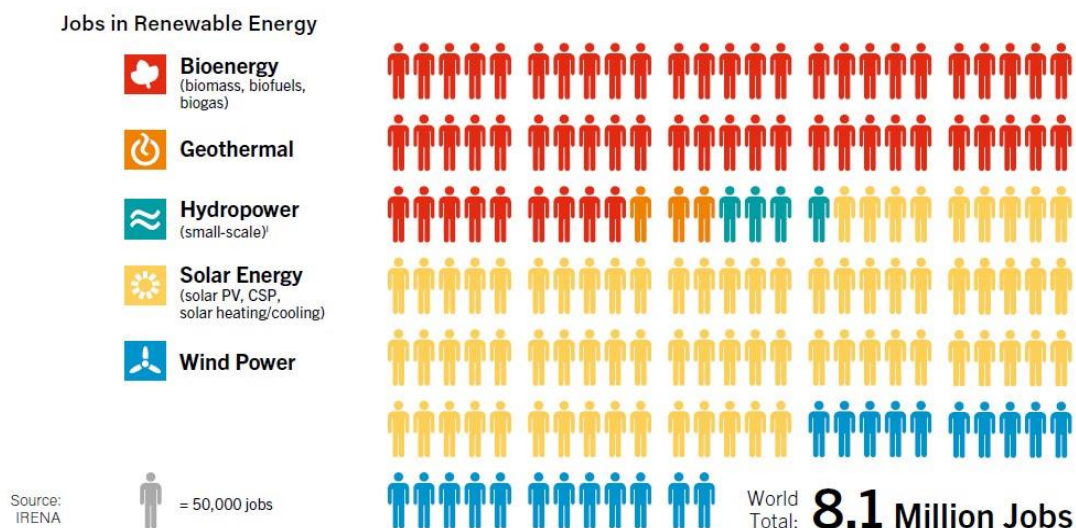
Note: Figures provided in the table are the result of a comprehensive review of primary (national entities such as ministries, statistical agencies, etc.) and secondary (regional and global studies) data sources and represent an ongoing effort to update and refine available knowledge. Totals may not add up due to rounding.

^a Power and heat applications (including heat pumps in the case of the EU). ^b Although 10 MW is often used as a threshold, definitions are inconsistent across countries. ^c About 268,400 jobs in sugar cane and 190,000 in ethanol processing in 2014; also includes 200,000 indirect jobs in equipment manufacturing and 162,600 jobs in biodiesel in 2015. ^d Equipment manufacturing and installation jobs. ^e Biomass power direct jobs run to only 15,500. ^f Includes 227,562 jobs for ethanol and 49,486 jobs for biodiesel in 2015. ^g Traditional biomass is not included. ^h The total for 'World' is calculated by adding the individual totals of the technologies, with 3,700 jobs in ocean energy, 11,000 jobs in renewable municipal and industrial waste and 14,000 jobs in others (jobs that cannot be broken down by technology). ⁱ All EU data are from 2014, and the two major EU countries are represented individually. ^j Includes 8,300 jobs in publicly funded R&D and administration; not broken down by technology. ^k Includes 8,000 jobs in renewable municipal and industrial waste and 3,700 jobs in ocean energy.



Γράφημα 1.7: Επαγγελματική Απασχόληση στην Ανανεώσιμη Ενέργεια παγκοσμίως, ανά Τεχνολογία, 2014-2015

(Πηγή: IRENA/Annual Review 2016)



ⁱ This sidebar is drawn from IRENA, *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2016*. Data are principally for 2014–2015, with dates varying by country and technology, including some instances where only dated information is available.

ⁱⁱ IRENA defines large-scale hydropower as projects above 10 MW. Definitions may vary across IRENA member countries. Projects below 10 MW are considered as small-scale hydropower.

Εικόνα 1.6: Θέσεις εργασίας στην ανανεώσιμη ενέργεια παγκοσμίως, ανά κατηγορία ΑΠΕ, 2014-2015

(Πηγή: REN21/Renewables 2016/GSR)

Με τη βοήθεια του παραπάνω Πίνακα 1.1, του Γραφήματος 1.7 και της Εικόνας 1.6, διαπιστώνεται ότι ο τομέας της ανανεώσιμης ενέργειας απασχόλησε επαγγελματικά 8,1 εκατομμύρια άτομα σε όλο τον κόσμο, άμεσα ή έμμεσα, κατά το 2015, με τον κλάδο της βιοενέργειας και του βιοαερίου, συγκεκριμένα, να γνωρίζει ιδιαίτερη άνθιση και να εξυπηρετεί μεγάλο μέρος του επιχειρηματικού δυναμικού, τόσο στην Κίνα, τη Βραζιλία και τις ΗΠΑ, όσο και στη Γερμανία και τη Γαλλία. Οι αναφερόμενες στον πίνακα και τα διαγράμματα ενεργειακές αγορές συνεχίζουν συνεχώς να διαμορφώνονται χάρις στα ευνοϊκά πλαίσια πολιτικής σε πολλές χώρες, τις περιφερειακές αλλαγές στην ανάπτυξη και την αυξημένη παραγωγικότητα της εργασίας.

Επιπλέον, ενώ η αύξηση της απασχόλησης στην πράσινη και την ανανεώσιμη ενέργεια είναι πιθανό να επιβραδύνει, με την ώριμη βιομηχανία και την άνοδο της παραγωγικότητας της εργασίας, οι εκτιμήσεις της IRENA για διπλασιασμό του μεριδίου των ΑΠΕ στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα θα οδηγήσει σε περισσότερες από 24 εκατομμύρια θέσεις εργασίας σε όλο τον κόσμο μέχρι το 2030 (IRENA, 2016).

Για την κάλυψη των αυξανόμενων απαιτήσεων του κλάδου του βιοαερίου και της ενεργειακής αξιοποίησής του, απαιτείται σταθερό και προβλέψιμο πλαίσιο πολιτικής που θα ενθαρρύνει την ανάπτυξη και την τόνωση των επενδύσεων σε τοπικές βιομηχανίες, την ενίσχυση των δυνατοτήτων σε επίπεδο επιχείρησης και την προώθηση της εκπαίδευσης και της κατάρτισης.

1.4. Βιοαέριο από ΧΥΤΑ

1.4.1. Σύσταση Βιοαερίου

Το βιοαέριο παράγεται από την αναερόβια χώνευση κτηνοτροφικών αποβλήτων (παραδείγματος χάριν λυμάτων από χοιροστάσια και βουστάσια), αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων και λυμάτων, καθώς και από αστικά στερεά απορρίμματα σε ΧΥΤΑ(CRES, 2016), όπως άλλωστε για την τελευταία περίπτωση μελετάται και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Προέρχεται από την αποσύνθεση και βιοαποικοδόμηση της οργανικής ύλης, απουσία αέρα, και αποτελείται από 45% έως 60% μεθάνιο (CH_4), 40% έως 60% διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), και περίπου 3% άλλα αέρια (Metz et al., 2007), ενώ μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά, μέσω της τροφοδοσίας του σε μία ποικιλία τεχνολογιών, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι αεριοτουρμπίνες για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (U.S. EPA Handbook, 2015; Al Seadi et al., 2010), ή ακόμα και πολλές φορές χρησιμοποιείται σε καυστήρες απλώς για παραγωγή θερμότητας.

Στον πίνακα 1.2, φαίνονται συγκεντρωτικά τα εύρη τιμών που μπορούν να λάβουν τα κύρια οργανικά και ανόργανα συστατικά του βιοαερίου, καθώς επίσης και κάποιες κοινές χαρακτηριστικές (φυσικοχημικές) ιδιότητες αυτών:

*Ως θερμογόνος δύναμη ή θερμογόνος ικανότητα καυσίμου ορίζεται «η θερμότητα που εκλύεται κατά την τέλεια καύση της μονάδας βάρους ενός στερεού ή υγρού καυσίμου και μετράται σε kJ/kg (SI). Στα αέρια καύσιμα (αναφορικά με το βιοαέριο) η θερμογόνος δύναμη αναφέρεται συνήθως στη μονάδα του όγκου του καυσίμου υπό κανονικές συνθήκες ($^{\circ}\text{C}$ - 760 mm Hg) και μετράται σε MJ/Nm^3 (SI), kcal/m^3 ή Btu/ft^3 - Btu/cu-ft » (Κράλλης, 2015).

Πίνακας 1.2: Ποσοστιαίο εύρος τιμών και ιδιότητες των κύριων συστατικών του βιοαερίου
(Πηγές: DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches; Pawłowska, 2014)

Συστατικό	Χημικός Τύπος	Βιοαέριο	Ιδιότητες
Μεθάνιο	CH ₄	45 – 60 %	Άοσμο, άχρωμο, μη δηλητηριώδες
Διοξείδιο του Άνθρακα	CO ₂	40 – 60 %	Άοσμο, άχρωμο, μη δηλητηριώδες σε χαμηλές συγκεντρώσεις
Άζωτο	N ₂	< 2 %	Άοσμο, άχρωμο, μη δηλητηριώδες, μη εύφλεκτο
Οξυγόνο	O ₂	< 0,5 %	Άοσμο, άχρωμο, μη δηλητηριώδες
Υδρόθειο	H ₂ S	< 500 ppm v	Άχρωμο, δηλητηριώδες
Υδρογονάνθρακες	C _x H _y	< 100 ppm v	-
Νερό	H ₂ O	100% κορεσμένο	-
Θερμογόνος Δύναμη*	H _{S,M}	6 – 7,5 kWh/m ³	-

1.4.2. Φάσεις Αποσύνθεσης της Οργανικής Ύλης και Παραγωγής Βιοαερίου

Συγκεκριμένα, όσον αφορά την παραγωγή βιοαερίου από ΧΥΤΑ, ενός καύσιμου αερίου που προέρχεται από την αποσύνθεση βιολογικών αποβλήτων υπό αναερόβιες συνθήκες, επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της αναερόβιας χώνευσης (Gikas, 2008) στα στάδια (φάσεις) που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Όπως προαναφέρθηκε, το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα είναι τα κύρια συστατικά του βιοαερίου και παράγονται από τη δράση των μικροοργανισμών εντός των κελιών του χώρου υγειονομικής ταφής, απουσία αέρα. Βακτήρια αποδομούν την οργανική ύλη των απορριμμάτων σε τέσσερις φάσεις. Η σύνθεση του αερίου που παράγεται αλλάζει με κάθε μία από τις τέσσερις φάσεις της αποσύνθεσης. Οι ΧΥΤΑ ενδέχεται να δέχονται συνεχώς απόβλητα για μία περίοδο 20-30 ετών, με αποτέλεσμα αυτά να υποβάλλονται στις διάφορες φάσεις της αποσύνθεσης ταυτόχρονα (U. S. EPA, 2005). Αυτό σημαίνει ότι τα παλαιότερα απόβλητα σε μία περιοχή της εγκατάστασης μπορεί να είναι σε διαφορετική φάση αποσύνθεσης από ό,τι πιο πρόσφατα θαμμένα απόβλητα σε άλλο σημείο του ΧΥΤΑ (U. S. EPA, 2005). Στην περίπτωση των χώρων υγειονομικής ταφής, λοιπόν, η διαδικασία απόθεσης των αποβλήτων εκτείνεται χρονικά σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του, ενώ η όλη αποσύνθεση των οργανικών συστατικών που περιέχονται σε αυτά διαρκεί μερικές δεκαετίες (Pawłowska, 2014).

Η βιοαποικοδόμηση της οργανικής ύλης στα διάφορα στρώματα του ΧΥΤΑ, και η συνακόλουθη παραγωγή βιοαερίου, συνίσταται από τις διαδοχικές φάσεις που παρουσιάζονται ακολούθως. Οι φάσεις αυτές είναι: [1] η φάση της όξινης υδρόλυσης, [2] η φάση της οξεογένεσης (όξινης ζύμωσης), [3] η μεταβατική φάση μεθανογένεσης και [4] η σταθερή φάση μεθανογένεσης, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί [5] μία μακρά περίοδος ωρίμανσης (οξείδωσης του μεθανίου), που εμφανίζεται όταν οι βιοδιασπώμενες οργανικές ενώσεις εξαντληθούν εντός των κελιών απόθεσης και κατά τη διάρκεια της οποίας παρατηρείται μείωση του κλάσματος του μεθανίου στο βιοαέριο (Pawłowska, 2014), όπως επεξηγείται αναλυτικά και στο κεφάλαιο 4, αναφορικά με τη μοντελοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου στο ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων Ηρακλείου Κρήτης.

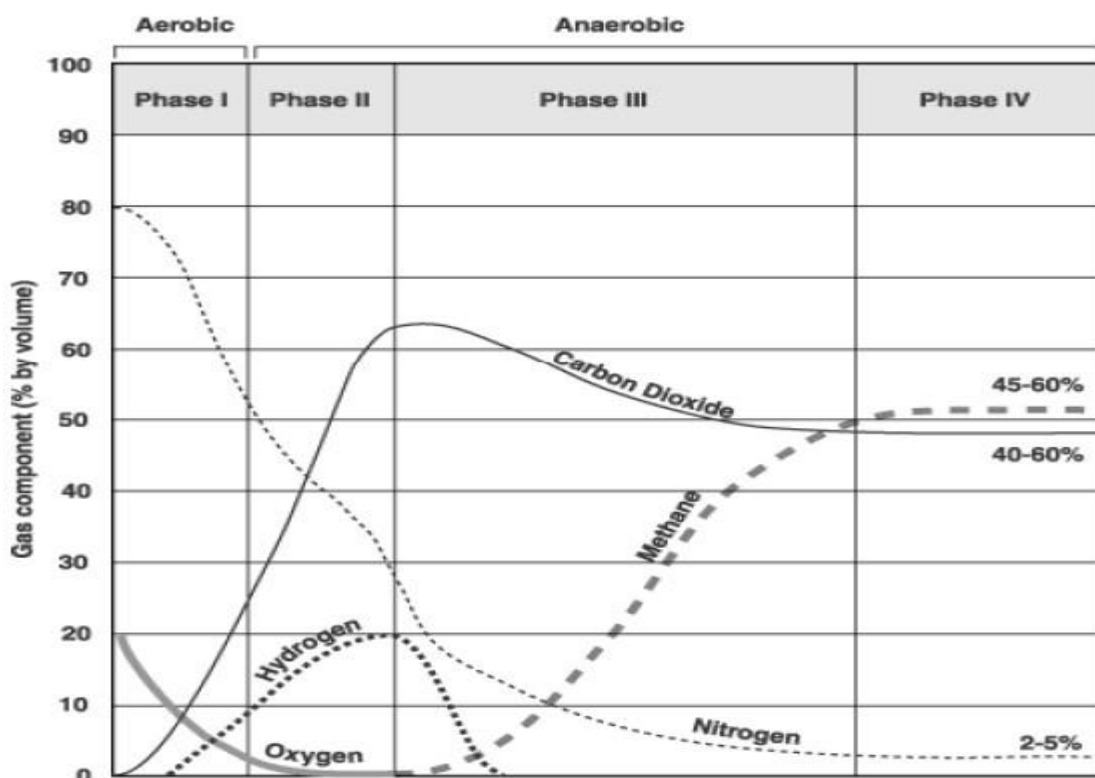
Όταν τα απορρίμματα αποτεθούν στους χώρους υγειονομικής ταφής, τα οργανικά τους συστατικά ξεκινούν σχεδόν αμέσως να αποσυντίθενται και περνούν από μία βιοχημική διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα αρχικά παρουσία αέρα και έπειτα απουσία αυτού.

Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης της αποσύνθεσης, αερόβια βακτήρια -βακτήρια που ζουν μόνο υπό την παρουσία οξυγόνου- καταναλώνουν O_2 από σύνθετους για να υδρολύσουν / διασπάσουν μακρομοριακές αλυσίδες υδατανθράκων, πρωτεϊνών και λιπιδίων σε μονομερείς ενώσεις, για να βιοαποικοδομήσουν εν συνεχεία τα προϊόντα της υδρόλυσης. Το κύριο παραπροϊόν αυτής της διαδικασίας είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Η συγκέντρωση του αζώτου είναι υψηλή στην αρχή αυτής της φάσης, αλλά μειώνεται καθώς ο χώρος υγειονομικής ταφής περνάει μέσα από τις τέσσερις φάσεις, όπως καταδεικνύεται και στο Γράφημα 1.8. Οι εν λόγω διεργασίες συνεχίζονται μέχρι να εξαντληθεί ο ατμοσφαιρικός αέρας, δηλαδή για όσο τα απόβλητα είναι κοντά στην επιφάνεια, στα ανώτερα στρώματα του ΧΥΤΑ.

Η φάση της υδρόλυσης μπορεί να διαρκέσει για ημέρες ή μήνες, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα οξυγόνου στα επιφανειακά στρώματα των απορριμμάτων του ΧΥΤΑ, -οξυγόνο που παγιδεύτηκε σε αυτά κατά την ταφή τους- ενώ τα επίπεδά του ποικίλλουν ανάλογα με κάποιους παράγοντες, όπως ο βαθμός συμπίεσης των αποβλήτων κατά την τοποθέτησή τους (U. S. EPA, 2005; Θέμελης et al., 2007; ATSDR, 2001).

Η δεύτερη φάση, η φάση της οξεογένεσης, ξεκινά όταν στο χώρο υγειονομικής ταφής έχει επέλθει ολοκληρωτική απουσία οξυγόνου. Συνεπώς, ειδικά βακτήρια, τα οποία επιβιώνουν και δρουν αποκλειστικά κάτω από αναερόβιες συνθήκες, χρησιμοποιώντας μία αμιγώς αναερόβια διαδικασία, δηλαδή μία διαδικασία που δεν

απαιτεί την ύπαρξη οξυγόνου, μετατρέπουν τις μονομερείς ενώσεις, που προέκυψαν από τους αερόβιους μικροοργανισμούς, σε οργανικά οξέα (οξικό, γαλακτικό και μυρμηκικό οξύ) και αλκοόλες, όπως μεθανόλη και αιθανόλη (U. S. EPA, 2005; Θέμελης et al., 2007).



Γράφημα 1.8: Τα κυριότερα συστατικά του βιοαερίου κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων παραγωγής του

(Πηγή: U. S. EPA)

Τα επίπεδα οξύτητας του ΧΥΤΑ ανεβαίνουν αισθητά και η ανάμειξη των οξέων με την υπάρχουσα υγρασία, έχει ως αποτέλεσμα ορισμένα θρεπτικά συστατικά να οδηγηθούν σε διάλυση, καθιστώντας διαθέσιμο το άζωτο και το φώσφορο για τα συνεχώς αυξανόμενα είδη βακτηρίων στο χώρο υγειονομικής ταφής (ATSDR, 2001). Τα αέρια παραπροϊόντα της εν λόγω φάσης είναι το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο (U. S. EPA, 2005; Θέμελης et al., 2007). Εάν ο χώρος υγειονομικής

ταφής διαταραχθεί ή εάν O_2 εισχωρήσει με κάποιο τρόπο στο ΧΥΤΑ, τότε η μικροβιακές διεργασίες, και πιο συγκεκριμένα η βακτηριακή δραστηριότητα θα επιστρέψει ξανά στην πρώτη φάση αποικοδόμησης (U. S. EPA, 2005).

Η τρίτη φάση, η μεταβατική φάση μεθανογένεσης, ξεκινά όταν ορισμένα είδη αναερόβιων βακτηρίων αρχίσουν να καταναλώνουν τα οργανικά οξέα που παράγουν κατά τη διάρκεια της προηγούμενης (δεύτερης) φάσης, μετασχηματίζοντάς τα σε οξικές ενώσεις (άλλα οξέα). Αυτή η διαδικασία μετατρέπει το ΧΥΤΑ σε ένα πιο ουδέτερο περιβάλλον και δημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες για να εδραιωθούν τα μεθανοπαραγωγά βακτήρια, γεγονός που σηματοδοτεί την ομαλή πορεία της συνολικής βιοχημικής διαδικασίας της αποσύνθεσης (U. S. EPA, 2005). Οι μικροοργανισμοί που παράγουν μεθάνιο και εκείνοι που παράγουν οξέα έχουν μια συμβιωτική ή ακόμα και αμοιβαία επωφελή σχέση. Τα βακτήρια που παράγουν οξύ δημιουργούν ενώσεις για τα μεθανοπαραγωγά βακτήρια, που καταναλώνουν το διοξείδιο του άνθρακα και τις οξικές ενώσεις, η υπερβολική συγκέντρωση των οποίων θα ήταν τοξική και επιβλαβής για τα οξεογενή βακτήρια (Θέμελης et. Al, 2007; ADSTR, 2001).

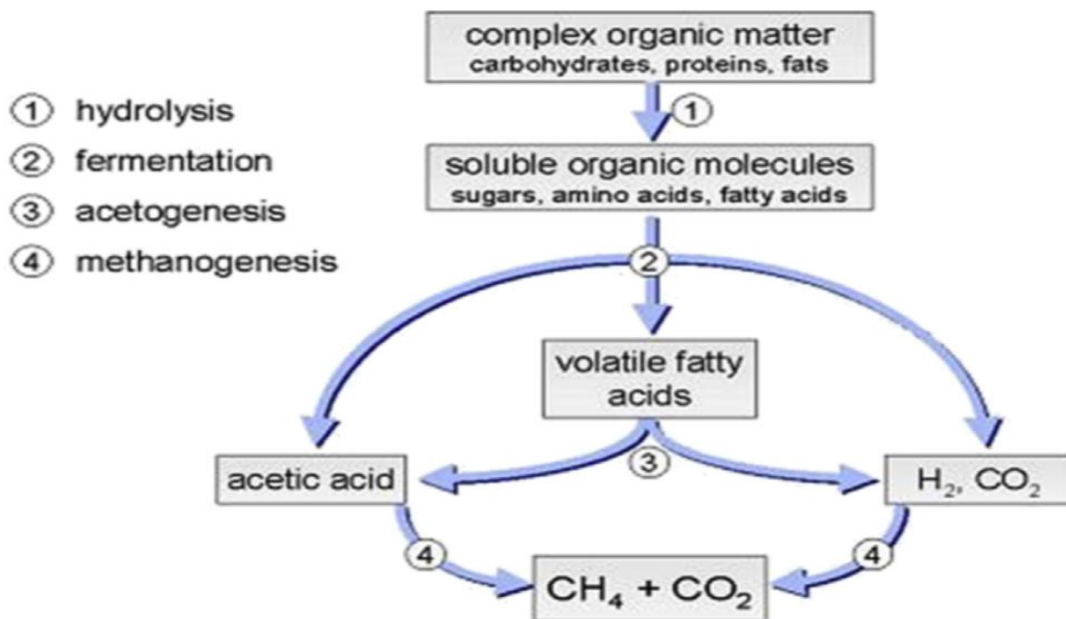
Το μεθάνιο σχηματίζεται όταν τα μεθανοπαραγωγά βακτήρια, διασπούν τα οξέα σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, ή με τη μείωση του διοξειδίου του άνθρακα με υδρογόνο. Προέχουσα σημασία έχει να διατηρήσει ο χώρος υγειονομικής ταφής την απαραίτητη υγρασία, έτσι ώστε η αναερόβια αντίδραση να συνεχίζεται αδιάκοπτα (Θέμελης et al., 2007).

Η τέταρτη φάση, η σταθερή φάση της μεθανογένεσης, αρχίζει όταν οι ρυθμοί σύνθεσης και παραγωγής τιμών του βιοαερίου παραμένουν σχετικά σταθεροί (Γράφημα 1.9). Κατά προκειμένη φάση, το κλάσμα του βιοαερίου συνήθως περιέχει

περίπου 45 με 60 τοις εκατό CH₄ κατ' όγκο, 40 έως 60 τοις εκατό CO₂ κατ' όγκο, και 2 έως 9 τοις εκατό άλλα αέρια, όπως σουλφίδια (U. S. EPA, 2005; ATSDR, 2001).

Το αέριο παράγεται με σταθερό ρυθμό συνήθως για περίπου 20 χρόνια, ωστόσο, το θα συνεχίσει να εκπέμπεται για 50 ή περισσότερα έτη μετά τη απόθεση των απορριμμάτων στο χώρο υγειονομικής ταφής. Ενδεχομένως, η παραγωγή του βιοαερίου να διαρκέσει περισσότερο, για παράδειγμα στην περίπτωση που υπάρχουν μεγαλύτερες ποσότητες οργανικών ενώσεων στα απόβλητα, όπως σε ένα χώρο υγειονομικής ταφής που λαμβάνει υψηλότερες του μέσου όρου ποσότητες ζωικών αποβλήτων (παραδείγματος χάριν κατοικίδιων ζώων) (Pawłowska, 2014).

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην αναερόβια χώνευση και την παραγωγή βιοαερίου, η παρουσία μη καύσιμων ουσιών μειώνει την ποσότητα του εκμεταλλεύσιμου και συνεπώς αξιοποιήσιμου αερίου. Το βιοαέριο είναι κυρίως μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, οπότε συνεπάγεται ότι περισσότερο μεθάνιο υπόσχεται περισσότερη περιεχόμενη ενέργεια στο κλάσμα του βιοαερίου. Ο σχηματισμός μεθανίου επηρεάζεται από παραμέτρους όπως η περιεκτικότητα σε υγρασία, το ποσοστό της οργανικής ύλης, το pH και τη θερμοκρασία. Ως εκ τούτου, ο έλεγχος αυτών των χαρακτηριστικών είναι μια κρίσιμη προϋπόθεση για ένα αέριο καλής ποιότητας για μετέπειτα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (IRENA, 2012).



Εικόνα 1.7: Μηχανισμός παραγωγής βιοαερίου και μετατροπής της βιομάζας σε βιοαέριο σε ένα ΧΥΤΑ

(Πηγή: Mebarki et al., 2015)

Συνοψίζοντας, οι φάσεις αποσύνθεσης της οργανικής ύλης και παραγωγής βιοαερίου σε ένα ΧΥΤΑ είναι τέσσερις, εκ των οποίων η μία λαμβάνει χώρα σε περίσσεια αέρα και οι άλλες τρεις σε παντελή έλλειψη αυτού. Η πρώτη φάση είναι η αερόβια, και το κύριο αέριο που παράγεται είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Η δεύτερη φάση χαρακτηρίζεται από εξάντληση O_2 , καταλήγοντας σε ένα αναερόβιο περιβάλλον όπου παράγονται μεγάλες ποσότητες CO_2 και μία ποσότητα H_2 . Στην αναερόβια τρίτη φάση, το μεθάνιο ξεκινά την παραγωγή του, με μία συνακόλουθη μείωση του ποσού του CO_2 , του οποίου ο ρυθμός εμφάνισης έχει πλέον μειωθεί αισθητά.

Επιπροσθέτως, το άζωτο έχει αρχικά υψηλή περιεκτικότητα στα παραγόμενα αέρια του ΧΥΤΑ κατά τη αερόβια πρώτη φάση και μειώνεται απότομα καθώς η βιοχημική

διαδικασία προχωρά μέσω της αναερόβιας δεύτερης και τρίτης φάσης. Στην τέταρτη φάση, η παραγωγή αερίου CH_4 , CO_2 και N_2 εμφανίζεται αρκετά σταθερή.

Η φάση, η διάρκεια και το χρονοδιάγραμμα της παραγωγής βιοαερίου ποικίλει ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες του χώρου υγειονομικής ταφής (U. S. EPA, 2005), δηλαδή τη σύνθεση και η παλαιότητα των αποβλήτων, τα υλικά κάλυψης, την περιεκτικότητα σε υγρασία, τη θερμοκρασία, το pH και με άλλους δευτερογενείς και τριτογενείς παράγοντες και μπορεί επίσης να ποικίλει συναρτήσει των κλιματικών συνθηκών, οι οποίες ενδεχομένως να επηρεάσουν και να καθορίσουν τα ποσοστά καθίζησης και συμπίεσης των απορριμμάτων.

1.4.3. Ποσοτικά Χαρακτηριστικά Βιοαερίου

Ομοίως με τη σύνθεση, η ποσότητα του βιοαερίου ποικίλλει ανάλογα με την ηλικία του χώρου υγειονομικής ταφής. Σε γενικές γραμμές, η πιο έντονη απελευθέρωση αερίου αρχίζει μετά την πάροδο περίπου δύο χρόνων από το κλείσιμο του ΧΥΤΑ και διαρκεί, σε αξιόλογο βαθμό, περίπου 20 με 30 χρόνια. Η ποσότητα του αερίου που παράγεται εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα της συσσωρευμένων αποβλήτων και τη μορφολογική σύνθεση και σύστασή τους, καθώς και από τη φάση του βιοχημικού μετασχηματισμού, στην οποία βρίσκονται (Pawłowska, 2014).

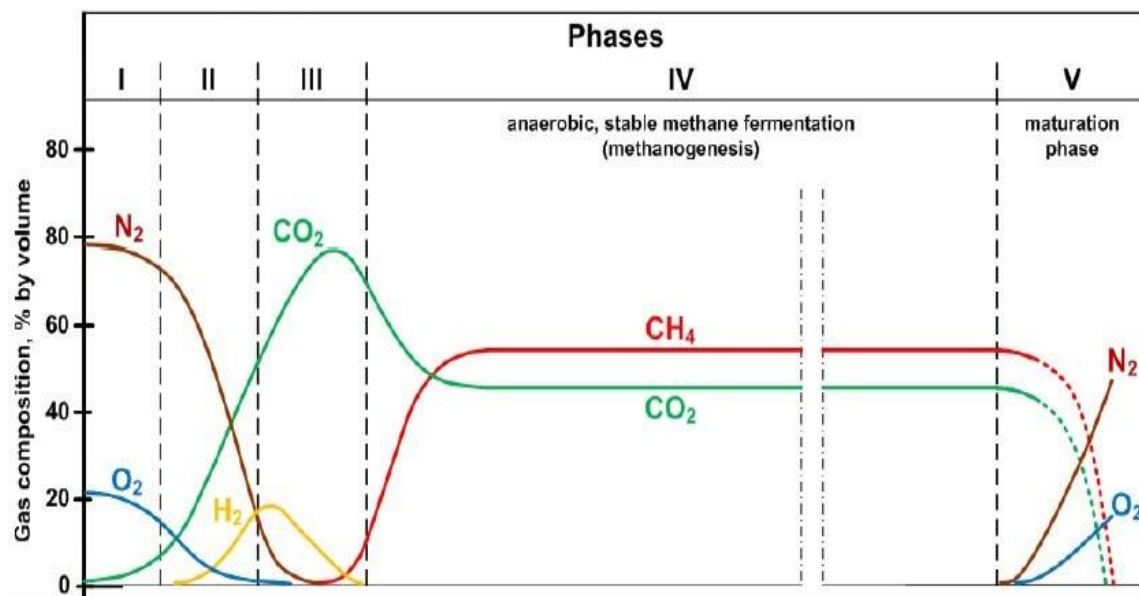
Το CH_4 εμφανίζεται στο βιοαέριο μόνο όταν τα μεθανογόνα βακτήρια αρχίσουν να μεταβολίζουν τα ενδιάμεσα προϊόντα αποσύνθεσης, όπως το οξικό, τα υδρογονοκαρβονίδια, το CO_2 και το H_2 . Όταν ο πληθυσμός των εν λόγω βακτηρίων φθάνει σε ένα κατάλληλο επίπεδο, επέρχεται δυναμική ισορροπία μεταξύ του

ρυθμού παραγωγής των οργανικών οξέων και του CH_4 , έτσι ώστε η συγκέντρωση του μεθανίου στο βιοαέριο να παρουσιάζει μία σταθεροποίηση. Ως αποτέλεσμα της εντατικής χρήσης των οξικών και της λειτουργία των αυτότροφων μεθανογόνων μικροοργανισμών με τη χρήση των διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου, η περιεκτικότητα του CH_4 στο βιοαέριο, κατά τη σταθερή μεθανογόνο φάση, υπερβαίνει τη συγκέντρωση του CO_2 . Η αναλογία του μεθανίου σε σύγκριση των συγκεντρώσεων $\text{CH}_4:\text{CO}_2$, σε αυτή τη φάση, είναι περίπου 1,6. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι η συνολική περιεκτικότητα των CH_4 και CO_2 φτάνει το 98-99% επί του συνολικού βιοαερίου (Pawłowska, 2014).

Με την πάροδο του χρόνου, η διαθέσιμη οργανική ύλη που περιέχεται στα απόβλητα έχει εξαντληθεί. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη μείωση της παραγωγής βιοαερίου και συνεπώς του μεθανίου, κάτω από τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα. Λόγω της μείωσης της πίεσης του βιοαερίου μέσα στο κελί, ο ατμοσφαιρικός αέρας αρχίζει να διαχέεται εντός της μάζας των αποβλήτων. Όταν ο ρυθμός της διάχυσης του οξυγόνου γίνει υψηλότερος από το ποσοστό κατανάλωσης του από τους μικροοργανισμούς, οι αερόβιες συνθήκες (ατμοσφαιρικές) επικρατούν στο εσωτερικό του κελιού (Kjeldsen et al., 2002). Σε αναφορά που έγινε παραπάνω, η φάση στην οποία παρατηρείται η μείωση του κλάσματος του μεθανίου στο βιοαέριο είναι η περίοδος της ωρίμανσης.

Σε αντίθεση με το γράφημα 1.8, που παρουσιάστηκε παραπάνω με τα επιμέρους στάδια της βιοχημικής διαδικασίας σύστασης βιοαερίου και τις συγκεντρώσεις των επιμέρους σημαντικών κλασμάτων του, το γράφημα 1.9 δίνει με πιο ξεκάθαρο τρόπο την ποσοτική κατ' όγκο διακύμανση των συγκεντρώσεων των βασικών

συστατικών του βιοαερίου και των λοιπών αερίων προϊόντων, που προκύπτουν από την βιοαποικοδομητική δραστηριότητα των αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών του ΧΥΤΑ, κατά της τέσσερις φάσεις παραγωγής του, αλλά και κατά την περίοδο ωρίμανσης-οξείδωσης.



Γράφημα 1.9: Αναπαράσταση της διακύμανσης των συγκεντρώσεων των βασικότερων κλασμάτων του βιοαερίου κατά τις 4 φάσεις παραγωγής του και την περίοδο ωρίμανσης (Πηγή: GESS, 2013)

Η σύνθεση του μίγματος του βιοαερίου που εκπέμπεται μεταβάλλεται με την ηλικία του ΧΥΤΑ. Σύμφωνα με το Γράφημα 1.9, στα αρχικά στάδια της μετάβασης προς την παραγωγή του βιοαερίου, το N₂ και το O₂, που περιέχονται στα απόβλητα, υπερισχύουν σε συγκεντρώσεις, ενώ υπάρχει ακόμη CO₂ και βιοχημικά αέρια προϊόντα που παράγουν οσμές, όπως μεθανοθειόλη και διμεθυλοσουλφίδιο (Kjeldsen et al., 2002).

Όταν το O_2 εξαντλείται, ξεκινάει η διαδικασία της χώνευσης. Τα προϊόντα είναι κυρίως χαμηλού μοριακού βάρους οργανικά οξέα, αλκοόλη, CO_2 και H_2 . Με την πάροδο του χρόνου, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα και του υδρογόνου αυξάνεται, φθάνοντας στη μέγιστη συγκέντρωση, περίπου 76 vol.% και 21 vol.%, αντίστοιχα, κατά τη φάση της μεθανογένεσης (Pawłowska, 2014).

Όσον αφορά τη φάση της ωρίμανσης και σταδιακής μείωσης της παραγωγής μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα στο κλάσμα του βιοαερίου, με την κλιμακούμενη εδραίωση ατμοσφαιρικών συνθηκών εντός του ΧΥΤΑ, διαφαίνεται μία σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων τόσο του αζώτου όσο και του οξυγόνου.

Τέλος, αναφορικά με τα ποσοτικά χαρακτηριστικά του βιοαερίου, χρήσιμες πληροφορίες προσφέρει και ο Πίνακας 1.3, ο οποίος δείχνει τη δραματική μείωση του N_2 με την πάροδο των μηνών και τη συνακόλουθη ελάττωση και του CO_2 , το οποίο έπειτα από 4 χρόνια περίπου από την απόθεση των απορριμμάτων στο ΧΥΤΑ, τείνει να ισορροπήσει με τη συγκέντρωση του παραγόμενου μεθανίου, σε μία τιμή κοντά στο 50%, δηλαδή σε αναλογία που προσεγγίζει το 1:1.

Πίνακας 1.3: Τυπική εκατοστιαία σύσταση βιοαερίου κατά τη διάρκεια των πρώτων 42 μηνών από την αποπεράτωση της ταφής

(Πηγή: Rajaram et. al., 2011)

Χρονικό Διάστημα από την Αποπεράτωση της Ταφής (Μήνες)	$N_2\%$	$CO_2\%$	$CH_4\%$
0	5,2	88	5
3	3,8	76	21
6	0,4	65	29
12	1,1	52	40
18	0,4	53	47
24	0,2	52	48
30	1,3	46	51
36	0,9	50	47
42	0,4	51	48

1.4.4. Καθαρισμός και Αναβάθμιση Βιοαερίου

Το βιοαέριο, μετά το πέρας της αναερόβιας χώνευσης, παραγωγής και τελικής σύνθεσης και σύστασής του, δύναται να υποστεί καθαρισμό, ο οποίος συνίσταται σε απομάκρυνση των υδρόθειου, αμμωνίας και νερού, και αναβάθμιση, δηλαδή απομάκρυνση του περιεχόμενου σε αυτό διοξειδίου του άνθρακα και προσθήκη προπανίου. Το αέριο που παράγεται από την εν λόγω επεξεργασία, ονομάζεται βιομεθάνιο (Ζαφείρης, 2010).

Συνεπώς, με την κατάλληλη επεξεργασία και αναβάθμιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο μεταφορών (με ιδιαίτερα ανταγωνιστική τιμή). Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στη Σουηδία ήδη αρκετά οχήματα κινούνται με μεθάνιο και λειτουργούν σταθμοί διανομής βιοαερίου (CRES, 2016).

Παράλληλα, το αναβαθμισμένο βιοαέριο μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο του φυσικού αερίου, όπως συμβαίνει στην Ολλανδία, τη Σουηδία και την Ελβετία και να χρησιμοποιηθεί για ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, με ιδιαίτερα υψηλές αποδόσεις. Πειραματικά χρησιμοποιείται και για παραγωγή υδρογόνου και ηλεκτροπαραγωγή, τροφοδοτώντας κυψέλες καυσίμου (fuel cells) (Manasaki and Gikas, 2014), τεχνολογία για την οποία γίνεται μνεία και ακολούθως στο κεφάλαιο 2 με τις τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου.

Η ανάπτυξη και εγκατάσταση τεχνολογιών βιοαερίου, αποτελεί μία εναλλακτική λύση με σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς προσφέρει περιβαλλοντικά φιλική ενέργεια και ταυτόχρονα επιλύει το συνεχώς διογκούμενο πρόβλημα της διάθεσης των απορριμμάτων (CRES, 2016).



*Εικόνα 1.8: Μονάδες αναβάθμισης βιοαερίου στη Σουηδία
(Πηγή: Swedish Gas Center)*

Κεφάλαιο 2. Εξεταζόμενες Τεχνολογίες Αξιοποίησης Βιοαερίου για Ηλεκτροπαραγωγή: Τεχνική Ανάλυση

Το βιοαέριο, όπως προαναφέρθηκε, είναι μια πολύτιμη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η σύνθεσή του, καθώς και η παροχή του συνιστούν καθοριστικούς παράγοντες για την επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας ή για συμπαραγωγή, ωστόσο, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και μια σειρά άλλων παραγόντων, όπως οι εκπομπές καυσαερίων, το αποτύπωμα άνθρακα και η τεχνολογική ωριμότητα. (Bove and Lunghi, 2006; Manasaki and Gikas, 2014).

Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η λειτουργία τεχνολογιών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αξιοποίηση βιοαερίου, το οποίο εκλύεται από την αναερόβια χώνευση των αστικών απορριμμάτων του ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων Ηρακλείου Κρήτης. Ακολουθώς, παρουσιάζονται οι ενεργειακές τεχνολογίες και η δυνατότητα εφαρμογής και εγκυρότητας των διαφόρων κλασμάτων βιοαερίου σε κάθε μία από αυτές.

2.1. Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ)

Οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης ή οι κινητήρες αερίου είναι μια ευρέως διαδεδομένη και γνωστή τεχνολογία. Κινητήρες αερίου είναι διαθέσιμοι για εφαρμογές παραγωγής ενέργειας σε μέγεθος που κυμαίνεται από λίγα KW έως πάνω από 3 MW. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κινητήρων καύσης για στατικές εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής (Rajaram et al., 2011):

1. Ανάφλεξης με σπινθήρα (κινητήρας κύκλου Otto) και
2. Ανάφλεξης με συμπίεση (κινητήρας κύκλου Diesel).

Τα κύρια μηχανικά μέρη των μηχανών κύκλου Otto και Diesel είναι τα ίδια, ενώ σε συστήματα αξιοποίησης του βιοαερίου δύνανται να χρησιμοποιούνται και οι δύο τύποι κινητήρων (Rajaram et al., 2011). Και οι δύο χρησιμοποιούν ένα κυλινδρικό θάλαμο καύσης κατά μήκος του οποίου κινείται ένα κατάλληλα εφαρμοσμένο έμβολο. Το έμβολο συνδέεται σε έναν στροφαλοφόρο άξονα που μετασχηματίζει τη γραμμική (παλινδρομική) κίνηση του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο σε περιστροφική κίνηση στο στροφαλοφόρο άξονα.

Η βασική διαφορά μεταξύ των κύκλων Otto και Diesel είναι η μέθοδος της καύσης του καυσίμου. Στον κύκλο Otto χρησιμοποιείται ένας σπινθηριστής για την ανάφλεξη ενός έτοιμου μίγματος αέρα καυσίμου που εισάγεται στον κύλινδρο. Από την άλλη, μια μηχανή Diesel συμπιέζει τον αέρα που εισάγεται στον κύλινδρο σε υψηλή πίεση, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του στα επίπεδα της θερμοκρασίας ανάφλεξης του καυσίμου που εγχέεται υπό υψηλή πίεση (U.S. EPA Handbook, 2015).



Εικόνα 2.1: Εξωτερική απεικόνιση MEK τύπου GE Jenbacher (Πηγή: easy2find.gr)

Η Μηχανή Εσωτερικής Καύσης είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνολογία μετατροπής αέριων καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας και ειδικότερα όσον αφορά τις ενεργειακές εφαρμογές βιοαερίου, λόγω των μεγεθών των σχετικά χαμηλού κόστους, υψηλής απόδοσης και κινητήρα της μηχανής, συμπληρώνουν την έξοδο αερίου πολλών χώρων υγειονομικής ταφής. Μηχανές εσωτερικής καύσης γενικά έχουν χρησιμοποιηθεί σε χώρους υγειονομικής ταφής, όπου ποσότητα του αερίου είναι ικανή να παράγει 100 kW έως 3 MW, ή όπου βιώσιμοι προς τις μηχανές ρυθμοί ροής βιοαερίου είναι περίπου 0.4 έως 1.6 εκατομμύριο cfd (cubic feet per day) σε 50% μεθάνιο (U.S. EPA Handbook, 2015). Πολλοί κινητήρες μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους για έργα μεγαλύτερα των 3 MW.

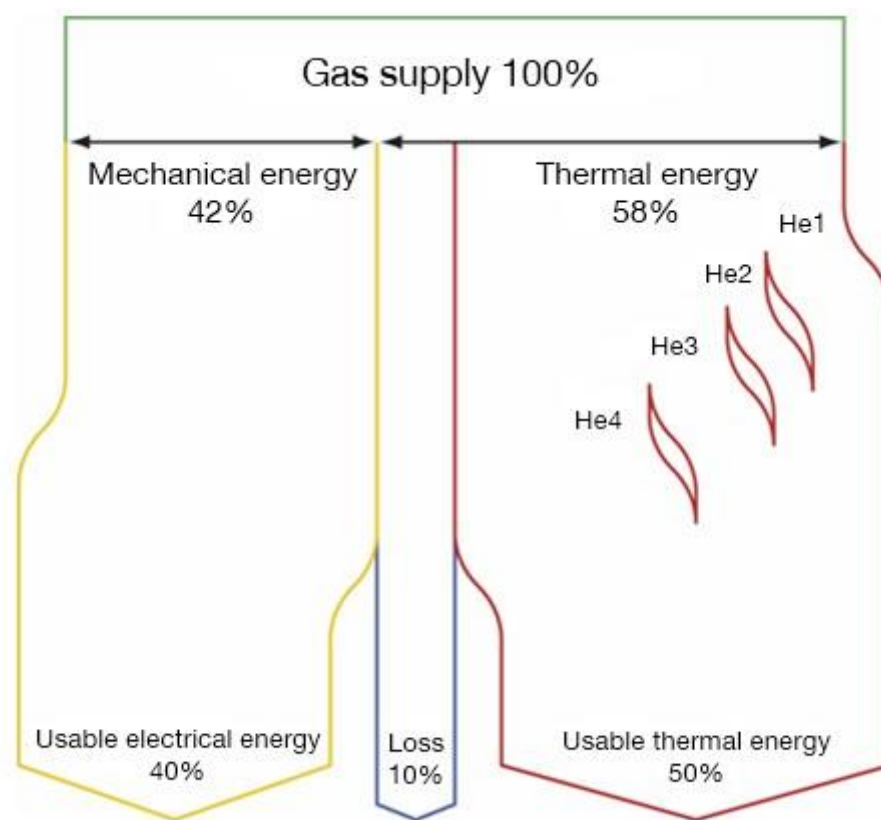
Ο ακόλουθος Πίνακας 2.1. παρέχει παραδείγματα διαθέσιμων μεγεθών των μηχανών εσωτερικής καύσης (U.S. EPA Handbook, 2015):

Πίνακας 2. 1: Μεγέθη Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (όπου cfm: cubic feet per minute)

Μέγεθος Μηχανής	Ροή Καυσίμου (50% Μεθάνιο)
540 kW	204 cfm
633 kW	234 cfm
800 kW	350 cfm
1.2 MW	500 cfm

Ειδικότερα, οι ΜΕΚ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές στη μετατροπή του βιοαερίου σε ηλεκτρική ενέργεια, επιτυγχάνοντας αποδόσεις που κυμαίνονται από 30 έως 40%. Πιο συγκεκριμένα, οι ηλεκτρικές αποδόσεις των κινητήρων αερίου κυμαίνονται από 30% για τις μικρές στοιχειομετρικές μηχανές (100 kW) έως λίγο πάνω από 40% για

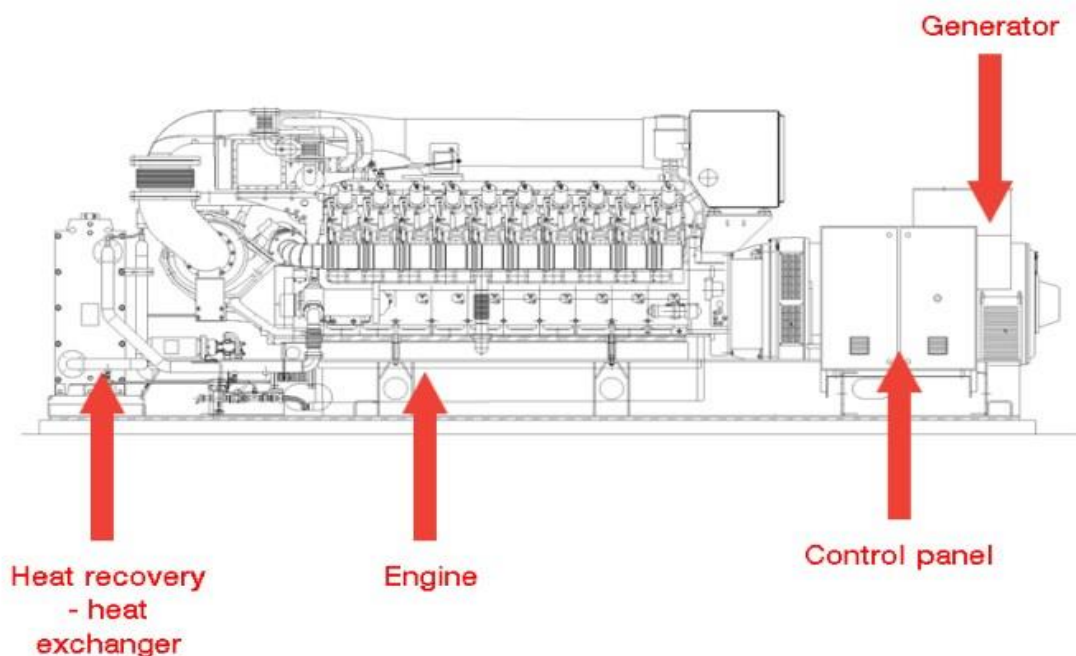
τις μεγάλες μηχανές εσωτερικής καύσης βιοαερίου (3 MW). Ακόμα μεγαλύτερη αποδοτικότητα επιτυγχάνεται σε εφαρμογές συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP-Combined Heat & Power), όπου η απορριπτόμενη θερμότητα ανακτάται από το σύστημα ψύξης του κινητήρα για τη δημιουργία ζεστού νερού, ή από την εξάτμιση του κινητήρα με σκοπό την παραγωγή ατμού χαμηλής πίεσης, στις οποίες το συνολικό φάσμα αποδόσεων φτάνει έως 70 με 80% (Rajaram et al., 2011; U.S. EPA Handbook, 2015).



Εικόνα 2.2: Ηλεκτρική και θερμική απόδοση MEK (Πηγή: clarke-energy.com)

Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης περιλαμβάνει συμπιεστές αερίου, σωληνώσεις διασύνδεσης, εναλλάκτες θερμότητας, εξοπλισμό για την αφαίρεση των υγρών σταγονιδίων από τη ροή των αερίων και φίλτρα. Ο τύπος του εξοπλισμού που απαιτείται εξαρτάται από τη

σύνθεση του βιοαερίου, αλλά και από την τοποθεσία του έργου. Ενδεχομένως, να χρειάζεται πρόσθετος εξοπλισμός επεξεργασίας, εάν το βιοαέριο περιέχει περίσσεια ενώσεων θείου, αλογόνου, ή πυριτίου, καθώς επίσης και επιπλέον συμπίεση του βιοαερίου εάν οι υπάρχοντες φυσητήρες δεν δύνανται να επιτύχουν την απαιτούμενη πίεση εισαγωγής στον κινητήρα, μαζί με έναν εναλλάκτη θερμότητας και εντατικότερο φιλτράρισμα του βιοαερίου προτού εισέλθει στο σύστημα εσωτερικής καύσης.



Εικόνα 2.3: Κάτοψη MEK τύπου GE Jenbacher (Πηγή: clarke-energy.com)

Η συμπίεση του καυσίμου γενικά απαιτείται για να φέρει το αέριο καύσιμο μέχρι την κλίμακα πιέσεων από 2 έως 5 psi (56 έως 139 ίντσες στήλης ύδατος) στην είσοδο του στροβιλοσυμπιεστή του κινητήρα. Άλλες προδιαγραφές των καυσίμων είναι η μέγιστη σχετική υγρασία 80% (το βιοαέριο από το πεδίο είναι 100%), και μία μέγιστη θερμοκρασία των 560 βαθμών Κελσίου (Ranjaram et al., 2011).

Όσον αφορά την τρόπο λειτουργίας της, η μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο -και στην προκειμένη περίπτωση στο βιοαέριο- σε μηχανική ενέργεια. Το εν λόγω ποσό μηχανικής ενέργειας χρησιμοποιείται εν συνεχεία για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή, ενώ μία γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνολικά λοιπόν, ένας κύκλος λειτουργίας των ΜΕΚ κύκλου Otto ή Diesel ολοκληρώνεται σε τέσσερις κινήσεις του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο, οι οποίες περιλαμβάνουν:

- 1) εισαγωγή του (μίγματος) αερίου καυσίμου στον κύλινδρο,
- 2) συμπίεση με καύση του καυσίμου,
- 3) επιτάχυνση του εμβόλου από τη δύναμη της καύσης (κίνηση ισχύος), και
- 4) αποβολή των προϊόντων της καύσης από τον κύλινδρο.

Συνεπώς, οι Μηχανές Εσωτερικής Καύσης ως η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την παραγωγή (ηλεκτρικής) ενέργειας από βιοαέριο αποδίδουν σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 0.10-3MW ανά μονάδα. Για βέλτιστη απόδοση, χρειάζεται βιοαέριο με συγκέντρωση μεθανίου άνω του 50%, ενώ δεν μπορούν να λειτουργήσουν εάν η συγκέντρωση του μεθανίου μειωθεί περίπου κάτω από 40%. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας συνίστανται στο χαμηλό κόστος κεφαλαίου, στις υψηλές αποδόσεις (30-40%) και στην προσαρμοστικότητα στις μεταβολές παροχής βιοαερίου (Manasaki and Gikas, 2014), ενώ από την άλλη παρουσιάζουν ιδιαιτέρως υψηλό κόστος συντήρησης (οικονομικά στοιχεία παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5).

2.2. Αεριοτουρμπίνες (ΑΤ)

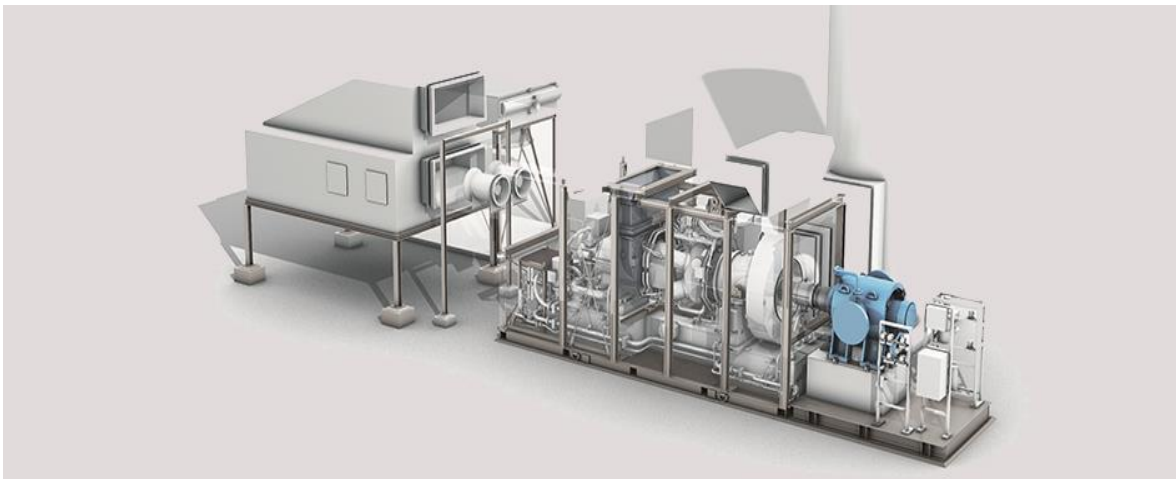
Μεγάλες τουρμπίνες, οι αεριοτουρμπίνες ή διαφορετικά οι αεριοστρόβιλοι είναι γενικώς οικονομικά βιώσιμες για μεγαλύτερα συστήματα αξιοποίησης βιοαερίου (U.S. EPA Handbook, 2015). Η αεριοτουρμπίνη εξαρτάται από κάποια χωριστή πηγή ενέργειας και ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της είναι ότι δεν μετατρέπει άμεσα το καύσιμο σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι αεριοτουρμπίνες είναι κινητήριες μηχανές που χρησιμοποιούν ατμό υψηλής πίεσης που παράγεται σε κάποιο λέβητα ή ατμοπαραγωγό ανάκτησης θερμότητας για την παραγωγή κινητικής ενέργειας. Στα καύσιμα των λεβήτων συμπεριλαμβάνονται ορυκτά καύσιμα, όπως ο γαιάνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, ή ανανεώσιμα καύσιμα, όπως το ξύλο, τα αστικά απορρίμματα και το βιοαέριο. Η αεριοτουρμπίνη ενδέχεται να αποτελείται από πολλές βαθμίδες, κάθε μία από τις οποίες μπορεί να οριστεί με την ανάλυση της εκτόνωσης του ατμού από μία υψηλότερη σε μία χαμηλότερη πίεση (Carazas and Souza, 2009).

Ο θερμοδυναμικός κύκλος της αεριοτουρμπίνας είναι ο κύκλος Rankine, ο οποίος συνιστά τον βασικό κύκλο των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και συνίσταται κατ' αρχήν από μια πηγή θερμότητας (λέβητας) που μετατρέπει το νερό σε ατμό υψηλής πίεσης. Ο ατμός ρέει μέσα από το στρόβιλο και παράγει μηχανική ισχύ, και μπορεί να είναι υγρός, ξηρός κορεσμένος ή υπέρθερμος. Όταν εξέρχεται από τον στρόβιλο συμπυκνώνεται και επιστέφει στο λέβητα για να επαναληφθεί η διαδικασία (Carazas and Souza, 2009).

Όσον αφορά γενικότερα τα συστήματα που λειτουργούν με βάση τον Οργανικό Κύκλο του Rankine (Organic Rankine Cycle – ORC), έχουν την ιδιότητα να απορροφούν χαμηλά επίπεδα θερμότητας και να παράγουν ενέργεια. Η λειτουργία

τους υπαγορεύεται από την ύπαρξη δύο πηγών θερμότητας: μία θερμή και μία ψυχρή. Η ψυχρή πηγή μπορεί να είναι ο αέρας, το έδαφος, ένα ποτάμι ή μία μονάδα ψύξης. Η θερμή πηγή μπορεί να είναι η θερμότητα των μηχανών σε ένα εργοστάσιο, ατμός που δεν αξιοποιείται ή για παράδειγμα το προϊόν της θερμικής οξείδωσης του syngas. Στις σωληνώσεις του συστήματος ρέει ένα οργανικό και πτητικό θερμικό υγρό, το οποίο απορροφά γρήγορα θερμότητα μεταβαίνοντας σύντομα από την υγρή στην αέρια (και αντίστροφα) φάση του.

Στο στάδιο της εξάτμισης, γίνεται η απορρόφηση της θερμότητας από τη θερμή πηγή οδηγώντας στην εξάτμιση του θερμικού υγρού. Ως αποτέλεσμα δημιουργείται ένα συμπιεσμένο αέριο το οποίο είναι ουσιαστικά το υγρό στην αέρια φάση του. Το αέριο αυτό εκτονώνεται πάνω στο συνδεδεμένο στρόβιλο της γεννήτριας παράγοντας ενέργεια. Στη συνέχεια, το αέριο που εξέρχεται από τη γεννήτρια, έχοντας χάσει μέρος της θερμότητας και πίεσής του, ψύχεται ώστε να επανέλθει στην υγρή φάση του (συμπύκνωση). Η κυκλοφορία του θερμικού υγρού στο σύστημα επιτυγχάνεται με μία αντλία.



Εικόνα 2.4: Διάταξη AT (Πηγή: Man Diesel & Turbo)

Οι αεριοτουρμπίνες έχουν πλεονεκτήματα, δεδομένου ότι είναι σε θέση να λειτουργούν σε συγκεντρώσεις μεθανίου μέχρι 20%, έχουν χαμηλότερο κόστος συντήρησης (πιο ανθεκτικές σε ενδεχόμενες βλάβες από διάβρωση) και έχουν χαμηλότερα ποσοστά εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x). Επιπλέον, στα πλεονεκτήματα των αεριοτουρμπίνων συγκαταλέγεται το γεγονός ότι είναι σχετικά μικρού μεγέθους και έχουν χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης από της ΜΕΚ. Ωστόσο, στις αεριοτουρμπίνες ενδέχεται να απαιτείται επεξεργασία του βιοαερίου για να αφαιρεθούν οι σιλοξάνες ώστε να ανταποκρίνεται η λειτουργία τους στις προδιαγραφές του κατασκευαστή (U.S. EPA Handbook, 2015; Rajaram et al., 2011).

Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν χαμηλότερη συνολική αποδοτικότητα (εκτός και αν η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται σε μια εφαρμογή συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού), την ανάγκη να τρέχει σε πλήρες φορτίο, και τις υψηλές παρασιτικές απώλειες. Συνήθεις αεριοτουρμπίνες βρίσκονται στην περιοχή παραγωγής 5 έως 10 (MW) (U.S. EPA Handbook, 2015; Rajaram et al., 2011).

Όπως και με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, μια εγκατάσταση αεριοτουρμπίνας απαιτεί συμπιεστές αερίου, σωληνώσεις διασύνδεσης, εναλλάκτες θερμότητας, εξοπλισμό για την αφαίρεση των υγρών σταγονιδίων από τη ροή των αερίων και φίλτρα. Οι αεριοτουρμπίνες απαιτούν τη συμπίεση του καυσίμου πρόσληψης έως 250 psi σε σύγκριση με τα 2 psi για κινητήρες εσωτερικής καύσης. Αποτέλεσμα της μεγάλης συμπίεσης του καυσίμου είναι η απώλεια παρασιτικού φορτίου στην πλειονότητά του στο συνολικό σύστημα.

Πρόσθετος εξοπλισμός επεξεργασίας ενδέχεται να απαιτηθεί εάν το βιοαέριο περιέχει υπερβολικές ποσότητες θείου, αλογόνου ή ενώσεων πυριτίου, ωστόσο,

ορισμένες ΑΤ έχουν λιγότερο αυστηρές προδιαγραφές, όσον αφορά το καύσιμο πρόσληψης-αξιοποίησης. Ακόμη, η σχετική υγρασία του βιοαερίου και η θερμοκρασία που έχει κατά την είσοδό του στο σύστημα είναι λιγότερο κρίσιμες για τους αεριοστροβίλους από ό,τι για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Η αποτελεσματικότητα μιας αεριοτουρμπίνας επηρεάζεται αρνητικά από υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και μπορεί να υπάρξει ανάγκη ψύξης του εισαγόμενου αέρα. Διαμορφώσεις του συνδυασμένου κύκλου, που ανακτούν τη θερμότητα των αποβλήτων στα καυσαέρια της αεριοτουρμπίνας για να συλλάβουν επιπλέον ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος σε περίπου 40 % (U.S. EPA Handbook, 2015; Rajaram et al., 2011).

Το αρχικό κόστος κεφαλαίου μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου είναι ανάλογο με την αύξηση της αποτελεσματικότητας. Το κόστος του απλού κύκλου (δηλαδή της αεριοτουρμπίνας), σε τιμή ανά εγκατεστημένη kW, μπορεί να είναι ελαφρώς υψηλότερο από ό,τι στις μηχανές εσωτερικής καύσης, ενώ επίσης το κόστος διατήρησής του μπορεί να είναι χαμηλότερο από αυτό του κινητήρα εσωτερικής καύσης (Rajaram et al., 2011).

Ωστόσο, θα πρέπει να περιλαμβάνονται τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού επεξεργασίας. Ως κόστη λειτουργίας θεωρούνται οι παρασιτικές απώλειες και η μείωση της συνολικής αποδοτικότητας του συστήματος. Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης για ένα έργο αεριοστροβίλου περιλαμβάνουν τις συνήθεις δαπάνες που συνδέονται με την τουρμπίνα και τον πιο σύνθετο εξοπλισμό επεξεργασίας του βιοαερίου, αλλά και τις έκτακτες δαπάνες που συνδέονται με σημαντικές επισκευές του στροβίλου. Μια οικονομική ανάλυση θα περιλαμβάνει

απαραιτήτως αφαίρεση σιλοξάνων και θείου, διότι οι αεριοστρόβιλοι εμφανίζονται πιο ευαίσθητοι σε αυτά τα συστατικά από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης (U.S. EPA Handbook, 2015; Rajaram et al., 2011).

Οι αεριοτουρμπίνες, λοιπόν, έχουν εφαρμογή για γενικά μεγάλες παροχές βιοαερίου και μπορούν να λειτουργήσουν σε περιεχόμενο μεθάνιο τόσο χαμηλά μέχρι και 20%, το οποίο αντιστοιχεί σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τουλάχιστον 3MW ανά μονάδα.. Είναι πιο ισχυρές, σε σύγκριση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και έχουν μικρότερες απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης. Ωστόσο, είναι γενικά ογκώδεις, με αποδόσεις μεταξύ 20-30% (Manasaki and Gikas, 2014). Βέβαια, αεριοτουρμπίνες απλού κύκλου που χρησιμοποιούνται για ενεργειακά έργα βιοαερίου, συνήθως επιτυγχάνουν αποδόσεις από 20 έως 28-30% σε πλήρες φορτίο. Ωστόσο, οι αποδόσεις αυτές μειώνονται αισθητά όταν η μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία σε μερικό φορτίο. Διαμορφώσεις του συνδυασμένου κύκλου, που ανακτούν τη θερμότητα των αποβλήτων στα καυσαέρια της αεριοτουρμπίνας για να συλλάβουν επιπλέον ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος σε περίπου 40%. Όπως και με τις αεριοτουρμπίνες απλού κύκλου, διαμορφώσεις συνδυασμένου κύκλου είναι επίσης λιγότερο αποτελεσματικές σε μερικό φορτίο (U.S. EPA Handbook, 2015).

2.3. Μικροτουρμπίνες (MT)

Οι μικροτουρμπίνες ξεκίνησαν να πωλούνται στο εμπόριο για εφαρμογές βιοαερίου στις αρχές του 21ου αιώνα (2001). Σε γενικές γραμμές, το κόστος για ένα έργο μικροτουρμπίνας είναι υψηλότερο της αντίστοιχης δαπάνης για μία εγκατάσταση

μηχανής εσωτερικής καύσης, με βάση την κοστολόγηση ανά kW εγκατεστημένης ισχύος (Wang et al., 2003).

Η εν λόγω τεχνολογία είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες αξιοποίησης βιοαερίου για ηλεκτροπαραγωγή ή για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Οι μικροτουρμπίνες είναι κατάλληλες για εφαρμογές κατανεμημένης παραγωγής, λόγω της ευελιξίας τους σε λειτουργία και την ικανότητα να διαταχθούν σε παράλληλες συστοιχίες με στόχο την παροχή σταθερής και αξιόπιστης ισχύος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι συνιστούν μία τεχνολογία με χαμηλές εκπομπές ρύπων και είναι ιδιαίτερα ανεκτική σε ίχνη ενώσεων που περιέχονται στο βιοαέριο. Οι ΜΤ έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν χαμηλή ποιότητας βιοαέριο με ελάχιστη τιμή θερμοχωρητικότητας τα 217,4 kJ/m³/hr, ενώ μπορούν να παράγουν συνήθως 10 έως 1000 (kW) ηλεκτρικής ισχύος και είναι οι πλέον κατάλληλες για μικρής κλίμακας εφαρμογές. Έχουν σχεδιαστεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τοπικές μεμονωμένες ενεργειακές απαιτήσεις και για τους τελικούς χρήστες που κατοικούν κοντά σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Το μέγεθος της μικροτουρμπίνας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 30-250 kW, ενώ έχει τη δυνατότητα να ομαδοποιηθεί σε μεγαλύτερες μονάδες (U.S. EPA Handbook, 2015; Soares, 2011).

Η λειτουργία της μικροτουρμπίνας βασίζεται στην ανάμειξη πεπιεσμένου αέρα με την πηγή καυσίμου και στην καύση του μείγματος υπό σταθερή πίεση, με το αέριο που προκύπτει να χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ενός στροβίλου (τουρμπίνας). Ένας εναλλάκτης θερμότητας χρησιμοποιείται επίσης για την ανάκτηση θερμότητας και ανακυκλοφορία της θερμότητας αυτής στο ρεύμα του

αέρα εισροής. Τα συστήματα των μικροτουρμπίνων αποτελούνται από το συμπιεστή, τον εναλλάκτη θερμότητας και το σύστημα ανάκτησης, τον καυστήρα, το στρόβιλο και τη γεννήτρια. Το συνολικό σύστημα απαιτεί ένα μικρό χώρο για τη λειτουργία του, η οποία βασίζεται στον ιδανικό κύκλο Brayton. Το βιοαέριο και ο πεπιεσμένος αέρας καίγονται σε έναν εξωτερικό θάλαμο καύσης. Το προκύπτον θερμό αέριο καύσης διαστέλλεται και κινεί μια τουρμπίνα, η οποία οδηγεί με τη σειρά της το συμπιεστή και τη γεννήτρια στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια που παραμένει στο καυσαέριο μπορεί να διέλθει μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας με σκοπό την ανάκτηση θερμότητας (Rajaram et al., 2011).



Εικόνα 2.5: Διάταξη μικροτουρμπίνας - Μονάδα παραγωγής βιοαερίου MAREC

(Πηγή: imad-mahawili.com)

Η τεχνολογία της μικροτουρμπίνας βασίζεται στο σχεδιασμό πολύ μεγαλύτερων αεριοστροβίλων (αεριοτουρμπίνων) που χρησιμοποιούνται στις μονάδες

παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός ότι περιστρέφονται σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες, τις διαφοροποιεί από τις παραδοσιακές τουρμπίνες καύσης. Η ηλεκτρική αποδοτικότητα του ενός συστήματος μικροτουρμπίνας είναι σχετικά χαμηλή, με το ποσοστό να κυμαίνεται από 25 έως 35%, λόγω του μικρού μεγέθους της. Η συνολική απόδοση είναι περίπου 80%, συμπεριλαμβανομένης δηλαδή της δυνατότητας για την ανάκαμψη της παραγωγής θερμικής ενέργειας από τη μικροτουρμπίνα (Soares, 2011).

Η μικρότερη χωρητικότητα των μονάδων αυτών σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας με την αξιοποίηση βιοαερίου, τις καθιστά πιο κατάλληλες για χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων που έχουν χαμηλά ποσοστά παραγωγής βιοαερίου. Επιπροσθέτως, τα μικρά μεγέθη της MT είναι ιδανικά για έναν αριθμό εφαρμογών που μπορεί να ανταποκριθεί στις αλλαγές του όγκου του βιοαερίου.

Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη ηλεκτρική απόδοση, ένας εναλλάκτης θερμότητας συνήθως χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του αέρα καύσης με τη βοήθεια των θερμών καυσαερίων του στροβίλου (Rajaram et al., 2011). Το σύστημα της μικροτουρμπίνας πρέπει να είναι εξοπλισμένο με ένα σύστημα προεπεξεργασίας των καυσίμων, το οποίο απομακρύνει την υγρασία και σε ορισμένες περιπτώσεις τις σιλοζάνες, πριν την εισαγωγή του βιοαερίου στις τουρμπίνες. Η καύση των περιεχόμενων στο βιοαέριο σιλοζανών παράγει μια λεπτή σκόνη πυριτίου που δύναται να σχηματίσει επιβλαβείς αποθέσεις στις εσωτερικές επιφάνειες του μηχανήματος και μπορεί να διαβρώσει τα εξαρτήματα του μικροστροβίλου (Ruiling et al., 2017). Επίσης, ένας άλλος εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξασφάλιση θερμότητας κατά τη διαδικασία

παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας σε εφαρμογές συμπαραγωγής. Αν είναι δυνατή η απενεργοποίηση του πρώτου εναλλάκτη, τότε η θερμότητα που θα απελευθερωθεί μέσω της διαδικασίας μπορεί να αυξηθεί σε βάρος της ηλεκτρικής απόδοσης, εάν κάτι τέτοιο απαιτείται. Αυτό επιτρέπει μία βέλτιστη προσαρμογή στις μεταβλητές απαιτήσεις θερμότητας (Rajaram et al., 2011).

Λόγω της ανεπαρκούς επεξεργασίας του βιοαερίου στις πρώτες εφαρμογές μικροτουρμπίνας, τα εν λόγω συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οδηγήθηκαν σε αστοχίες. Φυσιολογικά, η επεξεργασία του βιοαερίου απαιτείται για την αφαίρεση της υγρασίας, των σιλοξανών και άλλων ρυπαντών (Ruiling, 2017). Η εν λόγω επεξεργασία αποτελείται από τις ακόλουθες συνιστώσες (U.S. EPA Handbook, 2015):

- Είσοδος του διαχωριστή υγρασίας
- Περιστρεφόμενα πτερύγια του συμπιεστή
- Εναλλάκτης θερμότητας κρύου νερού (μειώνοντας τη θερμοκρασία του βιοαερίου σε 40°F)
- Φίλτρο συμφύσεως
- Εναλλάκτης αναθέρμανσης βιοαερίου (για την προσθήκη 20 έως 40°F πάνω από το σημείο δρόσου)
- Περαιτέρω επεξεργασία του βιοαερίου χωρίς υγρασία σε δοχείο εμπλουτισμένο με ενεργό άνθρακα ή άλλα μέσα (προαιρετικά).

Οι μικροτουρμπίνες, συνήθως συναντώνται σε μεγέθη ονομαστικής ισχύος των 30, 70 και 250 kW. Στις εφαρμογές MT θα πρέπει να χρησιμοποιούνται

μικροτουρμπίνες μεγαλύτερης χωρητικότητας, όπου οι απαιτήσεις ισχύος και η διαθεσιμότητα βιοαερίου μπορούν να τις υποστηρίξουν. Τα ακόλουθα οφέλη μπορούν να αποκτηθούν με τη χρήση μιας μεγαλύτερης μικροτουρμπίνας (U.S. EPA Handbook, 2015):

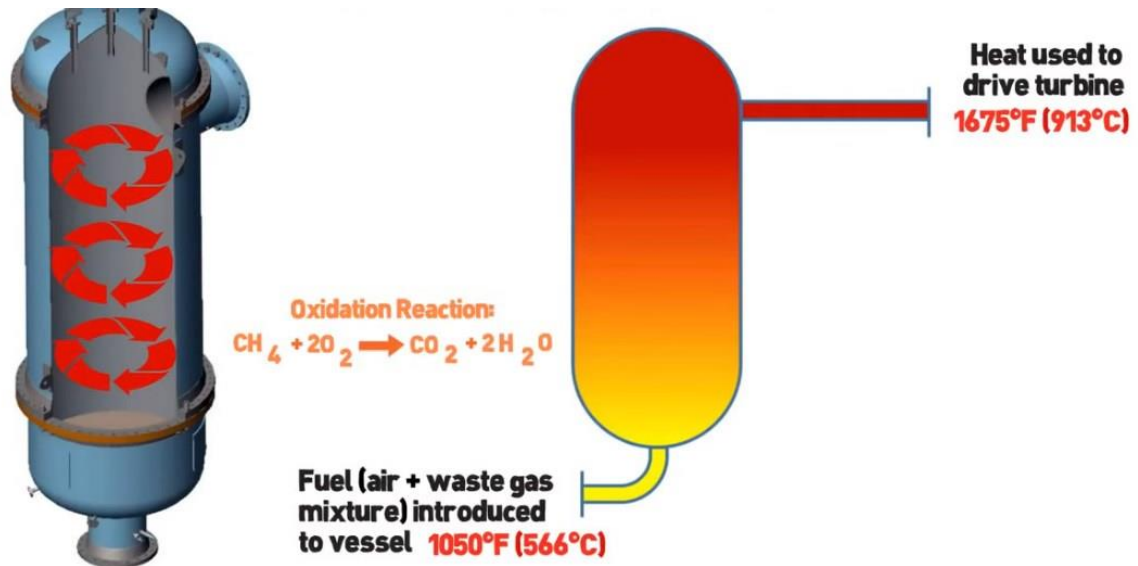
- Μειωμένο κόστος κεφαλαίου (ανά kW εγκατεστημένης βάσης ισχύος) για την ίδια τη μικροτουρμπίνα
- Μειωμένο κόστος συντήρησης
- Μειωμένη εξισορρόπηση του κόστους εγκατάστασης της τεχνολογίας – μία μείωση του αριθμού των μικροτουρμπίνων ώστε να επιτευχθεί μια δεδομένη χωρητικότητα (ικανότητα παραγωγής) θα μειώσει τις σωληνώσεις και τις καλωδιώσεις, καθώς επίσης και το κόστος θεμελίωσης και
- Βελτιωμένη απόδοση - το ποσοστό της θερμότητας της μικροτουρμπίνας των 250 kW αναμένεται να είναι περίπου 3,3 τοις εκατό καλύτερο από ό,τι εκείνης των 70 kW και περίπου 12,2 τοις εκατό καλύτερο από την μικροτουρμπίνα των 30 kW.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ειδικά για αξιοποίηση βιομάζας, όταν το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί είναι αέριο όπως φυσικό αέριο, προπάνιο, βιοαέριο από ΧΥΤΑ και αέριο αναερόβιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων πρέπει να συμπιεστεί. Η συνήθης συμπίεση ανέρχεται στο ύψος των 5.0 – 6.0 bar. Η ανάγκη συμπίεσης του αέριου καυσίμου αποτελεί το μεγαλύτερο παρασιτικό φορτίο της μονάδας. Μονάδες ΜΤ έχουν εγκατασταθεί σε εφαρμογές σε βιολογικούς καθαρισμούς και σε μία τέτοια περίπτωση μπορούν να θεωρηθούν μονάδες ΑΠΕ.

Συνεπώς, οι μικροτουρμπίνες με χωρητικότητες μεταξύ 30-250 kW χρησιμοποιούν συγκεντρώσεις μεθανίου πάνω από 35%. Επιπροσθέτως, παρουσιάζουν αποδόσεις μεταξύ 25-35% και είναι πιο κατάλληλες για εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας, κατά προτίμηση κάτω του 1MW. Ωστόσο, απαιτείται ειδική προεπεξεργασία του βιοαερίου για την απομάκρυνση της υγρασίας και άλλων μολυντών (Manasaki and Gikas, 2014).

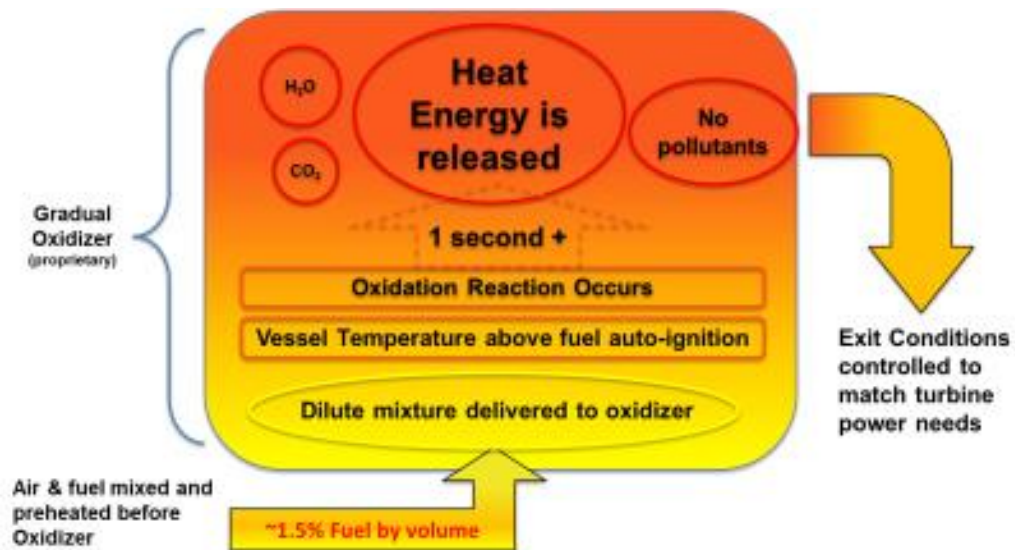
2.4. Τεχνολογίες Βαθμιαίας Οξειδωσης (Gradual Oxidizers-GO)

Βαθμιαία ή θερμική ή ενεργειακή οξείδωση είναι η 1 έως 2 δευτερολέπτων μετατροπή ενός αραιού μίγματος αερίου καυσίμου σε θερμική ενέργεια, διοξείδιο του άνθρακα και νερό (ENER-CORE, 2017), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.6. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές διαδικασίες καύσης, οι οποίες συμβαίνουν σε χιλιοστά του δευτερολέπτου, η διαδικασία βαθμιαίας οξείδωσης (Gradual Oxidation) πραγματοποιείται με πιο αργό ρυθμό και πιο σταδιακά (Hansen, 2013). Οι τεχνολογίες βαθμιαίας οξείδωσης αποτελούν νέες συσκευές, στις οποίες χαμηλής συγκέντρωσης αέριο καύσιμο (περίπου 1,5%) οξειδώνεται σε χαμηλή θερμοκρασία, και τα καυσάερια (αέριο μίγμα) τροφοδοτούνται σε μία Αεριοτουρμπίνα ή Μικροτουρμπίνα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ENER-CORE, 2017).



Εικόνα 2.6: Αντίδραση βαθμιαίας οξείδωσης (Πηγή: ENER-CORE, 2017)

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη (Εικόνα 2.6), στην οποία πραγματοποιείται σταδιακή οξείδωση του εισερχόμενου αερίου καυσίμου.



Εικόνα 2.7: Τυπική διάταξη τεχνολογίας σταδιακής οξείδωσης
 (ENER-CORE, 2017)

Η Gradual Oxidation προορίζεται να δεχθεί διαφορετικές ποιότητες καυσίμου κατά τη λειτουργία της, γεγονός που την καθιστά ως τεχνολογία προσαρμόσιμη όχι μόνο σε διαφορετικές πηγές εισερχόμενου αερίου, αλλά και στις φυσικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Διαθέτει ευέλικτο και παραμετροποιήσιμο σχεδιασμό έγχυσης καυσίμου υψηλής πίεσης για εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές ρύπων με δυνατότητα χρήσης χαμηλότερης ποιότητας αερίου καυσίμου (ENER-CORE, 2017).

Η τεχνολογία σταδιακής οξείδωσης έχει σχεδιαστεί για να ελέγχει τη διαδικασία οξείδωσης, έτσι ώστε ο χρόνος αντίδρασης και η απελευθέρωση θερμότητας να είναι αρκετά υψηλοί, με αποτέλεσμα να τροφοδοτείται συνεχώς μία τουρμπίνα αερίου για τη συνακόλουθη παραγωγή ενέργειας (ENER-CORE, 2017), ενώ η σχετική θερμοκρασία παραμένει αρκετά χαμηλή ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός NO_x , όπως αναφέρεται και ακολούθως.

Το βιοαέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε συγκεντρώσεις CH_4 πάνω από 1,5%. Πρακτικά, ο Gradual Oxidizer συνιστά τη μόνη τεχνολογία που έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί με εξαιρετικά κακής ποιότητας βιοαέριο. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, τα υποπροϊόντα δεν περιέχουν CO ή NO_x και η παραγωγή επιβλαβών εκπομπών περιορίζονται στο ελάχιστο (Manasaki and Gikas, 2014).



*Εικόνα 2.8: Σταθμός Παραγωγής GO 250 kW “Ener-Core FP250”
(ENER-CORE, 2017)*



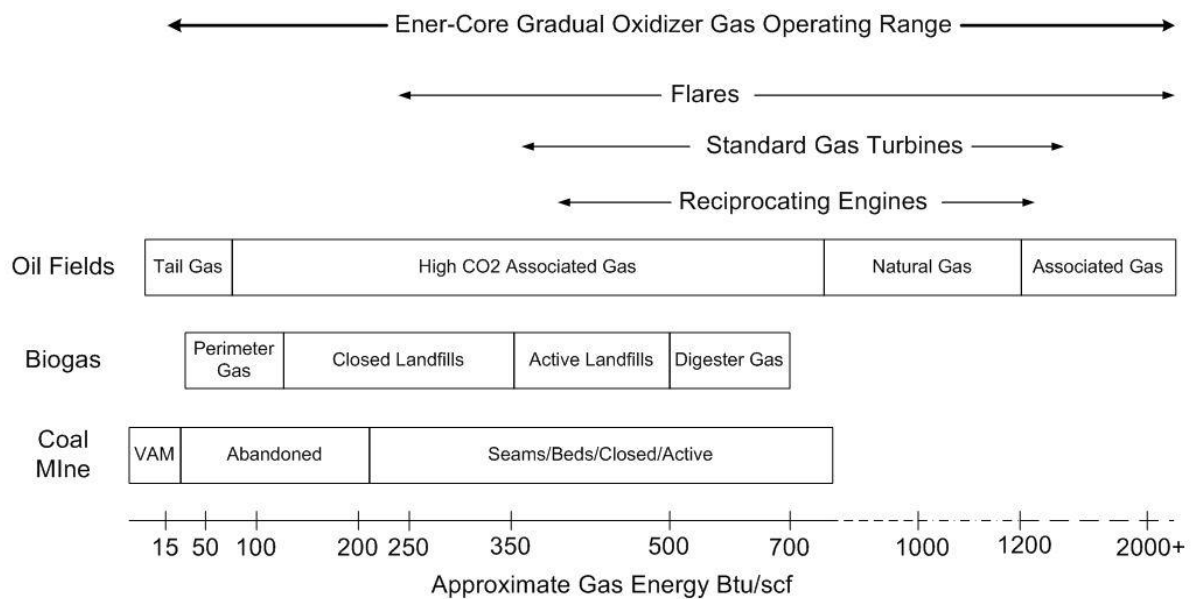
*Εικόνα 2.9: Σταθμός Παραγωγής GO “Ener-Core KG2-3G” με AT 2 MW
(ENER-CORE, 2017)*

Τα εμπορικά διαθέσιμα μεγέθη της τεχνολογίας ξεκινούν από τα 250 kW, εάν δε συνδυαστεί ένας Gradual Oxidizer με μία Αεριοτουρμπίνα, το σύστημα μπορεί να επιτύχει ισχύ περίπου ίση με 2MW (ENER-CORE, 2017). Επιπλέον, η ηλεκτρική αποδοτικότητά της είναι της τάξης του 29% και η λειτουργική διαθεσιμότητα της τεχνολογίας GO περίπου στο 95%, σε σύγκριση με 37% και 85% για τις μηχανές εσωτερικής καύσης, αντίστοιχα (ENER-CORE, 2017; U.S. EPA Handbook, 2015).

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, συνήθως χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο. Ωστόσο, δεν δύνανται να λειτουργήσουν όταν η περιεκτικότητα του βιοαερίου σε μεθάνιο πέφτει περίπου κάτω από 40%, ενώ η διαδικασία εμπλουτισμού του -σε περίπτωση που πρόκειται να πραγματοποιηθεί περαιτέρω αξιοποίησή του- είναι ιδιαίτερα δαπανηρή.

Από την άλλη πλευρά, η βαθμιαία οξείδωση, μια πρωτοποριακή τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο, όπως επισημάνθηκε μπορεί να λειτουργήσει με το περιεχόμενο μεθάνιο σε συγκεντρώσεις τόσο χαμηλές όσο το 1,5%, συνεπώς, η εν λόγω τεχνολογία πρέπει να εξετάζεται ως μία ελκυστική εναλλακτική μέθοδος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από απεμπλουτισμένους και εξαντλημένους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ποσοστό μεθανίου κάτω από 40%), αντί της κοινής πρακτικής καύσης του βιοαερίου (Hansen, 2013; ENER-CORE, 2017).

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, οι Gradual Oxidizers προορίζονται για να επιτρέψουν μία ευρύτερη ευελιξία καυσίμου από τις εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης και τους αεριοστρόβιλους (ENER-CORE, 2017), όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.10: Εύρος λειτουργίας τεχνολογίας (ENER-CORE, 2017)

2.5. Κυψέλες Καυσίμων (Fuel Cells – FC)

Το βιοαέριο μπορεί να τροποποιηθεί μέσα σε κυψέλες ή διαφορετικά κυψελίδες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε επιμέρους κυψέλη καυσίμου παράγει 0.7-1.0 V. Λειτουργούν σε συγκεντρώσεις μεθανίου μεταξύ 45-60%, ωστόσο, απαιτείται ειδική αντιμετώπιση για την απομάκρυνση του υδρόθειου και άλλων ακαθαρσιών που μπορεί να έχουν αρνητικές και επιβλαβείς επιπτώσεις

στην απόδοση των κυψελίδων. Οι κυψελίδες καυσίμων έχουν υψηλή απόδοση η οποία μπορεί να είναι πάνω από 60%, ενώ δεν παράγουν βλαβερά παραπροϊόντα, όπως NO_x , CO και SO_x (Manasaki and Gikas, 2014).

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία που μετατρέπει άμεσα το υδρογόνο σε ενέργεια. Τα στοιχεία των επιμέρους ενώσεων του εκάστοτε καυσίμου δημιουργούν ηλεκτρική ενέργεια συνδυάζοντας υδρογόνο και οξυγόνο σε μια ηλεκτροχημική αντίδραση. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτή της μπαταρίας, δηλαδή χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα για τη δημιουργία ηλεκτροχημικών αντιδράσεων από μια ανεμπόδιστη παροχή καυσίμου (Rajaram et al., 2011). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Daud et al., 2017, οι κυψέλες είναι ηλεκτροχημικές συσκευές οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα μετατροπής της χημικής ενέργειας ενός καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρισμό. Μια κυψέλη καυσίμου συνδυάζει το υδρογόνο, ως καύσιμο, και το οξυγόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ηλεκτρισμού-θερμότητας), με το νερό και τη θερμότητα ως υποπροϊόν του. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια (την άνοδο-αρνητικό ηλεκτρόδιο και την κάθοδο-θετικό ηλεκτρόδιο), τα οποία διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος λέγεται αλλιώς και μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane, PEM). Βέβαια, ανάλογα με τον τύπο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται υπάρχουν διάφορα είδη κυψελών καυσίμου: μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), φωσφορικού οξέος (PAFC), λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC), στερεού οξειδίου (SOFC), άμεσης μεθανόλης (DMFC), αλκαλικά (AFC).



Εικόνα 2.11: Κυψέλη Καυσίμου Βιοαερίου (Πηγή: global.mongabay.com)

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου έχουν υψηλότερο επίπεδο ενεργειακής μετατροπής (περίπου 40%) και χαμηλότερες εκπομπές από άλλες μεθόδους-τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής με χρήση βιοαερίου (Rajaram et al., 2011). Οι κυψέλες καυσίμου είναι διαθέσιμες σε μικρές αυξανόμενες χωρητικότητες και έχουν σύντομο χρόνο παράδοσης από το σχεδιασμό έως την κατασκευή και λειτουργία μίας μονάδας, αποτελούμενης από ένα σύνολο των εν λόγω τεχνολογιών. Επιπλέον, παρουσιάζουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις αέριων ρύπων σε σχέση με τεχνολογίες ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου μεγαλύτερης κλίμακας (Rajaram et al., 2011).

Η χρήση του βιοαερίου για κυψέλες καυσίμου απαιτεί τη χρήση επεξεργαστή καυσίμου υψηλής ποιότητας, συμπεριλαμβανομένων έναν μετασχηματιστή ισχύος στοίβας κυψελών καυσίμου και έναν πύργο ψύξης για τη θερμική επεξεργασία των αποβλήτων (Rajaram et al., 2011).

Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου συνοψίζονται μεταξύ άλλων στην αρθρωτή κατασκευή τους, στην υψηλή αποδοτικότητα και αξιοπιστία, στην ιδιαίτερα αθόρυβη λειτουργία τους και η δυνατότητα απομακρυσμένης χωροθέτησης, εγκατάστασης, χρήσης και συντήρησης. Επιπροσθέτως, εφόσον η μετατροπή του καυσίμου σε ενέργεια πραγματοποιείται μέσω μιας ηλεκτροχημικής διαδικασίας, και όχι καύσης, η διαδικασία είναι καθαρή, ήσυχη και υψηλής απόδοσης –δύο έως τρεις φορές πιο αποτελεσματική από την καύση καυσίμων (Rajaram et al., 2011; Daud et al., 2017).

Από την άλλη πλευρά, οι κυψελίδες καυσίμου έχουν σχετικά μικρή διάρκεια ζωής. Ακόμα, όπως και άλλες εφαρμογές βιοαερίου υψηλής ποιότητας, τα διάφορα κλάσματα καυσίμου, απαιτούν εκτεταμένη προεπεξεργασία, καθώς το υδρόθειο και οι αλογονωμένοι υδρογονάνθρακες μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στις κυψελίδες καυσίμου σε χαμηλά επίπεδα (Daud et al., 2017).

Ακόμη, οι κυψελίδες καυσίμου αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία με υψηλό κόστος κεφαλαίου και κατασκευής, μιας και δεν παράγεται σε εμπορικές ποσότητες. Παρόλα αυτά, ο αριθμός των κυψελίδων που παράγονται αυξάνεται συνεχώς, συνεπώς αναμένεται ότι η τιμή τους θα μειωθεί, γεγονός που θα αυξήσει την οικονομική τους βιωσιμότητα (Rajaram et al., 2011; Daud et al., 2017).

2.6. Συνοπτική Σύγκριση και Αξιολόγηση των Τεχνολογιών

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, από τεχνικής άποψης, η επιλογή της πλέον κατάλληλης τεχνολογίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο, θα εξαρτηθεί από την ποιότητα και την ποσότητα των κλασμάτων του εν λόγω καυσίμου. Οι MEK είναι αξιόπιστες αλλά δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε σχετικά μικρές συγκεντρώσεις βιοαερίου. Οι AT είναι κατάλληλες για μεγάλες εφαρμογές, ενώ οι MT είναι ιδανικές για αποκεντρωμένες εφαρμογές. Οι Κυψέλες Καυσίμων δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα πλήρως και μπορεί να υποφέρουν από τις ακαθαρσίες του εκάστοτε καυσίμου αερίου. Τέλος, οι Gradual Oxidizers εμφανίζονται ως η μοναδική τεχνολογία για τις ιδιαίτερα κακές και φτωχές συγκεντρώσεις βιοαερίου.

Εν συνεχεία, ο Πίνακας 2.2 παρέχει μία σύνοψη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων που σχετίζονται με την κάθε μία τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μεταξύ των MEK, AT και MT, καθώς επίσης γίνεται αναφορά της ενδεχόμενης ανάγκης για επεξεργασία του βιοαερίου (LFG) πριν τη χρήση του.

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Τεχνολογίας και Απαιτούμενη Επεξεργασία Βιοαερίου (LFG)

(Πηγή: LFG Energy Project Development Handbook, U.S. EPA Handbook, 2015)

Πλεονεκτήματα (+)	Μειονεκτήματα (-)	Επεξεργασία Βιοαερίου (LFG)
Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) - Internal Combustion Engine (ICE)		
<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή απόδοση σε σχέση με αεριοτουρμπίνες και μικροτουρμπίνες. Καλή προσαρμογή μεγέθους με την έξοδο του αερίου πολλών χώρων υγειονομικής ταφής. Σχετικά χαμηλό κόστος σε μια ανά εγκατεστημένο kW βάση ισχύος, σε σύγκριση με αεριοτουρμπίνες και μικροτουρμπίνες. Η απόδοση αυξάνεται όταν ανακτάται η απορριπτόμενη θερμότητα. Δυνατότητα πρόσθεσης ή αφαίρεσης κινητήρων, με σκοπό να ακολουθηθούν οι τάσεις ανάκαμψης του αερίου. 	<ul style="list-style-type: none"> Σχετικά υψηλό κόστος συντήρησης. Σχετικά υψηλές αέριες εκπομπές. Τα οικονομικά μπορεί να είναι οριακά σε περιοχές με χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. 	Κατ' ελάχιστο, απαιτείται πρωτοβάθμια επεξεργασία του βιοαερίου για τη βέλτιστη απόδοση του κινητήρα, ενώ δευτεροβάθμια επεξεργασία ενδέχεται να είναι απαραίτητη.
Αεριοτουρμπίνα (ΑΤ) - (Gas) Turbine (TU)		
<ul style="list-style-type: none"> Το κόστος ανά kW παραγόμενης ισχύος μειώνεται όσο το μέγεθος της αεριοτουρμπίνας αυξάνεται, ενώ η απόδοση, επίσης, βελτιώνεται. Η απόδοση αυξάνεται όταν ανακτάται η απορριπτόμενη θερμότητα. Πιο ανθεκτική τεχνολογία στις βλάβες λόγω διάβρωσης. Χαμηλές εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Σχετικά συμπαγής κατασκευή. 	<ul style="list-style-type: none"> Η αποδοτικότητα πέφτει όταν η μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία με μερικό φορτίο. Απαιτείται υψηλή συμπίεση του αερίου. Υψηλά παρασιτικά φορτία. Τα οικονομικά μπορεί να είναι οριακά σε περιοχές με χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. 	Κατ' ελάχιστο, απαιτείται πρωτοβάθμια επεξεργασία του βιοαερίου για τη βέλτιστη απόδοση της τουρμπίνας, ενώ δευτεροβάθμια επεξεργασία ενδέχεται να είναι απαραίτητη.
Μικροτουρμπίνα (ΜΤ) - Micro-Turbine (MT)		
<ul style="list-style-type: none"> Απαιτήση για μικρότερη ροή αερίου. Μπορεί να λειτουργήσει με χαμηλότερο ποσοστό μεθανίου. Χαμηλές εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Σχετικά εύκολη διασύνδεση. Δυνατότητα πρόσθεσης και αφαίρεσης μονάδων. 	<ul style="list-style-type: none"> Τα οικονομικά μπορεί να είναι οριακά σε περιοχές με χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. 	Απαιτείται αρκετά εκτεταμένη πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία του βιοαερίου.

Κεφάλαιο 3. ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων

3.1. Περιγραφή και Χαρακτηριστικά ΧΥΤΑ

Ο υπό εξέταση ΧΥΤΑ βρίσκεται στην περιοχή Πέρα Γαλήνων του Νομού Ηρακλείου, βρίσκεται 32 km περίπου δυτικά του Ηρακλείου στα διοικητικά όρια του Δήμου Γαζίου. Η έκταση του ΧΥΤΑ καταλαμβάνει 180 στρέμματα, εκμισθώνεται από το Δήμο Ηρακλείου, ως ο κύριος χρήστης του χώρου. Ο κοντινότερος οικισμός προς τον εξεταζόμενο χώρο είναι ο οικισμός Φόδελε, που βρίσκεται ανατολικά σε απόσταση 2,5 km.

Η διάθεση των ΑΣΑ στο ΧΥΤΑ ξεκίνησε το 1992. Κατά την έναρξη λειτουργίας του, δε διέθετε σύστημα στεγάνωσης, δίκτυο συλλογής στραγγισμάτων, σύστημα διαχείρισης βιοαερίου, αντιπλημμυρική προστασία, πυρασφάλεια, γεφυροπλάστιγγα, λοιπά έργα υποδομής, σύμφωνα με όσα ορίζει η νομοθεσία. Ωστόσο, ο Δήμος Ηρακλείου, ως φορέας λειτουργίας, προσπαθούσε να ελαχιστοποιήσει τους κινδύνους ρύπανσης του περιβάλλοντος λαμβάνοντας κατά τη λειτουργία όλα τα αναγκαία μέτρα, αξιοποιώντας τις υφιστάμενες υποδομές.

Σε επόμενη φάση κατασκευάστηκαν από τον ΕΣΔΑΚ έργα αποκατάστασης στο χώρο, με σκοπό την άρση των επιπτώσεων στο περιβάλλον από την ημι-ελεγχόμενη λειτουργία του, καθώς επίσης και έργα επέκτασης και εκσυγχρονισμού με την κατασκευή των κυττάρων Α' και Β' και όλων των αναγκαίων συμπληρωματικών έργων, σύμφωνα πάντα με τις νομοθετικές απαιτήσεις.

Η επιφάνεια της έκτασης, στην οποία κατασκευάστηκε το κύτταρο Α', υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, ανέρχεται οριζοντιογραφικά σε 35 περίπου στρέμματα (Τμήμα Β' ΧΑΔΑ) και βρίσκεται στο ΒΔ τμήμα του γηπέδου. Το υπόλοιπο τμήμα του

χώρου, που αποκαταστάθηκε, αφορά 50 ακόμη στρέμματα (Τμήμα Α' ΧΑΔΑ). Επιπλέον, αποκαταστάθηκε έκταση 10 στρεμμάτων, η οποία χρησιμοποιούνταν για τη διάθεση της αφυδατωμένης ιλύος από τη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων του Ηρακλείου. Η επιφάνεια της έκτασης, στην οποία κατασκευάστηκε το Β' κύτταρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων ανέρχεται οριζοντιογραφικά σε 28 περίπου στρέμματα.

Στο ΒΔ και ΝΑ τμήμα των παλιών απορριμματικών αποθέσεων κατασκευάστηκαν λοιπόν τα κύτταρο Α' και Β', αντίστοιχα. Η κατασκευή των κυττάρων έγινε μετά από εξομάλυνση του υφιστάμενου απορριμματικού ανάγλυφου, τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του υποβάθρου των λεκανών απόθεσης και την κατασκευή περιμετρικών αναχωμάτων σε κάθε λεκάνη. Πιο συγκεκριμένα, ο ΧΥΤΑ αποτελείται από 4 κύρια τμήματα, δύο παλιά και δύο νέα. Το 1^ο τμήμα (ΧΑΔΑ Α') άρχισε να λειτουργεί το 1992 και έκλεισε το 1997. Η διάθεση απορριμμάτων στο 2^ο τμήμα (ΧΑΔΑ Β') ξεκίνησε το 1998 και έκλεισε το 2008. Το 3^ο τμήμα (κύτταρο Α' του ΧΥΤΑ), είναι υπερκείμενο του ΧΑΔΑ Β' και δέχθηκε τις αποθέσεις από το 2009 έως και το 2012 και το 4^ο τμήμα (κύτταρο Β' του ΧΥΤΑ) είναι υπερκείμενο τμήμα του ΧΑΔΑ Α' και υποδέχθηκε απορρίμματα από το 2012 έως τις αρχές του 2016. Ήδη από το καλοκαίρι του 2016 έχει κατασκευαστεί το κύτταρο Γ', το οποίο δέχεται τις ποσότητες των απορριμμάτων από τα τέλη του 2016.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο εξεταζόμενος ΧΥΤΑ ανήκει στην κατηγορία των ΧΥΤΑ μη επικινδύνων στερεών αποβλήτων, ενώ εντός των ορίων του ΧΥΤΑ απαγορεύεται ρητά η καύση αποβλήτων.

Στην Εικόνα 3.1. που ακολουθεί, παρουσιάζεται η γενική διάταξη των τμημάτων των αποθέσεων των τεσσάρων τμημάτων του ΧΥΤΑ.



Εικόνα 3.1: Πανοραμική άποψη αποθέσεων στο ΧΥΤΑ

3.2. Σύνθεση των ΑΣΑ

Η ποσοστιαία σύνθεση κατά βάρος (% κ.β.) των απορριμμάτων της εξυπηρετούμενης περιοχής παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.1: Ποσοτική σύσταση κατά βάρος των αποβλήτων που εισέρχονται στο ΧΥΤΑ
(Πηγή: Μελέτη «Ποιοτική και Ποσοτική Ανάλυση Απορριμμάτων των Νομών Ηρακλείου, Ρεθύμνου και Λασιθίου». ΕΣΔΑΚ, 2003-2004)

Συστατικό	% Σύσταση κ.β.
Αδρανή	3,04
Μέταλλα	3,90
Αλουμίνιο	1,87
Γυαλί	4,25
Δέρματα–ξύλα–υφάσματα–λάστιχα	4,68
Χαρτί	20,51
Υπολείμματα τροφών	38,72
Πλαστικά	17,48
Υπόλοιπα	5,55
ΣΥΝΟΛΟ	100

3.3. Ποσότητες Εισερχόμενων Απορριμμάτων

Οι ποσότητες των ΑΣΑ που έχει δεχθεί, ή αναμένεται να δεχθεί στην περίπτωση του νέου κυττάρου Γ' (2015-2019) κάθε τμήμα του ΧΥΤΑ παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.2: Εισερχόμενες ποσότητες ΑΣΑ σε κάθε τμήμα του ΧΥΤΑ

ΕΤΟΣ	Εισερχόμενες ποσότητες ΑΣΑ (tn/ yr)				
	ΧΑΔΑ Α΄	ΧΑΔΑ Β΄	ΚΥΤΤΑΡΟ Α΄	ΚΥΤΤΑΡΟ Β΄	ΚΥΤΤΑΡΟ Γ΄
1992	56.673				
1993	57.467				
1994	58.271				
1995	59.087				
1996	59.914				
1997	60.753				
1998		61.603			
1999		62.466			
2000		63.340			
2001		64.590			
2002		65.107			
2003		65.628			
2004		66.153			
2005		66.682			
2006		67.215			
2007		67.753			
2008		68.295			
2009			139.825		
2010			142.988		
2011			120.401		
2012			76.286	33.606	
2013				133.835	
2014				135.843	
2015				137.880	42.102
2016					126.306
2017					127.569
2018					128.845
2019					126.306
ΣΥΝΟΛΟ	352.164	718.832	479.500	441.163	551.128

3.4. Σύστημα Διαχείρισης Βιοαερίου (Υφιστάμενη Κατάσταση)

Το υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης του βιοαερίου αποτελείται από τέσσερα διακριτά μέρη:

1. Το δίκτυο συλλογής-απαγωγής βιοαερίου που έχει εγκατασταθεί στο τμήμα Β' του ΧΑΔΑ (35 στρέμματα.) και κάτω από το τμήμα που έχει κατασκευαστεί το κύτταρο Α'.
2. Το δίκτυο συλλογής-απαγωγής βιοαερίου που έχει εγκατασταθεί στο τμήμα Α' του ΧΑΔΑ (50 στρέμματα), που αποκαταστάθηκε.
3. Το δίκτυο συλλογής βιοαερίου του κυττάρου Α', το οποίο έχει συνδεθεί στον πυρσό του ΧΥΤΑ.
4. Το δίκτυο κατακόρυφων φρεατίων συλλογής βιοαερίου που έχει εγκατασταθεί επί του κυττάρου Β', μετά το πέρας της λειτουργίας του οποίου, πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση και οριζόντιου δικτύου.

Για την εξυπηρέτηση των παραπάνω δικτύων έχουν προβλεφθεί:

- Κατακόρυφα φρεάτια απαγωγής βιοαερίου
- Κατακόρυφα φρεάτια συλλογής βιοαερίου
- Οριζόντιο δίκτυο συλλογής βιοαερίου
- Υποσταθμοί συλλογής βιοαερίου
- Οριζόντιο δίκτυο μεταφοράς του βιοαερίου προς τους υποσταθμούς

- Κεντρικοί αγωγοί μεταφοράς του βιοαερίου από τους υποσταθμούς στον πυρσό
- Σύστημα απομάκρυνσης συμπυκνωμάτων και
- Μονάδα καύσης (πυρσός) βιοαερίου.

Το δίκτυο συλλογής και διαχείρισης βιοαερίου περιγράφεται εκτενώς παρακάτω, ώστε να μελετηθούν οι προοπτικές για την ενδεχόμενη ενεργειακή αξιοποίησή του.

3.5. Δίκτυο Συλλογής Βιοαερίου

Το δίκτυο συλλογής του παραγόμενου βιοαερίου περιλαμβάνει προς το παρόν τρία ρεύματα:

- ΧΑΔΑ Β'
- ΧΑΔΑ Α'
- ΧΥΤΑ Α' (ΚΥΤΤΑΡΟ Α'),

τα οποία συγκεντρώνονται στον υποσταθμό του πυρσού καύσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Σημείο συνάντησης των τριών ρευμάτων βιοαερίου για τη μεταφορά τους στον πυρσό καύσης

3.5.1. Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Ρευμάτων Βιοαερίου

Α) Δίκτυο βιοαερίου στο ΧΑΔΑ Β', το υποκείμενο του Α' κυττάρου

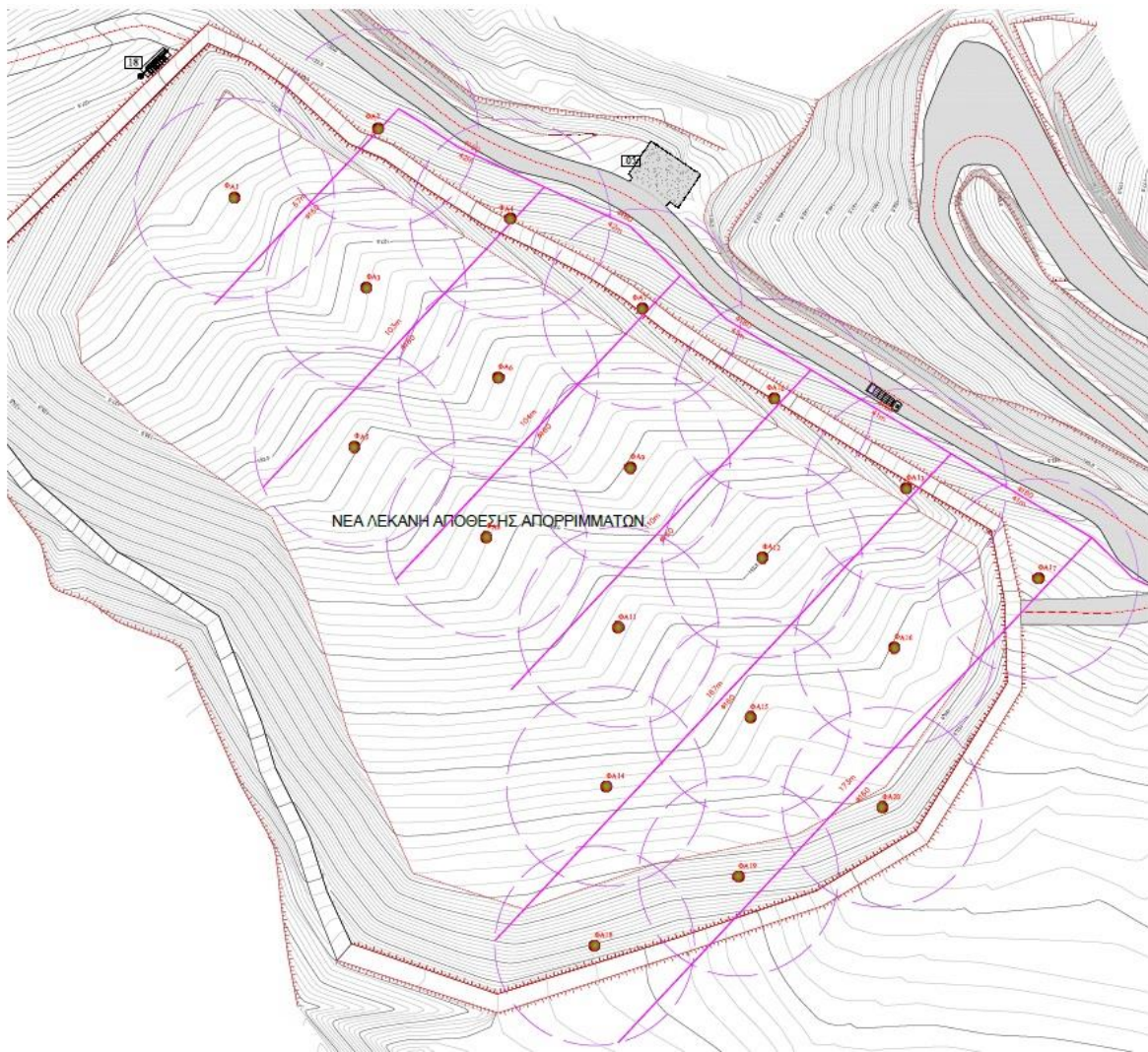
Στο τμήμα Β' του ΧΑΔΑ, υποκείμενο του κυττάρου Α', έχει κατασκευαστεί δίκτυο 20 γεωτρήσεων απαγωγής βιοαερίου διαμέτρου 8". Οι γεωτρήσεις πληρώθηκαν με χαλίκι κοκκομετρικής διαβάθμισης 16-32 mm, για την επίτευξη ικανής

παροχευευτικότητα, άμεσης συνοχής και συνέχειας με τη στρώση εκτόνωσης βιοαερίου, που έχει διαστρωθεί επί των παλαιών απορριμματικών αποθέσεων.

Η συλλογή του βιοαερίου πραγματοποιείται μέσω οριζόντιου δικτύου συλλογής, το οποίο αποτελείται από διάτρητους αγωγούς πολυαιθυλενίου (HDPE) μεγάλης πυκνότητας. Οι διάμετροι των αγωγών του οριζόντιου δικτύου είναι Φ160 mm και Φ180 mm, όπως διαφαίνεται και από την Εικόνα 3.3. Οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι σε παράλληλη διάταξη ανά 40 m περίπου επί της στρώσης εκτόνωσης του βιοαερίου και συνδέονται με κεντρικό αγωγό μεταφοράς προς τη μονάδα καύσης.

Πάνω από την στρώση εκτόνωσης έχει τοποθετηθεί στρώση προστασίας από εδαφικό υλικό και στη συνέχεια άνωθεν της στρώσης προστασίας κατασκευάστηκε το Κύτταρο Α'. Διαμέσου αυτής της μεθοδολογίας εξασφαλίστηκε η άντληση του βιοαερίου από το τμήμα Β' του ΧΑΔΑ και μετά την κατασκευή και λειτουργία του Α' κυττάρου.

Στα σχέδια των οριζοντιογραφιών (Εικόνες 3.3, 3.5, 3.7, 3.8) που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι γενικές διατάξεις των δικτύων συλλογής του βιοαερίου.



Εικόνα 3.3: Οριζοντιογραφία δικτύου συλλογής βιοαερίου -Τμήμα Β' ΧΑΔΑ

Β) Δίκτυο βιοαερίου στο ΧΑΔΑ Α' , το υποκείμενο του Β' κυττάρου

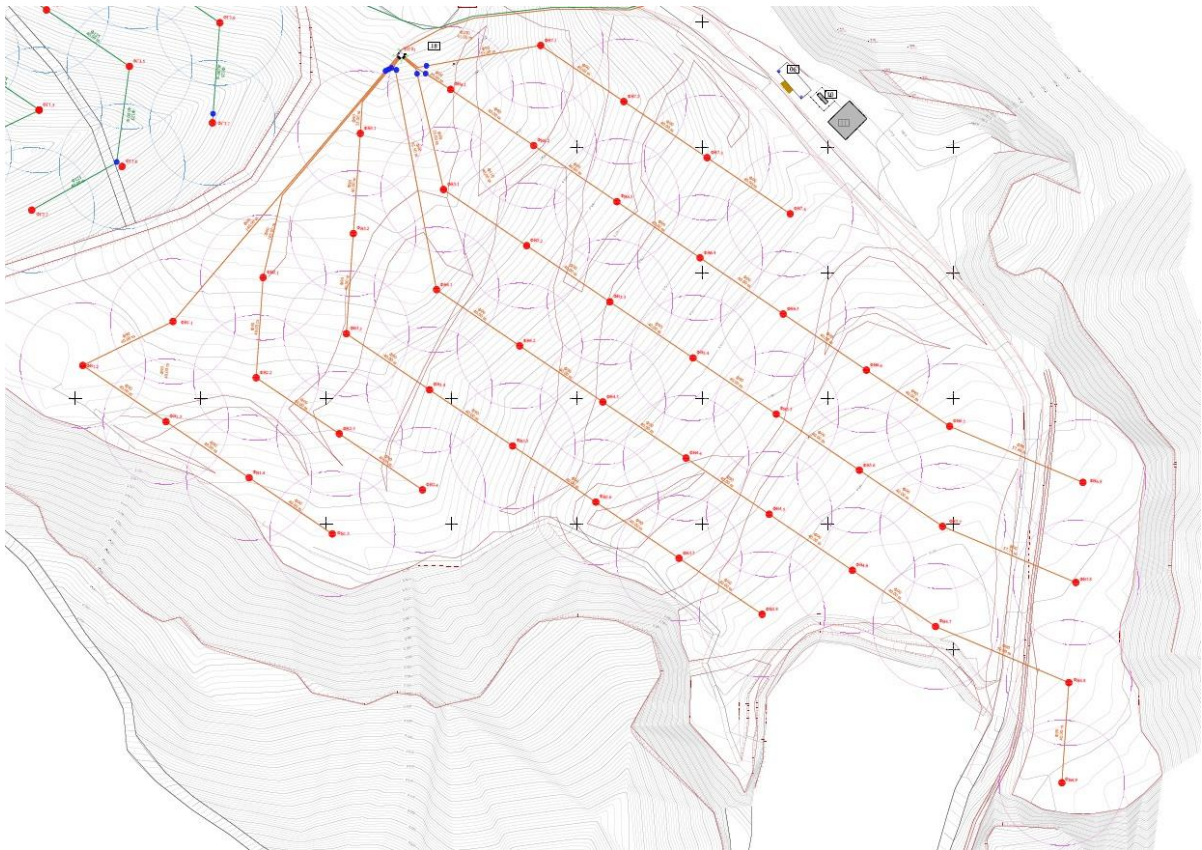
Στο τμήμα Α' του ΧΑΔΑ, το οποίο έχει αποκατασταθεί πλήρως, προβλέφθηκε η κατασκευή δικτύου 46 κατακόρυφων φρεατίων άντλησης του παραγόμενου βιοαερίου. Λόγω της κατασκευής του κυττάρου Β' έχουν απομείνει 22 φρεάτια άντλησης. Για την κατασκευή των φρεατίων άντλησης βιοαερίου έχουν διανοιχτεί γεωτρήσεις διαμέτρου Φ500 mm, μέσα στις οποίες έχει τοποθετηθεί διάτρητος αγωγός HDPE, ονομαστικής διαμέτρου Φ90 mm.

Η διάταξη των φρεατίων ακολουθεί την φιλοσοφία σχεδιασμού της διάταξης ισοπλεύρου τριγώνου, ακτίνας επιρροής 25 m και απόστασης μεταξύ των φρεατίων 40 m. Η μεταφορά του αντλούμενου βιοαερίου πραγματοποιείται με τη διασύνδεση των φρεατίων με οριζόντιο δίκτυο μεταφοράς αποτελούμενο από 7 επιμέρους κλάδους. Οι κλάδοι αυτοί συνενώνονται εντός υποσταθμού (ΥΠ1 – Εικόνα 3.4) σε κεντρικούς αγωγούς. Εν συνεχεία, μέσω των κεντρικών αγωγών μεταφοράς γίνεται η σύνδεση του υποσταθμού με τον πυρσό καύσης.



Εικόνα 3.4: Υποσταθμός συλλογής βιοαερίου (ΥΠ1)

Όλοι οι αγωγοί μεταφοράς είναι από HDPE 10 atm, Φ90-250 mm, τοποθετημένοι σε τάφρο επί της τελικής κάλυψης, ενώ εξασφαλίζεται μέγιστη τιμή της ταχύτητας ροής του βιοαερίου εντός των αγωγών 10 m/sec. Στα χαμηλότερα σημεία του δικτύου μεταφοράς έχουν προβλεφθεί κατάλληλες παγίδες συμπυκνωμάτων.



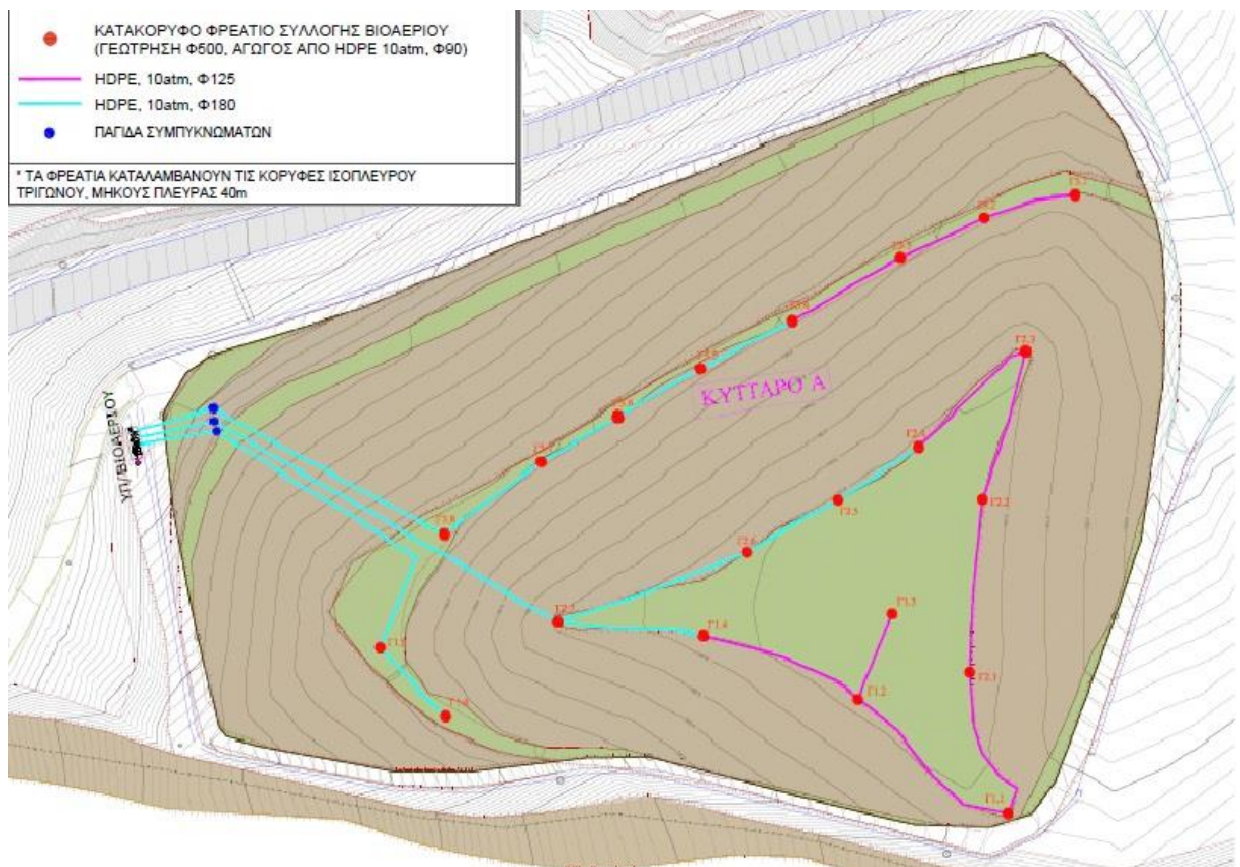
Εικόνα 3.5: Οριζοντιογραφία δικτύου συλλογής βιοαερίου - Τμήμα ΧΑΔΑ Α΄

Γ) Δίκτυο συλλογής βιοαερίου στο κύτταρο Α΄

Μετά την αποκατάσταση του Α' κυττάρου του ΧΥΤΑ διανοίχθηκαν 21 κατακόρυφες γεωτρήσεις διαμέτρου $\Phi 500$ mm, μέσα στις οποίες έχει τοποθετηθεί διάτρητος αγωγός HDPE, ονομαστικής διαμέτρου $\Phi 90$ mm. Η μεταφορά του αντλούμενου βιοαερίου πραγματοποιείται με τη διασύνδεση των φρεατίων με οριζόντιο δίκτυο μεταφοράς αποτελούμενο από 3 επιμέρους κλάδους. Οι κλάδοι αυτοί συνενώνονται εντός υποσταθμού (ΥΠ2 – Εικόνα 3.6) σε κεντρικούς αγωγούς. Εν συνεχεία, μέσω των κεντρικών αγωγών μεταφοράς γίνεται η σύνδεση του υποσταθμού με τον πυρσό καύσης.



Εικόνα 3.6: Υποσταθμός συλλογής βιοαερίου (ΥΠ2)

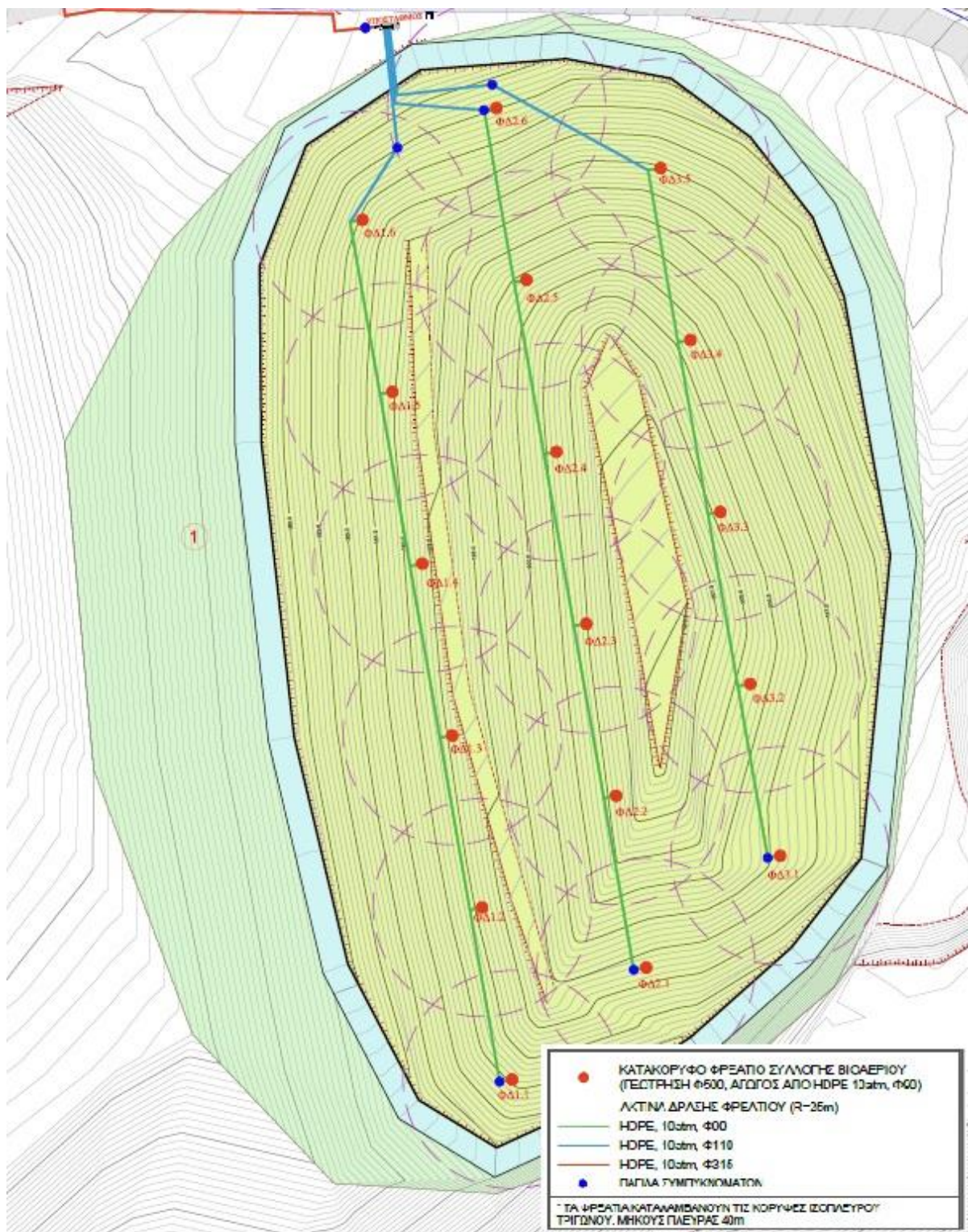


Εικόνα 3.7: Οριζοντιογραφία δικτύου συλλογής βιοαερίου - Τμήμα ΧΥΤΑ Α'

Δ) Δίκτυο συλλογής βιοαερίου στο κύτταρο Β'

Το κύτταρο Β' του ΧΥΤΑ περιλαμβάνει 17 κατακόρυφες γεωτρήσεις διαμέτρου Φ500 mm, μέσα στα οποία έχει τοποθετηθεί διάτρητος αγωγός HDPE, ονομαστικής διαμέτρου Φ90 mm. Η μεταφορά του αντλούμενου βιοαερίου πραγματοποιείται με τη διασύνδεση των φρεατίων με οριζόντιο δίκτυο μεταφοράς αποτελούμενο από 3 επιμέρους κλάδους διαμέτρων Φ90 mm, Φ110 mm και Φ315 mm.

Η διάταξη των φρεατίων ακολουθεί την φιλοσοφία σχεδιασμού της διάταξης ισοπλεύρου τριγώνου, ακτίνας επιρροής 25 m και απόστασης μεταξύ των φρεατίων 40 m.



Εικόνα 3.8: Οριζοντιογραφία δικτύου συλλογής βιοαερίου - Τμήμα ΧΥΤΑ Β'

3.5.2. Προβλήματα στο Δίκτυο Συλλογής Βιοαερίου

Δύο είναι τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζει το δίκτυο συλλογής βιοαερίου. Το πρώτο αφορά την έμφραξη ορισμένων από τα κατακόρυφα φρεάτια και το δεύτερο τις παγίδες των συμπυκνωμάτων. Σχετικά με τα συμπυκνώματα, όταν τοποθετούνται οι παγίδες εντός του εδάφους είναι πολύ εύκολο να φράξουν και να μη λειτουργούν. Αυτό συνέβη και στο συγκεκριμένο ΧΥΤΑ. Τα συμπυκνώματα του δικτύου έφραξαν τις παγίδες, με αποτέλεσμα να εγκλωβιστεί υγρό στράγγισμα εντός των αγωγών συλλογής βιοαερίου με αποτέλεσμα την έμφραξη αρκετών αγωγών.

Για το λόγο αυτό, έγινε αποκάλυψη των παγίδων του 2^{ου} υποσταθμού (ΥΠ2) και αφού έγινε καθαρισμός του δικτύου, κατασκευάστηκαν νέου τύπου παγίδες υπέργειες και εύκολα προσβάσιμες για καθαρισμό.

Όσον αφορά τα κατακόρυφα φρεάτια, όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις για το 2014 στα φρεάτια περιβαλλοντικής παρακολούθησης του ΧΥΤΑ, ορισμένα από αυτά παρουσιάζουν πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, και ειδικά για το μεθάνιο (CH_4) οι συγκεντρώσεις είναι μηδενικές, και συγκεκριμένα για τα φρεάτια 9, 12, 18, 19, 20, 21 και 22 (Πίνακας 3.2). Η ύπαρξη υψηλών ενδείξεων CH_4 στα υπόλοιπα περιφερειακά φρεάτια, αποτελεί ένδειξη μετανάστευσης του βιοαερίου.

Μόνο ένα φρεάτιο φαίνεται να έχει φράξει στον αποκατεστημένο ΧΑΔΑ Α', το φρεάτιο Δ.4.1. Φαίνεται ότι το βιοαέριο στο ΧΑΔΑ Α' βρίσκεται στη φάση της μεθανογένεσης, καθώς οι τιμές του CH_4 και του CO_2 είναι υψηλές και η φάση φαίνεται να διαρκεί για περίοδο παραπάνω από 15 έτη από το κλείσιμο του ΧΑΔΑ (1997-2014).

Οι μετρήσεις στο κύτταρο Α' δεν εμφανίζουν πρόβλημα έμφραξης σε κάποιο φρεάτιο (Πίνακας 3.4), το ποσοστό του CH₄ είναι αρκετά υψηλό και φαίνεται ότι το κύτταρο βρίσκεται στη φάση της μεθανογέννεσης. Επίσης, σχετικά με το κύτταρο Β' (Πίνακας 3.5) οι ενδείξεις των φρεατίων Δ1.6, Δ3.1, Δ3.4 και Δ3.5 δείχνουν ότι το βιοαέριο εισέρχεται στα πρώτα στάδια του, αφού το κύτταρο δεν έχει κλείσει ακόμα.

Στο ΧΑΔΑ Β' δεν υπάρχουν μετρήσεις, γιατί όταν κατασκευάστηκε το κύτταρο Α', οι γεωτρήσεις του ΧΑΔΑ Β' ενώθηκαν με υπόγειο δίκτυο χωρίς να υπάρχει πλέον πρόσβαση σε αυτό.

Με την αποκάλυψη και επισκευή των υδατοπαγίδων θα αναμενόταν βελτίωση του μετρούμενου βιοαερίου, κάτι που δεν απεδείχθη στην πραγματικότητα με βάση δοκιμές που εφαρμόστηκαν, αφού ο πυρσός καύσης εξακολουθεί να μη λειτουργεί.

Εδώ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το ενδεχόμενο της υπεράντλησης του βιοαερίου που οδηγεί σε αραίωση του μείγματος και ίσως η τροποποίηση του φυσητήρα να είναι αναγκαία, ώστε η παροχή να είναι σε τέτοιο ρυθμό που να μπορεί να ανακτάται σχετικά υψηλό ποσοστό CH₄. Παρόλα αυτά, οι μετρήσεις του O₂ δεν μαρτυρούν ένα τέτοιο ενδεχόμενο, καθώς οι τιμές του είναι χαμηλές στα περισσότερα φρεάτια πέραν των φρεατίων παρακολούθησης. Από την άλλη οι υψηλές συγκεντρώσεις βιοαερίου στα φρεάτια παρακολούθησης, υποδεικνύουν το ενδεχόμενο διαφυγής του μεθανίου.

Ένα μέτρο που θα μπορούσε να ληφθεί δυνητικά αφορά στον περιορισμό της διαφυγής του βιοαερίου. Εφόσον τα περισσότερα φρεάτια άντλησης είναι σε καλή κατάσταση, έργα μόνωσης των κυτάρων ή ακόμα και μετατροπή των φρεατίων παρακολούθησης σε φρεάτια άντλησης θα πρέπει να εξετασθούν από οικονομικής πλευράς ως λύσεις.

Πίνακας 3.3. Μέσες μετρήσεις παραμέτρων βιοαερίου στα φρεάτια περιβαλλοντικής παρακολούθησης του ΧΥΤΑ (2014)

Σημείο	CH ₄	CO ₂	O ₂ (%)
1	26,79	23,13	2,04
2	12,60	19,35	4,14
3	26,74	29,16	2,24
4	25,81	31,38	3,03
5	51,99	41,61	0,35
6	26,58	21,28	5,40
7	35,75	30,03	2,90
8	40,88	27,97	3,38
9	0,03	3,96	9,93
10	10,90	18,14	5,91
11	34,33	26,05	3,93
12	5,93	7,75	9,35
13	17,11	19,40	5,64
14	43,42	36,42	1,80
15	47,31	37,20	1,19
16	14,35	16,54	6,85
17	43,81	38,21	1,23
18	0,00	7,75	9,72
19	0,00	4,61	9,73
20	0,00	7,47	9,23
21	0,00	1,53	11,24
22	0,00	3,92	9,87

Πίνακας 3.4. Μέσες μετρήσεις παραμέτρων βιοαερίου στο ΧΑΔΑ Α' (2014)

Σημείο Ελέγχου/ Φρεάτιο	Μετρούμενες Παράμετροι		
	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Δ 1.1	55,4	41,1	0,1
Δ 1.2	56,4	39	0,1
Δ 1.3	53,4	42,1	0,1
Δ 1.4	56,1	39	0,1
Δ 2.1	41,8	36,9	0,5
Δ 2.2	53,7	42,3	0,1
Δ 3.1	58,7	35,5	0,1
Δ 3.2	47,2	25,4	2,4
Δ 3.3	59	35,6	0,1
Δ 3.8	44,9	35,2	1,7
Δ 4.1	0	0,3	11,2
Δ 4.8	53,8	42,3	0,1
Δ 4.9	46,3	40,9	0,1
Δ 5.6	53,1	40,9	0,1
Δ 5.7	52,6	43,3	0,1
Δ 5.8	53,9	44,2	0,1
Δ 6.1	12,6	15,1	0,1
Δ 6.2	52,6	42,8	0,1
Δ 6.7	53,1	43,4	0,1
Δ 6.8	52,7	43,7	0,1
Δ 7.1	52,4	41,6	0,3
Δ 7.2	53,3	42	0,1

Πίνακας 3.5: Μέσες μετρήσεις παραμέτρων βιοαερίου στο Κύτταρο Α' (2014)

Σημείο Ελέγχου/Φρεάτιο	Μετρούμενες Παράμετροι		
	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Δ 1.1	50,9	44,7	0,2
Δ 1.2	49,6	47	0,2
Δ 1.3	51,1	44,8	0,1
Δ 1.4	52,2	44,7	0,1
Δ 1.5	50,6	45,7	0,1
Δ 1.6	50,5	45,5	0,1
Δ 2.1	50,1	46,1	0,1
Δ 2.2	51,1	44,4	0,1
Δ 2.3	50,2	45,6	0,1
Δ 2.4	51,6	44,3	0,1
Δ 2.5	51,4	44,4	0,1
Δ 2.6	50,5	45,7	0,1
Δ 2.7	49,2	47,2	0,1
Δ 3.1	50,6	45,6	0,1
Δ 3.2	49,9	46,7	0,1
Δ 3.3	50,5	46,4	0,1
Δ 3.4	50,6	46	0,1
Δ 3.5	49,2	47,6	0,1
Δ 3.6	49,3	47,7	0,1
Δ 3.7	49,8	47,1	0,1
Δ 3.8	50,7	45,9	0,1

Πίνακας 3.6: Μέσες μετρήσεις παραμέτρων βιοαερίου στο ΧΑΔΑ Α' (2014)

Σημείο Ελέγχου/Φρεάτιο	Μετρούμενες Παράμετροι		
	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)
Δ 1.1	39,10	36,14	2,16
Δ 1.2	19,10	19,59	6,86
Δ 1.3	46,30	43,03	0,94
Δ 1.4	44,07	41,47	1,42
Δ 1.5	43,69	40,40	1,43
Δ 1.6	30,54	28,41	4,53
Δ 2.1	31,55	32,13	4,15
Δ 2.2	49,47	42,26	1,19
Δ 2.3	45,69	41,16	1,86
Δ 2.4	43,27	39,98	2,18
Δ 2.5	45,34	42,44	1,43
Δ 2.6	48,73	43,22	0,98
Δ 3.1	35,23	35,08	3,63
Δ 3.2	47,13	42,83	1,32
Δ 3.3	44,66	44,32	1,06
Δ 3.4	20,26	19,72	6,50
Δ 3.5	13,71	14,17	8,40

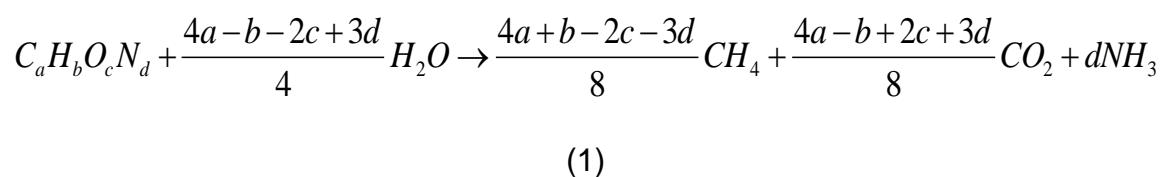
Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση Παραγωγής Βιοαερίου -

Εκτίμηση Κλάσματος Μεθανίου και Ποσότητας Βιοαερίου

4.1. Θεωρητική Εκτίμηση του Παραγόμενου Βιοαερίου

Ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου σε ένα χώρο απόθεσης είναι ιδιαίτερα δύσκολο να υπολογιστεί και εξαρτάται από μία σειρά παραμέτρων, όπως η σύνθεση, ο ρυθμός διάθεσης και η αρχική συμπίεση των απορριμμάτων, καθώς επίσης η περιεχόμενη υγρασία, η θερμοκρασία και η ηλικία τους.

Η μεθανική ζύμωση των οργανικών ενώσεων των απορριμμάτων εκφράζεται συνοπτικά από την ακόλουθη χημική αντίδραση:



Από τη στοιχειομετρία της αντίδρασης (1) προκύπτει ότι 1 mol C = 1 mol βιοαερίου (CH₄+CO₂) που σημαίνει ότι 1 kg ΑΣΑ μπορεί να παράξει 1,87 m³ βιοαερίου σε Κ.Σ. Η ποσότητα του βιοαερίου που μπορεί να παραχθεί προκύπτει με βάση την ποσότητα του οργανικού άνθρακα στα απορρίμματα, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ότι μέρος του άνθρακα αυτού είναι μη βιοαποικοδομήσιμο.

Συνεπώς, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η ουσιαστική δυνατότητα βιοαποδόμησης των ΑΣΑ. Η ποσότητα του βιοαποδομήσιμου οργανικού άνθρακα ενός συστατικού *i* δίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (Andreottola and Cossu, 1988):

$$C_{e,i} = C_i f_{b,i} (1 - u_i) P_i$$

(2)

όπου:

$C_{e,i}$, η ποσότητα βιοαποδομήσιμου οργανικού άνθρακα του συστατικού i (kg βιοαποδομήσιμου οργανικού άνθρακα / kg ΑΣΑ)

C_i , η ποσότητα οργανικού άνθρακα του συστατικού i (kg οργανικού άνθρακα / kg ξηρού βάρους του συστατικού i),

$f_{b,i}$, το βιοαποδομήσιμο κλάσμα του c_i (kg βιοαποδομήσιμου οργανικού άνθρακα / kg οργανικού άνθρακα),

u_i , η περιεχόμενη υγρασία του συστατικού i (kg νερού / kg υγρού βάρους του συστατικού i),

ρ_i , το υγρό βάρος του συστατικού i .

Σύμφωνα με την εξίσωση (2), η ποσότητα του βιοαποδομήσιμου άνθρακα υπολογίζεται για κάθε συστατικό ξεχωριστά, οπότε ο συνολικός βιοαποδομήσιμος άνθρακας, C_e , είναι το άθροισμα των $C_{e,i}$ κάθε συστατικού. Η συνολική παραγωγή του βιοαερίου για το σύνολο του βάρους των απορριμμάτων (ή αλλιώς «ειδική παραγωγή βιοαερίου») ισούται με:

$$Y = 1,867 \sum_i c_{e,i}$$

(3)

Η αντίδραση της αποσύνθεσης της οργανικής ύλης περιγράφεται με κινητική 1^{ης} τάξης,

$$\frac{dC_g}{dt} = k(C_e - C_g)$$

(4)

όπου:

C_g , η ποσότητα άνθρακα που μετατρέπεται σε αέρια μορφή

C_e , η ολική ποσότητα άνθρακα μετατρέψιμου σε αέριο

k , η σταθερά της ταχύτητας της αντιδράσεως, t^{-1} .

Η λύση του ρυθμού αποσύνθεσης δίνει τη συγκέντρωση του παραγόμενου αερίου συναρτήσει του χρόνου, ως εξής:

$$C_g = C_e(1 - e^{-kt})$$

(5)

Επομένως, προκύπτει η εξίσωση υπολογισμού του παραγόμενου βιοαερίου:

$$Q(t) = Y(1 - e^{-kt}) = 1,867 \sum_i c_{e,i} (1 - e^{-kt})$$

(6)

όπου:

$Q(t)$, η συσσωρευμένη ποσότητα του αερίου που έχει παραχθεί ανά τόνο απορριμμάτων ηλικίας t (m^3 αερίου/tn ΑΣΑ),

t , ηλικία απορριμμάτων (έτη)

Y , η ειδική παραγωγή βιοαερίου, που υπολογίζεται από τη σχέση (3)

Γίνεται λοιπόν εύκολα αντιληπτό ότι είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η ειδική παραγωγή βιοαερίου Y , καθώς και να γίνει εκτίμηση της σταθεράς της ταχύτητας k , ώστε να μπορέσει τελικά να εκτιμηθεί ο ρυθμός παραγωγής του βιοαερίου στο χώρο.

4.2. Υπολογισμός του Παραγόμενου Βιοαερίου με Βάση το Μοντέλο LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) v3.2 της EPA

4.2.1. Εισαγωγή

Μια σειρά από συστηματικές παραδοχές πρέπει να μελετηθεί και αξιολογηθεί για τη διαμόρφωση ενός μοντέλου εκτίμησης του παραγόμενου βιοαερίου με προσπάθεια αναπαράστασης των πραγματικών συνθηκών του πεδίου (ΧΥΤΑ). Οι παραδοχές αυτές είναι (Rajaram et al., 2011):

- Ισχύς: Η εφαρμογή της μικροβιακής κινητικής, με βάση τις μελέτες πληθυσμού μικροβιακής ανάπτυξης σε κλίμακα εργαστηρίου

- Επαλήθευση: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου για ένα συγκεκριμένο ΧΥΤΑ και σύγκριση με τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο
- Βαθμονόμηση: Χρησιμοποιώντας αναλυτικές μετρήσεις από ένα ΧΥΤΑ για ρύθμιση των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου
- Τοποθεσία: γεωγραφικές συντεταγμένες
- Κατάσταση: Η περιεκτικότητα σε υγρασία, η θερμοκρασία, η σύνθεση των αποβλήτων, η πυκνότητα και η σύνθεση του βιοαερίου και ο μικροβιακός πληθυσμός
- Χρόνος: σχετίζεται με αλλαγές στη θέση και τις συνθήκες των εισερχόμενων ποσοτήτων οργανικής σύνθεσης ή αποσύνθεσης.

Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα εκτίμησης βιοαερίου χρησιμοποιούν απλές εμπειρικές συναρτήσεις για το ρυθμό της αποσύνθεσης των αποβλήτων. Μπορούν να λαμβάνουν υπόψη μόνο την μικροβιακή ανάπτυξη και την αποικοδόμηση από τους μικροοργανισμούς και γενικά χρησιμοποιούν απλές κινητικές μηδενικής ή 1^{ης} τάξης. Βασίζονται σε παραμέτρους εισόδου που είναι ειδικές σε κάθε περίπτωση. Το πλεονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι ότι παρέχουν μια γρήγορη εκτίμηση της παραγωγής CH₄ (U.S. EPA Handbook, 2015).

Οι βασικές παράμετροι των μοντέλων αυτών είναι το δυναμικό του CH₄ στα απορρίμματα και η χρονική περίοδος και κινητική σταθερά για την κινητική του CH₄. Τα σύνθετα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τα διαφορετικά κλάσματα των αποβλήτων και χρησιμοποιούν παραδοχές, όπως για παράδειγμα ότι η τοποθέτηση των αποβλήτων είναι είτε στιγμιαία είτε με χρονική υστέρηση της παραγωγής CH₄. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες, τα απόβλητα τοποθετούνται συνεχώς επί σειρά

ετών σε διάφορες ετήσιες ποσότητες. Αυτό μπορεί να έχει αντίκτυπο στην εκπομπή του βιοαερίου (U.S. EPA Handbook, 2015).

Οι εκτιμώμενες τιμές του παραγόμενου βιοαερίου και οι πραγματικές εκπομπές διαφέρουν για τους εξής λόγους (Rajaram et al., 2011):

- Τα μοντέλα δεν απεικονίζουν με ακρίβεια όπως και δεν αποτυπώνουν πλήρως την πραγματική λειτουργία και τις πραγματικές συνθήκες ενός ΧΥΤΑ
- Τα απόβλητα υποτίθεται ότι αποτίθενται στιγμιαία και η παραγωγή CH_4 υποτίθεται ότι ξεκινά αμέσως μετά την τοποθέτηση των αποβλήτων
- Η φυσικοχημική σύνθεση των αποβλήτων υποτίθεται ότι είναι ομοιογενής
- Υπάρχουν ανακριβή δεδομένα για τα εισερχόμενα απόβλητα
- Το ανακτήσιμο CH_4 εξαρτάται από τον αριθμό των φρεατίων αερίου που έχουν εγκατασταθεί στο ΧΥΤΑ.

4.2.2. Περιγραφή και Δυνατότητες του Μοντέλου LandGEM

Το LandGEM είναι υπολογιστικό μοντέλο εκπομπών βιοαερίου που καλύπτει το σύνολο των πιθανών ρύπων που μπορεί να προέλθουν από τη διαδικασία αποδόμησης των απορριμμάτων. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται ευρέως από την Αμερικάνικη Υπηρεσία Περιβάλλοντος EPA (Environmental Protection Agency).

Πιο συγκεκριμένα το LandGEM (Rajaram et al., 2011; U.S. EPA Handbook, 2015):

- Υπολογίζει τις εκπομπές από μία απόθεση απορριμμάτων με βάση τον ετήσιο ρυθμό απόθεσης, τη χρονική διακύμανση αυτού και τη συνολική δυναμικότητα του χώρου.
- Περιλαμβάνει υπολογισμούς όχι μόνο για τους βασικούς ρύπους (CH_4 και CO_2) αλλά και για τα ιχνοστοιχεία που αποτελούν λιγότερο από 1% του παραγόμενου βιοαερίου. Ιδιαίτερη επίσης σημασία δίνεται και στον υπολογισμό των μη μεθανιούχων οργανικών συστατικών (NMOCs) που διαδραματίζουν σοβαρό ρόλο στις φωτοχημικές αντιδράσεις.
- Βασίζεται σε μαθηματικούς υπολογισμούς που θεωρούν τη διαδικασία αποδόμησης των απορριμμάτων ως αντίδραση πρώτης τάξης, ως προς το ρυθμό. Χρησιμοποιούνται δύο βασικές παράμετροι: Η παράμετρος L_0 , που παριστάνει τη συνολική δυνατότητα παραγωγής μεθανίου από τα απορρίμματα και η παράμετρος k , που συμβολίζει το ρυθμό πτώσης της παραγωγής βιοαερίου με το χρόνο. Πρακτικά, η τελευταία παράμετρος δείχνει πόσο γρήγορα μειώνεται ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου, αφού έχει φτάσει στη μέγιστη τιμή του. Θεωρείται ότι ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής βιοαερίου για κάθε απόθεση εντοπίζεται ένα χρόνο αφού τα απορρίμματα αποτεθούν στον χώρο υγειονομικής ταφής και ότι από το πέρας αυτής της χρονικής περιόδου και μετά, ο ρυθμός παραγωγής μειώνεται.
- Δίνει τη δυνατότητα να διαμορφωθούν οι τιμές των L_0 και k με βάση πειραματικά ή άλλα δεδομένα πεδίου. Επίσης, προσφέρει τη δυνατότητα προσαρμογής των παραμέτρων και δημιουργίας νέων προτύπων με συγκεκριμένη τοπική ισχύ.

Τα δεδομένα εισόδου του υπολογιστικού πακέτου που είναι απαραίτητα ως μεταβλητές εισόδου, είναι τα έτη έναρξης των απορριμματικών αποθέσεων και του κλεισίματος του κάθε κυττάρου, καθώς και οι ετήσιες εισερχόμενες ποσότητες των απορριμμάτων. Σημαντικές παράμετροι για τον υπολογισμό του παραγόμενου CH₄ είναι η ειδική παραγωγή CH₄/tn ΑΣΑ και η σταθερά του ρυθμού βιοαποδόμησης του οργανικού φορτίου.

Η παράμετρος L_0 είναι σημαντική και εξαρτάται από την σύνθεση των απορριμμάτων (Cho et al., 2012). Αν για κάθε συστατικό i των ΑΣΑ γνωρίζουμε το κλάσμα % κατά βάρος w_i και την ειδική παραγωγή $L_{0,i}$, τότε είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε το L_0 , βάσει της ακόλουθης σχέσης:

$$L_0 = \sum_i w_i L_{0,i}$$

(7)

Η συνολική παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου, σύμφωνα με το μοντέλο LandGEM, δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

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

(8)

όπου:

Q_{CH_4} , το ετήσιο δυναμικό CH₄ (m³/yr),

L_0 , το δυναμικό παραγωγής CH₄/tn ΑΣΑ

k , ο ρυθμός παραγωγής CH_4 (yr^{-1})

n , το έτος υπολογισμού από το χρόνο απόθεσης

i , το ετήσιο χρονικό βήμα

j , το χρονικό βήμα ίσο με $1/10$ του έτους

M_i , η ετήσια ποσότητα των αποβλήτων που τοποθετούνται το έτος i (απόβλητα με υγρασία)

$t_{i,j}$, η ηλικία του j -οστού τμήματος της ποσότητας M_i των ΑΣΑ το έτος i .

4.2.3. Εφαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου για την εκτίμηση του παραγόμενου Βιοαερίου από τους ΧΑΔΑ Α' και Β' και τα κύτταρα Α', Β'

Η τιμή του δυναμικού παραγωγής CH_4 ανά τόνο ΑΣΑ θεωρήθηκε ίση με $L_0 \text{ m}^3/\text{tn}$ ΑΣΑ που είναι ενδεικτική για αστικά απορρίμματα, όπως η σύσταση των εισερχόμενων αποβλήτων του Πίνακα 3.1, υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (7). Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται η τιμή L_0 , το δυναμικό παραγωγής CH_4/tn ΑΣΑ.

Ο ρυθμός ελάττωσης βιοαποικοδόμησης θεωρήθηκε ίσος με $0,04 \text{ yr}^{-1}$ σύμφωνα με τις συνθήκες βροχόπτωσης της περιοχής. Για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υπολογιστικού μοντέλου ανά τμήμα του ΧΥΤΑ και συνολικά, χρησιμοποιήθηκε μία περίοδος 45 ετών.

Το μοντέλο υπολογίζει την τιμή της παραγόμενης ποσότητας CH_4 , την οποία αποτιμά ως κλάσμα στο 50% του συνολικά παραγόμενου βιοαερίου. Ωστόσο, η αναλογία CH_4 /βιοαέριο είναι σταθερή για 20 χρόνια, όσο διαρκεί η 4^η φάση. Το μοντέλο συνεχίζει να υπολογίζει την ίδια αναλογία για όλη την περίοδο προσομοίωσης, γεγονός που υπό κανονικές συνθήκες δεν ισχύει, καθώς μετά το τέλος της 4^{ης} φάσης, τόσο το ποσοστό του μεθανίου όσο και το κλάσμα του CO_2 στο βιοαέριο μειώνονται.

Για να προσεγγιστεί μια πιο κοντινή τιμή της εκτίμησης του πραγματικού βιοαερίου, από το μοντέλο LandGEM, χρησιμοποιήθηκε μόνο η παραγόμενη ποσότητα CH_4 . Η αναλογία για τα πρώτα 20 έτη εκτιμήθηκε σε ποσοστό κλάσματος (% vol.) 50% ως προς το CH_4 και 50% ως προς το CO_2 .

4.3. Μοντελοποίηση της Ελάττωσης του Κλάσματος του Μεθανίου (CH_4) στο Βιοαέριο σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο LandGEM

Το μοντέλο LANDGEM, όπως και αρκετά μοντέλα υπολογισμού του βιοαερίου, κάνει μία εκτίμηση, σύμφωνα με την εξίσωση (8), της παραγόμενης ποσότητας του μεθανίου. Τα αποτελέσματα όμως του μοντέλου παρουσιάζονται με βάση μια σταθερή αναλογία CH_4 /LFG ίση με 50%. Η τιμή αυτή του ποσοστού του κλάσματος θεωρείται σταθερή για την φάση της μεθανογένεσης που διαρκεί περίπου 15 με 20 έτη. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, κατά την φάση της ωρίμανσης, η οποία ξεκινά μετά το στάδιο της μεθανογένεσης, το ποσοστό του παραγόμενου CH_4 στο μείγμα του βιοαερίου αρχίζει να φθίνει.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έχει ληφθεί υπόψη η μείωση του ποσοστού του κλάσματος του μεθανίου σύμφωνα με το μοντέλο των Bozkurt et al., 1999. Σε κάθε κελί απόθεσης που θεωρείται ότι καταλαμβάνει όγκο V_j υπάρχει εισροή ατμοσφαιρικού αέρα, είτε λόγω της παροχής άντλησης του βιοαερίου είτε και λόγω της διάχυσης του ατμοσφαιρικού αέρα μέσα στο κελί. Με βάση την ανάπτυξη των ισοζυγίων μάζας για κάθε ένα από τα κύρια συστατικά του αέρα (N_2 , O_2 και CO_2), προέκυψε το εξής σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την τύχη κάθε συστατικού i σε ένα κελί απόθεσης j , όπως αυτό προσομοιώνεται στην Εικόνα 4.1.

$$\varepsilon_p \frac{\partial(c_i V_j)}{\partial t} + q_j \frac{\partial(c_i V_j)}{\partial x} = D_2 \frac{\partial^2(c_i V_j)}{\partial x^2} + R_i V_j$$

(10)

όπου:

ε_p , το πορώδες των απορριμμάτων σε ένα κελί j

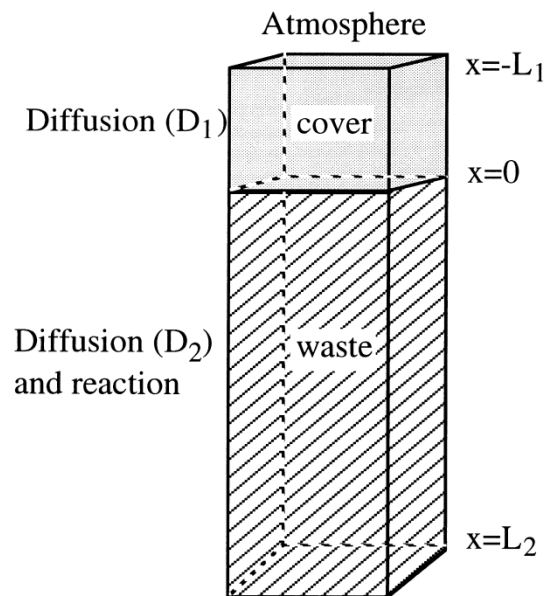
c_i , η συγκέντρωση του συστατικού i (mol/m^3)

V_j , ο όγκος του κελιού j (m^3)

D_2 , ο συντελεστής διάχυσης στο κελί (m^2/hr)

R_i , ο ρυθμός αντίδρασης του συστατικού i ($mg/m^3 hr$).

Γνωρίζοντας τη συμπεριφορά και κατάληξη των παραπάνω συστατικών του αέρα, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μια εκτίμηση του ρυθμού ελάττωσης του μεθανίου στο βιοαέριο.



Εικόνα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός κελιού απόθεσης ΑΣΑ ως «στήλη»

(Πηγή: Bozkurt et al., 1999)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1, ένα κελί έχει κάλυψη μεταξύ των απορριμμάτων και της ατμόσφαιρας. Με D_1 συμβολίζεται ο συντελεστής διάχυσης στο στρώμα κάλυψης (m^2/hr), L_1 είναι το πάχος της κάλυψης σε m και L_2 το μέσο πάχος του κελιού, που προκύπτει από το λόγο του όγκου προς την επιφάνεια που καλύπτει το εν λόγω κελί.

Με βάση το παραπάνω σχήμα διαμορφώνονται οι αρχικές και οριακές συνθήκες για κάθε ένωση της εξίσωσης (10).

Οριακές συνθήκες:

Ο.Σ.1:
$$D_2 \frac{dc_i}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{D_1}{L_1} (c_i(x=0) - c_i(x=-L_1))$$
,

Ο.Σ.2:
$$\frac{dc_i}{dx} \Big|_{x=L_2} = 0$$

Και αρχικές συνθήκες:

$c_{O_2} = 0$ και $c_{N_2} = 0$, ενώ για τη c_{CO_2} η αρχική συνθήκη σε κάθε χρονική στιγμή εξαρτάται από το CO_2 που υπάρχει από τη φάση της μεθανογένεσης.

Ο όρος της αντίδρασης της εξίσωσης (10) αναφέρεται σε κινητική 1^{ης} τάξης ως προς το O_2 , λόγω των αερόβιων αντιδράσεων, ενώ το N_2 θεωρείται ότι είναι αδρανές. Η χρήση του παραπάνω απλοποιημένου μοντέλου, έχει ως σκοπό να εκτιμήσει την τύχη του κλάσματος του μεθανίου στο χρόνο, λόγω άντλησης (ο όρος q στην εξίσωση 10) και λόγω ελλιπούς σφραγίσματος ενός κελιού (όρος της διάχυσης). Εφαρμόζοντας το μοντέλο LandGEM σε συνδυασμό με το μοντέλο της εισόδου του ατμοσφαιρικού αέρα, προκύπτει το κλάσμα CH_4/LFG για κάθε κελί απόθεσης του ΧΥΤΑ.

4.3.1. Επιλογή Δυναμικού Παραγωγής και Σταθεράς της Κινητικής Παραγωγής για τους ΧΑΔΑ και τα Κύτταρα Α' και Β'

Σύμφωνα με τους Fei et al. (2016), το μέσο δυναμικό παραγωγής CH_4 που προέκυψε από μελέτες σε 57 ΧΥΤΑ, υπολογίστηκε στα $88 \text{ m}^3CH_4/\text{tn}$. Η τιμή που

χρησιμοποιεί η ΕΡΑ είναι $100 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tn}$. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται η τιμή **$L_0 = 88 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tn}$** (ΧΑΔΑ Α' και Β'), για τις περιπτώσεις που τα ΑΣΑ δεν περιέχουν προϊόντα του εργοστασίου βιοξήρανσης. Η τιμή του L_0 που επιλέχθηκε έχει παρατηρηθεί σε αντίστοιχους ΧΥΤΑ. Για την περίπτωση των ΚΥΤΤΑΡΩΝ Α' και Β', η τιμή του δυναμικού εκτιμήθηκε στα **$L_0 = 68 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tn}$ και $L_0 = 79 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tn}$** , αντίστοιχα, δηλαδή κατά 15% και 10% μικρότερη σε σχέση με τους ΧΑΔΑ, λόγω της απόθεσης των συμπιεσμένων και βιοξηραμένων απορριμμάτων που δέχθηκαν τα πιο πάνω κύτταρα κατά την περίοδο αποθέσεων. Η σταθερά της κινητικής παραγωγής του CH_4 επιλέχθηκε ίση με **$k = 0,04 \text{ yr}^{-1}$** σύμφωνα με τις συνθήκες βροχόπτωσης της περιοχής του Ηρακλείου.

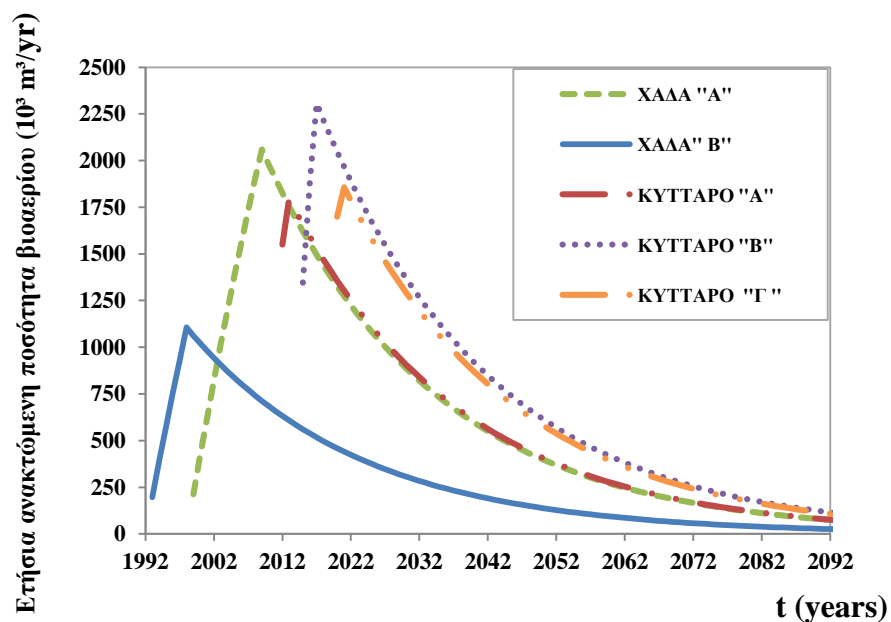
4.3.2. Εφαρμογή του Υπολογιστικού Μοντέλου για την εκτίμηση του Παραγόμενου Βιοαερίου από τη Σταθεροποιημένη Ιλύ

Σε διακριτή θέση στον παλιό ΧΑΔΑ των Πέρα Γαλήνων πραγματοποιούνταν, για τη δεκαετία 2001-2010, η απόθεση της αφυδατωμένης-σταθεροποιημένης ιλύος από την ΕΕΛ Ηρακλείου. Η έκταση αυτού του τμήματος του χώρου ήταν 10 στρέμματα, και το μέσο βάθος 6 m. Η ποσότητα της ιλύος που είχε αποτεθεί, τα τελευταία 10 έτη λειτουργίας του ΧΑΔΑ, εκτιμάται σε 60.000 tn.

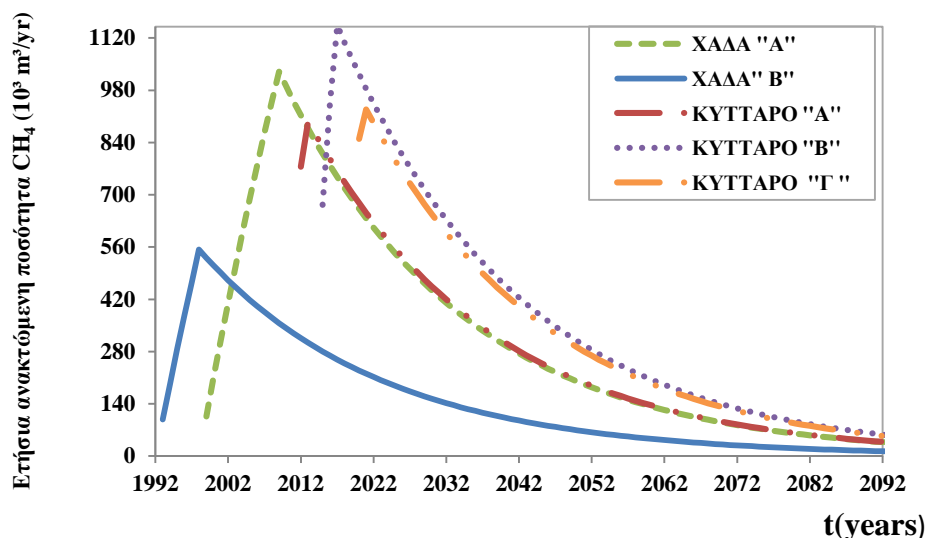
Η διαδικασία εκτίμησης ακολουθήθηκε λοιπόν και για την περίπτωση της χωνευμένης ιλύος που αποτέθηκε στον ΧΥΤΑ την προαναφερθείσα χρονική περίοδο. Στην περίπτωση της ιλύος, έγινε η παραδοχή της ισόποσης διάθεσης ιλύος

με ρυθμό 6000 tn ετησίως. Η ειδική παροχή CH_4 ανά τόνο χωνευμένης ιλύος εκτιμάται σε $L_0 = 90 \text{ m}^3/\text{tn}$ και η σταθερά του ρυθμού βιοαποικοδόμησης του οργανικού φορτίου σε $k = 0,04 \text{ yr}^{-1}$ (Cho et al., 2012). Η εισαγωγή των ποσοτήτων και των παραμέτρων μπορεί να πραγματοποιηθεί στο LandGEM, όπως ακριβώς και με τα ΑΣΑ.

4.3.3. Αποτελέσματα Μοντελοποίησης για κάθε Τμήμα του ΧΥΤΑ σύμφωνα με το Μοντέλο LandGEM της EPA και με το Τροποποιημένο LandGEM



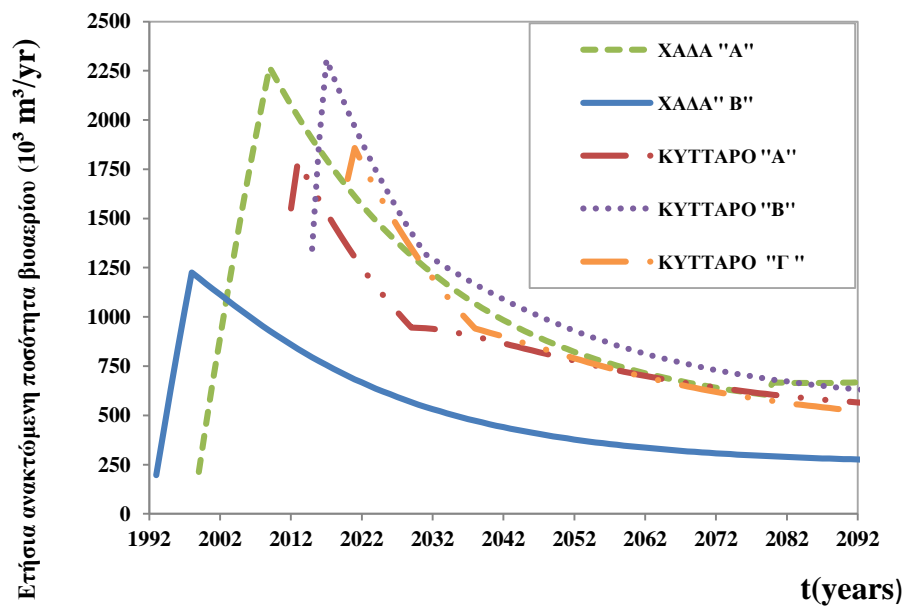
Γράφημα 4.1: Ετήσια ανακτώμενη ποσότητα βιοαερίου στα επιμέρους τμήματα του ΧΥΤΑ, σύμφωνα με το μοντέλο LandGEM της EPA, για ποσοστά ανάκτησης 50% για τους αποκατεστημένους ΧΑΔΑ, 75% για τα ΚΥΤΤΑΡΑ Α' και Β' και 90% για το ΚΥΤΤΑΡΟ Γ'



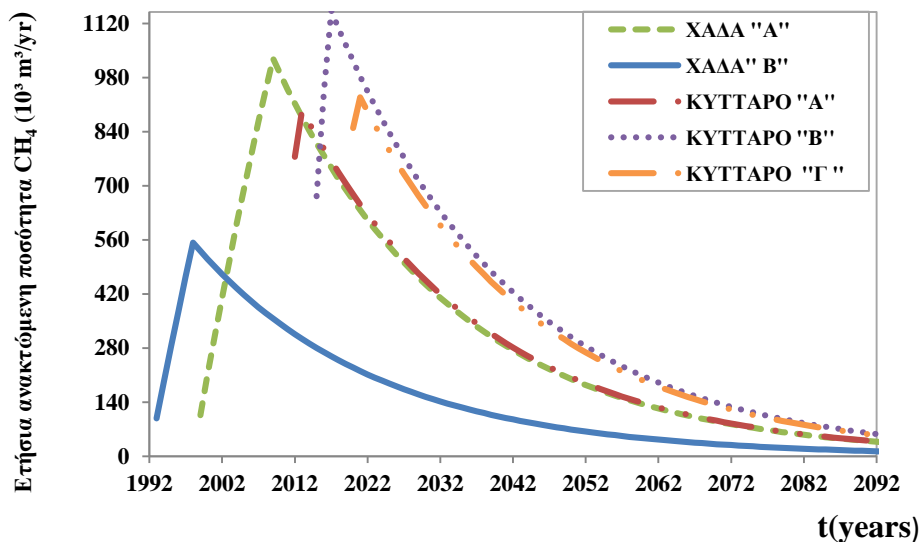
Γράφημα 4.2: Ετήσια ανακτώμενη ποσότητα μεθανίου στα επιμέρους τμήματα του ΧΥΤΑ, σύμφωνα με το μοντέλο LandGEM της EPA, για ποσοστά ανάκτησης 50% για τους αποκατεστημένους ΧΑΔΑ, 75% για τα ΚΥΤΤΑΡΑ Α' και Β' και 90% για το ΚΥΤΤΑΡΟ Γ'

Παρατηρώντας τα Γραφήματα 4.1 και 4.2, παρατηρείται ότι παρά το γεγονός ότι ο ΧΑΔΑ Α' είναι παλιότερο τμήμα σε σχέση με τα Κύτταρα Α' και Β', παρουσιάζει αξιοσημείωτες ποσότητες παραγόμενου βιοαερίου παρά το γεγονός ότι η απόδοση του συλλεγόμενου βιοαερίου είναι μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο τμήμα του ΧΥΤΑ είναι το μεγαλύτερο, αφού δέχθηκε τις περισσότερες ποσότητες απορριμματικής μάζας σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα. Αμέσως μετά ακολουθεί το Κύτταρο Β' ως το 2^ο σε μέγεθος τμήμα. Φυσιολογικά, το βιοαέριο δείχνει να αυξάνεται περίπου για 15 χρόνια (για το εκάστοτε τμήμα), ενώ σταδιακά με την πάροδο του χρόνου μειώνεται.

Εν συνεχεία, ακολουθούν τα γραφήματα για το τροποποιημένο μοντέλο LandGEM:



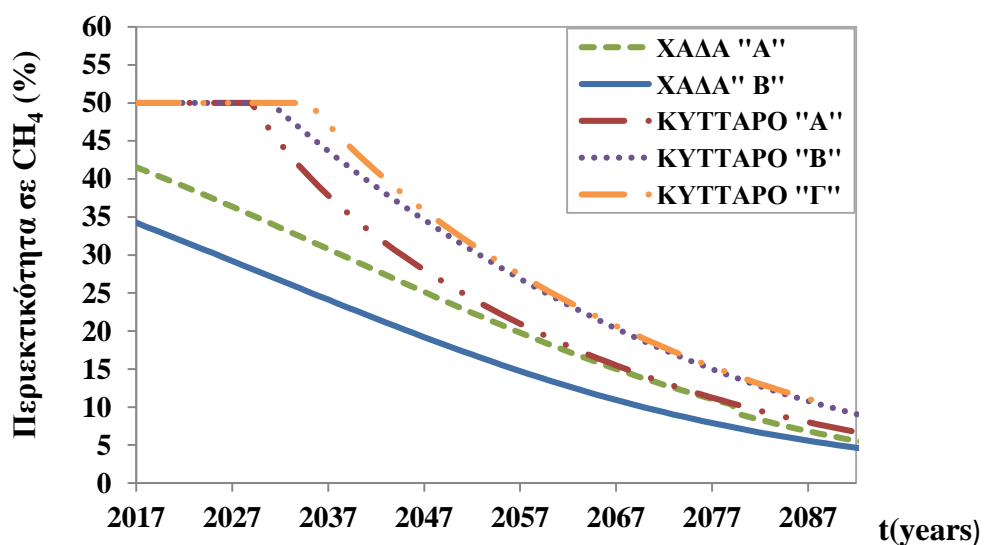
Γράφημα 4.3: Ετήσια ανακτώμενη ποσότητα βιοαερίου στα επιμέρους τμήματα του ΧΥΤΑ, σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο LANGEM για ποσοστά ανάκτησης 50% για τους αποκατεστημένους ΧΑΔΑ, 75% για τα ΚΥΤΤΑΡΑ Α' και Β' και 90% για το ΚΥΤΤΑΡΟ Γ'



Γράφημα 4.4.: Ετήσια ανακτώμενη ποσότητα μεθανίου στα επιμέρους τμήματα του ΧΥΤΑ, σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο LandGEM, για ποσοστά ανάκτησης 50% για τους αποκατεστημένους ΧΑΔΑ, 75% για τα ΚΥΤΤΑΡΑ Α' και Β' και 90% για το ΚΥΤΤΑΡΟ Γ'

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, από τα γραφήματα για την ανακτώμενη παραγωγή μεθανίου για το μοντέλο LandGEM (4.2) και για το τροποποιημένο LandGEM (4.4), οι τιμές είναι ίδιες. Η διαφορά των δύο μοντέλων αντικατοπτρίζεται στην εκτίμηση του ανακτώμενου βιοαερίου (Γραφήματα 4.1 και 4.3). Αυτό εξηγείται στην παραδοχή του κλασικού μοντέλου LandGEM, ότι το κλάσμα του CH_4 στο βιοαέριο είναι σταθερό (50% v/v), ενώ σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο LandGEM το κλάσμα του CH_4 φθίνει με το χρόνο, λόγω και της εισχώρησης αέρα στο σώμα του ΧΥΤΑ.

4.3.4. Μακροχρόνια πρόβλεψη του ποσοστού του CH_4 στο Βιοαέριο σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο LandGEM



Γράφημα 4.5: Μακροχρόνια πρόβλεψη για την ελάττωση του ποσοστού του κλάσματος του CH_4 στο βιοαέριο, σύμφωνα με το τροποποιημένο μοντέλο LandGEM, για τα επιμέρους τμήματα και για το σύνολο του ΧΥΤΑ.

Στο Γράφημα 4.5 και σύμφωνα με τη μακροχρόνια πρόβλεψη, η συγκέντρωση του μεθανίου στο βιοαέριο φαίνεται να μειώνεται με την παραδοχή και της έγχυσης αέρα στα κελιά απόθεσης, παρόλα αυτά η παραγωγή βιοαερίου σε βάθος χρόνου παραμένει εκμεταλλεύσιμη, χρησιμοποιώντας κατάλληλη τεχνολογία και συγκεκριμένα Gradual Oxidizers, η οποία δύναται να λειτουργήσει σε συγκέντρωση βιοαερίου 1,5%. Επίσης, για την 20ετία μελέτης (2018-2037) των σεναρίων του κεφαλαίου 5, ο μέσος όρος συγκέντρωσης του μεθανίου παραμένει πάνω από 40%.

Να σημειωθεί ότι εικόνες του περιβάλλοντος εργασίας από την εκτέλεση του μοντέλου LandGEM βρίσκονται στο Παράρτημα της εργασίας.

Κεφάλαιο 5. Δυνατότητα Ηλεκτροπαραγωγής στο ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων και Οικονομική Ανάλυση

Σε αυτό το κεφάλαιο εκτιμάται η ηλεκτρική ισχύς (ενεργειακό δυναμικό) του βιοαερίου και η εγκατεστημένη ισχύς των τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησής, του, καθώς επίσης πραγματοποιείται οικονομική ανάλυση του έργου, καταλήγοντας στο σενάριο με την καλύτερη σχέση κεφαλαιουχικού-λειτουργικού κόστους, Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) και Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης (IRR).

Παρόλο που η άδεια ηλεκτροπαραγωγής από χρήση ΑΠΕ ορίζεται στα 25 έτη, ως χρονικός ορίζοντας λειτουργίας του σταθμού λαμβάνεται η 20ετία 2018-2037, βάσει του νόμου 20ετούς σύμβασης πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας (Ν. 4414/2016) και του νόμου για τις ΑΠΕ όσον αφορά το βιοαέριο (Ν. 3468/2006).

5.1. Εξεταζόμενα Σενάρια: Εγκατεστημένη Ισχύς Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής, Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου και Οικονομική Απόδοση

Παρόλο που η άδεια ηλεκτροπαραγωγής από χρήση ΑΠΕ ορίζεται στα **25 έτη**, ως χρονικός ορίζοντας λειτουργίας του σταθμού λαμβάνεται η 20ετία 2018-2037, βάσει του νόμου 20ετούς σύμβασης πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας (Ν. 4414/2016) και του νόμου για τις ΑΠΕ όσον αφορά το βιοαέριο (Ν. 3468/2006).

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος έγινε η χρήση της παρακάτω εξίσωσης (11):

$$P(t) = LHV_{CH_4} \cdot Q_{CH_4}(t) \cdot \eta_{ICE}$$

(11)

όπου:

$P(t)$ = η ετήσια παραχθείσα ισχύς (ηλεκτρική ισχύς βιοαερίου) (kW)

LHV = η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του CH_4 (MJ/m³)

$Q_{CH_4}(t)$ = η ετήσια παραγωγή μεθανίου (m³/yr)

η = η απόδοση της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας.

Η τιμή της κατώτερης θερμογόνου δύναμης (LHV) του CH_4 είναι 39,7 MJ/m³, ενώ η ηλεκτρική απόδοση της Μηχανής Εσωτερικής Καύσης είναι ίση με 40%. Αντιστοίχως και για τον Gradual Oxidizer, με ηλεκτρική απόδοση 29%.

Όπως διακρίνεται και από τους παρακάτω πίνακες, η είσοδος του ανακτώμενου μεθανίου από το Κύτταρο Γ' στο σύστημα παραγωγής ενέργειας, από το 2021 και μετά, αυξάνει αρκετά την ηλεκτρική απόδοση του βιοαερίου και για τις δύο τεχνολογίες.

Επίσης, να σημειωθεί ότι για τους ΧΑΔΑ Α' και Β' θεωρείται ποσοστό ανάκτησης μεθανίου 50%, το Κύτταρο Α' εξετάζεται για αποδόσεις 67, 75 και 90%, ενώ στο νεότερο Κύτταρο Β' θεωρούνται αποδόσεις 75 και 90%, ενώ στο Κύτταρο Γ' θεωρούνται αποδόσεις 75 και 90%.

Πίνακας 5.1: Εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή μεθανίου (m^3CH_4/yr) και παραγόμενη ισχύς (βάσει του μοντέλου LandGEM) από τον ΧΑΔΑ Α', θεωρώντας ανάκτηση βιοαερίου 50% και χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης με απόδοση σε ηλεκτρική ισχύ 40%

Έτος	CH ₄ (ανακτώμενο 50%) (m ³ /yr)	Ισχύς (ανάκτηση 50%) (kW)	Έτος	CH ₄ (ανακτώμενο 50%) (m ³ /yr)	Ισχύς (ανάκτηση 50%) (kW)
2018	718325	361,7	2028	481508	242,5
2019	690159	347,5	2029	462628	233,0
2020	663098	333,9	2030	444488	223,8
2021	637097	320,8	2031	427059	215,0
2022	612116	308,2	2032	410314	206,6
2023	588114	296,1	2033	394225	198,5
2024	565054	284,5	2034	378768	190,7
2025	542898	273,4	2035	363916	183,3
2026	521611	262,7	2036	349646	176,1
2027	501158	252,4	2037	335936	169,2

Πίνακας 5.2: Εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή μεθανίου (m^3CH_4/yr) και παραγόμενη ισχύς (βάσει του μοντέλου LandGEM) από τον ΧΑΔΑ Β' θεωρώντας ανάκτηση βιοαερίου 50% και χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης με απόδοση σε ηλεκτρική ισχύ 40%

Έτος	CH ₄ (ανακτώμενο 50%) (m ³ /yr)	Ισχύς (ανάκτηση 50%) (kW)	Έτος	CH ₄ (ανακτώμενο 50%) (m ³ /yr)	Ισχύς (ανάκτηση 50%) (kW)
2018	248497	125,1	2028	166572	83,9
2019	238754	120,2	2029	160041	80,6
2020	229392	115,5	2030	153766	77,4
2021	220397	111,0	2031	147736	74,4
2022	211756	106,6	2032	141944	71,5
2023	203452	102,4	2033	136378	68,7
2024	195474	98,4	2034	131030	66,0
2025	187810	94,6	2035	125893	63,4
2026	180446	90,9	2036	120956	60,9
2027	173370	87,3	2037	116214	58,5

Πίνακας 5.3: Εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή μεθανίου (m^3CH_4/yr) και παραγόμενη ισχύς (βάσει του μοντέλου LandGEM) από το ΚΥΤΤΑΡΟ Α' θεωρώντας ανάκτηση βιοαερίου 67, 75 και 90% και χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης με απόδοση σε ηλεκτρική ισχύ 40%

Έτος	CH ₄ 67% (m ³ /yr)	Ισχύς 67% (kW)	CH ₄ , 75% (m ³ /yr)	Ισχύς 75% (kW)	CH ₄ , 90% (m ³ /yr)	Ισχύς 90% (kW)
2018	801878	403,8	897624	452,0	1077149	542,4
2019	770436	388,0	862428	434,3	1034913	521,1
2020	740226	372,7	828612	417,2	994334	500,7
2021	711202	358,1	796121	400,9	955345	481,1
2022	683315	344,1	764905	385,2	917886	462,2
2023	656522	330,6	734913	370,1	881895	444,1
2024	630779	317,6	706096	355,6	847315	426,7
2025	606046	305,2	678410	341,6	814092	409,9
2026	582283	293,2	651809	328,2	782171	393,9
2027	559451	281,7	626251	315,3	751501	378,4
2028	537515	270,7	601695	303,0	722035	363,6
2029	516438	260,1	578103	291,1	693723	349,3
2030	496189	249,9	555435	279,7	666522	335,6
2031	476733	240,1	533656	268,7	640387	322,5
2032	458040	230,6	512731	258,2	615277	309,8
2033	440080	221,6	492627	248,1	591152	297,7
2034	422824	212,9	473310	238,3	567973	286,0
2035	406245	204,6	454752	229,0	545702	274,8
2036	390316	196,5	436921	220,0	524305	264,0
2037	375011	188,8	419789	211,4	503746	253,7

Πίνακας 5.4: Εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή μεθανίου (m^3CH_4/yr) και παραγόμενη ισχύς (βάσει του μοντέλου LandGEM) από το ΚΥΤΤΑΡΟ Β' θεωρώντας ανάκτηση βιοαερίου 75 και 90% και χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης με απόδοση σε ηλεκτρική ισχύ 40%

Έτος	CH ₄ , 90% (m ³ /yr)	Ισχύς 90% (kW)	CH ₄ , 75% (m ³ /yr)	Ισχύς 75% (kW)
2018	1330401	669,9	1108667	558,3
2019	1278235	643,7	1065196	536,4
2020	1228115	618,4	1023429	515,3
2021	1179959	594,2	983300	495,1
2022	1133693	570,9	944744	475,7
2023	1089240	548,5	907700	457,1
2024	1046531	527,0	872109	439,2
2025	1005495	506,3	837913	421,9
2026	966069	486,5	805058	405,4
2027	928189	467,4	773491	389,5
2028	891795	449,1	743162	374,2
2029	856827	431,5	714023	359,5
2030	823230	414,5	686025	345,4
2031	790951	398,3	659126	331,9
2032	759937	382,7	633281	318,9
2033	730139	367,7	608450	306,4
2034	701510	353,2	584592	294,4
2035	674004	339,4	561670	282,8
2036	647575	326,1	539646	271,7
2037	622184	313,3	518486	261,1

Πίνακας 5.5: Εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή μεθανίου (m^3CH_4/yr) και παραγόμενη ισχύς (βάσει του μοντέλου LandGEM) από το ΚΥΤΤΑΡΟ Γ' θεωρώντας ανάκτηση βιοαερίου 75 και 90% και χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης με απόδοση σε ηλεκτρική ισχύ 40%

Έτος	CH ₄ , 90% (m ³ /yr)	Ισχύς 90% (kW)	CH ₄ , 75% (m ³ /yr)	Ισχύς 75% (kW)
2021	1019890	513,6	849908	428,0
2022	1114690	561,3	928908	467,8
2023	1070982	539,3	892485	449,4
2024	1028989	518,1	857490	431,8
2025	988641	497,8	823868	414,9
2026	949876	478,3	791563	398,6
2027	912631	459,6	760526	383,0
2028	876846	441,5	730705	367,9
2029	842465	424,2	702054	353,5
2030	809431	407,6	674526	339,7
2031	777693	391,6	648077	326,3
2032	747199	376,3	622666	313,5
2033	717901	361,5	598251	301,3
2034	689752	347,3	574793	289,4
2035	662706	333,7	552255	278,1
2036	636721	320,6	530601	267,2
2037	611755	308,1	509796	256,7

Πίνακας 5.6: Συνολικός πίνακας για την ηλεκτρική απόδοση βιοαερίου σε ορίζοντα 20ετίας (2018-2037) με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης απόδοσης σε ηλεκτρική ισχύ 40%

Ανάκτηση CH4 50%			Ανάκτηση CH4 75%				
	ΧΑΔΑ Α'	ΧΑΔΑ Β'	Κύτταρο Α'	Κύτταρο Β'	Κύτταρο Γ'	Κύτταρα Α'+Β'+Γ'	ΧΥΤΑ
Έτος	Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)						
2018	361,7	125,1	452	558,3		1010,3	1497,1
2019	347,5	120,2	434,3	536,4		970,7	1438,4
2020	333,9	115,5	417,2	515,3		932,5	1381,9
2021	320,8	111	400,9	495,1	428	1324	1755,8
2022	308,2	106,6	385,2	475,7	467,8	1328,7	1743,5
2023	296,1	102,4	370,1	457,1	449,4	1276,6	1675,1
2024	284,5	98,4	355,6	439,2	431,8	1226,6	1609,5
2025	273,4	94,6	341,6	421,9	414,9	1178,4	1546,4
2026	262,7	90,9	328,2	405,4	398,6	1132,2	1485,8
2027	252,4	87,3	315,3	389,5	383	1087,8	1427,5
2028	242,5	83,9	303	374,2	367,9	1045,1	1371,5
2029	233	80,6	291,1	359,5	353,5	1004,1	1317,7
2030	223,8	77,4	279,7	345,4	339,7	964,8	1266
2031	215	74,4	268,7	331,9	326,3	926,9	1216,3
2032	206,6	71,5	258,2	318,9	313,5	890,6	1168,7
2033	198,5	68,7	248,1	306,4	301,3	855,8	1123
2034	190,7	66	238,3	294,4	289,4	822,1	1078,8
2035	183,3	63,4	229	282,8	278,1	789,9	1036,6
2036	176,1	60,9	220	271,7	267,2	758,9	995,9
2037	169,2	58,5	211,4	261,1	256,7	729,2	956,9

Αντιστοίχως, για τους ίδιους βαθμούς ανάκτησης βιοαερίου ανά τμήμα και για ηλεκτρική απόδοση τεχνολογίας 29%, ο συνολικός πίνακας για την ηλεκτρική απόδοση βιοαερίου σε ορίζοντα 20ετίας με χρήση Gradual Oxidizer, διαμορφώνεται ως εξής:

Πίνακας 5.7: Συνολικός πίνακας για την ηλεκτρική απόδοση βιοαερίου σε ορίζοντα 20ετίας (2018-2037) με χρήση Gradual Oxidizer απόδοσης σε ηλεκτρική ισχύ 29%

Ανάκτηση CH4 50%			Ανάκτηση CH4 75%				
	ΧΑΔΑ Α'	ΧΑΔΑ Β'	Κύτταρο Α'	Κύτταρο Β'	Κύτταρο Γ'	ΧΑΔΑ Α'+Β'	ΧΥΤΑ
Έτος	Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)						
2018	262,2	90,7	327,7	404,8		352,9	1085,4
2019	251,9	87,1	314,9	388,9		339,1	1042,8
2020	242,1	83,7	302,5	373,6		325,8	1001,9
2021	232,6	80,5	290,7	358,9	310,3	313,1	1273,0
2022	223,4	77,3	279,3	344,9	339,2	300,7	1264,0
2023	214,7	74,2	268,3	331,4	325,8	288,9	1214,4
2024	206,3	71,3	257,8	318,4	313,1	277,6	1166,9
2025	198,2	68,6	247,7	305,9	300,8	266,8	1121,1
2026	190,5	65,9	237,9	293,9	289,0	256,4	1077,2
2027	183,0	63,3	228,6	282,4	277,7	246,3	1034,9
2028	175,8	60,8	219,7	271,3	266,7	236,6	994,3
2029	168,9	58,4	211,0	260,6	256,3	227,4	955,3
2030	162,3	56,1	202,8	250,4	246,3	218,4	917,9
2031	155,9	53,9	194,8	240,6	236,6	209,8	881,8
2032	149,8	51,8	187,2	231,2	227,3	201,6	847,3
2033	143,9	49,8	179,9	222,1	218,4	193,7	814,2
2034	138,3	47,9	172,8	213,4	209,8	186,1	782,1
2035	132,9	46,0	166,0	205,0	201,6	178,9	751,5
2036	127,7	44,2	159,5	197,0	193,7	171,8	722,0
2037	122,7	42,4	153,3	189,3	186,1	165,1	693,8

5.1.1. Σενάριο 1: Χρήση 3 Μηχανών Εσωτερικής Καύσης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1500 kW (500 kW η καθεμία) για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ'

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που έδωσε το τροποποιημένο υπολογιστικό μοντέλο LandGEM, οι τιμές της συγκέντρωσης του μεθανίου εντός του κοινού δικτύου συλλογής του παραγόμενου βιοαερίου (Γράφημα 4.6), καθ' όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης 20ετούς περιόδου, παραμένουν κατά μέσω όρο άνω του 40%. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την επιλογή Μηχανών Εσωτερικής Καύσης για την ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου, χωρίς την ανάγκη παρουσίας άλλων τεχνολογιών.

Η τιμή της ηλεκτρικής ισχύος βιοαερίου για το έτος έναρξης λειτουργίας της τεχνολογίας (2018) και για το έτος λήξης, για το σύνολο του ΧΥΤΑ, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 5.6, είναι ίση με 1497,1 και 956,9 kW (1,50 και 0,96 MW), αντίστοιχα.

Πίνακας 5.8: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 3 ΜΕΚ 500 kW έκαστη, 2018-2027)

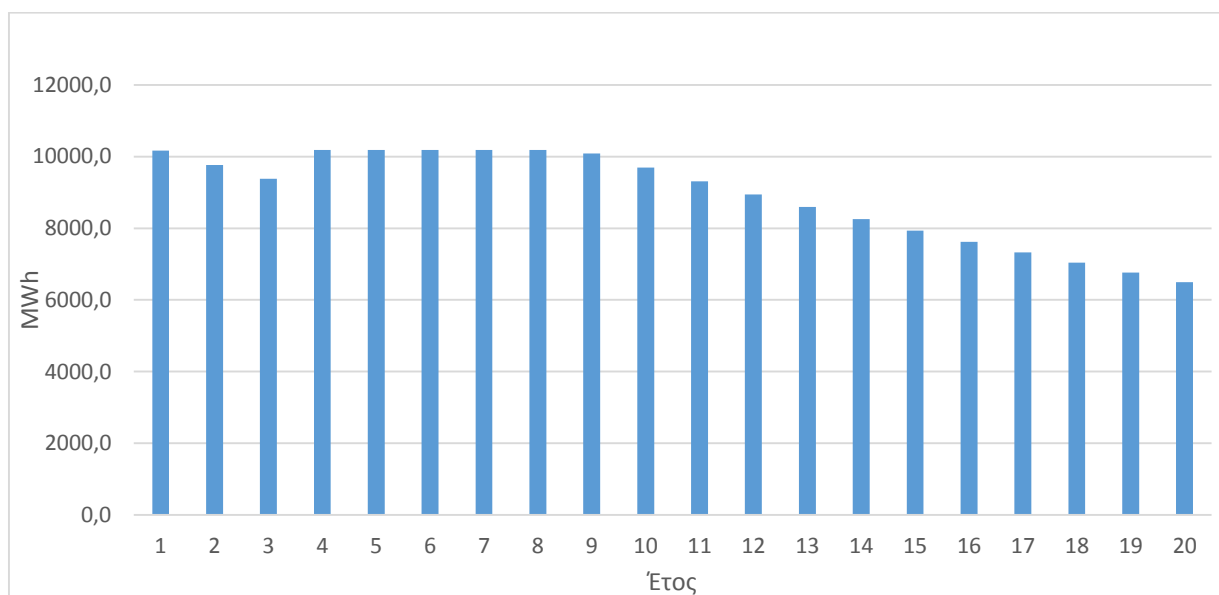
Έτος		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		1497	1438	1382	1756	1744	1675	1610	1546	1486	1428
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα (%)		85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		1497,1	1438,4	1381,9	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1485,8	1427,5
Ώρες Λειτουργίας		7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια(MWh)		11147,4	10710,3	10289,6	11169,0	11169,0	11169,0	11169,0	11169,0	11063,3	10629,2
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	668,8	642,6	617,4	670,1	670,1	670,1	670,1	670,1	663,8	637,7
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	314,4	302,0	290,2	315,0	315,0	315,0	315,0	315,0	312,0	299,7
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		10164,2	9765,7	9382,1	10183,9	10183,9	10183,9	10183,9	10183,9	10087,5	9691,7
Τιμή Πώλησης Ηλ. Ενέργειας (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		1.311.182	1.259.772	1.210.289	1.313.722	1.313.722	1.313.722	1.313.722	1.313.722	1.301.286	1.250.226

Πίνακας 5.9: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 3 ΜΕΚ 500 kW έκαστη, 2028-2037)

Έτος		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		1372	1318	1266	1216	1169	1123	1079	1037	996	957
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0	1500,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα (%)		85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		1371,5	1317,7	1266,0	1216,3	1168,7	1123,0	1078,8	1036,6	995,9	956,9
Ώρες Λειτουργίας		7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		10212,2	9811,6	9426,6	9056,6	8702,1	8361,9	8032,7	7718,5	7415,5	7125,1
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	612,7	588,7	565,6	543,4	522,1	501,7	482,0	463,1	444,9	427,5
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	288,0	276,7	265,8	255,4	245,4	235,8	226,5	217,7	209,1	200,9
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		9311,5	8946,2	8595,2	8257,8	7934,6	7624,3	7324,3	7037,7	6761,4	6496,6
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		1.201.180	1.154.061	1.108.782	1.065.254	1.023.565	983.540	944.829	907.870	872.224	838.067

Αναφορικά με τα δεδομένα των Πινάκων 5.8 και 5.9, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι το αποτέλεσμα του γινομένου ισχύος λειτουργίας με τις ώρες λειτουργίας της τεχνολογίας, ενώ η πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι η καθαρή ενέργεια απαλλαγμένη από τις ιδιοκαταναλώσεις του σταθμού και τις ηλεκτρικές απώλειες του δικτύου. Τέλος, ο κύκλος εργασιών προκύπτει από το γινόμενο της πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας με την τιμή πώλησής της.

Ακολουθώς, φαίνεται η γραφική απεικόνιση των ετήσιων ποσοτήτων πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον ορίζοντα της εξεταζόμενης 20ετίας (2018-2037):



Γράφημα 5.1: Ετήσιες ποσότητες πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 1)

Πίνακας 5.10: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 3 ΜΕΚ, 2018-2027)

(€)			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Έτος		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)										
Σύνολο αρχικής επένδυσης	3.600.000											
Έσοδα (κύκλος εργασιών)			1.311.182	1.259.772	1.210.289	1.313.722	1.313.722	1.313.722	1.313.722	1.313.722	1.301.286	1.250.226
Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης			330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Έξοδα αποκατάστασης									750.000			
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			981.182	929.772	880.289	983.722	983.722	983.722	233.722	983.722	971.286	920.226
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			-360.000	-360.000	-360.000	-360.000	-360.000	-360.000	-360.000	-360.000	-360.000	-360.000
Κέρδη προ φόρων			621.182	569.772	520.289	623.722	623.722	623.722	-126.278	623.722	611.286	560.226
Αφαίρεση φόρων			-180.143	-165.234	-150.884	-180.879	-180.879	-180.879	-36.621	-180.879	-177.273	-162.465
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			441.040	404.538	369.405	442.843	442.843	442.843	-162.898	442.843	434.013	397.760
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-3.600.000	801.040	764.538	729.405	802.843	802.843	802.843	270.343	802.843	794.013	757.760
Παρούσα αξία χρηματοροών		-3.600.000	762.895	693.459	630.087	660.501	629.048	599.094	192.128	543.396	511.828	465.199
Αθροιστική παρούσα αξία		-3.600.000	-2.837.105	-2.143.646	-1.513.559	-853.058	-224.010	375.084	567.211	1.110.607	1.622.435	2.087.634

Πίνακας 5.11: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 3 ΜΕΚ, 2028-2037)

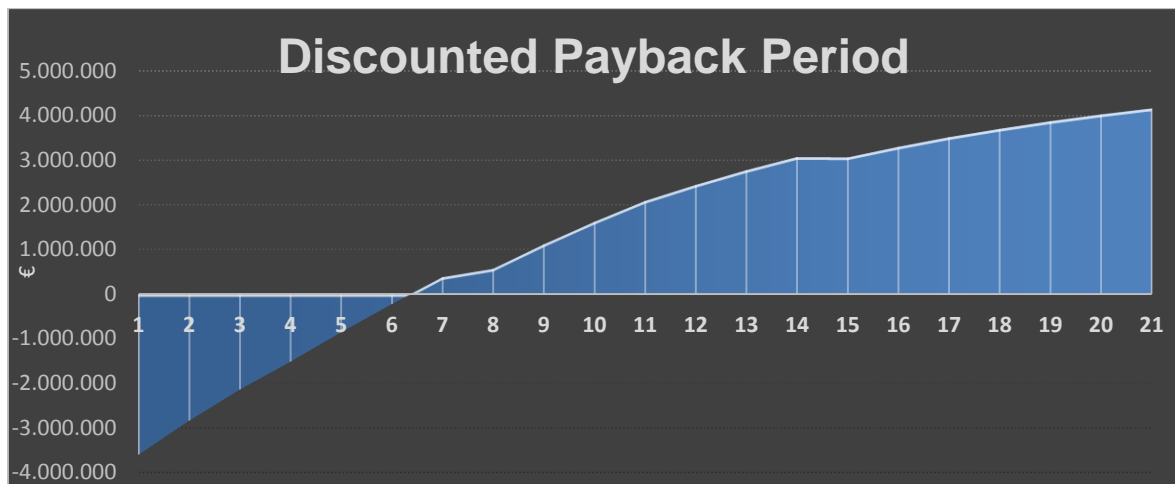
(€)			2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Έτος		0	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)										
Σύνολο αρχικής επένδυσης	3.600.000											
Έσοδα (κύκλος εργασιών)			1.201.180	1.154.061	1.108.782	1.065.254	1.023.565	983.540	944.829	907.870	872.224	838.067
Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης			330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000	330.000
Έξοδα αποκατάστασης						750.000						
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			871.180	824.061	778.782	-14.746	693.565	653.540	614.829	577.870	542.224	508.067
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Κέρδη προ φόρων			871.180	824.061	778.782	-14.746	693.565	653.540	614.829	577.870	542.224	508.067
Αφαίρεση φόρων			-252.642	-238.978	-225.847	-4.276	-201.134	-189.527	-178.300	-167.582	-157.245	-147.340
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			618.538	585.084	552.935	-19.023	492.431	464.013	436.529	410.288	384.979	360.728
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-3.600.000	618.538	585.084	552.935	-10.470	492.431	464.013	436.529	410.288	384.979	360.728
Παρούσα αξία χρηματοροών		-3.600.000	361.646	325.796	293.233	-5.288	236.868	212.570	190.456	170.483	152.349	135.955
Αθροιστική παρούσα αξία		-3.600.000	2.449.280	2.775.077	3.068.310	3.063.022	3.299.890	3.512.460	3.702.916	3.873.399	4.025.748	4.161.702

Για τη συμπλήρωση των παραπάνω Πινάκων 5.10 και 5.11 θεωρήθηκε φορολογικός συντελεστής ίσος με 29%, επιτόκιο αναγωγής χρηματοροών (προεξοφλητικό επιτόκιο) 5%, αποσβέσεις παγίων επένδυσης 10% και ως περίοδος λογιστικής αποπληρωμής τα 10 έτη. Επιπλέον, για την τεχνολογία της Μηχανής Εσωτερικής Καύσης (μεγέθους 500 kW) χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα κόστη:

- Κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης τα 2400€/kW
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης τα 220€/kW και
- Κόστος αποκατάστασης τα 250.000€/7ετία (για καθεμία ΜΕΚ)

Για το συγκεκριμένο σενάριο, λοιπόν, με επιλογή 3 ΜΕΚ των 500 kW έκαστη, δηλαδή συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1500 kW, αθροίζοντας τις παρούσες αξίες χρηματοροών της 20ετίας 2018-2037, από τα οικονομικά στοιχεία των Πινάκων 5.10 και 5.11, προκύπτει ότι η **Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)** ορίζεται στα **4.161.702 €**, ενώ ο **Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)**, από τη χρηματοροή (με αποσβέσεις), ισούται με **19% (<20%)**.

Επίσης, από το Γράφημα 5.2 διακρίνεται ότι ο προεξοφλούμενος χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης, για το εν λόγω σενάριο, ορίζεται περίπου στα 6,5 έτη, από την έναρξη λειτουργίας των 3 ηλεκτρομηχανών.



Γράφημα 5.2: Προεξοφλούμενη Περίοδος Αποπληρωμής Επένδυσης (Σενάριο 1)

5.1.2. Σενάριο 2: Χρήση 2 Μηχανών Εσωτερικής Καύσης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1000 kW (500 kW η καθεμία) για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ'

Στους Πίνακες 5.12 και 5.13 υπολογίζονται η παραγόμενη και πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς επίσης και ο κύκλος εργασιών, με τον τρόπο που περιεγράφηκε στο Σενάριο 1.

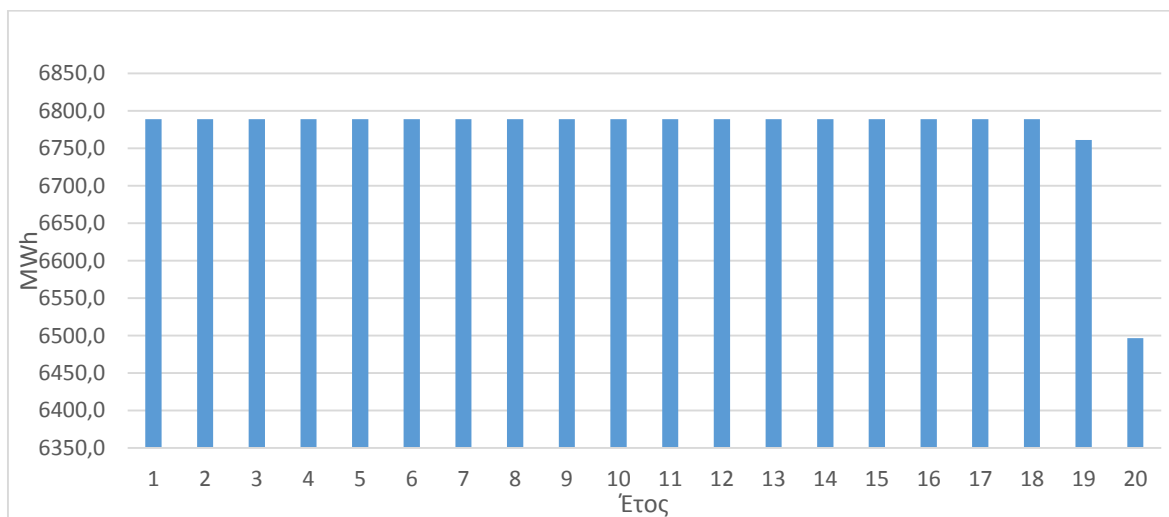
Πίνακας 5.12: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 2 ΜΕΚ 500 kW έκαστη, 2018-2027)

Έτος		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		1497	1438	1382	1756	1744	1675	1610	1546	1486	1428
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα (%)		85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Ώρες Λειτουργίας		7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815

Πίνακας 5.13: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 2 ΜΕΚ 500 kW έκαστη, 2028-2037)

Έτος		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		1372	1318	1266	1216	1169	1123	1079	1037	996	957
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα		85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	995,9	956,9
Ώρες Λειτουργίας		7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7415,5	7125,1
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	444,9	427,5
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	209,1	200,9
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6761,4	6496,6
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	872.224	838.067

Παρακάτω φαίνεται η γραφική απεικόνιση των ετησίων ποσοτήτων πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον ορίζοντα της εξεταζόμενης 20ετίας (2018-2037):



Γράφημα 5.3: Ετήσιες ποσότητες πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 2)

Ακολουθούν τα οικονομικά αποτελέσματα του Σεναρίου 2, στους Πίνακες 5.14 και 5.15.

Πίνακας 5.14: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 2 ΜΕΚ, 2018-2027)

(€)			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Έτος		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)										
Σύνολο αρχικής επένδυσης	2.400.000											
Έσοδα (κύκλος εργασιών)			875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815
Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης			220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000
Έξοδα αποκατάστασης									500.000			
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			655.815	655.815	655.815	655.815	655.815	655.815	155.815	655.815	655.815	655.815
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			-240.000	-240.000	-240.000	-240.000	-240.000	-240.000	-240.000	-240.000	-240.000	-240.000
Κέρδη προ φόρων			415.815	415.815	415.815	415.815	415.815	415.815	-84.185	415.815	415.815	415.815
Αφαίρεση φόρων			-120.586	-120.586	-120.586	-120.586	-120.586	-120.586	-24.414	-120.586	-120.586	-120.586
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			295.229	295.229	295.229	295.229	295.229	295.229	-108.599	295.229	295.229	295.229
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-2.400.000	535.229	535.229	535.229	535.229	535.229	535.229	180.229	535.229	535.229	535.229
Παρούσα αξία χρηματοροών		-2.400.000	509.742	485.468	462.351	440.334	419.366	399.396	128.085	362.264	345.013	328.584
Αθροιστική παρούσα αξία		-2.400.000	-1.890.258	-1.404.790	-942.440	-502.106	-82.740	316.655	444.741	807.004	1.152.017	1.480.601

Πίνακας 5.15: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 2 ΜΕΚ, 2028-2037)

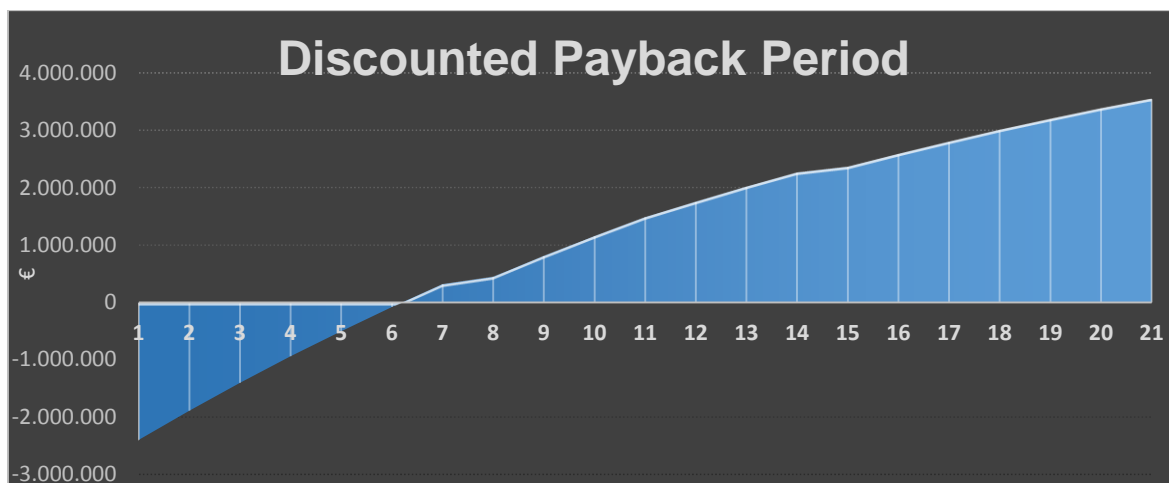
(€)			2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Έτος		0	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)										
Σύνολο αρχικής επένδυσης	2.400.000											
Έσοδα (κύκλος εργασιών)			875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	872.224	838.067
Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης			220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000
Έξοδα αποκατάστασης						500.000						
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			655.815	655.815	655.815	155.815	655.815	655.815	655.815	655.815	652.224	618.067
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Κέρδη προ φόρων			655.815	655.815	655.815	155.815	655.815	655.815	655.815	655.815	652.224	618.067
Αφαίρεση φόρων			-190.186	-190.186	-190.186	-45.186	-190.186	-190.186	-190.186	-190.186	-189.145	-179.240
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			465.629	465.629	465.629	110.629	465.629	465.629	465.629	465.629	463.079	438.828
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-2.400.000	465.629	465.629	465.629	201.001	465.629	465.629	465.629	465.629	463.079	438.828
Παρούσα αξία χρηματοροών		-2.400.000	272.243	259.279	246.933	101.519	223.975	213.310	203.152	193.478	183.256	165.390
Αθροιστική παρούσα αξία		-2.400.000	1.752.845	2.012.124	2.259.057	2.360.576	2.584.552	2.797.861	3.001.014	3.194.492	3.377.748	3.543.138

Για τη συμπλήρωση των παραπάνω Πινάκων 5.14 και 5.15 θεωρήθηκε φορολογικός συντελεστής ίσος με 29%, επιτόκιο αναγωγής χρηματοροών (προεξοφλητικό επιτόκιο) 5%, αποσβέσεις παγίων επένδυσης 10% και ως περίοδος λογιστικής αποπληρωμής τα 10 έτη. Επιπλέον, για την τεχνολογία της Μηχανής Εσωτερικής Καύσης (μεγέθους 500 kW) χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα κόστη:

- Κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης τα 2400€/kW
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης τα 220€/kW και
- Κόστος αποκατάστασης τα 250.000€/7ετία (για καθεμία ΜΕΚ)

Για το συγκεκριμένο σενάριο, λοιπόν, με επιλογή 2 ΜΕΚ των 500 kW έκαστη, δηλαδή συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1000 kW, αθροίζοντας τις παρούσες αξίες χρηματοροών της 20ετίας 2018-2037, από τα οικονομικά στοιχεία των Πινάκων 5.14 και 5.15, προκύπτει ότι η **Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)** ορίζεται στα **3.543.137 €**, ενώ ο **Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)**, από τη χρηματοροή (με αποσβέσεις), ισούται με **20%**.

Επίσης, από το Γράφημα 5.4 διακρίνεται ότι ο προεξοφλούμενος χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης, για το εν λόγω σενάριο, ορίζεται λίγο μετά τα 6 έτη, από την έναρξη λειτουργίας των 2 ηλεκτρομηχανών.



Γράφημα 5.4: Προεξοφλούμενη Περίοδος Αποπληρωμής Επένδυσης (Σενάριο 2)

5.1.3. Σενάριο 3: Χρήση 4 Gradual Oxidizers (GO) συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1000 kW (250 kW έκαστος) για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ'

Η τιμή της ηλεκτρικής ισχύος βιοαερίου για το έτος έναρξης λειτουργίας της τεχνολογίας (2018) και για το έτος λήξης (2037), όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 5.11, είναι ίση με 1,08 και 0,69 MW, αντίστοιχα.

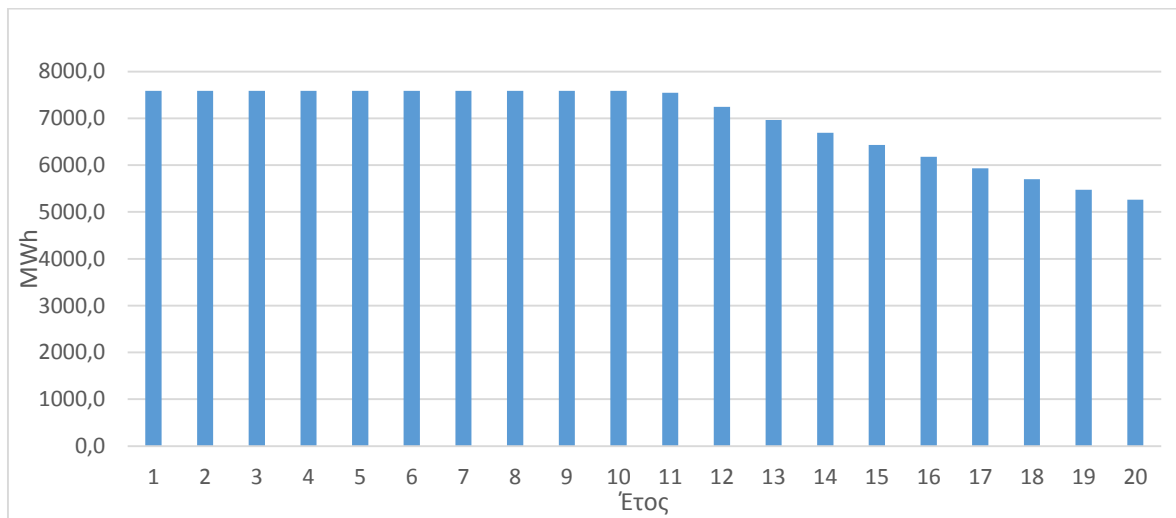
Πίνακας 5.16: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 4 GO 250 kW έκαστος, 2018-2027)

Έτος		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		1085	1043	1002	1273	1264	1214	1167	1121	1077	1035
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα (%)		95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Ώρες Λειτουργίας		8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	499,3	499,3	499,3	499,3	499,3	499,3	499,3	499,3	499,3	499,3
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7	234,7
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		7588,0	7588,0	7588,0	7588,0	7588,0	7588,0	7588,0	7588,0	7588,0	7588,0
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852

Πίνακας 5.17: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 4 GO 250 kW έκαστος, 2028-2037)

Έτος		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		994	955	918	882	847	814	782	752	722	694
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα		95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		994,3	955,3	917,9	881,8	847,3	814,2	782,1	751,5	722,0	693,8
Ώρες Λειτουργίας		8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		8274,6	7950,0	7638,8	7338,3	7051,2	6775,8	6508,6	6254,0	6008,5	5773,8
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	496,5	477,0	458,3	440,3	423,1	406,5	390,5	375,2	360,5	346,4
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	233,3	224,2	215,4	206,9	198,8	191,1	183,5	176,4	169,4	162,8
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		7544,7	7248,8	6965,0	6691,1	6429,3	6178,1	5934,6	5702,4	5478,5	5264,6
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		973.272	935.097	898.488	863.152	829.381	796.981	765.560	735.607	706.731	679.127

Παρακάτω φαίνεται η γραφική απεικόνιση των ετησίων ποσοτήτων πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον ορίζοντα της εξεταζόμενης 20ετίας (2018-2037):



Γράφημα 5.5: Ετήσιες ποσότητες πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 3)

Ακολουθούν τα οικονομικά αποτελέσματα του Σεναρίου 3, στους Πίνακες 5.18 και 5.19.

Πίνακας 5.18: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 4 GO, 2018-2027)

(€)			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	
Έτος			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)											
Σύνολο αρχικής επένδυσης	4.150.000												
Έσοδα (κύκλος εργασιών)			978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852	978.852
Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης			74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000
Έξοδα αποκατάστασης												1.600.000	
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			904.852	904.852	904.852	904.852	904.852	904.852	904.852	904.852	904.852	-695.148	904.852
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000
Κέρδη προ φόρων			489.852	489.852	489.852	489.852	489.852	489.852	489.852	489.852	489.852	-1.110.148	489.852
Αφαίρεση φόρων			-142.057	-142.057	-142.057	-142.057	-142.057	-142.057	-142.057	-142.057	-142.057	-321.943	-142.057
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			347.795	347.795	347.795	347.795	347.795	347.795	347.795	347.795	347.795	-1.432.091	347.795
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-4.150.000	762.795	762.795	762.795	762.795	762.795	762.795	762.795	762.795	762.795	-373.205	762.795
Παρούσα αξία χρηματοροών		-4.150.000	726.471	691.877	658.931	627.553	597.670	569.209	542.104	516.290	516.290	-240.571	468.290
Αθροιστική παρούσα αξία		-4.150.000	-3.423.529	-2.731.651	-2.072.720	-1.445.167	-847.497	-278.288	263.816	780.106	780.106	539.534	1.007.824

Πίνακας 5.19: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 4 GO, 2028-2037)

(€)			2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Έτος		0	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)										
Σύνολο αρχικής επένδυσης	4.150.000											
Έσοδα (κύκλος εργασιών)			973.272	935.097	898.488	863.152	829.381	796.981	765.560	735.607	706.731	679.127
Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης			74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000	74.000
Έξοδα αποκατάστασης										1.200.000		
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			899.272	861.097	824.488	789.152	755.381	722.981	691.560	-538.393	632.731	605.127
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Κέρδη προ φόρων			899.272	861.097	824.488	789.152	755.381	722.981	691.560	-538.393	632.731	605.127
Αφαίρεση φόρων			-260.789	-249.718	-239.102	-228.854	-219.061	-209.665	-200.552	-156.134	-183.492	-175.487
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			638.483	611.379	585.387	560.298	536.321	513.317	491.008	-694.527	449.239	429.641
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-4.150.000	638.483	611.379	585.387	560.298	536.321	513.317	491.008	-382.259	449.239	429.641
Παρούσα αξία χρηματοροών		-4.150.000	373.308	340.439	310.443	282.988	257.979	235.156	214.225	-158.836	177.779	161.927
Αθροιστική παρούσα αξία		-4.150.000	1.381.132	1.721.571	2.032.014	2.315.002	2.572.982	2.808.138	3.022.363	2.863.527	3.041.306	3.203.233

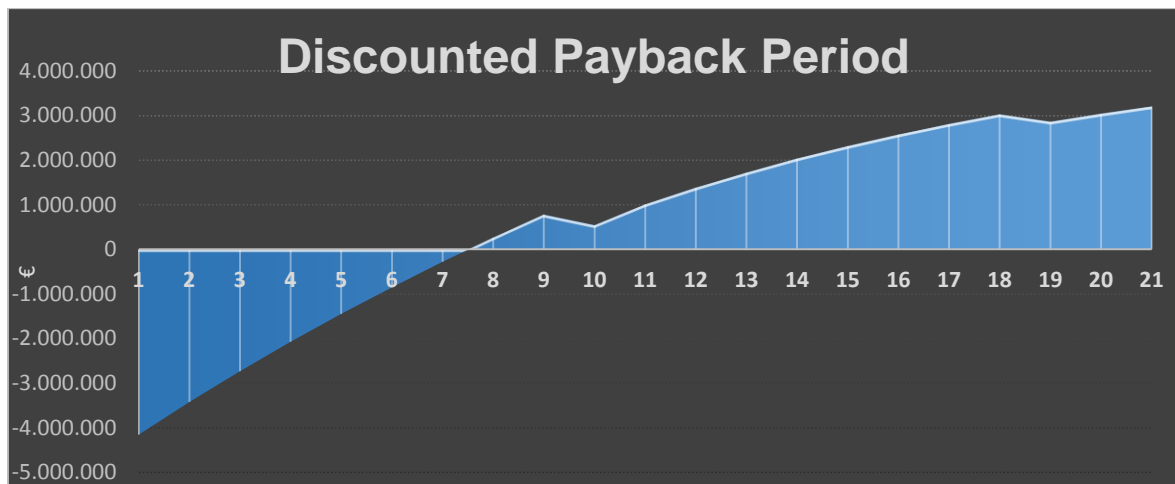
*Στο πέρας της δεύτερης 9ετίας προβλέπεται να αποκατασταθεί η λειτουργία 3 εκ των 4 GO, λόγω του ότι η ηλεκτρική ισχύς του βιοαερίου πρόκειται να ξεπερνά ελαφρώς τα 750 kW (752 kW το 2035).

Για τη συμπλήρωση των παραπάνω Πινάκων 5.18 και 5.19 θεωρήθηκε φορολογικός συντελεστής ίσος με 29%, επιτόκιο αναγωγής χρηματοροών (προεξοφλητικό επιτόκιο) 5%, αποσβέσεις παγίων επένδυσης 10% και ως περίοδος λογιστικής αποπληρωμής τα 10 έτη. Επιπλέον, για την τεχνολογία του Gradual Oxidizer (μεγέθους 250 kW) χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα κόστη (Ener-Core Power, Inc., U.S.):

- Κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης τα 4150€/kW
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης τα 74€/kW και
- Κόστος αποκατάστασης τα 400.000 €/9ετία (για καθέναν GO)

Για το συγκεκριμένο σενάριο, λοιπόν, με επιλογή 4 GO των 250 kW έκαστος, δηλαδή συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1000 kW, αθροίζοντας τις παρούσες αξίες χρηματοροών της 20ετίας 2018-2037, από τα οικονομικά στοιχεία των Πινάκων 5.18 και 5.19, προκύπτει ότι η **Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)** ορίζεται στα **3.203.232 €**, ενώ ο **Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)**, από τη χρηματοροή (με αποσβέσεις), ισούται με **15% (<20%)**.

Επίσης, από το Γράφημα 5.6 διακρίνεται ότι ο προεξοφλούμενος χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης, για το εν λόγω σενάριο, ορίζεται στα 7,5 έτη, από την έναρξη λειτουργίας των 4 τεχνολογιών βαθμιαίας οξείδωσης.



Γράφημα 5.6: Προεξοφλούμενη Περίοδος Αποπληρωμής Επένδυσης (Σενάριο 3)

5.1.4. Σενάριο 4: Χρήση 3 Gradual Oxidizers (GO) συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 750 kW (250 kW έκαστος) για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ'

Στους Πίνακες 5.20 και 5.21 υπολογίζονται η παραγόμενη και πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς επίσης και ο κύκλος εργασιών.

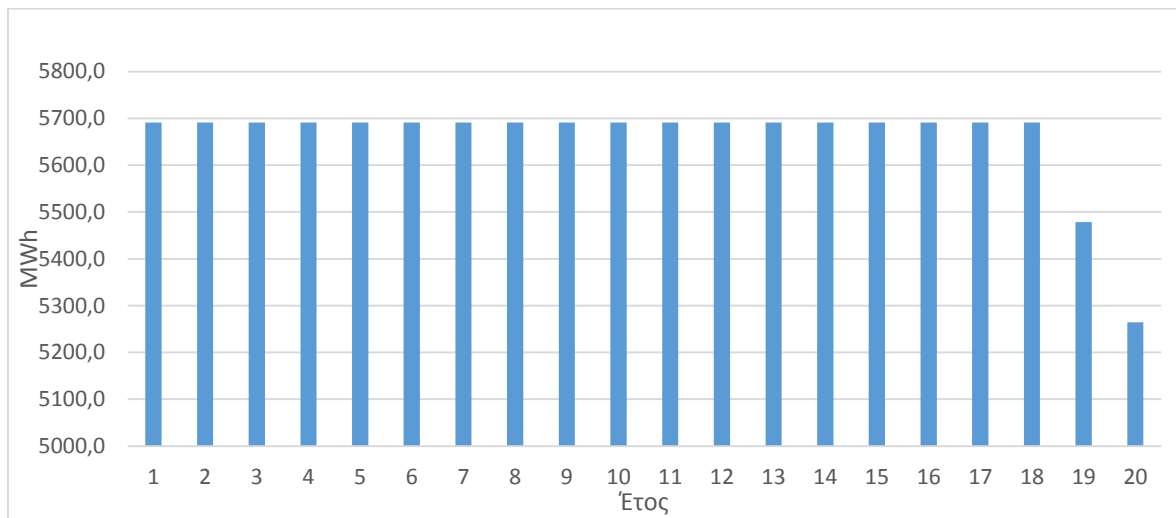
Πίνακας 5.20: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 3 GO 250 kW έκαστος, 2018-2027)

Έτος		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		1085	1043	1002	1273	1264	1214	1167	1121	1077	1035
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα (%)		95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0
Ώρες Λειτουργίας		8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139

Πίνακας 5.21: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 3 GO 250 kW έκαστος, 2028-2037)

Έτος		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		994	955	918	882	847	814	782	752	722	694
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα		95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%	95,0%
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	722,0	693,8
Ώρες Λειτουργίας		8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6241,5	6008,5	5773,8
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5	374,5	360,5	346,4
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	176,0	169,4	162,8
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5691,0	5478,5	5264,6
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	706.731	679.127

Παρακάτω φαίνεται η γραφική απεικόνιση των ετησίων ποσοτήτων πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον ορίζοντα της εξεταζόμενης 20ετίας (2018-2037):



Γράφημα 5.7: Ετήσιες ποσότητες πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 4)

Ακολουθούν τα οικονομικά αποτελέσματα του Σεναρίου 4, στους Πίνακες 5.22 και 5.23.

Πίνακας 5.22: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 3 GO, 2018-2027)

(€)	2018			2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Έτος		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)										
Σύνολο αρχικής επένδυσης	3.112.500											
Έσοδα (κύκλος εργασιών)			734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139
Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης			55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500
Έξοδα αποκατάστασης											1.200.000	
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	-521.361	678.639
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000	-415.000
Κέρδη προ φόρων			367.389	367.389	367.389	367.389	367.389	367.389	367.389	367.389	-832.611	367.389
Αφαίρεση φόρων			-106.543	-106.543	-106.543	-106.543	-106.543	-106.543	-106.543	-106.543	-241.457	-106.543
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			260.846	260.846	260.846	260.846	260.846	260.846	260.846	260.846	-1.074.068	260.846
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-3.112.500	572.096	572.096	572.096	572.096	572.096	572.096	572.096	572.096	-279.904	572.096
Παρούσα αξία χρηματοροών		-3.112.500	544.853	518.908	494.198	470.665	448.252	426.907	406.578	387.217	-180.429	351.217
Αθροιστική παρούσα αξία		-3.112.500	-2.567.647	-2.048.738	-1.554.540	-1.083.875	-635.623	-208.716	197.862	585.079	404.651	755.868

Πίνακας 5.23: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 3 GO, 2028-2037)

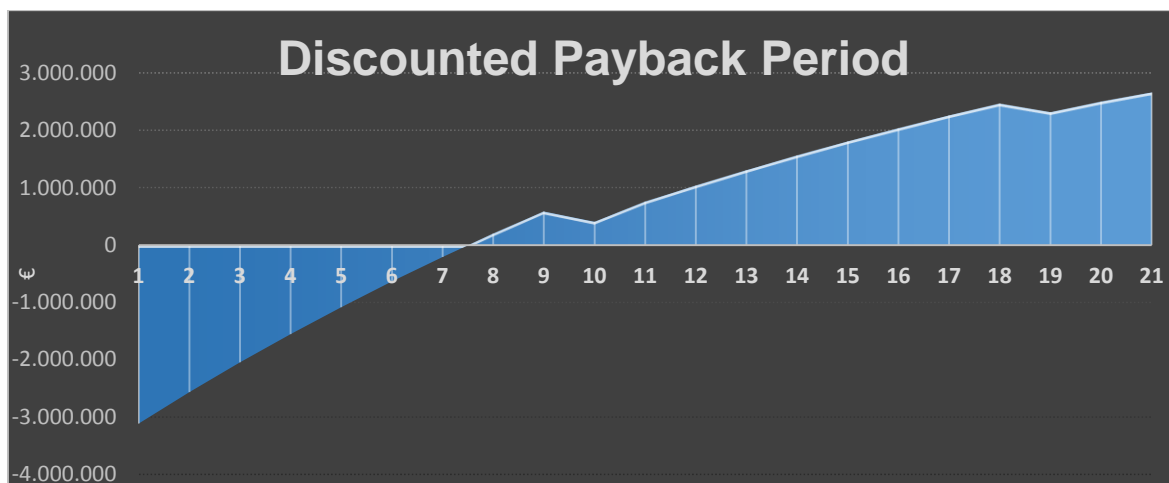
(€)			2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Έτος		0	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)										
Σύνολο αρχικής επένδυσης	3.112.500											
Έσοδα (κύκλος εργασιών)			734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	734.139	706.731	679.127
Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης			55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500	55.500
Έξοδα αποκατάστασης										1.200.000		
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	-521.361	651.231	623.627
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Κέρδη προ φόρων			678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	678.639	-521.361	651.231	623.627
Αφαίρεση φόρων			-196.805	-196.805	-196.805	-196.805	-196.805	-196.805	-196.805	-151.195	-188.857	-180.852
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			481.834	481.834	481.834	481.834	481.834	481.834	481.834	-672.556	462.374	442.776
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-3.112.500	481.834	481.834	481.834	481.834	481.834	481.834	481.834	-370.166	462.374	442.776
Παρούσα αξία χρηματοροών		-3.112.500	281.718	268.303	255.527	243.359	231.770	220.734	210.222	-153.812	182.977	166.877
Αθροιστική παρούσα αξία		-3.112.500	1.037.586	1.305.889	1.561.416	1.804.775	2.036.545	2.257.279	2.467.501	2.313.689	2.496.666	2.663.544

Για τη συμπλήρωση των παραπάνω Πινάκων 5.22 και 5.23 θεωρήθηκε φορολογικός συντελεστής ίσος με 29%, επιτόκιο αναγωγής χρηματοροών (προεξοφλητικό επιτόκιο) 5%, αποσβέσεις παγίων επένδυσης 10% και ως περίοδος λογιστικής αποπληρωμής τα 10 έτη. Επιπλέον, για την τεχνολογία του Gradual Oxidizer (μεγέθους 250 kW) χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα κόστη (Ener-Core Power, Inc., U.S.):

- Κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης τα 4150€/kW
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης τα 74€/kW και
- Κόστος αποκατάστασης τα 400.000 €/9ετία (για καθέναν GO)

Για το συγκεκριμένο σενάριο, λοιπόν, με επιλογή 3 GO των 250 kW έκαστος, δηλαδή συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 750 kW, αθροίζοντας τις παρούσες χρηματοροών της 20ετίας 2018-2037, από τα οικονομικά στοιχεία των Πινάκων 5.22 και 5.23, προκύπτει ότι η **Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)** ορίζεται στα **2.663.543 €**, ενώ ο **Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)**, από τη χρηματοροή (με αποσβέσεις), ισούται με **15%** (<20%).

Επίσης, από το Γράφημα 5.8 διακρίνεται ότι ο προεξοφλούμενος χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης, για το εν λόγω σενάριο, ορίζεται στα 7,5 έτη, από την έναρξη λειτουργίας των 3 τεχνολογιών βαθμιαίας οξείδωσης.



Γράφημα 5.8: Προεξοφλούμενη Περίοδος Αποπληρωμής Επένδυσης (Σενάριο 4)

5.1.5. Σενάριο 5 (Συνδυαστικό): Χρήση 1 Gradual Oxidizer (GO) 250 kW για τους ΧΑΔΑ Α' και Β' και 2 Μηχανών Εσωτερικής Καύσης 1000 kW (500 kW έκαστη) για τα Κύτταρα Α', Β' & Γ' - Εγκατεστήμενη Ισχύς 1250 kW

Αρχικά, πραγματοποιείται υπολογισμός της ηλεκτρικής ισχύος του βιοαερίου για την αθροιστική παροχή μεθανίου από τους ΧΑΔΑ Α' και Β' (GO) και την αντίστοιχη από τα Κυττάρων Α', Β' & Γ' (ΜΕΚ), με χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων για τα κλάσματα του βιοαερίου (Μοντελοποίηση LandGEM). Οι εν λόγω τιμές παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.6 και 5.7, στην αρχή του κεφαλαίου 5. Εν συνεχεία, στους Πίνακες 5.24-5.27 υπολογίζονται η παραγόμενη και πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς επίσης και ο κύκλος εργασιών, ξεχωριστά για κάθε τεχνολογία. Έπειτα, τα επιμέρους αθροίσματα των κύκλων εργασίας, δίνουν τα αντίστοιχα έσοδα σε ορίζοντα 20ετίας και αναλόγως συμβαίνει και με το σύνολο αρχικής επένδυσης και τα έξοδα (κόστη) των δύο τεχνολογιών, όπως φαίνεται και στους Πίνακες 5.28 και 5.29.

Πίνακας 5.24: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 2 ΜΕΚ 500 kW έκαστη, 2018-2027)

Έτος		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		1010	971	933	1324	1329	1277	1227	1178	1132	1088
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα (%)		85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		1000,0	970,7	932,5	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Ώρες Λειτουργίας		7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		7446,0	7227,8	6943,4	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	446,8	433,7	416,6	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8	446,8
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	210,0	203,8	195,8	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		6789,3	6590,3	6331,0	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3	6789,3
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		875.815	850.154	816.697	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815	875.815

Πίνακας 5.25: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 2 ΜΕΚ 500 kW έκαστη, 2028-2037)

Έτος		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		1045	1004	965	927	891	856	822	790	759	729
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα		85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0	85,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		1000,0	1000,0	964,8	926,9	890,6	855,8	822,1	789,9	758,9	729,2
Ώρες Λειτουργίας		7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0	7446,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		7446,0	7446,0	7183,9	6901,7	6631,4	6372,3	6121,4	5881,6	5650,8	5429,6
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	446,8	446,8	431,0	414,1	397,9	382,3	367,3	352,9	339,0	325,8
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	210,0	210,0	202,6	194,6	187,0	179,7	172,6	165,9	159,4	153,1
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		6789,3	6789,3	6550,3	6293,0	6046,5	5810,3	5581,5	5362,8	5152,4	4950,7
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		875.815	875.815	844.986	811.793	780.001	749.522	720.007	691.806	664.656	638.644

Πίνακας 5.26: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 1 GO 250 kW, 2018-2027)

Έτος		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		352,9	339,1	325,8	313,1	300,7	288,9	277,6	266,8	256,4	246,3
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα (%)		95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	246,3
Ώρες Λειτουργίας		8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		2080,5	2080,5	2080,5	2080,5	2080,5	2080,5	2080,5	2080,5	2080,5	2049,7
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	124,8	123,0
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	58,7	58,7	58,7	58,7	58,7	58,7	58,7	58,7	58,7	57,8
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		1897,0	1897,0	1897,0	1897,0	1897,0	1897,0	1897,0	1897,0	1897,0	1868,9
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		244.713	244.713	244.713	244.713	244.713	244.713	244.713	244.713	244.713	241.091

Πίνακας 5.27: Παραγόμενη και Πωλούμενη ηλεκτρική ενέργεια - Κύκλος εργασιών (Χρήση 1 GO 250 kW, 2028-2037)

Έτος		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ηλεκτρική Ισχύς Βιοαερίου (kW)		236,6	227,4	218,4	209,8	201,6	193,7	186,1	178,9	171,8	165,1
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)		250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0
Ετήσια Διαθεσιμότητα		95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0%	95,0	95,0	95,0
Ισχύς Λειτουργίας (kW)		236,6	227,4	218,4	209,8	201,6	193,7	186,1	178,9	171,8	165,1
Ώρες Λειτουργίας		8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0	8322,0
Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		1969,0	1892,4	1817,5	1746,0	1677,7	1612,0	1548,7	1488,8	1429,7	1374,0
Ιδιοκαταναλώσεις Σταθμού (MWh)	6%	118,1	113,5	109,1	104,8	100,7	96,7	92,9	89,3	85,8	82,4
Ηλεκτρικές Απώλειες (MWh)	3%	55,5	53,4	51,3	49,2	47,3	45,5	43,7	42,0	40,3	38,7
Πωλούμενη Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)		1795,3	1725,5	1657,2	1592,0	1529,7	1469,8	1412,1	1357,5	1303,6	1252,8
Τιμή Πώλησης (€/MWh)		129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0
Κύκλος Εργασιών (€)		231.596	222.591	213.781	205.363	197.337	189.604	182.164	175.117	168.167	161.608

Πίνακας 5.28: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 2 ΜΕΚ και 1 GO, 2018-2027)

(€)												
			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Έτος		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)										
Σύνολο αρχικής επένδυσης	3.437.500											
Έσοδα (άθροισμα κύκλων εργασιών)			1.120.528	1.094.867	1.061.410	1.120.528	1.120.528	1.120.528	1.120.528	1.120.528	1.120.528	1.116.906
Έσοδα λειτουργίας και συντήρησης			238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500
Έσοδα αποκατάστασης									500.000		400.000	
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			882.028	856.367	822.910	882.028	882.028	882.028	382.028	882.028	482.028	878.406
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			-343.750	-343.750	-343.750	-343.750	-343.750	-343.750	-343.750	-343.750	-343.750	-343.750
Κέρδη προ φόρων			538.278	512.617	479.160	538.278	538.278	538.278	38.278	538.278	138.278	534.656
Αφαίρεση φόρων			-156.101	-148.659	-138.957	-156.101	-156.101	-156.101	-11.101	-156.101	-40.101	-155.050
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			382.177	363.958	340.204	382.177	382.177	382.177	27.177	382.177	98.177	379.606
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-3.437.500	725.927	707.708	683.954	725.927	725.927	725.927	393.128	725.927	522.128	723.356
Παρούσα αξία χρηματοροών		-3.437.500	691.359	641.912	590.825	597.222	568.783	541.698	279.389	491.336	336.569	444.078
Αθροιστική παρούσα αξία		-3.437.500	-2.746.141	-2.104.229	-1.513.404	-916.182	-347.399	194.300	473.689	965.025	1.301.593	1.745.671

Πίνακας 5.29: Οικονομικά Αποτελέσματα (Χρήση 2 ΜΕΚ και 1 GO, 2028-2037)

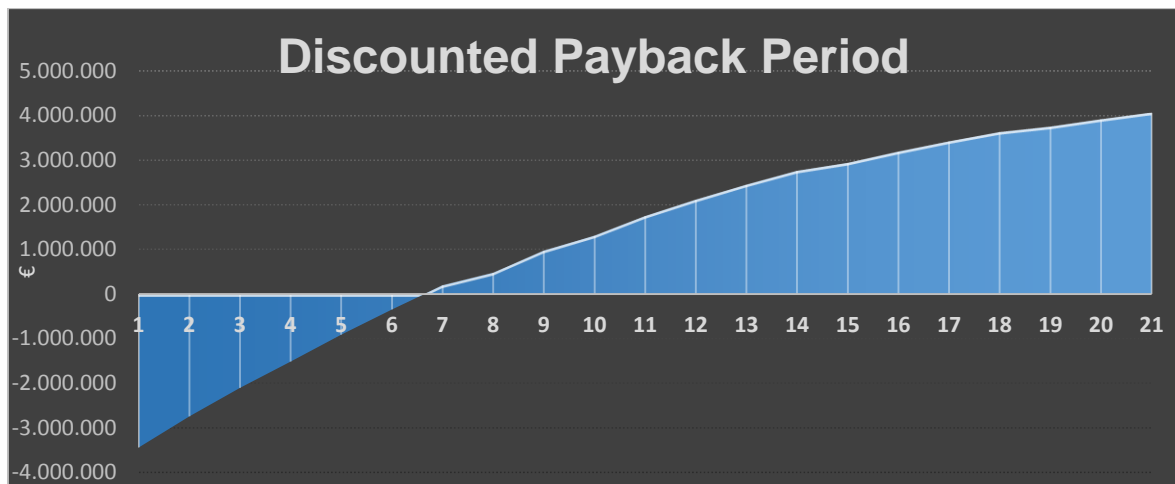
(€)			2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Έτος		0	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Είδος	Κόστος (€)	Απόσβεση (€)										
Σύνολο αρχικής επένδυσης	3.437.500											
Έσοδα (άθροισμα κύκλων εργασιών)			1.107.411	1.098.406	1.058.767	1.017.156	977.337	939.126	902.172	866.923	832.823	800.253
Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης			238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500	238.500
Έξοδα αποκατάστασης						500.000				400.000		
Κέρδη προ φόρων και αποσβέσεων			868.911	859.906	820.267	278.656	738.837	700.626	663.672	228.423	594.323	561.753
Αφαίρεση αποσβέσεων παγίων επένδυσης			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Κέρδη προ φόρων			868.911	859.906	820.267	278.656	738.837	700.626	663.672	228.423	594.323	561.753
Αφαίρεση φόρων			-251.984	-249.373	-237.878	-80.810	-214.263	-203.182	-192.465	-66.243	-172.354	-162.908
Κέρδη μετά φόρων και αποσβέσεων			616.927	610.533	582.390	197.846	524.574	497.444	471.207	162.180	421.969	398.844
Χρηματοροή (με αποσβέσεις)		-3.437.500	616.927	610.533	582.390	359.466	524.574	497.444	471.207	294.665	421.969	398.844
Παρούσα αξία χρηματοροών		-3.437.500	360.704	339.968	308.854	181.555	252.329	227.885	205.586	122.440	166.988	150.320
Αθροιστική παρούσα αξία		-3.437.500	2.106.376	2.446.343	2.755.197	2.936.752	3.189.081	3.416.966	3.622.552	3.744.992	3.911.979	4.062.300

Για τη συμπλήρωση των παραπάνω Πινάκων 5.28 και 5.29 θεωρήθηκε φορολογικός συντελεστής ίσος με 29%, επιτόκιο αναγωγής χρηματορρών (προεξοφλητικό επιτόκιο) 5%, αποσβέσεις παγίων επένδυσης 10% και ως περίοδος λογιστικής αποπληρωμής τα 10 έτη. Επιπλέον, για την τεχνολογία του Gradual Oxidizer (250 kW) και της Ηλεκτρομηχανής (500 kW) χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα συνδυασμένα κόστη (Ener-Core Power, Inc., U.S.; U.S. EPA):

- Κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης τα 4150€/kW & 2400€/kW
- Κόστος λειτουργίας και συντήρησης τα 74€/kW και 220€/kW και
- Κόστος αποκατάστασης τα 400.000 €/9ετία και 250.000€/7ετία, αντιστοίχως.

Για το συγκεκριμένο συνδυαστικό σενάριο, λοιπόν, με επιλογή 1 GO των 250 kW και 2 MEK των 500 kW έκαστη, δηλαδή συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1250 kW, αθροίζοντας τις παρούσες αξίες χρηματορρών της 20ετίας 2018-2037, από τα οικονομικά στοιχεία των Πινάκων 5.28 και 5.29, προκύπτει ότι η **Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)** ορίζεται στα **4.062.299 €**, ενώ ο **Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)**, από τη χρηματοροή (με αποσβέσεις), ισούται με **19% (<20%)**.

Επίσης, από το Γράφημα 5.8 διακρίνεται ότι ο προεξοφλούμενος χρόνος αποπληρωμής της επένδυσης, για το εν λόγω σενάριο, ορίζεται περίπου στα 7 έτη, από την έναρξη λειτουργίας των 2 διαφορετικών τεχνολογιών ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου.



Γράφημα 5.9: Προεξοφλούμενη Περίοδος Αποπληρωμής Επένδυσης (Σενάριο 5)

* Να σημειωθεί ότι για όλα τα σενάρια η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας έχει θεωρηθεί ότι παραμένει αμετάβλητη, ενώ επίσης δεν έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας στο διάστημα της εξεταζόμενης 20ετίας.

5.2. Προκρινόμενο Σενάριο

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται συγκεντρωτικά τα 5 σενάρια ηλεκτροπαραγωγής, τα οποία εξετάστηκαν τεχνοοικονομικά, με τα οικονομικά στοιχεία των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 5.30: Συγκεντρωτικός πίνακας σεναρίων

Σενάριο	Τεχνολογία (Ρεύμα Βιοαερίου)	Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)	Σύνολο Αρχικής Επένδυσης (Εκ. €)	Χρόνος Αποπληρωμής Επένδυσης (Έτη)	NPV (Εκ. €)	IRR (%)
1	3 MEK (Σύνολο ΧΥΤΑ)	1500	3,60	6,5	4,16	19
2	2 MEK (Σύνολο ΧΥΤΑ)	1000	2,40	6,0	3,54	20
3	4 GO (Σύνολο ΧΥΤΑ)	1000	4,15	7,5	3,20	15
4	3 GO (Σύνολο ΧΥΤΑ)	750	3,11	7,5	2,66	15
5	1 GO (ΧΑΔΑ Α' & Β') + 2 MEK (Κύτταρα Α', Β' & Γ')	1250	3,44	7,0	4,06	19

Σύμφωνα με τα 5 εξεταζόμενα πολυπαραγοντικά σενάρια και τα ευρήματα του Πίνακα 5.30, τα οποία να τονιστεί για ακόμα μία φορά ότι στηρίζονται αποκλειστικά σε μοντελοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου και της συγκέντρωσης του μεθανίου σε αυτό, και όχι σε υφιστάμενες μετρήσεις στο πεδίο, φαίνεται ότι για τη εκμετάλλευση του βιοαερίου από το ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων η χρησιμοποίηση 3 Μηχανών Εσωτερικής Καύσης για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ' (σενάριο 1), συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 1500 kW, είναι η προσφορότερη λύση, με εσωτερικό συντελεστή απόδοσης (IRR) 19% και καθαρή παρούσα αξία ίση με 4,16 εκ. € (αποπληθωρισμένες τιμές). Βασική προϋπόθεση για την υλοποίηση αυτού του σεναρίου είναι η ύπαρξη σχετικά υψηλού αρχικού κεφαλαίου ή χρηματοδότησης, καθώς το συνολικό ύψος της αρχικής επένδυσης ανέρχεται στα 3,6 εκ. €. Σε αντίθετη περίπτωση προβάλλει ως ιδανικότερο το σενάριο 2, με τις 2 ηλεκτρομηχανές και με σαφώς μικρότερο σύνολο αρχικής επένδυσης (2,4 εκ. €), ταχύτερο χρόνο αποπληρωμής της επένδυσης (6 έτη με τις 2 MEK έναντι 6,5 με τις 3), αλλά και ελαφρώς μεγαλύτερο εσωτερικό συντελεστή απόδοσης (20%).

Συνεπώς, προκρινόμενα σενάρια είναι αυτά των μηχανών εσωτερικής καύσης (σενάρια 1 και 2), ανάλογα φυσικά με την αρχική διάθεση κεφαλαίου, σε αντίθεση με αυτά των Gradual Oxidizers, η χρήση των οποίων να μην προκαλεί ενδιαφέρον λόγω της ευρύτερης ευελιξίας καυσίμου και των υψηλών NPV (3,2 και 2,66 εκ. €), εμφανίζουν όμως πολύ χαμηλότερους εσωτερικούς συντελεστές απόδοσης (15%) και μεγαλύτερα διαστήματα αποπληρωμής των αντίστοιχων επενδύσεων (7,5 έτη), ενώ επίσης ο αριθμός των εγκαταστάσεων με την εν λόγω τεχνολογία, μέχρι σήμερα, είναι μη επαρκής και η εμπορική τους διαθεσιμότητα περιορισμένη, γεγονός που φέρνει μία μικρή αβεβαιότητα για την επιλογή τους και ενισχύει την αξιοπιστία των ηλεκτρομηχανών. Φυσικά σε αυτή την επιλογή λαμβάνονται υπόψη και τα μεγάλα σύνολα αρχικής επένδυσης των GO (4,15 και 3,11 εκ. €) και τα πολύ υψηλά κόστη αποκατάστασής τους. Βέβαια αξίζει να υπερθεματίσει κανείς - ειδικά από τη σκοπιά του μηχανικού περιβάλλοντος - ότι από άποψη επιβλαβών αερίων εκπομπών, τα οποία διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα, σύμφωνα και με τα όσα αναγράφονται στο κεφάλαιο 2, το συνολικό σύστημα ενός GO συνιστά τη φιλικότερη προς το περιβάλλον τεχνολογία.

Τέλος, αναφορικά με το συνδυαστικό σενάριο των 2 ΜΕΚ και του 1 GO, δίνει καθαρή παρούσα αξία 4,06 εκ. € και εσωτερικό συντελεστή απόδοσης 19%, προβάλλοντας ως το δεύτερο πιο συμφέρον μετά από αυτό των 3 ηλεκτρομηχανών, αλλά δεν προκρίνεται για εφαρμογή, κατά πρώτον για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω και κατά δεύτερον για το πολύ υψηλό σύνολο αρχικής επένδυσης (3,44 εκ. €) σε συνδυασμό με το μεγάλο διάστημα αποπληρωμής της επένδυσης (7 έτη).

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Το βιοαέριο συνιστά μία σημαντική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας και έχει ήδη μεγάλο δυναμικό ανάπτυξης τόσο στην ευρωπαϊκή όσο και στην παγκόσμια αγορά.

Όσον αφορά το ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων, που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποδεικνύεται ότι το οικονομικό όφελος από την ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου φαίνεται ιδιαίτερα σημαντικό. Για αυτό το λόγο, πρέπει ταχέως να προχωρήσει η επένδυση λειτουργίας μονάδας εκμετάλλευσης βιοαερίου στον εν λόγω ΧΥΤΑ, γεγονός που επιβεβαιώνει η τεχνοοικονομική αξιολόγηση.

Από τις 5 εξετασθείσες περιπτώσεις ενεργειακής αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου, η λύση των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, και συγκεκριμένα των 3 ηλεκτρομηχανών με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 1500 kW για τους ΧΑΔΑ Α' & Β' και τα Κύτταρα Α', Β' & Γ', είναι η ελκυστικότερη και πλέον συμφέρουσα οικονομικά (αν και είναι ήδη ευρεία η χρησιμοποίησή της σε ΧΥΤΑ και ΕΕΛ), όπως προκύπτει από την μελέτη του κεφαλαίου 5 (και συγκεκριμένα στον Πίνακα 5.30) και τους αντίστοιχους οικονομικούς δείκτες ($IRR=19\%$ και $NPV=4,16$ εκ. €). Επιπλέον, οι υψηλοί δείκτες Καθαρής Παρούσας Αξίας και στα υπόλοιπα σενάρια, υψηλότεροι μάλιστα από τα αντίστοιχα σύνολα αρχικής επένδυσης, υποδεικνύουν τη βιωσιμότητα του εξεταζόμενου έργου, παρά το μικρό μέγεθός του, όσον αφορά την περιορισμένη ηλεκτρική απόδοσης του βιοαερίου, η οποία δύναται να γίνει μεγαλύτερη όταν τεθεί σε πλήρη λειτουργία και παραγωγή βιοαερίου και το καινούργιο Κύτταρο Γ'. Σε κάθε περίπτωση, για καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης, απαιτείται να γίνουν μετρήσεις στο πεδίο σε σχέση με την ποσότητα και ποιότητα του παραγόμενου βιοαερίου, από τη στιγμή

που όλα τα αποτελέσματα της εργασίας στηρίζονται στην εφαρμογή των υπολογιστικών μοντέλων.

Σύμφωνα μάλιστα με τη μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογιστικού μοντέλου LandGEM (της EPA), παρόλο που η Μηχανή Εσωτερικής Καύσης λειτουργεί σε ποσοστά συγκέντρωσης του μεθανίου άνω του 40% και θα μπορούσε να συνιστά μία αβέβαιη επενδυτική κίνηση, το διάγραμμα 4.5 δείχνει ότι η επένδυση, σε βάθος 20ετίας, είναι ασφαλής και συμφέρουσα.

Βέβαια, μετά το πέρας της 20ετίας, όπου η συγκέντρωση πέφτει κάτω του 40%, προκρίνεται η χρησιμοποίηση των Αεριοτουρμπίνων και των Gradual Oxidizers, οι οποίες δύνανται να λειτουργήσουν και σε συγκεντρώσεις μέχρι 20 και 1,5%, αντίστοιχα. Για αυτό το λόγο η μέθοδος βαθμιαίας οξειδωσης προβάλλει ως η μοναδική ρεαλιστική λύση για εκμετάλλευση βιοαερίου από απεμπλουτισμένους ΧΥΤΑ, παρά τη μικρή εμπορική της διαθεσιμότητα μέχρι στιγμής και το πολύ υψηλό κόστος εξοπλισμού και συντήρησης που έχει. Επιπλέον, οι τεχνολογίες μικροτουρμπίνας και κυψέλης καυσίμου (πολύ υψηλά κόστη αποκατάστασης) λειτουργούν και αυτές σε υψηλές συγκεντρώσεις μεθανίου όπως οι ΜΕΚ, συνεπώς σε μια αντίστοιχη μελλοντική τεχνοοικονομική μελέτη αξίζει να αναλυθεί σε ποιες περιπτώσεις είναι συμφέρουσα η χρησιμοποίησή τους.

Επιπροσθέτως, αξίζει να επισημανθεί ότι αναφορικά με την εύρυθμη λειτουργία του ΧΥΤΑ Πέρα Γαλήνων και βάσει της έκτασης που καταλαμβάνει, πρέπει να υπάρχει ικανός αριθμός πλήρως λειτουργικών φρεατίων (από τη στιγμή που ορισμένα είναι φραγμένα) για την καλύτερη, ουσιαστικότερη και πληρέστερη άντληση και διαχείριση του βιοαερίου (και συνακόλουθη αναβάθμιση της μονάδας).

Η επένδυση πρέπει να υποστηρίζεται από έμπειρο λειτουργό με γνώσεις στη σωστή διαχείριση του πεδίου και των εγκαταστάσεων, λόγω της πολυπλοκότητας του έργου. Τέλος, χρειάζεται να προσεχθεί, τα ανταποδοτικά τέλη που θα αποδίδονται στους αρμόδιους φορείς, να μην είναι τόσο υψηλά που να καθιστούν τη μονάδα μη βιώσιμη.

Ερωτηματικό φυσικά παραμένει το κάτω από ποιες συνθήκες θα εξετάζεται η λειτουργία του εν λόγω ΧΥΤΑ, αλλά και των ΧΥΤΑ γενικότερα, μετά το πέρας των επόμενων 20-25 χρόνων (2040), δεδομένης της τάσης ιεράρχησης εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης των προϊόντων (ανακύκλωση ή διαλογή στην πηγή), που οπωσδήποτε θα μειώσουν τη διάθεση απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ.

Βιβλιογραφία

1. Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., and Janssen, R. (2010). *Biogas Handbook*. University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark.
2. Angevine, G., Murrillo, C. A., and Pencheva, N. (2012). *A sensible strategy for Renewable Electrical Energy in North America*. Fraser Institute.
3. Aydi, A., Abichou, T., Zairi, M., and Sdiri A. (2015). Assessment of Electrical Generation Potention and Viability of Gas Collection from Fugitive Emissions in a Tunisian Landfill. *Energy Strategy Reviews*, pp. 8-14.
4. Bakos, C. G. (2009). Distributed Power Generation: A case study of small scale PV power plant in Greece. *Applied Energy* 86, pp.757-1766.
5. Bioenergy Annual Report. (2015). *International Energy Agency (IEA)*.
6. Biogas Brochure. (2011). Brussels, Belgium: *European Biogas Association (EBA)*, Renewable Energy House.
7. Biogas Report. (2015). *European Biogas Association (EBA)*.
8. Biogas to Energy. (2016). Study: *The World Market for Biogas Plants*, ecoprog GmbH.
9. Bove, R., and Lunghi, P. (2006). Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. *Energy Conversion and Management* 47(11), pp. 1391-1401.
10. Bozkurt, S., Moreno, L., and Neretnieks, I. (1999). Long-term fate of organics in waste deposits and its effect on metal release. *Science of the Total Environment* 228 (2), pp. 135-152.
11. Cho, H. S., Moon, H. S., and Kim, J. Y. (2012). Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. *Bioresource Technology* 109, pp. 86-92.
12. Danchev, S., Maniatis, G., and Tsakanikas, A. (2010). Returns on investment in electricity producing photovoltaic systems under de-escalating feed-in tariffs: The case of Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp. 500-505.
13. Daud, W. R. W., Rosli, R. E., Majlan, E. H., Hamid, S. A., and Mohamed, R. (2017). PEM Fuel Cell System Control: A review. *Renewable Energy*.

14. European Bioenergy Outlook Annual Report. (2015). *The European Biomass Association (AEBIOM)*.
15. Fei, X., Zekos, D., and Lutgard, R. (2015). «Quantification of parameters influencing methane generation due to biodegradation of municipal solid waste in landfills and laboratory experiments.» *Waste Management* 55, pp. 276-287.
16. Garcia, A. P. (2014). *Techno-economic feasibility study of a small-scale biogas plant for treating market waste in the city of El Alto*, Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management.
17. Gikas, P. (2008). Commissioning of the Gigantic Anaerobic Sludge Digesters at the Wastewater Treatment Plant of Athens. *Environmental Technology* 29, pp. 131-139.
18. Gilberto Fernando Jesus Guevara Carazas, and Gilberto Francisco Martha de Souza. 2009. Availability Analysis of Gas Turbines Used in Power Plants. *International Journal of Thermodynamics* 12 (1), pp. 28-37.
19. Guidance for Evaluating Landfill Gas Emissions from Closed or Abandoned Facilities. (2005). *United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA)*.
20. Hansen, T. (2013). *Demonstration and Verification of a Turbine Power Generation System Utilizing Renewable Fuel: Landfill Gas*. ESTCP Project EW-200823, Southern Research.
21. Kjeldsen, P. I., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., and Christensen, T. H. (2002). Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 32 (4), pp. 297-336.
22. Kost, C., Mayer, J. N., Thomsen, J., Hartmann, N., Senkpiel, C., Philipps, S., Nold, S., Lude, S., Saad, N., and Schlegl, T. (2013). *Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies Study*, Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
23. Landfill Gas Primer. (2001). *An Overview for Environmental Health Professionals*. ATSDR, Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Division of Health Assessment and Consultation.
24. Landfill Gas to Energy. (2013). *Gas Collection and Utilization Project*. Green Energy Solutions & Sustainability L.L.C. (GESS).
25. LFG Energy Project Development Handbook. (2015). Landfill Methane Outreach Program, *United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA)*.

26. Li, H., Jenkins-Smith, C. H., Silva, L. C., Berrens, P. R., and Herron, G. K. (2009). Public support for reducing US reliance on fossil fuels: investigating household willingness to pay for energy research and development. *Ecological Economics* 68, pp. 731-742.
27. Manasaki, V., and Gikas, P. (2014). *Landfill Gas to Electric Energy: Pros and Cons of Available Technologies*. International Solid Waste Association (ISWA) World Congress. Sao Paulo, Brazil.
28. Markou, G., Brule, M., Balafoutis, A., Georgakakis, D., and Papadakis, G. (2015). Energy-Crops-Based Biogas Plants in Greece: Economical Comparison of Maize and Sweet Sorghum Silages used as Feedstock. *23rd European Biomass Conference and Exhibition*. Vienna, Austria.
29. Mebarki, B., Adouane, B., Khaldi, F., Dehimi, S., and Haddad, D. (2015). Theoretical estimation of the production of biogas from the landfill of Batna city and its electrical conversion by a SOFC. *International Journal of Hydrogen Energy*.
30. Monni, S., Pipatti, R., Lehtilä, A., Savolainen, I., and Syri, S. (2006). *Global climate change mitigation scenarios for solid waste management*. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, VTT Publications 603.
31. Pawłowska, M. (2014). *Mitigation of Landfill Gas Emissions*. London, United Kingdom: CRC Press/Balkema.
32. Rajaram, V., Siddiqui, F. Z., and Khan, M. E. (2011). *From Landfill Gas to Energy: Technologies and Challenges*. CRC Press/Balkema.
33. Renewable Energy and Jobs, Annual Review. (2016). *International Renewable Energy Agency (IRENA)*.
34. IRENA Working Paper. (2012). Renewable Energy Technologies: Cost Analysis (Series) of Biomass for Power Generation. *International Renewable Energy Agency (IRENA)*.
35. Renewables, Global Status Report (GSR). (2016). Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21).
36. Ruiling, G., Shikun, C., and Zifu, L. (2017). *Research Progress of Siloxane Removal from Biogas*. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 10 (1), pp. 30-39.
37. Soares, C. (2011). *Microturbines: Applications for distributed Energy Systems*. BH, Elsevier.
38. Themelis, N. J., and P. A. Ulloa. (2007). «Methane generation in landfills.» *Renewable Energy* 32 1243–1257.

39. W&CC. (2010). *Waste and Climate Change: Global trends and strategy framework*. United Nations Environmental Programme Division of Technology, Industry and Economics International Environment Technology Centre Osaka/Shiga.
40. Wang, A., Benson, B., and Wheless, E. (2003). *Microturbine Operating Experience at Landfills*. Tampa, Florida: SWANA LFG Symposium.
41. Zafiris, C. (2016). *Biogas in Greece: Actual situation and perspectives*. Center for Renewable Energy Sources and Saving (CRES).
42. Ζαφείρης, Χ. (2010). *Αναβάθμιση Βιοαερίου σε Βιομεθάνιο, Χρήση σαν Καύσιμο Μεταφορών ή Έγχυσή του στο Δίκτυο του Φυσικού Αερίου*. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
43. Ζαφείρης, Χ. (2012). *Δυναμικό παραγωγής βιοαερίου από απόβλητα αγροτοβιομηχανιών*. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
44. Ζαφείρης, Χ. (2011). *Ενεργειακή Αξιοποίηση Βιοαερίου στην Ελλάδα*. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
45. Ζαφείρης, Χ. (2007). *Ενεργειακή Αξιοποίηση του Βιοαερίου: Τάσεις & Προοπτικές*. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
46. Κράλλης, Κ. (2015). *Βασικοί Υπολογισμοί Καυσίμων*.

Ιστοσελίδες

- [1] AEBIOM: The European Biomass Association.
<http://www.aebiom.org/>. [2015-2016]
- [2] CRES: Center for Renewable Energy Sources and Saving.
<http://www.cres.gr/kape/index.htm>. [2015-2016]
- [3] EBA: European Biogas Association.
<http://european-biogas.eu/>. [2015-2016]
- [4] EEA: European Environment Agency.
<http://www.eea.europa.eu/>. [2015-2016]
- [5] EIA: U. S. Energy Information Administration.
<http://www.eia.gov/>. [2015-2016]
- [6] ENER-CORE. <http://ener-core.com/technology/>. [2016-2017]
- [7] ENERGIA. <http://www.energia.gr/>. [2015-2016]
- [8] IEA: International Energy Agency. <http://www.iea.org/>. [2015-2016]
- [9] IRENA: International Renewable Energy Agency.
<http://www.irena.org/home/index.aspx?PriMenuID=12&mnu=Pri>.
[2015-2016]
- [10] RAE: Regulatory Authority for Energy. <http://www.rae.gr/site/portal.csp>.
[2015-2016]
- [11] U.S. EPA: United States Environmental Protection Agency.
<http://www.epa.gov/>. [2015-2016]

Παράρτημα

USER INPUTS

Landfill Name or Identifier: Landfill of Pera Gallines

1: PROVIDE LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year

1992

Landfill Closure Year

2015

Have Model Calculate Closure Year?

☐ Yes
 ☒ No

Waste Design Capacity

megagrams

2: DETERMINE MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k (year⁻¹)

0.04

Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m³/Mg)

User-specified

User-specified value: 96

NMOC Concentration (ppmv as hexane)

CAA - 4,000

Methane Content (% by volume)

CAA - 50% by volume

3: SELECT GASES/POLLUTANTS

Gas / Pollutant #1

Total landfill gas

Gas / Pollutant #2

Methane

Gas / Pollutant #3

Carbon dioxide

Gas / Pollutant #4

NMOC

4: ENTER WASTE ACCEPTANCE RATES

Input Units: Mg/year

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
1992	56.673	62.340
1993	57.467	63.214
1994	58.271	64.098
1995	59.087	64.996
1996	59.914	65.909
1997	60.753	66.828
1998	61.603	67.763
1999	62.466	68.713
2000	63.340	69.674
2001	64.590	71.049
2002	65.107	71.618
2003	65.628	72.191
2004	66.153	72.768
2005	66.682	73.350
2006	67.215	73.937
2007	67.753	74.528
2008	68.295	75.125
2009	139.825	153.808
2010	142.988	157.287
2011	120.401	132.441
2012	109.892	120.881
2013	133.835	147.219
2014	135.843	149.427
2015	179.885	197.870
2016		
2017		
2018		
2019		
2020		
2021		

Clear ALL Non-Parameter Inputs/Selections

Restore Default Model Parameters

Edit Existing or Add New Pollutant Parameters

Restore Default Pollutant Parameters

Description/Comments:

INTRO

USER INPUTS

POLLUTANTS

INPUT REVIEW

METHANE

RESULTS

GRAPHS

Εικόνα Π1-1: Περιβάλλον εργασίας υπολογιστικού μοντέλου LandGEM – Εισαγωγή παραμέτρων και ποσοτήτων ΑΣΑ

~ 174 ~

INPUT REVIEW

Landfill Name or Identifier: Landfill of Pera Galines

LANDFILL CHARACTERISTICS

Landfill Open Year

1992

Landfill Closure Year (with 80-year limit)

2015

Actual Closure Year (without limit)

2015

Have Model Calculate Closure Year?

No

Waste Design Capacity

megagrams

MODEL PARAMETERS

Methane Generation Rate, k

0,040

year⁻¹

Potential Methane Generation Capacity

96

m³/Mg

NMOC Concentration

4.000

ppmv as hexane

Methane Content

50

% by volume

GASES / POLLUTANTS SELECTED

Gas / Pollutant #1: Total landfill gas

Gas / Pollutant #2: Methane

Gas / Pollutant #3: Carbon dioxide

Gas / Pollutant #4: NMOC

Description/Comments:

WASTE ACCEPTANCE RATES

Year	(Mg/year)	(short tons/year)
1992	56.673	62.340
1993	57.467	63.214
1994	58.271	64.098
1995	59.087	64.996
1996	59.914	65.905
1997	60.753	66.828
1998	61.603	67.763
1999	62.466	68.713
2000	63.340	69.674
2001	64.590	71.049
2002	65.107	71.818
2003	65.628	72.191
2004	66.153	72.768
2005	66.682	73.350
2006	67.215	73.937
2007	67.753	74.528
2008	68.295	75.125
2009	139.825	153.808
2010	142.988	157.287
2011	120.401	132.441
2012	109.892	120.881
2013	133.836	147.219
2014	135.843	149.427
2015	179.882	197.870
2016	0	0
2017	0	0
2018	0	0
2019	0	0

USER INPUTS

POLLUTANTS

INPUT REVIEW

METHANE

RESULTS

GRAPHS

INVENTORY

REPORT

ENV

Εικόνα Π1-2: Περιβάλλον εργασίας υπολογιστικού μοντέλου LandGEM – Περίληψη
 χαρακτηριστικών ΧΥΤΑ