



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική εργασία: Μελέτη του αέριου μεθανίου και εφαρμογή του στη βιομηχανία

Κωνσταντίνος Χριστόφορος Αποστόλου

ΑΜ:2016010052

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Τσαγκαράκης

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Μαρία Μπακατσάκη, Πάυλος Φαφαλιός

Χανιά, Ιούλιος 2025

Περιεχόμενα

Πίνακας Σχημάτων	4
Περίληψη.....	5
Summary	6
1. Εισαγωγή	7
1.1 Σημασία και σκοπός της μελέτης	7
1.2 Ορισμός του μεθανίου	7
1.3 Ιστορική αναδρομή της ανακάλυψης και χρήσης του	8
2.Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	10
2.1 Φυσικοχημικές Ιδιότητες του Μεθανίου	10
2.2 Χημικές αντιδράσεις στη βιομηχανία	11
2.2.1 Καύση	11
2.2.2 Ατμομεθανική αναμόρφωση.....	11
2.2.3 Αναερόβια Χώνευση	11
2.2.4 Πυρόλυση	13
2.3 Πηγές και Μορφές του Μεθανίου ως πηγή ενέργειας στη βιομηχανία	14
2.3.1 Φυσικές πηγές.....	14
2.3.1.1 Φυσικό αέριο (Natural gas)	14
2.3.1.2 Γαιανθρακικό μεθάνιο (Coalbed methane).....	14
2.3.2 Ανθρωπογενείς πηγές (επεξεργασμένες μορφές)	14
2.3.2.1 Βιοαέριο (Biogas).....	14
2.3.2.2 Βιομεθάνιο (Biomethane)	14
2.3.2.3 Συνθετικό αέριο (Syngas)	15
2.4 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις του Μεθανίου	15
2.4.1 Ο ρόλος του μεθανίου στην κλιματική κρίση.....	16
2.4.2 Μέθοδοι Μείωσης και Αντιμετώπισης Εκπομπών Μεθανίου	16
3. Μεθοδολογία Έρευνας και Επεξεργασία Πληροφοριών	18
Βήμα 1: Επιλογή κατάλληλου keyword	18
Βήμα 2: Συλλογή και λήψη των δεδομένων.....	18
Βήμα 3: Συμπλήρωση των δεδομένων.....	18
Βήμα 4: Δημιουργία Σχημάτων	18
4. Ανάλυση και Συζήτηση	20
4.1 Μεγέθη εταιρειών που ασχολούνται με το μεθάνιο	20
4.2 Εταιρείες ανά χώρα	20
4.3 Εταιρείες ανά έτος ίδρυσης	21
4.4 Ακόλουθοι εταιρειών	22

4.5 Δημοτικότητα	23
4.6 Γεωγραφική κατανομή	23
4.7 Σύγκριση έτους ίδρυσης και υπαλλήλων	24
4.8 Συσχέτιση μεγέθους εταιρείας και έδρας	24
4.9 Σύγκριση Followers και έτους ίδρυσης	25
4.10 Ειδικότητες εταιρειών	26
4.10.1 Κατανομή εταιρειών σε σχέση με τη χρήση του μεθανίου ως πηγή ενέργειας ..	26
4.10.2 Κατανομή εταιρειών σε σχέση με τις δράσεις αντιμετώπισης των εκπομπών μεθανίου	27
4.10.3 Τομέας εξειδίκευσης.....	28
5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές	29
6. Μελλοντικές επεκτάσεις	30
7. Βιβλιογραφία.....	31

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1 Κατανομή εταιρειών βάσει αριθμού εργαζόμενων	20
Σχήμα 2 Κατανομή εταιρειών ανά χώρα έδρας	21
Σχήμα 3 Κατανομή εταιρειών ανά περίοδο ίδρυσης	22
Σχήμα 4 Σύγκριση μεγέθους εταιρείας με αριθμό ακολούθων στο LinkedIn	22
Σχήμα 5 Κατανομή εταιρειών ανά δημοτικότητα	23
Σχήμα 6 Χάρτης εδρών εταιρειών	24
Σχήμα 7 Σύγκριση έτους ίδρυσης και αριθμού υπαλλήλων	24
Σχήμα 8 Σύγκριση τοποθεσίας έδρας και αριθμού υπαλλήλων	25
Σχήμα 9 Σύγκριση έτους ίδρυσης και ακολούθων	25
Σχήμα 10 Κατανομή εταιρειών με βάση το μεθάνιο ως πηγή ενέργειας	27
Σχήμα 11 Κατανομή εταιρειών με βάση τις δράσεις αντιμετώπισης εκπομπών μεθανίου ...	28
Σχήμα 12 Κατανομή εταιρειών με βάση τον τομέα εξειδίκευσης	28

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του αέριου μεθανίου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας έναντι των καθιερωμένων και διαδεδομένων ορυκτών καυσίμων, καθώς και η έρευνα των εφαρμογών του στους διάφορους τομείς βιομηχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Η μελέτη αποτελείται από δύο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα συντάχθηκε μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριότερων σημείων της μελέτης βάσει των πληροφοριών που είχαν την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης κατά την ανάλυση των δεδομένων, καθώς κρίθηκαν ως οι πιο αντιπροσωπευτικές και σχετικές έννοιες στο σύνολο του ερευνητικού υλικού. Στο δεύτερο τμήμα, το οποίο αφορά την συλλογή και ανάλυση δεδομένων, πρώτο βήμα αποτέλεσε η συλλογή δεδομένων από τα προφίλ περίπου 1000 εταιρειών από τη διαδικτυακή πλατφόρμα κοινωνικής δικτύωσης LinkedIn. Για την εύρεση των δεδομένων εισάχθηκε η χρήση της φράσης κλειδί methane gas στη μπάρα έρευνας της πλατφόρμας, η οποία επιλέχθηκε ώστε τα αποτελέσματα της έρευνας να ανέρχονται κοντά στα 1000, καθώς και να αφορά ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα βιοκασίμου. Κατόπιν συλλογής και λήψης των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε αναλυτική ανάγνωση και συμπλήρωση τους σε περίπτωση απουσίας κρίσιμων πληροφοριών όπως οι ειδικότητες μιας επιχείρησης. Στη συνέχεια με την χρήση του λογισμικού Microsoft Excel σε συνδυασμό με εις βάθος ανάλυση των δεδομένων, δημιουργήθηκαν ορισμένα σχήματα, καθένα εκ των οποίων μελετά μία συγκεκριμένη οπτική της παρούσας κατάστασης του βιομηχανικού κλάδου του μεθανίου όπως η γεωγραφική παρουσία των επιχειρήσεων οι οποίες ασχολούνται με το μεθάνιο, η ανάπτυξη τους ως αντανάκλαση της ανάπτυξης του κλάδου και φυσικά η κατανομή τους βάσει των ειδικοτήτων τους. Μέσω αυτών των σχημάτων προκύπτουν πολύτιμα συμπεράσματα σχετικά με την πραγματικότητα που επικρατεί στον βιομηχανικό τομέα της ενέργειας σχετικά με το μεθάνιο. Τα συμπεράσματα αυτά αναδεικνύουν μεταξύ άλλων, τις χώρες με την μεγαλύτερη συνεισφορά στον κλάδο, το ρυθμό ανάπτυξης του κλάδου όπως και τους τομείς του κλάδου οι οποίοι έχουν λάβει τη μεγαλύτερη ανάπτυξη. Με τον συνδυασμό των επιμέρους συμπερασμάτων αυτών προκύπτει το πόρισμα ότι το ήδη διαδεδομένο και εκμεταλλευόμενο βιοκάσιμο γνωστό ως βιοαέριο το οποίο αποτελεί παράγωγο του μεθανίου, δύναται να γίνει ακόμα πιο αποτελεσματικό ως πηγή ενέργειας αλλά και λιγότερο βλαβερό για το περιβάλλον με την διαδικασία του καθαρισμού και τη μετατροπή του σε βιομεθάνιο το οποίο είναι σχεδόν πλήρως αβλαβές στην ατμόσφαιρα διατηρώντας παράλληλα την ενεργειακή απόδοση του παραδοσιακού μεθανίου. Δεδομένης της σύγχρονης ενεργειακής και κλιματικής κρίσης, μέσω αυτής της μελέτης η ανάγκη για επένδυση στον τομέα του βιομεθανίου το οποίο δρα ως αποτελεσματική, ανανεώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας καθίσταται εμφανής και επιτακτική.

Λέξεις-κλειδιά: Μεθάνιο, Ενέργεια, Περιβάλλον, Βιοαέριο, Βιομεθάνιο

Summary

The purpose of the herewith dissertation is the study of methane gas as an alternative energy source to the established and widespread fossil fuels, as well as research into their implementations into the different sects of industry worldwide. The study consists of two sections. In the first section, a literature review was conducted on the key aspects of the study based on the most frequently occurring information during the data analysis, as these were considered the most representative and relevant facts within the overall research material. In the second section, which focuses on data collection and analysis, the first step was the extraction and collection of data from about 1000 company profiles from the digital social media platform LinkedIn. The data retrieval process involved entering the keyword phrase 'methane gas' in the search bar of the platform, which was chosen to ensure a simultaneous result set of approximately 1000 entries as well as representing a characteristic example of a biofuel. Following the collection and extraction of the data, a thorough review and completion of the entries was carried out to ensure any missing important information was added, one example being the specialties of a company. Following that, with the use of Microsoft Excel software combined with an in-depth analysis of the data, several graphical presentations were created, with each one studying a specific aspect of the current state of the methane industry sector, including but not limited to the geographical presence of companies specializing in methane, their development as a reflection of the sector's development and of course their distribution according to their specialties. Valuable conclusions can be drawn from these graphical presentations regarding the reality of the industrial sector regarding methane as an energy source. These findings highlight, among other things, the countries providing the largest contribution to the sector, the growth rate of the sector as well as the parts of the sector that have undergone the most development so far. By synthesizing these individual findings, it can be concluded that the already widespread and widely used biofuel known as biogas which is a derivative of methane, can become a lot more efficient as an energy source as well as become a lot less of a risk for the environment by undergoing the process of purification and turning into biomethane, which is almost completely harmless in the atmosphere while maintaining the energy output of the traditional methane. Given the ongoing energy and environmental crisis, through this study the need to invest in the field of biomethane, which is an efficient, renewable and friendly to the environment energy source, becomes both evident and urgent.

Keywords; Methane, Energy, Environment, Biogas, Biomethane

1. Εισαγωγή

1.1 Σημασία και σκοπός της μελέτης

Στόχος αυτής της μελέτης είναι εις βάθος ανάλυση της φύσης και των ιδιοτήτων του μεθανίου ως χημικής ένωσης και πηγής ενέργειας, όπως και η παρουσίαση της προέλευσης και των εφαρμογών του στον βιομηχανικό τομέα στη σύγχρονη εποχή. Παράλληλα θα διερευνηθούν οι επιπτώσεις του μεθανίου και της καύσης του σε περιβαλλοντικό και βιομηχανικό επίπεδο, ενώ στη συνέχεια θα εξεταστούν στρατηγικές μετριασμού και διαχείρισης τους.

Η σημασία αυτής της μελέτης είναι κρίσιμη καθώς, με την επιστημονική κοινότητα να κρούει τον κώδωνα του κινδύνου σχετικά με την υπερβολική εξάρτηση από την καύση ορυκτών καυσίμων καθώς και την σταδιακή μείωσή τους σε ανησυχητικά χαμηλά επίπεδα, κρίνεται αναγκαίο να αναπτυχθούν εναλλακτικές ενεργειακές πηγές που να είναι οικονομικά βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές, παράλληλα όμως ικανές να ικανοποιήσουν τις σύγχρονες ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες για ενέργεια τόσο σε βιομηχανικό όσο και οικονομικό επίπεδο και συνεπώς να συμβάλουν στην άμβλυνση της παγκόσμιας ενεργειακής κρίσης, εξισορροπώντας την ενεργειακή ζήτηση με τις περιβαλλοντικές προκλήσεις.

Για την μελέτη, έχουν αντληθεί δεδομένα χιλίων βιομηχανιών από την διαδικτυακή πλατφόρμα LinkedIn και, κατόπιν μελέτης και ανάλυσης τους με τη δημιουργία γραφημάτων, εξάγονται πολύτιμα πορίσματα τα οποία είναι απαραίτητα για την πρόταση μελλοντικών πολιτικών και στρατηγικών. Οι στρατηγικές αυτές θα καθορίσουν τη βιώσιμη χρήση του μεθανίου ως πηγής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο και τις οικονομικές και τεχνολογικές διαστάσεις της ενεργειακής μετάβασης.

1.2 Ορισμός του μεθανίου

Το μεθάνιο (CH_4), γνωστό επίσης και ως βιοαέριο ή μέθυλουδρίδιο, είναι ένα άχρωμο, άοσμο και εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο που απαντάται σε αφθονία στη φύση και παράγεται τόσο από φυσικές, όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες. Αποτελεί το απλούστερο μέλος της οικογένειας των παραφινών υδρογονανθράκων και ανήκει στα ισχυρότερα αέρια του θερμοκηπίου, με σημαντική συμβολή στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Χημικά το μεθάνιο αποτελείται από ένα άτομο άνθρακα συνδεδεμένο με τέσσερα άτομα υδρογόνου, γεγονός το οποίο το καθιστά το απλούστερο αλκάνιο καθώς και ένα από τα βασικότερα υβρίδια της ομάδας-14.

Αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου, μιας σημαντικής πηγής ενέργειας ενώ, λόγω της ευρείας κατανομής του θεωρείται ένα οικονομικά ελκυστικό καύσιμο. Εξαιτίας όμως της αέριας κατάστασής του, καθώς πρόκειται για ένα αέριο σε τυπικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, η δέσμευση, αποθήκευση και μεταφορά του μετατρέπονται από φαινομενικά απλές διαδικασίες σε προκλήσεις.

Το μεθάνιο επιπλέον, είναι ένα από τα πιο ισχυρά αέρια του θερμοκηπίου, με μικρότερη διάρκεια ζωής (7-12 έτη) από αυτή του διοξειδίου του άνθρακα, αλλά με πολλαπλάσια ικανότητα εγκλωβισμού του θερμότητας. Όντας το δεύτερο πιο άφθονο ανθρωπογενές αέριο μετά το CO_2 , φέρει την ευθύνη για 11% των παγκόσμιων εκπομπών. Το μεθάνιο είναι διαφανές στο ορατό φως όταν βρίσκεται στην ατμόσφαιρα της Γης, ενώ οι συγκεντρώσεις του έχουν υπερδιπλασιαστεί τα τελευταία 200 χρόνια, κυρίως λόγω ανθρωπογενών

δραστηριοτήτων οι οποίες θα περιγράφουν αναλυτικότερα σε μεταγενέστερο τμήμα της μελέτης. (Britannica T. E., 1998) (Agency, Importance of Methane, 2023) (NASA, 2024)

1.3 Ιστορική αναδρομή της ανακάλυψης και χρήσης του

Η ανακάλυψη του μεθανίου αποδίδεται στον Ιταλό φυσικό Alessandro Volta, ο οποίος μεταξύ 1776 και 1778 μελέτησε τη χημεία των αερίων, εμπνευσμένος από ένα άρθρο του Benjamin Franklin σχετικά με τον «εύφλεκτο αέρα». Τον Νοέμβριο του 1776, κατά τη διάρκεια των ερευνών του στα έλη της Ανγκέρα στη λίμνη Maggiore της Ιταλίας, εντόπισε την παρουσία ενός εύφλεκτου αερίου, το οποίο συνέλεξε και απομόνωσε μέχρι το 1778. Ο Volta, μέσω πειραμάτων, απέδειξε ότι το συγκεκριμένο αέριο μπορούσε να αναφλεγεί, προκαλώντας ισχυρό βρυχηθμό όταν ερχόταν σε επαφή με φωτιά. Ένα από τα πειράματα του περιλάμβανε την ανάφλεξη του αερίου με ηλεκτρικό σπινθήρα μέσα σε κλειστό δοχείο, το οποίο επιβεβαίωσε την εύφλεκτη φύση του μεθανίου.

Παράλληλα, λίγα χρόνια αργότερα, εντελώς ανεξάρτητα, ο Άγγλος επιστήμονας John Dalton, ο οποίος αργότερα έγινε μέλος της Βασιλικής Εταιρείας (πρώην Βασιλικής Εταιρείας του Λονδίνου για τη βελτίωση των Φυσικών Γνώσεων) το 1822 για τη συμβολή του στην ατομική θεωρία, πραγματοποίησε αντίστοιχο πείραμα στο Μάντσεστερ. Ο Dalton παρατήρησε ότι το αέριο που συνέλεξε αναφλεγόταν με την ίδια ευκολία και το ονόμασε «υδρογόνο σε καρμπυραντέρ» (carburetted hydrogen), εισηγούμενος ότι αποτελείται από ένα άτομο άνθρακα και 2 άτομα υδρογόνου, θεωρία που αργότερα διαψεύστηκε.

Οι πρωτοποριακές μελέτες του Volta όχι μόνο οδήγησαν στην ανακάλυψη του μεθανίου ως ξεχωριστής χημικής ένωσης, αλλά συνέβαλαν σημαντικά στην κατανόηση της φυσικής παραγωγής αερίων και της σχέσης του με τις χημικές αντιδράσεις και τις φυσικές διεργασίες στους υγροτόπους. Το έργο του αποτέλεσε θεμέλιο λίθο για τις μελλοντικές έρευνες στη χημεία των αερίων, ενώ οι ανεξάρτητες μελέτες του Dalton συνέβαλαν στην ανάπτυξη της ατομικής θεωρίας και της ταξινόμησης των αερίων βάσει της σύστασής τους. (contributors, Alessandro Volta, n.d.)

Από τους αρχαιότερους χρόνους, το μεθάνιο, υπό τη μορφή του ως βασικού συστατικού του φυσικού αερίου, χρησιμοποιούνταν από τον άνθρωπο κυρίως για σκοπούς θέρμανσης. Η πρώτη καταγεγραμμένη συστηματική αξιοποίηση του αποδίδεται στους Κινέζους, τουλάχιστον από τον 10^ο αιώνα π.Χ., οι οποίοι ανέπτυξαν μία πρωτοποριακή μέθοδο μεταφοράς του μεθανίου με τη χρήση σωλήνων από καλάμια μπαμπού. Το αέριο στη συνέχεια καιγόταν με σκοπό την εξάτμιση του θαλασσινού νερού, διευκολύνοντας έτσι την παραγωγή αλατιού, διαδικασία αποφασιστικής σημασίας τόσο για την διατήρηση των τροφίμων όσο και για την βιοτεχνική παραγωγή της εποχής. Παράλληλα, η εκπομπή φυσικού αερίου από σχισμές του εδάφους, γινόταν αντιληπτή σε διάφορες περιοχές, ενώ παρατηρήθηκε ότι εισπνοή του αερίου προκαλούσε έντονη σύγχυση, κατάσταση έκστασης και ασυναρτησία στην ομιλία. Λόγω της έλλειψης επιστημονικής γνώσης στα αρχαία χρόνια, οι επιπτώσεις αυτές αποδόθηκαν σε υπερφυσικές δυνάμεις, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα τη σύνδεση του φυσικού αερίου με θρησκευτικές και μαντικές πρακτικές. Έχει διαπιστωθεί ότι πολλά μαντεία και ναοί έχουν αναγερθεί σε περιοχές με φυσικές διαρροές μεθανίου και άλλων καυσίμων, τα οποία θεωρούνταν χώροι επαφής με τα θεία καθώς και κέντρα προφητείας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα το γνωστό μαντείο των Δελφών, όπου λέγεται ότι διαρροή μίξης διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου από το έδαφος οδηγούσε την ιέρεια, γνωστή στους μύθους ως Πυθία σε κατάσταση έκστασης, ώστε να κάνει χρησμούς.

Εκτός από την θερμαντική και θρησκευτική του χρήση, το μεθάνιο αξιοποιούνταν και ως πηγή φωτισμού, με αναφορές σε αυτή του την ιδιότητα ήδη από τον 2^ο αιώνα μ.Χ. Επίσης, ως αέριο των ελών (ή ελογενές αέριο-marsh gas), το μεθάνιο ήταν ένα από τα πρώτα αέρια που αναγνωρίστηκαν ως διακριτές θερμικές ενώσεις, θέτοντας με αυτόν τον τρόπο τις βάσεις για την μελλοντική κατανόηση της χημείας των αερίων.

Η ιστορική πορεία του μεθανίου δείχνει ότι πολύ πριν την επιστημονική του ανακάλυψη και ταυτοποίηση, το ανθρώπινο γένος είχε αντιληφθεί τόσο τις πρακτικές του χρήσεις όσο και τις επιπτώσεις του στην ανθρώπινη συμπεριφορά, εντάσσοντάς το έτσι σε τελετουργικές, και καθημερινές δραστηριότητες ενώ τα τελευταία 200 χρόνια εντάχθηκε και σε βιομηχανικές δραστηριότητες. (Group M. , 2023) (Pennisi, 2006)

2.Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Φυσικοχημικές Ιδιότητες του Μεθανίου

Το μεθάνιο είναι γνωστό ως η απλούστερη οργανική ένωση και επίσης το πρώτος μέλος της σειράς των αλκανίων, γνωστών και ως κορεσμένων υδρογονανθράκων. Η χημική σύνθεση του μεθανίου είναι ένα άτομο άνθρακα συνδεδεμένο μέσω ομοιοπολικών δεσμών, ελαφρά πολωμένων, με 4 άτομα υδρογόνου, καθιστώντας το την οργανική ένωση με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Οι δεσμοί C-H είναι τύπου σ, με ίδιο μήκος δεσμού 109 pm ($1.09 \cdot 10^{-10}$ m), γωνία δεσμού $109^\circ 28'$ και ιονισμό 3%. Ο χημικός τύπος του μεθανίου είναι CH_4 ενώ η μοριακή δομή του μορίου του μεθανίου στο χώρο είναι κανονικό τετράεδρο. Το βάρος του μορίου (molecular weight) είναι 16.043 g/mol, ενώ η ακριβής μάζα του μορίου είναι 16.0313001276 Da, όπου το Da εκφράζει τη μονάδα μέτρησης Dalton με ισότητα 1 Da=1/12 της μάζας του μορίου άνθρακα η οποία ισούται με $1,66053906660 \times 10^{-27}$ kg. Τέλος, η κατανομή των φορτίων των ατόμων άνθρακα και υδρογόνου σε ουδέτερο μόριο είναι -0,12 για άνθρακα και 0,03 για υδρογόνο.

Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες του μεθανίου, αρχικά γνωστά είναι το σημείο τήξης και το σημείο βρασμού του τα οποία ανέρχονται στους $-182,5^\circ\text{C}$ (90,65 K) και $-161,6^\circ\text{C}$ (111,55 K) υπό πίεση 1 atm. Επιπλέον η κρίσιμη θερμοκρασία (ή κρίσιμο σημείο στη θερμοδυναμική), δηλαδή η θερμοκρασία στην οποία το μεθάνιο μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονα σε υγρή και αέρια φάση είναι $-82,6^\circ\text{C}$ (190,55 K), ενώ η κρίσιμη πίεση, δηλαδή η πίεση που επικρατεί στο κρίσιμο σημείο είναι 45,3984703 atm. Η πυκνότητα του μεθανίου ορίζεται στα 0,717 kg/m³, καθιστώντας το ελαφρύτερο από τον αέρα. Η διαλυτότητα του στο νερό είναι ελάχιστη, μόλις 35 g/m³ (στους 17°C). Η τάση ατμών, δηλαδή η πίεση των ατμών ενός στοιχείου ή μιας ένωσης ώστε αυτοί να βρίσκονται σε ισορροπία με την υγρή ή στερεή φάση του στοιχείου ή ένωσης είναι 40 atm συγκεκριμένα στους $-86,3^\circ\text{C}$. Το μεθάνιο είναι άοσμο, άχρωμο και εξαιρετικά εύφλεκτο, με θερμοκρασία ανάφλεξης -188°C .

Το μεθάνιο απαντάται κυρίως σε αέρια μορφή αλλά με την εφαρμογή κατάλληλων θερμοκρασιών δύναται να μεταβεί σε υγρή ή και στερεή φάση. Σε υγρή φάση το μεθάνιο είναι αραιότερο από το νερό με πυκνότητα 0,42kg/L στους -164°C , καθώς και με χαμηλό ιξώδες, καθιστώντας τη ροή του εύκολη. Όπως και στην αέρια μορφή του, το υγρό μεθάνιο είναι άοσμο και άχρωμο. Σε αντίθεση με την αέρια μορφή του όμως, το υγρό μεθάνιο δεν καίγεται υπό συνθήκες κανονικής πίεσης 1 atm. Οι συνθήκες πίεσης που δύναται να προκαλέσουν ανάφλεξη του υγρού μεθανίου είναι 4-5 atm.

Στην στέρεα μορφή του, το μεθάνιο απαντάται σε αρκετές δομικές μορφές. Κατά την ψύξη υπό κανονική πίεση (1 atm) δημιουργείται η δομική δομή μεθάνιο I. Σε αυτή τη μορφή το μεθάνιο κρυσταλλώνεται με τετράεδρη συμμετρία, με τις θέσεις των ατόμων του υδρογόνου στο μόριο να μην είναι σταθεροποιημένες, ενώ το ίδιο το μόριο έχει τη δυνατότητα να περιστρέφεται ελεύθερα. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται κατάσταση πλαστικού κρυστάλλου. Η διαλυτότητα του στέρεου μεθανίου είναι μεγαλύτερη σε οργανικούς διαλύτες, ενώ έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από την υγρή μορφή, με εξαίρεση συγκεκριμένες τιμές οι οποίες μπορεί να διαφέρουν αναλόγως των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Τέλος η ύπαρξη του στέρεου μεθανίου δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμη ενώ με τον αέρα σχηματίζει εκρηκτικά μείγματα, καθιστώντας τον έναν από τους κύριους λόγους εκρήξεων σε ανθρακωρυχεία. (Information, 2004) (Group S. , 2018) (Contributors, n.d.)

2.2 Χημικές αντιδράσεις στη βιομηχανία

Το μεθάνιο, όπως όλες οι χημικές ενώσεις, αντιδρά με άλλα στοιχεία ή ενώσεις υπό ορισμένες συνθήκες. Ορισμένες από αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς. Οι κυριότερες χημικές αντιδράσεις του μεθανίου είναι η καύση, η ατμομεθανική αναμόρφωση η αναερόβια χώνευση και η πυρόλυση, οι οποίες θα μελετηθούν εις βάθος στη συνέχεια.

2.2.1 Καύση

Η καύση του μεθανίου είναι η πιο γνωστή χημική αντίδραση της ένωσης αυτής και πραγματοποιείται σε πολλές μορφές. Η πιο συνηθισμένη είναι η καύση του μεθανίου με οξυγόνο (O_2), όπου επρόκειτο για μία εξώθερμη χημική αντίδραση η οποία παράγει γαλαζωπή φλόγα και υψηλές θερμοκρασίες. Η θερμότητα καύσης του μεθανίου είναι 55,5 MJ/kg. Η αντίδραση καύσης του μεθανίου είναι: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$.

Παρά το γεγονός ότι η αντίδραση είναι έντονα εξώθερμη, δεν πραγματοποιείται σε μέτριες θερμοκρασίες, καθώς η εκκίνηση της απαιτεί τη διάσπαση των δεσμών C-H και O=O, οι οποίοι είναι ισχυροί και επομένως απαιτούν υψηλή ενέργεια ενεργοποίησης. Για αυτό το λόγο απαιτούνται ενεργητικά μέσα (M^*) για τη μεταφορά της απαιτούμενης θερμότητας. (Glassman & Yetter, 2008)

2.2.2 Ατμομεθανική αναμόρφωση

Η ατμομεθανική αναμόρφωση (Steam Methane Reforming, SMR) αποτελεί την κυρίαρχη μέθοδο παραγωγής υδρογόνου στο βιομηχανικό τομέα, το οποίο θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους φορείς ενέργειας μελλοντικής γενιάς, αξιοποιώντας την αντίδραση του μεθανίου με υδρατμούς για την παραγωγή υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο, η διαδικασία συνοδεύεται από σημαντικές εκπομπές CO_2 , τόσο εξαιτίας της ίδιας της αντίδρασης της αναμόρφωσης όσο και της καύσης που απαιτείται για τη θερμική αναμόρφωση της. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, η τεχνολογία ατμομεθανικής αναμόρφωσης ενισχυμένης ρόφησης (SESMR - Sorption-enhanced steam methane reforming) έχει προταθεί ως μία λύση που επιτρέπει την επιτόπια απομάκρυνση του CO_2 , βελτιώνοντας την απόδοση παραγωγής υδρογόνου. Παράλληλα, η αντικατάσταση της θερμικής ενέργειας της καύσης με ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές έχει τη δυνατότητα να εξαλείψει τις εκπομπές που σχετίζονται με την απώλεια θερμοκρασίας καυσαερίων. Η διακοπτόμενη διαθεσιμότητα και αστάθεια της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές όμως, αποτελούν πρόκληση για τη σταθερή και ομαλή εκτέλεση της διαδικασίας. Η διαδικασία SEESMR αξιοποιεί τη δυνατότητα του υλικού πρόσρόφησης να λειτουργεί τόσο ως φορέας CO_2 όσο και ως φορέας ενέργειας. Η ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιείται για την πύρωση του ροφητικού στον αναγεννητή, αποθηκεύοντας τη θερμότητα ως χημική ενέργεια, η οποία στη συνέχεια απελευθερώνεται στον αναμορφωτή κατά τη διάρκεια της αντίδρασης πρόσρόφησης του διοξειδίου του άνθρακα. (Song, Zhang, Lin, Bian, & Liu, 2025) (Gupta & Agarwal, 2024)

2.2.3 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μία από τις πιο ευρέως διαδεδομένες αντιδράσεις του μεθανίου στον βιομηχανικό χώρο όπως και η ατμομεθανική αναμόρφωση, αλλά για διαφορετικούς λόγους. Ως διαδικασία, η αναερόβια χώνευση πραγματοποιείται τόσο φυσικά όσο και τεχνητά. Η αντίδραση περιλαμβάνει την διάσπαση οργανικής ύλης μέσω

μικροοργανισμών απουσία οξυγόνου. Η φυσική εκδοχή της διαδικασίας αυτής πραγματοποιείται κυρίως σε ιζήματα λιμνών και ωκεάνιων λεκανών ενώ η τεχνητή εκδοχή σε ειδικά σχεδιασμένες βιομηχανικές εγκαταστάσεις με τη χρήση χωνευτήριων και βιοαντιδραστήρων. Αποτέλεσμα και των δύο εκδοχών της διαδικασίας είναι η παραγωγή βιοαερίου (biogas) και χωνεμένου υπολείμματος (digestate).

Τα δύο παράγωγα αυτής της αντίδρασης είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στον άνθρωπο, με το χωνεμένο υπόλειμμα πλούσιο σε θρεπτικά υλικά και επομένως να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα. Το βιοαέριο όμως είναι το σημαντικότερο από τα δύο καθώς αποτελεί μια ανανεώσιμη και αποτελεσματική πηγή ενέργειας με δυνατότητα να συνεισφέρει στην επίλυση της κλιματικής κρίσης των τελευταίων ετών.

Η αντίδραση της αναερόβιας χώνευση αποτελείται από τέσσερις φάσεις:

- 1) Υδρόλυση: Προτού ξεκινήσει η αναερόβια χώνευση, είναι αναγκαίο τα σύνθετα οργανικά μόρια (ή πολυμερή) της βιομάζας να διασπαστούν σε απλούστερα σωματίδια (ή μονομερή) σάκχαρα, οξέα και λιπαρά οξέα. Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της υδρόλυσης, όπου τα πολυμερή, χρήσει νερού και ενζύμων τα οποία παράγουν ειδικά βακτήρια, διασπώνται στα επιθυμητά μονομερή. Με αυτόν τον τρόπο, οι μικροοργανισμοί οι οποίοι δρουν ως καταλύτες για την αναερόβια χώνευση έχουν ευκολότερη πρόσβαση στην οργανική ύλη στις επόμενες φάσεις. Χωρίς τη διαδικασία της υδρόλυσης, η αντίδραση της αναερόβιας χώνευσης θα ήταν πολύ πιο αργή και πολύ λιγότερο αποδοτική.
- 2) Οξυγένεση: Η επόμενη φάση της αναερόβιας χώνευσης είναι η οξυγένεση ή οξεογένεση, η οποία έχει καθοριστικό ρόλο στην τελική παραγωγή του βιοαερίου. Κατά τη φάση αυτή, τα μονομερή που προκύπτουν από την υδρόλυση διασπώνται περαιτέρω από οξεογόνα βακτήρια. Παράγωγα αυτής της φάσης είναι μεταξύ άλλων, τα πτητικά λιπαρά οξέα (Volatile Fatty Acids – VFAs), αμμωνία, διοξείδιο του άνθρακα και υδροθείο. Τα VFAs είναι τα παράγωγα τα οποία στην τελική φάση της μεθανογένεσης μετατρέπονται σε μεθάνιο.
- 3) Ακετογένεση: Σε αυτή τη φάση τα παράγωγα της οξυγένεσης, πιο συγκεκριμένα τα VFAs, διασπώνται περαιτέρω με τη χρήση ειδικών βακτηριών τα οποία ονομάζονται ακετογόνα. Τα ακετογόνα μετατρέπουν τα VFAs σε διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και τέλος σε οξικό οξύ (CH_3COOH), το οποίο είναι και το σημαντικότερο παράγωγο αυτής της φάσης, καθώς στην τέταρτη και τελευταία φάση μετατρέπεται σε μεθάνιο.
- 4) Μεθανογένεση: Η τελική φάση της αναερόβιας χώνευσης. Σε αυτή τη φάση συμμετέχουν τα μεθανογόνα βακτήρια τα οποία μετατρέπουν το παραγόμενο οξικό οξύ από την προηγούμενη φάση καθώς και άλλα παράγωγα των προηγούμενων φάσεων και τα μετατρέπουν στα τελικά παράγωγα της αντίδρασης: μεθάνιο, νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Οι τρεις αυτές ενώσεις αποτελούν τα κύρια συστατικά του βιοαερίου. Μια σημαντική συνθήκη για την ομαλή πραγματοποίηση αυτής της φάσης είναι η διατήρηση της τιμής του pH μεταξύ 6,5 και 8, καθώς η φάση είναι ευαίσθητη σε pH χαμηλότερα ή υψηλότερα αντίστοιχα. Τέλος ότι υλικό περισσέψει λόγω δυσπεψίας του από τα βακτήρια (indigestible material) αποτελεί το χωνεμένο υπόλειμμα.

Όντας μια αντίδραση η οποία μετατρέπει τα απόβλητα σε πόρους, αξιοποιεί νέες τεχνολογίες για τη μείωση κόστους κεφαλαίου και συνεισφέρει στην αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης και τη δημιουργία πράσινης οικονομίας, η αναερόβια χώνευση έχει λάβει σημαντική

προσοχή από κυβερνήσεις παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια όπως η Γερμανία, η Δανία και οι ΗΠΑ. (Conservation, n.d.) (Agency, How Does Anaerobic Digestion Work?, n.d.)

2.2.4 Πυρόλυση

Η πυρόλυση μεθανίου αποτελεί μία παραλλαγή της παραδοσιακής πυρόλυσης στην οποία το κύριο αντιδρών στοιχείο είναι το καθαρό μεθάνιο (είτε με τη μορφή του ως κύριου συστατικού του φυσικού αερίου, είτε ως βιομεθάνιο) σε αέρια μορφή. Κατά την αντίδραση αυτή, το μεθάνιο διασπάται στα δύο συστατικά του, υδρογόνο και άνθρακα. Με την παροχή θερμικής ενέργειας συνήθως μεταξύ 900 °C και 1200 °C, η αντίδραση παράγει άνθρακα σε στέρεα μορφή, ο οποίος στη συνέχεια αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση ή απορρίπτεται σε ορυχεία άνθρακα και υδρογόνο σε αέρια μορφή το οποίο συλλέγεται για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.

Αντίδραση πυρόλυσης: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C (στερεό)} + 2\text{H}_2 \text{ (αέριο)}$

Σε αντίθεση με την ατμομεθανική αναμόρφωση, η πυρόλυση μεθανίου είναι λιγότερο διαδεδομένη σαν διεργασία στον βιομηχανικό τομέα. Τα τελευταία όμως χρόνια, η επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει το βλέμμα της στις δυνατότητες της πυρόλυσης ως εναλλακτικής μεθόδου παραγωγής καθαρού υδρογόνου για πληθώρα λόγων. Καταρχάς σε αντίθεση με την ατμομεθανική αναμόρφωση, η οποία παράγει CO_2 ως ένα από τα τελικά προϊόντα, η πυρόλυση μεθανίου παράγει σχεδόν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ιδίως σε περίπτωση χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την εκκίνησή της. Επιπλέον δεν απαιτείται παρουσία κάποιου στοιχείου ή ένωσης για την πραγματοποίηση της πυρόλυσης, αντίθετα με την SMR η οποία απαιτεί παρουσία νερού. Τέλος το παραγόμενο υδρογόνο είναι καθαρότερο σε σχέση με αυτό της ατμομεθανικής αναμόρφωσης καθώς δεν απαιτείται επιπλέον καθαρισμός του για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.

Παρά τα πλεονεκτήματα της όμως, η πυρόλυση συνοδεύεται από πλήθος προκλήσεων και εμποδίων στη χρήση της ως αντίδραση παραγωγής υδρογόνου. Καταρχάς, είναι λιγότερο αναπτυγμένη και διαδεδομένη αντίδραση από ότι η SMR, καθώς οι τεχνολογίες για την πραγματοποίηση και βελτίωση της βρίσκονται ακόμα σε πιλοτική φάση, με τους ειδικούς να προβλέπουν αναγκαίο χρόνο ανάπτυξης τουλάχιστον 10 ετών προκειμένου η διεργασία να εδραιωθεί σαν διεργασία ικανή να ανταγωνιστεί την SMR. Επιπλέον είναι αδύνατον στο παρόν, διεργασία να πραγματοποιηθεί σε κλίμακα μεγαλύτερη του εργαστηριακού περιβάλλοντος, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην έλλειψη σταθερότητας και ανικανότητας ασφαλούς μεγέθυνσης του αντιδραστήρα. Μια ακόμα πρόκληση είναι η διαφορά κόστους μεταξύ πυρόλυσης και SMR καθώς η πυρόλυση απαιτεί σημαντικά υψηλότερο ποσό ενέργειας για την πραγματοποίησή της, καθώς η SMR πραγματοποιείται μεταξύ 700 °C – 900 °C. Επίσης ο χρόνος αντίδρασης της πυρόλυσης είναι γενικά μεγαλύτερος από ότι της SMR, με το κύριο κριτήριο για τη διάρκεια να είναι η μέθοδος θέρμανσης. Τέλος τα παράγωγα της πυρόλυσης φέρουν στο φως την πρόκληση της διαχείρισης του παραγόμενου άνθρακα, καθώς παράγεται 3 φορές περισσότερος άνθρακας από ότι υδρογόνο, μειώνοντας τη χρησιμότητά της.

Παρά τις προκλήσεις που συνοδεύουν την πυρόλυση, η δυνατότητά της να παράγει καθαρό υδρογόνο σε μία εποχή όπου η ανάγκη για καθαρές και πράσινες πηγές ενέργειας είναι μεγαλύτερη από ποτέ, έχει τραβήξει την προσοχή των επιστημόνων παγκοσμίως, οδηγώντας στην επένδυση αναπτύξεως τεχνολογιών με σκοπό τη βελτίωση της αντίδρασης και της απόδοσής της. (GmbH, n.d.) (Lehner, 2023)

2.3 Πηγές και Μορφές του Μεθανίου ως πηγή ενέργειας στη βιομηχανία

Το μεθάνιο αξιοποιείται στη βιομηχανία ως πηγή ενέργειας σε πολλές μορφές και από πηγές τόσο φυσικές όσο και ανθρωπογενείς, στην δεύτερη περίπτωση όντας επεξεργασμένο ώστε να είναι πιο φιλικό στο περιβάλλον.

2.3.1 Φυσικές πηγές

2.3.1.1 Φυσικό αέριο (*Natural gas*)

Η πιο συνηθισμένη μορφή του μεθανίου καθώς το φυσικό αέριο αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος του από μεθάνιο καθιστώντας τις δύο ενώσεις σχεδόν ολόιδιες. Πρόκειται για ένα ορυκτό καύσιμο το οποίο δημιουργείται μέσω της θερμικής αποσύνθεσης οργανικής ύλης απουσία οξυγόνου και χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση, μαγειρική και παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω καύσης του. Οι κύριες βιομηχανικές δραστηριότητες σχετικά με το φυσικό αέριο είναι εξαγωγή και κατανάλωση του ή μετατροπή του σε άλλες μορφές όπως βιοαέριο. (Administration, n.d.)

2.3.1.2 Γαιανθρακικό μεθάνιο (*Coalbed methane*)

Μια σχεδόν υγρή, μη συμβατική μορφή του μεθανίου το οποίο, σε αντίθεση με το παραδοσιακό φυσικό αέριο το οποίο απαντάται συνήθως σε πόρους σε ελεύθερη μορφή, βρίσκεται παγιδευμένο σε κοιτάσματα ανθρακίτη ή λιγνίτη. Δημιουργείται κυρίως μέσω θερμικής ωρίμανσης και διάσπασης οργανικής ύλης. Η εξαγωγή του από τα κοιτάσματα πραγματοποιείται αρχικά με την άντληση του νερού από το κοιτάσμα, καθώς το μεθάνιο βρίσκεται σε κορεσμένη κατάσταση μέσα στο νερό. Με την αφαίρεση του νερού, προκαλείται μείωση της συσσωρευμένης πίεσης, με αποτέλεσμα το μεθάνιο να αποκτά αέρια μορφή. Ακολουθεί η εκρόφησή του από τον άνθρακα και η ροή του σε αέρια μορφή στην επιφάνεια όπου συλλέγεται, συμπιέζεται και προωθείται στην αγορά ως καύσιμο. Όπως και το φυσικό αέριο, χρησιμοποιείται για παραγωγή θέρμανσης ή ηλεκτρισμού αλλά και ως καύσιμο για βιομηχανικές μονάδες και οχήματα. (ScienceDirect, Coal Bed Methane, n.d.) (Agency, Coalbed Methane Extraction Industry, n.d.)

2.3.2 Ανθρωπογενείς πηγές (επεξεργασμένες μορφές)

2.3.2.1 Βιοαέριο (*Biogas*)

Επρόκειτο για επεξεργασμένη μορφή του μεθανίου και αποτελεί το κύριο προϊόν της αναερόβιας χώνευσης. Το βιοαέριο αποτελεί μία αέρια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και CO₂. Η δυνατότητα καύσης του βιοαερίου με χρήση οξυγόνου ή οξείδωσης του, επιτρέπει τη χρήση του ως παραγωγός θέρμανσης και ηλεκτρισμού, συνήθως στο χώρο παραγωγής του, δεδομένου ότι η συμπίεση και μεταφορά του αποτελεί πρόκληση. Παρά την ασφαλή φύση του ως καύσιμο, η διαχείριση του απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς σε περίπτωση διαφυγής του στην ατμόσφαιρα, έχει παρόμοια συνεισφορά με το μεθάνιο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επιπλέον έχει εκρηκτικές ιδιότητες σε περίπτωση μίξης με συγκεκριμένες αναλογίες αέρα (8-20 μέρη). (Grid, n.d.)

2.3.2.2 Βιομεθάνιο (*Biomethane*)

Το βιομεθάνιο, γνωστό επίσης και ως ανανεώσιμο φυσικό αέριο (Renewable natural gas – RNG), αποτελεί προϊόν μεταγενέστερης επεξεργασίας του βιοαερίου. Μοιάζει πάρα πολύ στη σύνθεση με το παραδοσιακό φυσικό αέριο, με τη διαφορά ότι έχει καθαριστεί και αποξηραθεί, αφαιρώντας οξείδια όπως το CO₂, το νερό και άλλες ενώσεις όπως υδρόθειο,

αμμωνία και υδρατμούς. Αποτέλεσμα είναι η σύσταση του RNG να αποτελείται κατά 95% από μεθάνιο, γεγονός που το καθιστά προτιμότερο καύσιμο από το βιοαέριο καθώς έχει τις ίδιες χρήσεις με το βιοαέριο, διατηρώντας ταυτόχρονα την ενεργειακή απόδοση του παραδοσιακού φυσικού αερίου. Η μετατροπή ή αλλιώς αναβάθμιση, του βιοαερίου σε βιομεθάνιο, γίνεται σε δύο κύριες φάσεις. Η πρώτη είναι η απομάκρυνση ρύπων και υδρατμών από το βιοαέριο, η οποία επιτυγχάνεται με επιμέρους διαδικασίες αφαίρεσης του ανάλογου ρύπου όπως αποθείωση, αφαίρεση αμμωνίας και αφυδάτωση.

Η δεύτερη φάση είναι ο διαχωρισμός των αερίων, ώστε να αφαιρεθεί το CO₂ από το βιοαέριο. Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται με πολλές μεθόδους όπως ο μεμβρανικός διαχωρισμός, ο οποίος πραγματοποιεί διαχωρισμό των αερίων σε μοριακό επίπεδο με τη χρήση κοίλων μικροϊνών, εκμεταλλευόμενος τη διαφορά μοριακών βαρών CH₄ και CO₂. Ένας άλλος τρόπος είναι η προσρόφηση με ταλάντωση πίεσης, κατά την οποία το βιοαέριο διοχετεύεται σε δοχείο το οποίο περιέχει προσροφητικά υλικά όπως ο ζεόλιθος. Σε αυτή τη φάση η οποία συνοδεύεται από υψηλή πίεση μέσα στο δοχείο τα αέρια προς απομάκρυνση προσροφούνται ισχυρά στο υλικό, ενώ το μεθάνιο παραμένει σχετικά άθικτο, και συλλέγεται ως βιομεθάνιο. Στη συνέχεια με απότομη μείωση της πίεσης τα προσροφημένα αέρια απελευθερώνονται ενώ το προσροφητικό υλικό επαναχρησιμοποιείται σε επόμενο κύκλο. Τέλος, υπάρχει η επιλογή της χημικής απορρόφησης ή πλύσης του βιοαερίου, συνήθως με αμμωνία ή νερό, επιτυγχάνοντας διάλυση του CO₂ και ολοκληρώνοντας τη μετατροπή του βιοαερίου σε βιομεθάνιο. Το απορροφητικό υλικό επαναχρησιμοποιείται ύστερα από απελευθέρωση του CO₂ είτε με θέρμανση είτε με απότομη πτώση (μείωση) της πίεσης. (Repsol, n.d.)

2.3.2.3 Συνθετικό αέριο (Syngas)

Το συνθετικό αέριο (synthetic gas – syngas) είναι μία ανάμειξη μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου και αποτελεί μια ειδική κατηγορία αερίου συγκριτικά με το μεθάνιο καθώς δύναται να δράσει τόσο ως αντιδρών όσο και ως προϊόν σε αντίδραση στην οποία συμμετέχει το μεθάνιο. Η πρώτη περίπτωση περιγράφει τη διαδικασία της μεθανοποίησης (methanation) κατά την οποία το συνθετικό αέριο μετατρέπεται σε μεθάνιο και CO₂ παρουσία καταλύτη (συνήθως νικέλιο-Ni, ρουθίνιο-Ru και Ρόδιο-Rh). Η 2^η περίπτωση αναφέρεται στην αντίδραση ατμομεθανικής αναμόρφωσης. Οι δύο κύριες βιομηχανικές χρήσεις του συνθετικού αερίου είναι ως καύσιμο και ως πηγή υδρογόνου. Η συλλογή του υδρογόνου από το syngas πραγματοποιείται χρήσι των ίδιων μεθόδων χάρη στις οποίες το CO₂ διαχωρίζεται από το βιοαέριο κατά την τελική φάση της μετατροπής του σε βιομεθάνιο. (ScienceDirect, A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas, n.d.) (ScienceDirect, Methanation, 2023)

2.4 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις του Μεθανίου

Παρά την μεγάλη ενεργειακή του αξία ως καύσιμο, το μεθάνιο επρόκειτο για ένα ορυκτό καύσιμο και συνεπώς, τόσο η καύση του όσο και οι υπόλοιπες αντιδράσεις και βιομηχανικές δραστηριότητες οι οποίες περιλαμβάνουν τόσο το παραδοσιακό μεθάνιο όσο και τις εναλλακτικές μορφές του (φυσικές ή επεξεργασμένες) προκαλούν ή δύναται να προκαλέσουν εκπομπές μεθανίου συμβάλλοντας κατά αυτόν τον τρόπο στην εντατικοποίηση του καίριου προβλήματος της κλιματικής κρίσης.

2.4.1 Ο ρόλος του μεθανίου στην κλιματική κρίση

Οι εκπομπές μεθανίου αποτελούν τον δεύτερο σημαντικότερο παράγοντα υπερθέρμανσης του πλανήτη, με τον πρώτο να είναι οι εκπομπές CO₂. Η διαφορά αυτή στην κατάταξη οφείλεται στις διαφορές κατά τις οποίες αυτά τα δύο αέρια συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το μεθάνιο έχει δραστικά μικρότερη διάρκεια ζωής από ότι το CO₂, η οποία κυμαίνεται στο διάστημα 7 έως 12 χρόνων, απείρως χαμηλότερη συγκριτικά με τη διάρκεια ζωής του διοξειδίου του άνθρακα η οποία δύναται να αγγίξει έως και εκατοντάδες χρόνια. Αυτή η διαφορά στη διάρκεια ζωής του μεθανίου σχετικά με το CO₂ αντισταθμίζεται από την ιδιότητα του μεθανίου να δεσμεύει πολύ μεγαλύτερα ποσά θερμότητας ανά μονάδα μάζας από ότι το διοξείδιο του άνθρακα, έως και 85 φορές περισσότερη θερμότητα. Εκπομπές μεθανίου δύναται να δημιουργήσουν τόσο οι φυσικές μορφές του όσο και οι επεξεργασμένες, καθώς όλες είναι επιβλαβείς όταν βρίσκονται ελεύθερες στην ατμόσφαιρα.

Δεδομένης αυτής της ιδιότητας, καθίσταται κρίσιμη η επίγνωση των πηγών των εκπομπών μεθανίου και η επακόλουθη αντιμετώπιση τους. Σύμφωνα με δεδομένα της παγκόσμιας πρωτοβουλίας μεθανίου (Global Methane Initiative 2020), το 33% των εκπομπών μεθανίου προέρχεται από την αξιοποίηση του ως καύσιμο (fossil fuel use). Πιο συγκεκριμένα, οι εκπομπές μεθανίου σε αυτόν τον τομέα προέρχονται τόσο από τις αντιδράσεις καύσης του για παραγωγή ενέργειας όσο και από διαφεύγουσες εκπομπές τόσο κατά τη συλλογή του ως φυσικό αέριο ή γαιανθρακικό μεθάνιο, όσο και από τη μεταφορά του στην αγορά ή στην τοποθεσία κατανάλωσης του. Παράλληλα, το περισσευούμενο σε αυτόν τον κλάδο της βιομηχανίας μεθάνιο, υποβάλλεται σε καύση μετά την χρήση του (methane flaring) για αποφυγή άμεσης απελευθέρωσής του στην ατμόσφαιρα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, επιλέγεται η σταδιακή απελευθέρωση του στην ατμόσφαιρα έναντι της καύσης του. Αυτή η διαφυγή συνήθως γίνεται ακούσια, με πιθανές αιτίες οι διαρροές σε αγωγούς και βλάβες εξοπλισμού. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως γίνεται και εσκεμμένα έναντι της καύσης, απελευθερώνοντας το μεθάνιο άκαυστο στην ατμόσφαιρα.

Αμέσως μετά ακολουθεί το 30% το οποίο προέρχεται από την κτηνοτροφία (animal agriculture) το οποίο υποδεικνύει την διάσπαση οργανικής ύλης προερχόμενη από τα ζώα ως την πηγή αυτών των εκπομπών. και συνεπώς τονίζοντας την ύψιστη σημασία της αναερόβιας χώνευσης τόσο ως διεργασίας ασφαλούς διάσπασης της οργανικής ύλης όσο και πηγής προέλευσης του βιοαερίου. Τέλος, μία ακόμα σημαντική πηγή προέλευσης εκπομπών μεθανίου είναι η αποσύνθεση των οργανικών απορριμμάτων στις χωματερές (waste) η οποία ανέρχεται στα 15%. (NASA, 2024) (contributors, Methane emissions, n.d.) (Initiative, 2010)

2.4.2 Μέθοδοι Μείωσης και Αντιμετώπισης Εκπομπών Μεθανίου

Η επίγνωση των πηγών προέλευσης των εκπομπών μεθανίου, όπως αναφέρθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, ανοίγει το δρόμο για την εφαρμογή μεθόδων αντιμετώπισης των εκπομπών και αποτροπής δημιουργίας περισσότερων εκπομπών.

Σχετικά με την αντιμετώπιση των διαρροών κατά την καύση του μεθανίου είτε ως πηγή ενέργειας, οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι αντιμετώπισης είναι η επένδυση σε νέες τεχνολογίες καύσης του φυσικού αερίου οι οποίες να βελτιστοποιούν την αντίδραση της καύσης με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώνονται οι εκπομπές μεθανίου και CO₂ αλλά και να αυξάνεται η ενεργειακή απόδοση της αντίδρασης. Παράλληλα προωθείται η χρήση νέων πηγών ενέργειας, φιλικών προς το περιβάλλον όπως το βιοαέριο και το βιομεθάνιο, τα οποία είναι άμεσα προϊόντα επεξεργασίας του παραδοσιακού μεθανίου και έχουν παρόμοια απόδοση.

Για την αντιμετώπιση των εκπομπών από methane flaring και venting, έχουν θεσπιστεί αρκετοί νόμοι από πολλές κυβερνήσεις και οργανισμούς παγκοσμίως με στόχο τον περιορισμό των διαρροών μεθανίου από αυτές τις μεθόδους, τη φορολόγηση των διαρροών αυτών και νόμοι που επιβάλλουν στους ρυπογόνους οργανισμούς και βιομηχανίες την υποχρεωτική ανάκτηση των διαφυγόντων αερίων.

Όσον αφορά τις εκπομπές από κτηνοτροφία, ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης τους είναι η επένδυση σε τεχνολογίες βελτίωσης και εγκαταστάσεις μετατροπής του μεθανίου σε βιοαέριο, τονίζοντας έτσι την ύψιστη σημασία της αναερόβιας χώνευσης τόσο ως διεργασίας ασφαλούς διάσπασης της οργανικής ύλης όσο και πηγής προέλευσης του βιοαερίου. Ένα ακόμα σημαντικό βήμα σε αυτή τη μέθοδο είναι η επακόλουθη επένδυση σε εγκαταστάσεις και τεχνολογίες μετατροπής του βιοαερίου σε βιομεθάνιο ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος διαρροής του βιοαερίου κατά τη μεταφορά του και να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την καύση του.

Τέλος, λύση στο πρόβλημα των εκπομπών μεθανίου προερχόμενων από την αποσύνθεση των οργανικών απορριμμάτων στις χωματερές δίνουν διάφορες μέθοδοι ελέγχου του όγκου της οργανικής ύλης προτού αυτή αποσυντεθεί, όπως η μείωση της απώλειας και σπατάλης τροφής στα εστιατόρια, καταστήματα και νοικοκυριά, είτε μέσω της σωστής διαχείρισης των προμηθειών φαγητού και συλλογή των αποφαγίων. Επιπλέον καθοριστική η προώθηση της ανακύκλωσης ώστε να διαχωρίζονται τα οργανικά απορρίμματα. Καθώς και οι δύο αυτές μέθοδοι περιλαμβάνουν την διαδικασία της συλλογής οργανικής ύλης, επακόλουθα βήματα αυτών των μεθόδων είναι η χρήση της συλλεγμένης οργανικής ύλης, είτε μέσω της κομποστοποίησης και μετατροπής της σε λίπασμα ώστε να ενδυναμωθεί το έδαφος και να αυξηθεί η γονιμότητά του. Η άλλη δυνατή χρήση της συλλεγμένης οργανικής ύλης είναι με τη μορφή ζωοτροφής όταν αυτό είναι δυνατόν, καθώς και ως πρώτη ύλη για τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης η οποία έχει ως τελικό προϊόν το βιοαέριο. Επίσης όσον αφορά την αντιμετώπιση των εκπομπών μεθανίου από τις χωματερές, χρήσιμες μέθοδοι αντιμετώπισης είναι η συλλογή του αερίου μέσω συστημάτων δέσμευσης μεθανίου προτού αυτό απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα, καθώς και η χρήσιμη μικροοργανισμών τα οποία ονομάζονται μεθανοτροφικά και διασπούν έως και 80% των εκπομπών μεθανίου στις χωματερές. Χρειάζεται να σημειωθεί, ότι τα μεθανοτροφικά βακτήρια δεν είναι πλήρη λύση καθώς μετατρέπουν το μεθάνιο μέσω οξειδωσης σε CO₂ και νερό, μη συνεισφέροντας επομένως στην αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης. (Bank, n.d.) (Alternatives, 2021)

3. Μεθοδολογία Έρευνας και Επεξεργασία Πληροφοριών

Η διεκπεραίωση της μελέτης ακολούθησε τα παρακάτω βήματα.

Βήμα 1: Επιλογή κατάλληλου keyword

Στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση δεδομένων 1000 περίπου εταιρειών από το LinkedIn με κοινό τους σημείο με ένα βιοκαύσιμο. Για τη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε η λέξη κλειδί methane gas η χρήση της οποίας παρείχε τον βέλτιστο αριθμό δεδομένων για τις προϋποθέσεις της μελέτης (όσο πιο κοντά γίνεται στα 1000 αποτελέσματα από το LinkedIn, στην προκειμένη περίπτωση 988 αποτελέσματα). Παρόλου που το μεθάνιο δεν αποτελεί εκ φύσεως βιοκαύσιμο, δύναται να μετατραπεί σε βιοκαύσιμο (βιοαέριο και βιομεθάνιο) όπως περιεγράφηκε προηγουμένως.

Βήμα 2: Συλλογή και λήψη των δεδομένων

Κατόπιν εύρεσης των δεδομένων, ακολούθησε η λήψη τους από το LinkedIn και αποθήκευση τους για μελλοντική ανάλυση στο Microsoft Excel. Η λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού linked-helper.

Βήμα 3: Συμπλήρωση των δεδομένων

Η επόμενη φάση της μελέτης απαιτεί την συμπλήρωση των δεδομένων καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντικές πληροφορίες δεν συμπεριλαμβάνονται στην σελίδα προφίλ μιας εταιρείας στο LinkedIn. Αυτό δύναται να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους όπως επίσκεψη στην ιστοσελίδα της εταιρείας (εάν η εταιρεία έχει) και αναζήτησή τους σε άλλα πεδία πληροφοριών που συλλέχθηκαν από το LinkedIn όπως οι περιγραφές (descriptions) και τα συνθήματα (taglines) των εταιρειών. Στην παρούσα μελέτη, η μεγαλύτερη έλλειψη πληροφοριών παρατηρήθηκε στα πεδία του έτους ίδρυσης εταιρείας, της τοποθεσίας της έδρας της (headquarter city, headquarter country, headquarter geographic area) καθώς και στις ειδικότητές των εταιρειών. Στην περίπτωση του έτους ίδρυσης και της τοποθεσίας έδρας, οι ελλείψεις πληροφορίες αντλήθηκαν κυρίως μέσω των επιμέρους ιστοσελίδων της κάθε εταιρείας, ενώ οι ειδικότητες αντλήθηκαν κυρίως από τις περιγραφές (descriptions) και τα συνθήματα (taglines).

Βήμα 4: Δημιουργία Σχημάτων

Κατόπιν συμπλήρωσης των ελλειπόντων στοιχείων, δημιουργήθηκαν ορισμένα σχήματα κυρίως μέσω καταμέτρησης του αριθμού των εταιρειών που συμπεριλαμβάνονται στα δεδομένα μέσω διαφόρων κριτηρίων καταμέτρησης όπως η χώρα της έδρας της εταιρείας, το έτος ίδρυσης, ο αριθμός των ακολούθων (και επομένως η δημοτικότητα της εταιρείας) στο LinkedIn, ενώ το κυριότερο από τα κριτήρια είναι το πλήθος και τα είδη των εξειδικεύσεων των εταιρειών σχετικά με τον κλάδο του μεθανίου. Για την καταμέτρηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε κυρίως η συνάρτηση COUNTIF του Excel τροποποιημένη σε κάθε περίπτωση ώστε να καταμετρηθεί το επιθυμητό πλήθος εταιρειών. Σε άλλες περιπτώσεις η εξαγωγή συμπεράσματος προέκυψε με τη μελέτη της πυκνότητας δεδομένων βάσει ορισμένων κριτηρίων. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση scatter plot με δεδομένα τα έτη ίδρυσης των εταιρειών και τους αντίστοιχους ακολούθους στο LinkedIn, το οποίο απεδείχθη λιγότερο πολύπλοκο σαν διαδικασία καθώς δεν χρειαζόταν κάποια καταμέτρηση των δεδομένων,

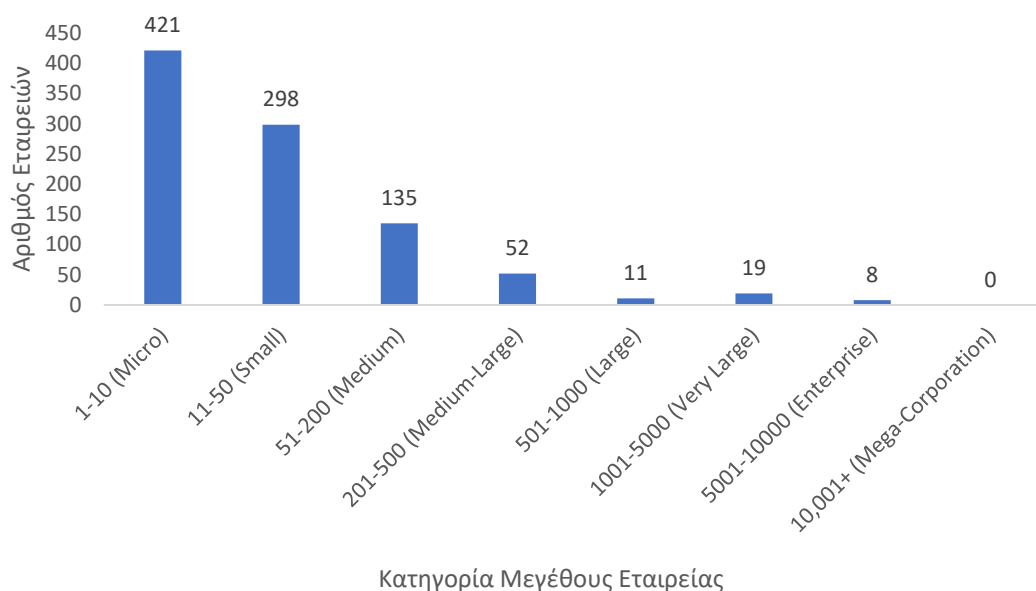
παρά μόνο η ομαδοποίησή τους. Τέλος, στην περίπτωση της χρήσης του αριθμού εργαζόμενων (προσωπικού) της κάθε εταιρείας, κρίθηκε αναγκαία η επαλήθευση τους καθώς τα δεδομένα από το LinkedIn ήταν σε αρκετές περιπτώσεις ανακριβή σε αυτόν τον τομέα. Μέσω της χρήσης της συνάρτησης If τροποποιημένης ώστε να διαβάζει τις στήλες του ελάχιστου και μέγιστου αριθμού προσωπικού της κάθε εταιρείας και να συγκρίνει εάν ο καταγεγραμμένος αριθμός προσωπικού από το προφίλ της εταιρείας στο LinkedIn βρίσκεται στο διάστημα που υποδεικνύουν τα δύο άκρα του διαστήματος, αφαιρέθηκαν τα εσφαλμένα ή ανακριβή δεδομένα και επιτεύχθηκε η εξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων από την μελέτη αυτών των δεδομένων.

Τα σχήματα που θα εξεταστούν παρακάτω δημιουργήθηκαν κυρίως με χρήση του excel με εξαίρεση το Σχήμα 4 για το οποίο χρησιμοποιήθηκε η διαδικτυακή εφαρμογή Box Plot Maker της ιστοσελίδας Statistics Kingdom δημιουργίας box plot για ακριβή απεικόνιση και αναπαράσταση της ανάλυσης των δεδομένων τα οποία περιγράφονται.

4. Ανάλυση και Συζήτηση

4.1 Μεγέθη εταιρειών που ασχολούνται με το μεθάνιο

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται η κατανομή των εταιρειών με βάση τον αριθμό εργαζόμενων, οποίος καθορίζει και την κατηγορία μεγέθους τους στο LinkedIn. Παρατηρείται ότι οι περισσότερες εταιρείες που ασχολούνται με το μεθάνιο είναι κυρίως πολύ μικρές (Micro με 1-10 υπαλλήλους) και μικρές (Small με 11-50 υπαλλήλους). Η επικράτηση των δύο αυτών τάξεων υποδεικνύει ότι ο τομέας του μεθανίου πρόκειται για αναπτυσσόμενη αγορά με κυρίως μικρές καινοτόμες επιχειρήσεις. Επιπλέον ο κλάδος του μεθανίου είναι εξειδικευμένος και απαιτεί ευελιξία, γεγονός το οποίο ευνοεί τις μικρές επιχειρήσεις. Τέλος, εξαιτίας της αναπτυσσόμενης κατάστασης της αγοράς, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα παρουσίας εμποδίων στην ανάπτυξή της, το οποίο τονίζει την ανάγκη για μεγαλύτερη υποστήριξη και επένδυση ώστε να επακολουθήσει η ανάπτυξή της.

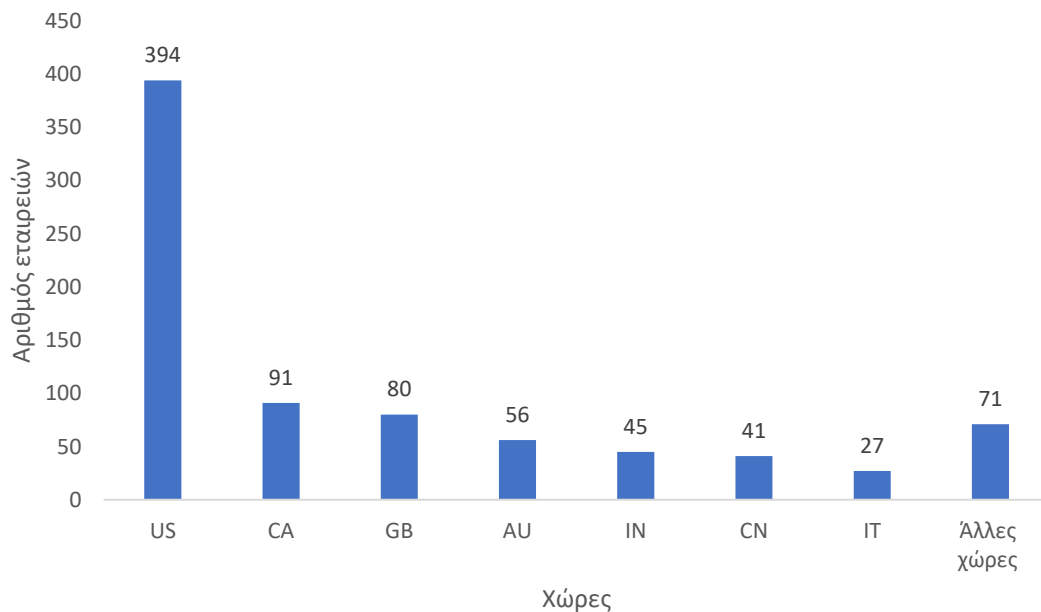


Σχήμα 1 Κατανομή εταιρειών βάσει αριθμού εργαζόμενων

4.2 Εταιρείες ανά χώρα

Το Σχήμα 2 μελετάει την κατανομή των εταιρειών βάσει της χώρας στην οποία βρίσκεται η έδρα της εταιρείας. Το σχήμα αποκαλύπτει ότι η πλειονότητα των εταιρειών που δραστηριοποιούνται στον τομέα του μεθανίου εδρεύει στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (US). Η διαφορά στον αριθμό εταιρειών μεταξύ των μεταξύ των ΗΠΑ και της δεύτερης σε αριθμό εταιρειών χώρας, του Καναδά (CA), είναι εντυπωσιακή, φτάνοντας τις 303 εταιρείες. Η κατοχή των πρώτων θέσεων σε αριθμό εταιρειών από αυτές τις 2 χώρες καταδεικνύει τη σημαντική συγκέντρωση του κλάδου στην βόρεια Αμερική συγκριτικά με περιοχές του πλανήτη. Πιθανές εξηγήσεις για αυτό αποτελούν η υψηλή τεχνογνωσία, χρηματοδότηση και οι πολιτικές στήριξης για έρευνα και εκμετάλλευση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Ταυτόχρονα, παρατηρείται μία μικρή αλλά σταθερή παρουσία από χώρες με αναπτυσσόμενες οικονομίες όπως η Ινδία και η Κίνα, γεγονός που υποδεικνύει την ανεκμετάλλευτη δυνατότητα του κλάδου και συνεπώς την ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη.

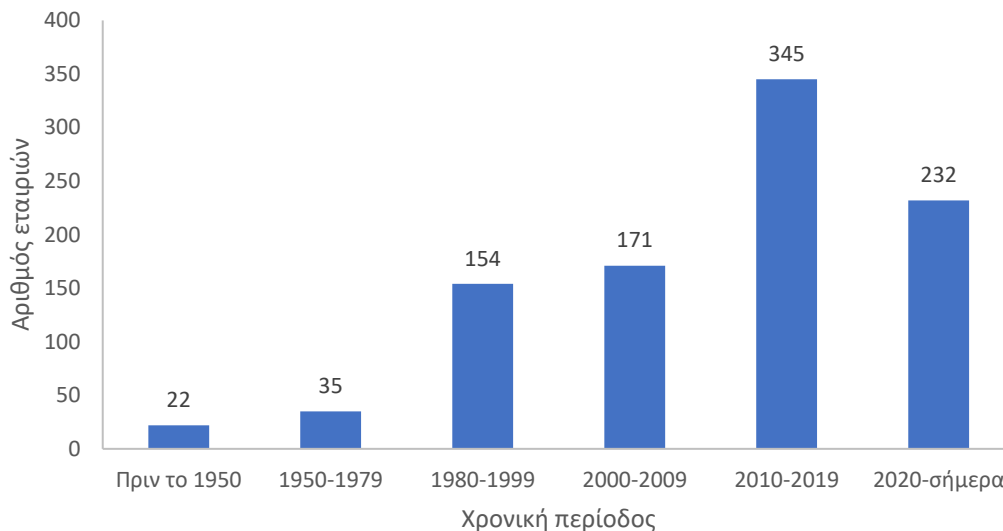
Η κατηγορία άλλες χώρες δεν αναδεικνύει τον αριθμό των εταιρειών που ασχολούνται με το μεθάνιο οι οποίες έχουν έδρα άλλες χώρες αλλά τον αριθμό των χωρών οι οποίες αποτελούν έδρα για αριθμό εταιρειών μικρότερο του 25.



Σχήμα 2 Κατανομή εταιρειών ανά χώρα έδρας

4.3 Εταιρείες ανά έτος ίδρυσης

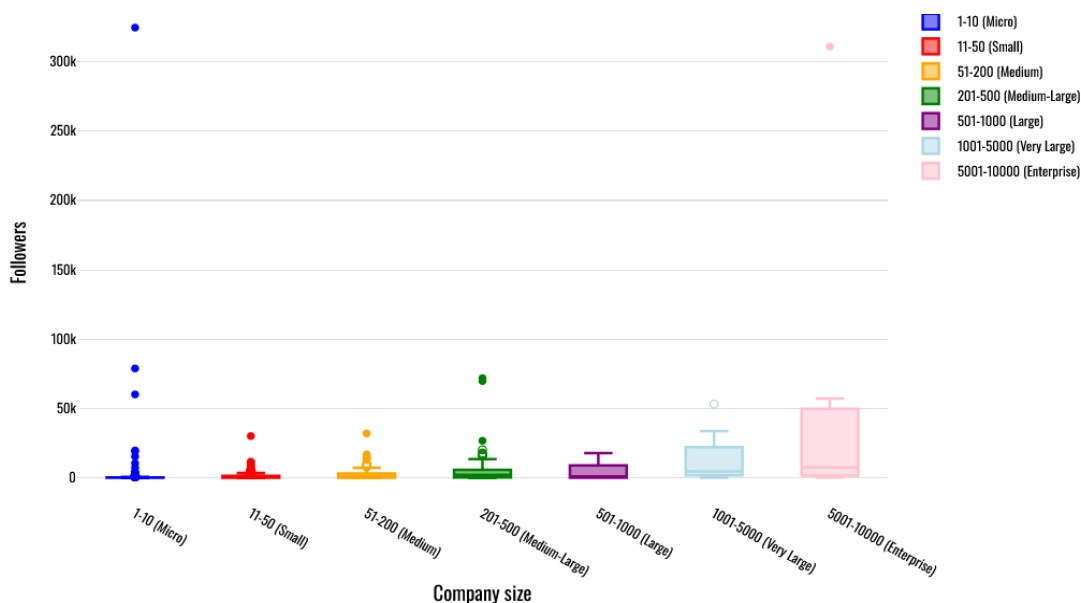
Το Σχήμα 3 εξετάζει την κατανομή των εταιρειών βάσει της περιόδου ίδρυσης. Ανάλυση του Σχήματος 3 δείχνει ότι η δραστηριότητα στον κλάδο του μεθανίου έχει αυξηθεί δραστικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Συγκεκριμένα την περίοδο 1980-2009 ιδρύθηκαν συνολικά 325 εταιρείες ενώ την δεκαετία 2010 -2019 παρατηρήθηκε ραγδαία άνοδος με 345 νέες εταιρείες. Παρόλο που η περίοδος 2020-σήμερα είναι μικρότερη χρονικά, έχουν ήδη ιδρυθεί 232 εταιρείες, δείχνοντας ότι το ενδιαφέρον στον κλάδο παραμένει υψηλό καθώς ο ρυθμός ίδρυσης σε σχέση με τη χρονική περίοδο είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι προηγουμένως. Η αύξηση αυτή υπογραμμίζει την δυναμική ανάπτυξη της βιομηχανίας, ενδεχομένως λόγω των αυξανόμενων αναγκών και του ενδιαφέροντος για νέες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και βιώσιμες φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις.



Σχήμα 3 Κατανομή εταιρειών ανά περίοδο ίδρυσης

4.4 Ακόλουθοι εταιρειών

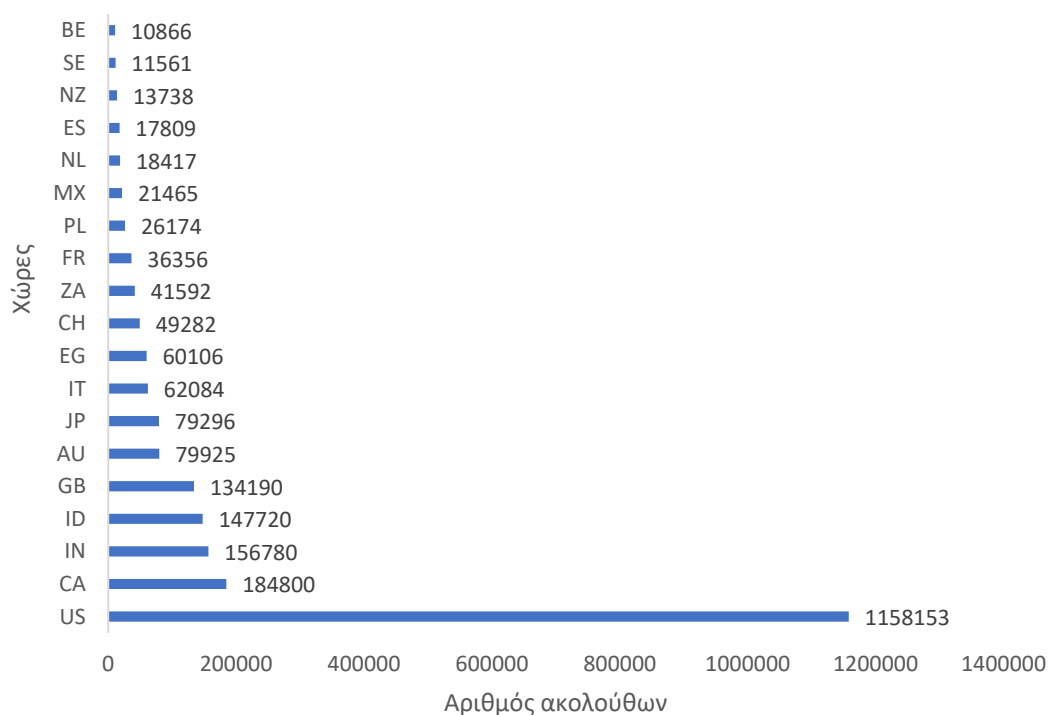
Μελετώντας το Σχήμα 4, καταδεικνύεται μια σαφή θετική συσχέτιση μεταξύ του μεγέθους των επιχειρήσεων και του αριθμού των ακολούθων τους στην πλατφόρμα LinkedIn. Καθώς αυξάνεται το εύρος του ανθρώπινου δυναμικού, παρατηρείται αντίστοιχη αύξηση στη διάμεσο τιμή των ακολούθων, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μεγαλύτερες επιχειρήσεις τυγχάνουν μεγαλύτερης προβολής και αναγνωρισιμότητας στο LinkedIn. Παράλληλα οι μεγαλύτερες εταιρείες εμφανίζουν μεγάλη διασπορά σε αριθμό ακολούθων. Αυτό πιθανώς αντανακλά τη διαφοροποίηση στον κλάδο (ειδικότητα), την πολυεθνική δραστηριότητα ή τη συμμετοχή τους σε περιβαλλοντικές και ενεργειακές πρωτοβουλίες. Παράλληλα η παρουσία ακραίων τιμών (outliers) σε μικρότερες κατηγορίες επιχειρήσεων καταδεικνύει ότι (σπανιότερα) εταιρείες μικρού μεγέθους, μέσω καινοτομιών και εξειδικευμένων λύσεων στον τομέα του μεθανίου δύνανται να προσελκύσουν έντονο ψηφιακό ενδιαφέρον.



Σχήμα 4 Σύγκριση μεγέθους εταιρείας με αριθμό ακολούθων στο LinkedIn

4.5 Δημοτικότητα

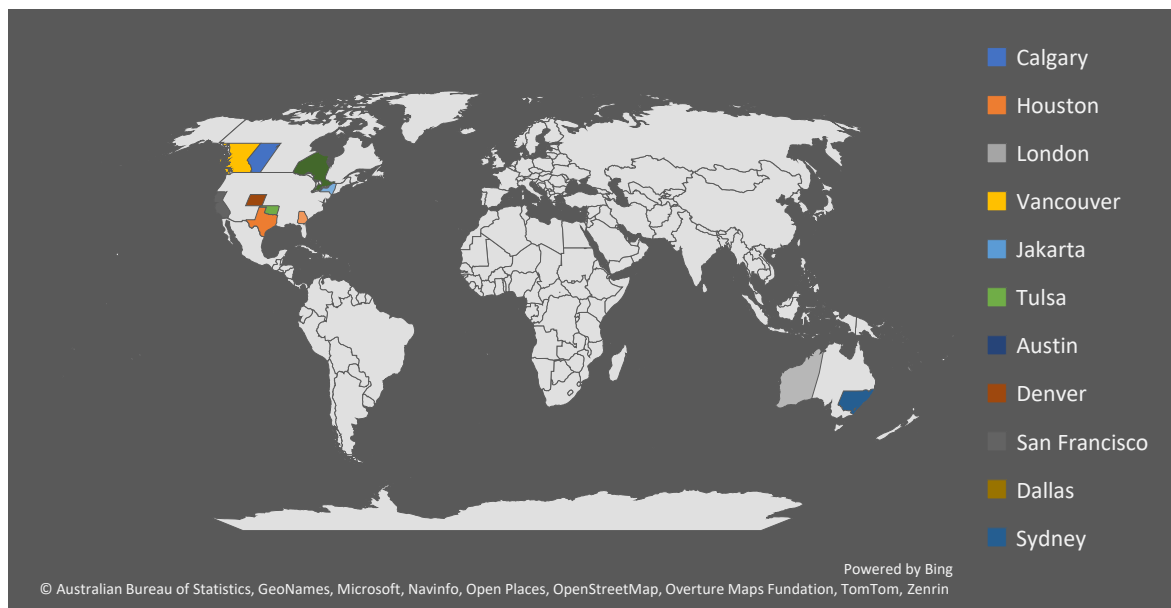
Όσον αφορά τη δημοτικότητα ανά χώρα, σύμφωνα με το Σχήμα 5, παρατηρείται ότι ο μεγαλύτερος αριθμός ακολούθων ακολουθεί εταιρείες με έδρα τις ΗΠΑ, με τον Καναδά να βρίσκεται στη 2^η θέση. Το αποτέλεσμα του παραπάνω γραφήματος επηρεάζεται άμεσα από πόρισμα που εξάγεται από το Σχήμα 2 καθώς οι περισσότερες εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον κλάδο του μεθανίου έχουν έδρα στις ΗΠΑ.



Σχήμα 5 Κατανομή εταιρειών ανά δημοτικότητα

4.6 Γεωγραφική κατανομή

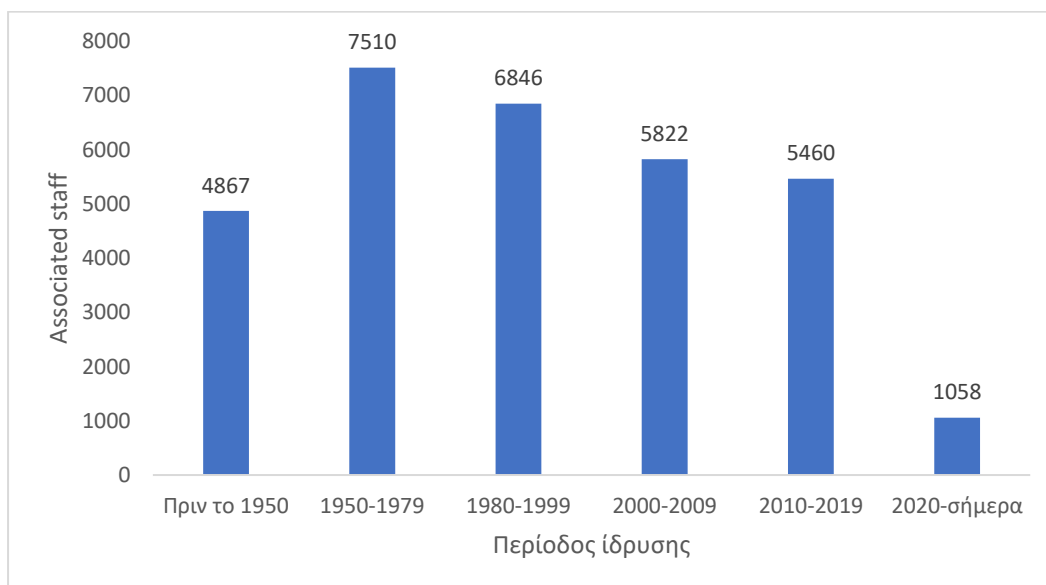
Το Σχήμα 6 παρουσιάζει ένα map plot το οποίο περιλαμβάνει μία απεικόνιση των γεωγραφικών περιοχών στις οποίες βρίσκονται οι πόλεις με τις περισσότερες εταιρείες που ασχολούνται με το μεθάνιο ανά μία πόλη. Από μελέτη του χάρτη επαληθεύεται το συμπέρασμα ότι η βόρεια Αμερική είναι πρωτοπόρος στην ανάπτυξη του βιομηχανικού τομέα του μεθανίου με περιοχές όπως το Houston και το Austin στις ΗΠΑ καθώς και το Calgary και το Vancouver στον Καναδά να αποτελούν έδρες για πολλές εταιρείες ενασχόλησης με το μεθάνιο.



Σχήμα 6 Χάρτης εδρών εταιρειών

4.7 Σύγκριση έτους ίδρυσης και υπαλλήλων

Σχετικά με την σύγκριση έτους ίδρυσης μιας εταιρείας και συνολικού αριθμού υπαλλήλων που απασχολεί (associated staff), μελετώντας το Σχήμα 7, φαίνεται ότι οι εταιρείες οι οποίες ιδρύθηκαν τα τελευταία 70 χρόνια (γεγονός που επαληθεύεται από το Σχήμα 3) αποτελούν τις ελκυστικότερες επιλογές για το εργατικό δυναμικό του κλάδου. Το πόρισμα αυτό επαληθεύει την αναπτυσσόμενη και δυναμική φάση του βιομηχανικού τομέα του μεθανίου και επακολούθως υποδηλώνει την προφανή και αναγκαία περαιτέρω ανάπτυξή του.

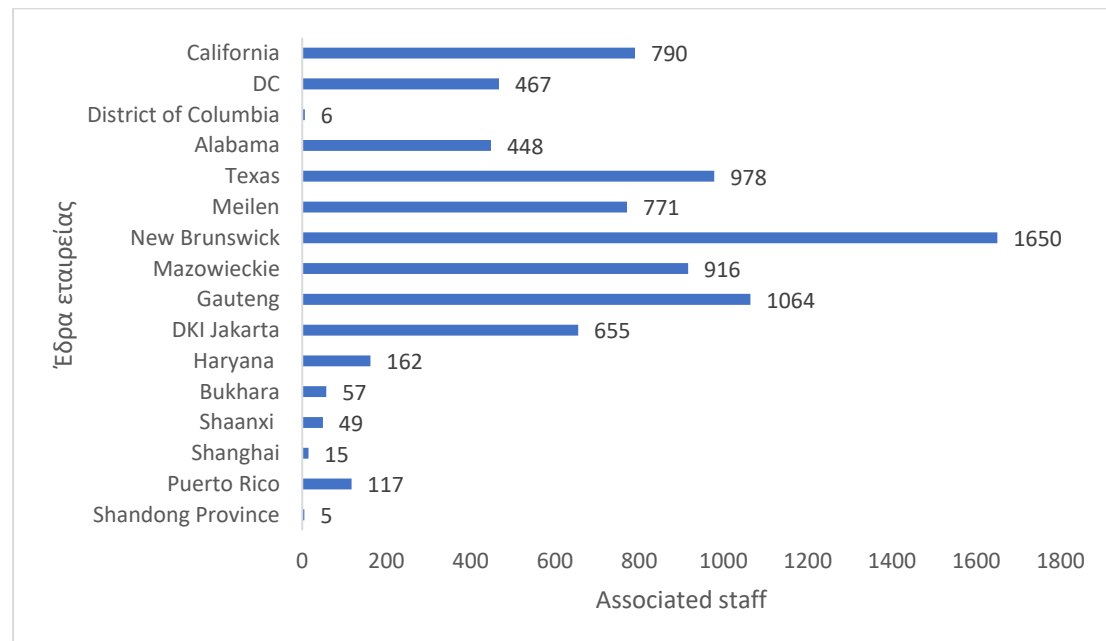


Σχήμα 7 Σύγκριση έτους ίδρυσης και αριθμού υπαλλήλων

4.8 Συσχέτιση μεγέθους εταιρείας και έδρας

Από το Σχήμα 8, παρατηρείται ότι οι πιο ελκυστικές εταιρείες για το εργατικό δυναμικό του τομέα του μεθανίου βρίσκονται είτε στη βόρεια Αμερική (New Brunswick-Καναδάς, Texas California, Alabama, DC- ΗΠΑ) είτε σε περιοχές με αναπτυσσόμενες οικονομίες όπως η

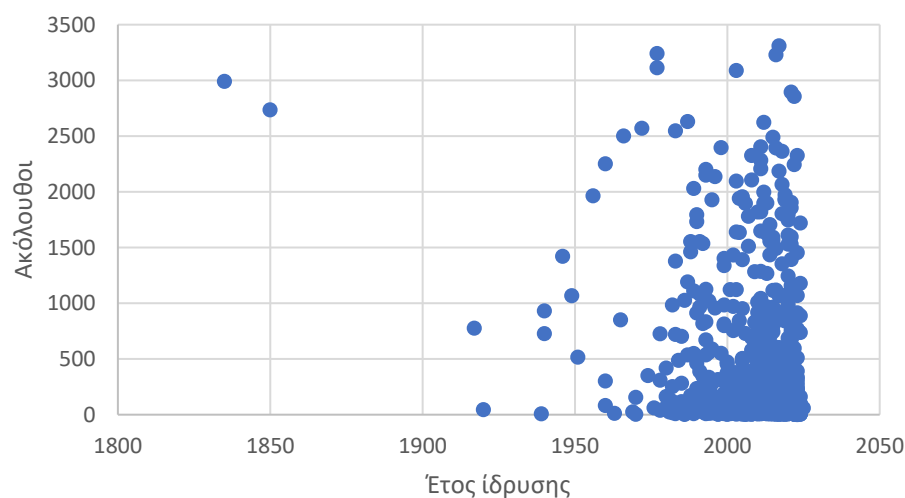
Ινδονησία (DKI Jakarta) και η Gauteng (Νότια Αφρική), επαληθεύοντας τα ευρήματα του Σχήματος 2 όπως και το πόρισμα της ανάγκης για περαιτέρω ανάπτυξη του βιομηχανικού κλάδου του μεθανίου.



Σχήμα 8 Σύγκριση τοποθεσίας έδρας και αριθμού υπαλλήλων

4.9 Σύγκριση Followers και έτους ίδρυσης

Σχετικά με τη συσχέτιση αριθμού ακολούθων και έτους ίδρυσης, σύμφωνα με το Σχήμα 9, παρατηρείται ότι οι εταιρείες με έτος ίδρυσης 1990 μέχρι σήμερα έχουν το μεγαλύτερο αριθμό ακολούθων σε σχέση με τις παλαιότερες εταιρείες. Αυτό υποδεικνύει την στροφή του πληθυσμού προς εναλλακτικές πηγές ενέργειας και ανάγκη εύρεσης λύσεων και αντιμέτρων για το πρόβλημα της κλιματικής κρίσης.



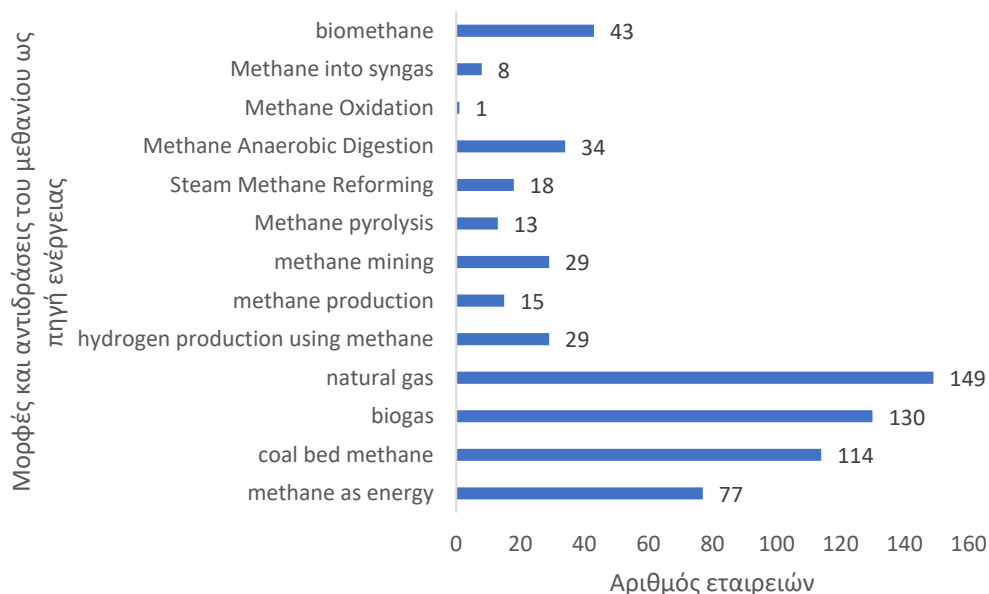
Σχήμα 9 Σύγκριση έτους ίδρυσης και ακολούθων

4.10 Ειδικότητες εταιρειών

Οι ειδικότητες των εταιρειών των προς μελέτη δεδομένων αποδίδουν το σημαντικότερο πόρισμα αυτής της μελέτης καθώς υποδεικνύουν σε ποια κατηγορία αποδίδεται η περισσότερη ανάπτυξη στον τομέα του μεθανίου στη βιομηχανία. Καθώς πολλές εταιρείες έχουν πάνω από μία ειδικότητες, η απευθείας καταμέτρηση τους με τη χρήση καθίσταται πολύ δύσκολη. Για αυτό το σκοπό μελετήθηκε ο κάθε κλάδος του τομέα του μεθανίου ξεχωριστά, με τους 2 κλάδους να είναι η ενασχόληση με το μεθάνιο ως πηγή ενέργειας και η ενασχόληση με την αντιμετώπιση των εκπομπών μεθανίου.

4.10.1 Κατανομή εταιρειών σε σχέση με τη χρήση του μεθανίου ως πηγή ενέργειας

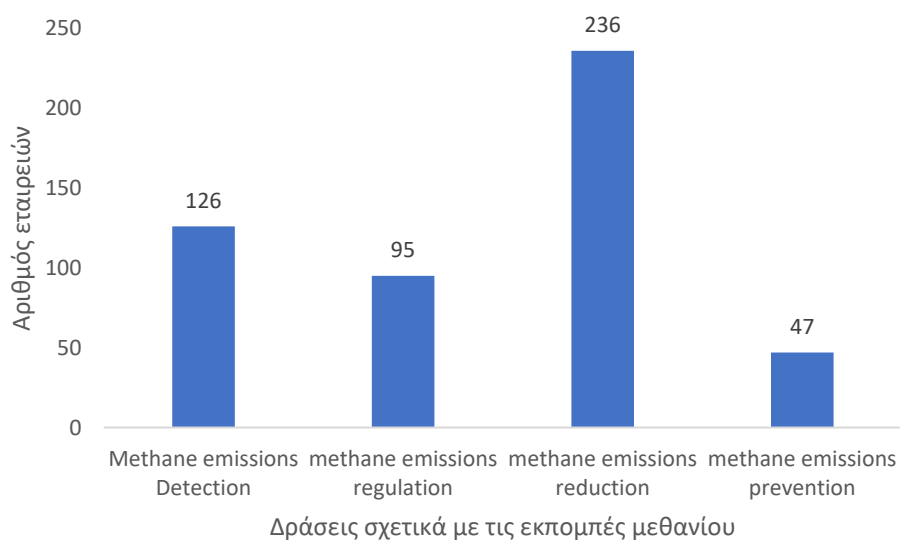
Σε πρώτη φάση καταμετρήθηκαν οι εταιρείες οι οποίες ασχολούνται με το μεθάνιο ως καύσιμο. Για τη δημιουργία του Σχήματος 10 χρησιμοποιήθηκαν λέξεις κλειδιά στις ειδικότητες της κάθε εταιρείας στα δεδομένα, βάσει της ανάλογης ενασχόλησης. Οι λέξεις κλειδιά είναι natural gas, biogas, coal bed methane, hydrogen production using methane, methane production, methane mining, methane pyrolysis, steam methane reforming, methane anaerobic digestion, methane oxidation, methane into syngas, biomethane και methane as energy. Από τις καταμετρήσεις παρατηρείται ότι η υποκατηγορία με το μεγαλύτερο αριθμό ενασχόλησης είναι η υποκατηγορία του natural gas, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και αποτελεί μία σημαντική πηγή ενέργειας. Η επόμενη υποκατηγορία είναι το biogas το οποίο αποτελεί παράγωγο του μεθανίου μέσω αναερόβιας χώνευσης. Τρίτη υποκατηγορία είναι το coal bed methane. Οι 3 αυτές υποκατηγορίες φανερώνουν την τάση των εταιρειών σε αυτόν τον τομέα να ασχολούνται κυρίως με συλλογή και εμπορευματοποίηση του μεθανίου ως καύσιμο. Υποκατηγορίες όπως η methane anaerobic digestion (αναερόβια χώνευση) και biomethane είναι άμεσα συνδεδεμένες με την υποκατηγορία του biogas παρόλα αυτά καταμετρούνται ξεχωριστά. Τέλος η υποκατηγορία methane as energy δημιουργήθηκε για την διεκπεραίωση αυτής της μελέτης ώστε να καταμετρηθούν οι εταιρείες οι οποίες σύμφωνα με τα δεδομένα ασχολούνται με το μεθάνιο σαν πηγή ενέργειας χωρίς όμως να παρέχεται η ακριβής υποκατηγορία ενασχόλησης τους.



Σχήμα 10 Κατανομή εταιρειών με βάση το μεθάνιο ως πηγή ενέργειας

4.10.2 Κατανομή εταιρειών σε σχέση με τις δράσεις αντιμετώπισης των εκπομπών μεθανίου

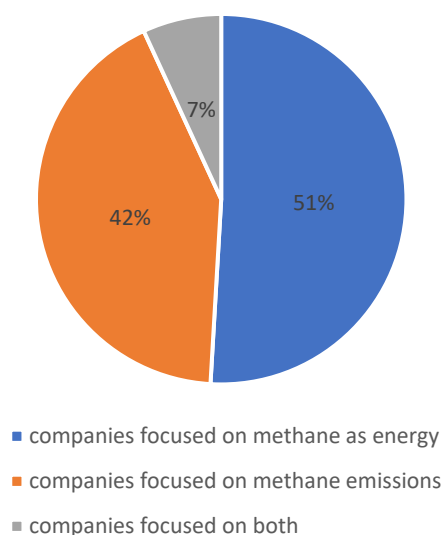
Στη συνέχεια καταμετρήθηκαν οι εταιρείες οι οποίες ασχολούνται με την αντιμετώπιση των εκπομπών μεθανίου (Σχήμα 11), οι οποίες αποτελούν έναν πολύ σημαντικό παράγοντα της κλιματικής κρίσης. Για αυτή την καταμέτρηση χρησιμοποιήθηκαν οι φράσεις κλειδιά 1) methane emissions detection η οποία περιγράφει εταιρείες σκοπός των οποίων είναι ο εντοπισμός των εκπομπών μεθανίου ο οποίος συνήθως γίνεται με εξοπλισμό μετεωρολογικής ανάλυσης και πιο πρόσφατα χρήσης drones 2) Methane emissions regulation η οποία περιγράφει δράσεις όπως η ποσοτικοποίηση και παρατήρηση των εκπομπών μεθανίου, σε ορισμένες περιπτώσεις χωρίς τη λήψη δράσης για αντιμετώπιση 3) methane emissions reduction για εταιρείες οι οποίες αναλαμβάνουν δράσεις για αντιμετώπιση και μείωση των εκπομπών μεθανίου και 4) Methane emissions prevention η οποία περιγράφει τις δράσεις εταιρειών ώστε να αποφευχθούν εκπομπές μεθανίου ολοκληρωτικά. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι εταιρείες διαχείρισης οργανικής ύλης, συνήθως αποφαγιών από χώρους εστίασης προτού αυτά καταλήξουν στις χωματερές και αποσυντεθούν, δημιουργώντας εκπομπές μεθανίου.



Σχήμα 11 Κατανομή εταιρειών με βάση τις δράσεις αντιμετώπισης εκπομπών μεθανίου

4.10.3 Τομέας εξειδίκευσης

Τέλος καταμετρούνται οι εταιρείες βάσει του τομέα της βιομηχανίας μεθανίου στον οποίο δραστηριοποιούνται (Σχήμα 12), με το 51% να ασχολείται αποκλειστικά με το μεθάνιο ως πηγή ενέργειας, το 42% με την αντιμετώπιση των εκπομπών και το υπόλοιπο 7% να δραστηριοποιείται και στους 2 κλάδους. Το σχήμα 15 δίνει το πολύτιμο πόρισμα ότι το μεγαλύτερο μέρος της ανάπτυξης στον κλάδο της βιομηχανίας του μεθανίου πραγματοποιείται στον τομέα του μεθανίου ως καύσιμο.



Σχήμα 12 Κατανομή εταιρειών με βάση τον τομέα εξειδίκευσης

5. Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προοπτικές

Έχοντας ολοκληρώσει την ανάλυση των γραφημάτων, διαπιστώνεται ότι ο τομέας του μεθανίου στη βιομηχανία σημείωσε μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία 40 χρόνια, με το ρυθμό ανάπτυξης να αυξάνεται στην τελευταία πενταετία εξαιτίας της ολοένα και μεγαλύτερης ανάγκης για εύρεση νέας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, ώστε να αντικατασταθούν σταδιακά τα ορυκτά καύσιμα.

Επιπλέον, υπεδείχθη ότι οι πρωτοπόρες χώρες σε αυτόν τον τομέα είναι οι ΗΠΑ και ο Καναδάς, ενώ σημαντική συμμετοχή έχουν και αναπτυσσόμενες οικονομίες όπως της Ινδίας, της Κίνας και της Ινδονησίας. Αυτό υπογραμμίζει την αναγνώριση της δυνατότητας αλλά και της σημαντικότητας αυτού του κλάδου της βιομηχανίας από αυτές τις χώρες, τονίζοντας ταυτόχρονα την καίρια ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξή του.

Τέλος, προκύπτει από τα γραφήματα ότι οι περισσότερες εταιρείες ασχολούνται με το μεθάνιο ως πηγή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι 3 πιο αναπτυγμένες υποκατηγορίες αυτού του τομέα είναι η συλλογή και εμπορευματοποίηση του φυσικού αερίου και του γαιανθρακικού μεθανίου, καθώς και η δημιουργία και επίσης εμπορευματοποίηση του βιοαερίου.

Ιδιαίτερη έμφαση προσδίδεται στο γεγονός ότι, αν και το βιοαέριο αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, δεν είναι τόσο ενεργειακά αποδοτικό σαν καύσιμο όπως το βιομεθάνιο, ενώ παράλληλα έχει παρόμοια συνεισφορά με το φυσικό αέριο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά, το Σχήμα 10 παρουσιάζει πολύ μικρή ανάπτυξη στον τομέα της παραγωγής βιομεθανίου.

Επομένως κρίνεται αναγκαία και κρίσιμη η επένδυση σε εγκαταστάσεις και τεχνολογίες μετατροπής του βιοαερίου σε βιομεθάνιο, ούτως ώστε να εξασφαλιστεί η παροχή μιας ανανεώσιμης και φιλικής προς το περιβάλλον πηγής ενέργειας, η οποία όμως να ανταποκρίνεται στις ολοένα και μεγαλύτερες ανάγκες για ενέργεια στη σύγχρονη εποχή, ιδίως σε χώρες οι οποίες ήδη δραστηριοποιούνται στον τομέα του μεθανίου και έχουν αναγνωρίσει την ζωτική σημασία και τεράστια δυνατότητα αυτού του καυσίμου.

Συνοψίζοντας, η αξιοποίηση του μεθανίου, και πιο συγκεκριμένα του βιομεθανίου, δύναται να χαράξει πορεία προς ένα πιο ενεργειακά βιώσιμο μέλλον. Για την επίτευξη αυτού του στόχου σε παγκόσμιο επίπεδο όμως, κρίνεται απαραίτητη η διεθνής συνεργασία και η συντονισμένη υποστήριξη του τομέα του μεθανίου στη βιομηχανία μέσω επενδύσεων σε καλύτερες εγκαταστάσεις και βελτιωμένες τεχνολογίες.

6. Μελλοντικές επεκτάσεις

Στο πλαίσιο μελλοντικής έρευνας, μπορούν να εξεταστούν επιπλέον παράγοντες όπως οι βαθύτερες προοπτικές των αντιδράσεων της ατμομεθανικής αναμόρφωσης και της πυρόλυσης του μεθανίου, οι οποίες έχουν ως άμεσο προϊόν το υδρογόνο. Όντας μία πολύ αποδοτική και καθαρή πηγή ενέργειας στην αγνή μορφή του (με την αντίδραση της πυρόλυσης να παράγει σχεδόν πλήρως αγνό υδρογόνο), η περαιτέρω ανάπτυξη των αντιδράσεων που το παράγουν καθώς και των τεχνολογιών τους θα αποτελέσει ένα ακόμα σημαντικό βήμα στην αντιμετώπιση της κλιματικής και ενεργειακής κρίσης. Σημαντικός σταθμός σε αυτή την έρευνα φυσικά θα αποτελέσει η αντιμετώπιση των ανεπιθύμητων προϊόντων αυτών των αντιδράσεων. Συγκεκριμένα στην περίπτωση της ατμομεθανικής αναρρόφησης, αναγκαία κρίνεται η εύρεση μεθόδου αντιμετώπισης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν, πιθανώς μέσω φιλτραρίσματος ή ασφαλούς απελευθέρωσής τους στην ατμόσφαιρα. Αντίστοιχα στην πυρόλυση χρειάζεται πρόταση για πιθανή χρήση του στέρεου άνθρακα που προκύπτει ως το δεύτερο παράγωγο της αντίδρασης το οποίο οι εταιρείες που ασχολούνται με αυτό δυσκολεύονται να βρουν ωφέλιμες χρήσεις οι οποίες να μην είναι βλαβερές στο περιβάλλον. Τέλος μία ακόμα δυνατή επέκταση της εργασίας είναι η αύξηση του δείγματος των δεδομένων προς ανάλυση, συγκεκριμένα με εταιρείες οι οποίες εδρεύουν σε χώρες με χαμηλή εκπροσώπηση στο δείγμα της παρούσας μελέτης, ώστε να σχηματιστεί μία πιο ολοκληρωμένη και αληθοφανής εικόνα του βιομηχανικού κλάδου του μεθανίου.

7. Βιβλιογραφία

- Administration, U. E. (χ.χ.). *Natural Gas Explained*. Ανάκτηση από EIA.gov:
<https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/>
- Agency, U. E. (2023). *Importance of Methane*. Ανάκτηση από EPA.gov:
<https://www.epa.gov/gmi/importance-methane>
- Agency, U. E. (χ.χ.). *Coalbed Methane Extraction Industry*. Ανάκτηση από EPA.gov:
<https://www.epa.gov/eg/coalbed-methane-extraction-industry>
- Agency, U. E. (χ.χ.). *How Does Anaerobic Digestion Work?* Ανάκτηση από EPA.gov:
<https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work>
- Alternatives, G. A. (2021). *Seven Key Solutions to Landfill Methane*. GAIA.
- Bank, W. (χ.χ.). *Methane Explained*. Ανάκτηση από World Bank:
<https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction/methane-explained>
- Britannica, E. (1998, July 20). *Methane*. Ανάκτηση από Encyclopaedia Britannica:
<https://www.britannica.com/science/methane>
- Britannica, T. E. (1998, July 20). *Methane*. Ανάκτηση από Encyclopaedia Britannica:
<https://www.britannica.com/science/methane>
- Conservation, T. D. (χ.χ.). *Anaerobic Digestion*. Ανάκτηση από TN.gov:
<https://www.tn.gov/environment/program-areas/sw-mm-organics/anaerobic-digestion.html>
- Contributors, L. (χ.χ.). *7.1.04: sp Hybrid Orbitals and the Structure of Methane*. Ανάκτηση από LibreTexts Chemistry:
https://chem.libretexts.org/Courses/Thompson_Rivers_University/CHEM_1500%3A_Chemical_Bonding_and_Organic_Chemistry/07%3A_Organic_Chemistry_I_-_Bonding_and_Structure/7.01%3A_Bonding_and_Structure_I_-_Review_of_Bonding/7.1.04%3A_sp_Hybrid_Orbitals_and_the_St
- contributors, W. (χ.χ.). *Alessandro Volta*. Ανάκτηση από Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/Alessandro_Volta
- contributors, W. (χ.χ.). *Methane emissions*. Ανάκτηση από Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/Methane_emissions
- Glassman, I., & Yetter, R. (2008). *Combustion*. Academic Press.
- GmbH, I. (χ.χ.). *Methane Pyrolysis*. Ανάκτηση από INERATEC:
<https://www.ineratec.de/en/glossary/methane-pyrolysis>
- Grid, N. (χ.χ.). *What is biogas?* Ανάκτηση από National Grid:
<https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-biogas>
- Group, M. (2023, September 30). *When was natural gas first used?* Ανάκτηση από MET Group: <https://group.met.com/en/media/energy-insight/when-was-natural-gas-first-used>

- Group, S. (2018, December 31). *Methane Structure Characteristics*. Ανάκτηση από Sirloong Group: <https://gr.sirloonggroup.com/info/methane-structure-characteristics-33030697.html>
- Gupta, R., & Agarwal, R. (2024). Mathematical Modeling and Simulation of Methane Steam Reforming Membrane Reactor. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 957-966.
- Information, N. C. (2004, September 16). *Methane*. Ανάκτηση από PubChem: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methane>
- Initiative, G. M. (2010). *Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities*. Global Methane Initiative.
- Lehner, M. (2023). Feasibility of a Plasma Furnace for Methane Pyrolysis: Hydrogen and Carbon Production. *Energies*.
- NASA. (2024). *Methane: A Vital Sign of Climate Change*. Ανάκτηση από NASA Climate Change and Global Warming: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/methane/?intent=121>
- Pennisi, E. (2006, October 2). *Prophet of the gases*. Ανάκτηση από Science.org: <https://www.science.org/content/article/prophet-gases>
- Repsol. (χ.χ.). *What is biomethane and how is it produced?* Ανάκτηση από Repsol: <https://www.repsol.com/en/energy-and-the-future/sustainable-mobility/biomethane/index.cshhtml>
- ScienceDirect. (2023). *Methanation*. Ανάκτηση από ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/methanation>
- ScienceDirect. (χ.χ.). *A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas*. Ανάκτηση από ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/syngas>
- ScienceDirect. (χ.χ.). *Coal Bed Methane*. Ανάκτηση από ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/coal-bed-methane>
- Song, H., Zhang, X., Lin, X., Bian, H., & Liu, Y. (2025). Process analyses on sorption-enhanced electrified steam methane reforming for near-zero emission hydrogen production with CO₂ capture by calcium looping thermochemical reaction. *Applied energy*. Ανάκτηση από Sciencedirect.
- Tsagkarakis, K. (2024). Green Intellectual Capital: a critical factor to explain the relationship between corporate sustainable and financial performance. *Environment, Development and Sustainability*, 22863-22884.
- Tsironis, G., & Tsagkarakis, K. (2023). Global online networking for circular economy companies in fashion, apparel, and textiles industries, the LinkedIn platform. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*.
- Tsironis, G., Daglis, T., & Tsagkarakis, K. (2022). Social media and EU companies' engagement in circular economy: A LinkedIn approach. *Sustainable Production and Consumption*, 802-816.

