



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Μελέτη εφικτότητας χρήσης πράσινης μεθανόλης (green methanol)
ως καύσιμο σε πλοία με βάση την ανάλυση κύκλου ζωής**

Διπλωματική Εργασία

του

Ευάγγελου Γεωργιάδη

Επιβλέπων καθηγητής

Δημήτριος Λυρίδης

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Ιούνιος, 2024

Ευχαριστίες

Με τη συγγραφή κι εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται ένα όμορφο ταξίδι τεσσεράμισι και πλέον ετών στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αυτή η παρουσία που αποτέλεσε μία απαιτητική, κοπιαστική και παράλληλα ευχάριστη, ενδιαφέρουσα και γεμάτη όμορφες στιγμές χρονική περίοδο στη ζωή μου, σμίλευσε καθοριστικά την προσωπικότητα μου και μου καλλιέργησε την επιθυμία να ακολουθήσω μελλοντικά το συγκεκριμένο επάγγελμα. Σε αυτή την περίοδο γνώρισα καθηγητές, φίλους και συμφοιτητές με τους οποίους, ανέπτυξα μία ιδιαίτερη σχέση συνεργασίας και κατανόησης. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους έβαλαν κι αυτοί το λιθαράκι τους στην ολοκλήρωση αυτού του ταξιδιού και στήριξαν την προσπάθειά μου.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Δημήτρη, τη μητέρα μου Γεωργία και την αδερφή μου Παναγιώτα για την αμέριστη στήριξη και ανιδιοτελή αγάπη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια και συνεχίζουν καθημερινά να μου την παρέχουν, κάνοντας την όποια δυσκολία ευκολότερη και βοηθώντας με καθοριστικά με τις συμβουλές τους να επιτύχω τους στόχους μου. Επιπλέον, θα ήθελα να κάνω μία ειδική αναφορά στους καθηγητές μου κ. Δημήτριο Λυρίδη επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, ο οποίος, πάντοτε βρισκόταν στη διάθεση μου για την επίλυση αποριών και την παροχή συμβουλευτικής υποστήριξης για την ολοκλήρωση αυτής της τεχνοοικονομικής μελέτης, καθώς και τον κ. Γεώργιο Δημόπουλο για τη συλλογή δεδομένων και πληροφοριών, χωρίς την καθοριστική βοήθεια του οποίου, αυτή η εργασία δε θα μπορούσε ποτέ να ολοκληρωθεί.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συμφοιτητές, καθηγητές, ερευνητές κι επιστημονικούς συνεργάτες που συνεργάστηκαν μαζί μου στα πλαίσια της φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο ενώ, ειδική αναφορά θα ήθελα να κάνω για το συμφοιτητή, γείτονα και φίλο μου Παναγιώτη Ευαγγελιάδη με τον οποίο, περάσαμε ατελείωτες ώρες εργαζόμενοι σκληρά για την επιτυχή ολοκλήρωση εργασιών και ανταλλάσσοντας γνώσεις και πληροφορίες κατά τη διαδικασία του διαβάσματος.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην αναφερθώ και στην κοπέλα μου Κατερίνα, που με στήριξε τόσο σε συναισθηματικό, όσο και σε προσωπικό επίπεδο, συμβάλλοντας και η ίδια στην επιτυχή ολοκλήρωση αυτού του ενδιαφέροντος και γεμάτου αναμνήσεις ταξιδιού της φοιτητικής μου πορείας.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Λίστα εικόνων	5
Λίστα πινάκων.....	7
Λίστα διαγραμμάτων	10
Εισαγωγή.....	11
Περίληψη	12
Abstract	13
Βιβλιογραφική επισκόπηση	14
1 Το φαινόμενο της κλιματικής κρίσης και οι νέες προκλήσεις για τη ναυτιλία.....	16
1.1 Η κλιματική αλλαγή και οι προσπάθειες για το μετριασμό της	16
1.2 Οι αλλαγές που αναμένεται να επέλθουν στη ναυτιλιακή βιομηχανία.....	19
1.2.1 Η στρατηγική του IMO για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου	20
1.2.2 Η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.....	22
1.2.3 Η εισαγωγή εναλλακτικών καυσίμων για την μείωση του αποτυπώματος το άνθρακα της παγκόσμιας ναυτιλίας.....	24
2 Περιγραφή της μεθανόλης και εισαγωγή στην αγορά μεθανόλης	28
2.1 Η οργανική ένωση της μεθανόλης: βασικά στοιχεία, μέθοδοι παραγωγής και εφαρμογές.....	28
2.2 Η αγορά της μεθανόλης.....	31
2.2.1 Οι επιπτώσεις του COVID-19 στην αγορά μεθανόλης.....	33
2.2.2 Το μέγεθος της αγοράς μεθανόλης ανά γεωγραφική περιοχή.....	33
2.2.3 Το μέγεθος της αγοράς μεθανόλης ανά πρώτη ύλη	35
2.2.4 Το μέγεθος της αγοράς μεθανόλης ανά βιομηχανία	36
2.3 Η μεθανόλη με βάση τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	37
3 Πράσινη μεθανόλη.....	39
3.1 Μέθοδοι παραγωγής	39
3.1.1 Παραγωγή πράσινης μεθανόλης από βιομάζα.....	39
3.1.2 Παραγωγή πράσινης μεθανόλης με την τεχνολογία δέσμευσης άνθρακα και πράσινου υδρογόνου	43
3.1.3 Παραγωγή πράσινης μεθανόλης με συνδυασμό μεθόδων	48
3.2 Απόδοση των μεθόδων παραγωγής	51
3.2.1 Απόδοση μεθόδου παραγωγής πράσινης μεθανόλης από βιομάζα.....	51

3.2.2 Απόδοση μεθόδου παραγωγής πράσινης μεθανόλης από πράσινο υδρογόνο και την τεχνολογία δέσμευσης άνθρακα	53
3.3 Η αγορά της πράσινης μεθανόλης.....	54
3.3.1 Το μέγεθος της αγοράς πράσινης μεθανόλης ανά τύπο και πρώτη ύλη	55
3.3.2 Το μέγεθος της αγοράς πράσινης μεθανόλης ανά εφαρμογή και βιομηχανία	57
4 Πράσινη μεθανόλη ως ναυτιλιακό καύσιμο	59
4.1 Εισαγωγικά στοιχεία	59
4.2 Προβλέψεις για τα εναλλακτικά καύσιμα	60
4.3 Κινητήρες διπλού καυσίμου Diesel – Μεθανόλης.....	62
4.3.1 Συστήματα παροχής μεθανόλης υψηλής και χαμηλής πίεσης.....	64
4.3.2 Θέματα ασφαλείας και σχεδιαστικές ιδιαιτερότητες.....	65
4.3.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω διαρροής στη θάλασσα	66
4.4 Εκπομπές αερίων	67
4.5 Μεταφορά – Αποθήκευση	73
4.6 Ανεφοδιασμός (bunkering)	74
5 Μεθοδολογία	77
5.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)	77
5.1.1 Δανεισμός	78
5.1.2 Φόροι – Αποσβέσεις	78
5.2 Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)	79
5.3 Συντελεστής Ανάκτησης Κεφαλαίου (CRF)	79
5.4 Χρόνος Αποπληρωμής (PP).....	80
5.5 Συντελεστής Κερδοφορίας (PI)	80
6 Μελέτη εφικτότητας χρήσης πράσινης μεθανόλης ως καύσιμο σε πλοία με βάση την ανάλυση κύκλου ζωής.....	82
6.1 Στάδιο παραγωγής πράσινης μεθανόλης	82
6.1.1 Σενάριο 1 ^ο	82
6.1.2 Σενάριο 2 ^ο	95
6.2 Στάδιο μεταφοράς και κατανάλωσης πράσινης μεθανόλης	108
6.2.1 Διαχείριση και λειτουργία από ναυτιλιακή εταιρεία	108
6.2.2 Ναύλωση πλοίου από τρίτη εταιρεία που αναλαμβάνει τη μεταφορά μεθανόλης	116
Συμπεράσματα.....	122
Πηγές - Βιβλιογραφία	126

Λίστα εικόνων

Εικόνα 1: Η μεταβολή της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας της Γης τα τελευταία 65 εκατομμύρια χρόνια (Scott & Lindsey , 2023).....	17
Εικόνα 2: Το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η όξυνσή του από τον ανθρώπινο παράγοντα (University of Michigan, 2023)	18
Εικόνα 3: Σύγκριση εκπομπών CO ₂ μεταξύ διαφόρων μέσων μεταφορών σε gr/(tonne*km) (International Chamber of Shipping, χ.χ.)	20
Εικόνα 4: Χάρτης με τα κράτη της Ευρώπης που συμμετέχουν στο EU ETS (DNV, 2023).....	22
Εικόνα 5: Απεικόνιση ιστιοφόρου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (The Maritime Executive , 2022)	25
Εικόνα 6: Σύστημα αερολίπανσης της γάστρας σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Marine Insight, 2021)	25
Εικόνα 7: Το επιβατηγό πλοίο που χρησιμοποιεί μεθανόλη ως καύσιμο, Stena Germanica, με καθαρό βάρος 50,000 DWT (IRENA, 2021)	26
Εικόνα 8: Πλοίο μεταφοράς πετρελαιοειδών που λειτουργεί με μεθανόλη ως καύσιμο (IRENA, 2021) ..	27
Εικόνα 9: Το μόριο της μεθανόλης (Openclipart, 2015)	28
Εικόνα 10: Πρώτες ύλες, χρωματικοί κώδικες, ένταση άνθρακα, μέθοδοι και όγκος παραγωγής της μεθανόλης (Carr, 2022).....	29
Εικόνα 11: Προκληθέντα συμπτώματα λόγω δηλητηρίασης από μεθανόλη (無國界醫生, 2020).....	31
Εικόνα 12: Στόλος από ταξί που λειτουργούν με καύσιμο μεθανόλη, στην πόλη Γκουϊγιάνγκ της Κίνας (IRENA, 2021)	34
Εικόνα 13: Οι πρώτες ύλες και οι εφαρμογές της μεθανόλης (IRENA, 2021)	36
Εικόνα 14: Σχεδιάγραμμα συστήματος παραγωγής μεθανόλης από φυσικό αέριο ή γαιάνθρακα (Aziz & Sun, 2021)	40
Εικόνα 15: Σχεδιάγραμμα συστήματος παραγωγής πράσινης μεθανόλης με βάση τη διαδικασία B-CLG (Aziz & Sun, 2021)	42
Εικόνα 16: Σχεδιάγραμμα συστήματος παραγωγής πράσινης μεθανόλης με βάση τη διαδικασία B-CLHP (Aziz & Sun, 2021)	43
Εικόνα 17: Ο κύκλος της εφοδιαστικής αλυσίδας του πράσινου υδρογόνου (Technetics Group, n.d.)	44
Εικόνα 18: Ο κύκλος της δέσμευσης, μεταφοράς, αποθήκευσης και χρήσης CO ₂ (Technip Energies, n.d.)	45
Εικόνα 19: Διαδικασία δέσμευσης CO ₂ από τα καυσάερια μονάδας παραγωγής ενέργειας με καύσιμο το γαιάνθρακα και χρήση μονοαιθανολαμίνης (MEA) (Abbas, et al., 2022)	46
Εικόνα 20: Σχεδιάγραμμα ροής της διαδικασίας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από πράσινο υδρογόνο και δεσμευμένο CO ₂ σύμφωνα με τη βασική σχεδίαση (Abbas, et al., 2022).....	47
Εικόνα 21: Συνδυασμός μεθόδων παραγωγής πράσινης μεθανόλης με την τεχνολογία δέσμευσης CO ₂ και χρήση πράσινου υδρογόνου και βιομάζας ως πρώτες ύλες (IRENA, 2021)	49
Εικόνα 22: Συνδυασμός μεθόδων παραγωγής πράσινης μεθανόλης με την τεχνολογία δέσμευσης CO ₂ και χρήση πράσινου υδρογόνου και βιοαερίου ως πρώτες ύλες (IRENA, 2021)	50
Εικόνα 23: Διαδικασία παραγωγής πράσινης μεθανόλης από τη μονάδα Project Air της εταιρείας Perstrop (Kihlberg, n.d.)	50
Εικόνα 24: Σκίτσο μονάδας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από H ₂ και CO ₂ (SADC Mining & Construction News, 2023).....	54

Εικόνα 25: Χάρτης με τις περιοχές ECA στις οποίες ισχύουν οι νομοθεσίες για τις εκπομπές SO _x , NO _x (Isalos.net, 2016).....	60
Εικόνα 26: Δίχρονος κινητήρας διπλού καυσίμου μεθανόλης – diesel, MAN ME-LGIM (Maritime Informed, n.d.)	63
Εικόνα 27: Τετράχρονος κινητήρας διπλού καυσίμου μεθανόλης – diesel, Wärtsilä 32 (Wärtsilä, n.d.) ..	63
Εικόνα 28: Σχεδιάγραμμα συστήματος παροχής μεθανόλης χαμηλής πίεσης (Marine Service Noord, n.d.)	64
Εικόνα 29: Σχεδιάγραμμα συστήματος παροχής μεθανόλης υψηλής πίεσης (Marine Service Noord, n.d.)	65
Εικόνα 30: Σχεδιάγραμμα πλοίου που παρουσιάζει τις ειδικές μελέτες για τη χρήση μεθανόλης ως καύσιμο (MAN Energy Solutions, 2023).....	66
Εικόνα 32: Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς μεθανόλης (Ship Technology, 2019)	74
Εικόνα 33: Παγκόσμιος χάρτης με τους τερματικούς σταθμούς ανεφοδιασμού μεθανόλης (Bunker Ports News Worldwide, 2022).....	75
Εικόνα 34: Δεξαμενόπλοιο ανεφοδιασμού μεθανόλης Hai Gang Zhi Yuan (Offshore Energy , 2024)	76

Λίστα πινάκων

Πίνακας 1: Αναμενόμενη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τον κανονισμό FuelEU Maritime (ABS, n.d.)	23
Πίνακας 2: Ενεργειακοί βαθμοί απόδοσης της διαδικασίας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από βιομάζα (IRENA, 2021)	52
Πίνακας 3: Παράμετροι εναλλακτικών καυσίμων (Forsyth, Longspur Research, 2022).....	62
Πίνακας 4: Μέση θανατηφόρος δόση LC50 για την υποθαλάσσια πανίδα (Methanol Institute, 2023)....	67
Πίνακας 5: Ποσοστό μείωσης εκπομπών αερίων με τη χρήση μεθανόλης ως καύσιμο πρόωσης (MAN Energy Solutions, 2023)	69
Πίνακας 6: Κατανάλωση μεθανόλης του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier III Mode)	69
Πίνακας 7: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier III Mode).....	70
Πίνακας 8: Κατανάλωση μεθανόλης του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier II Mode)	70
Πίνακας 9: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier II Mode).....	71
Πίνακας 10: Εκλογή αρχικού κεφαλαίου (CAPEX) μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης (IRENA, 2021)	85
Πίνακας 11: Εκλογή λειτουργικού κόστους (OPEX) μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης (IRENA, 2021) ..	85
Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός πίνακας λειτουργικού κόστους (OPEX) σε USD/t/γ μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης (IRENA, 2021)	86
Πίνακας 13: Χρηματικές εκροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW για το χρονικό διάστημα 2024-2045	86
Πίνακας 14: Χρηματικές εκροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα για το χρονικό διάστημα 2024-2045	87
Πίνακας 15: Ελάχιστες ετήσιες εισροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW για το χρονικό διάστημα 2026-2045	87
Πίνακας 16: Ελάχιστες ετήσιες εισροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα για το χρονικό διάστημα 2026-2045	88
Πίνακας 17: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW, με επιτόκιο αναγωγής 5%	88
Πίνακας 18: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα, με επιτόκιο αναγωγής 5%.....	89
Πίνακας 19: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW, με επιτόκιο αναγωγής 10%	90
Πίνακας 20: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα, με επιτόκιο αναγωγής 10%.....	90
Πίνακας 21: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW, με επιτόκιο αναγωγής 15%	91
Πίνακας 22: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα, με επιτόκιο αναγωγής 15%.....	92
Πίνακας 23: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW	92
Πίνακας 24: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα	93
Πίνακας 25: Τελικές τιμές NPV, IRR	93
Πίνακας 26: Τελικές τιμές NPV, IRR	94

Πίνακας 27: Εκλογή αρχικού κεφαλαίου (CAPEX) μονάδας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα (IRENA, 2021)	98
Πίνακας 28: Εκλογή λειτουργικών εξόδων (OPEX) μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές (IRENA, 2021)	98
Πίνακας 29: Εκλογή λειτουργικών εξόδων (OPEX) μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα (IRENA, 2021)	99
Πίνακας 30: Χρηματικές εκροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές για το χρονικό διάστημα 2024-2045	99
Πίνακας 31: Χρηματικές εκροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα για το χρονικό διάστημα 2024-2045	100
Πίνακας 32: Ελάχιστες ετήσιες εισροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές για το χρονικό διάστημα 2026-2045	100
Πίνακας 33: Ελάχιστες ετήσιες εισροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα για το χρονικό διάστημα 2026-2045	101
Πίνακας 34: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές, με επιτόκιο αναγωγής 5%	101
Πίνακας 35: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα, με επιτόκιο αναγωγής 5%	102
Πίνακας 36: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές, με επιτόκιο αναγωγής 10%	103
Πίνακας 37: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα, με επιτόκιο αναγωγής 10%	103
Πίνακας 38: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές, με επιτόκιο αναγωγής 15%	104
Πίνακας 39: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα, με επιτόκιο αναγωγής 15%	105
Πίνακας 40: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές	105
Πίνακας 41: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα	106
Πίνακας 42: Τελικές τιμές NPV, IRR	106
Πίνακας 43: Τελικές τιμές NPV, IRR	107
Πίνακας 44: Συνολικό CAPEX ναυπήγησης δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης	111
Πίνακας 45: Συνολικό OPEX δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης (Drewry, 2022)	111
Πίνακας 46: Χρηματικές εκροές δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2024-2045	112
Πίνακας 47: Υπολογισμός ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου (RFR)	112
Πίνακας 48: Ετήσιες εισροές από τη διαχείριση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης, με επιτόκιο αναγωγής 5%	113
Πίνακας 49: Ετήσιες εισροές από τη διαχείριση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης, με επιτόκιο αναγωγής 10%	114
Πίνακας 50: Ετήσιες εισροές από τη διαχείριση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης, με επιτόκιο αναγωγής 15%	114

Πίνακας 51: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές από τη λειτουργία δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης	115
Πίνακας 52: Τελικές τιμές NPV, IRR, ημερησίου RFR.....	115
Πίνακας 53: Κόστος πράσινης μεθανόλης	117
Πίνακας 54: Καταναλώσεις καυσίμων από τη λειτουργία του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier III Mode)	117
Πίνακας 55: Κόστος πιλοτικού καυσίμου κύριας μηχανής και MGO των ηλεκτρογεννητριών (Ship & Bunker, n.d.).....	117
Πίνακας 56: Έξοδα καυσίμου μεθανόλης	118
Πίνακας 57: Έξοδα ναύλωσης	118
Πίνακας 58: Συνολικά έξοδα της εταιρείας - ναυλωτή	118
Πίνακας 59: Χρηματικές εκροές από τη ναύλωση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2024-2045 (r=5%)	119
Πίνακας 60: Χρηματικές εκροές από τη ναύλωση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2024-2045 (r=10%)	119
Πίνακας 61: Χρηματικές εκροές από τη ναύλωση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2024-2045 (r=15%)	120
Πίνακας 62: Ελάχιστες χρηματικές εισροές από τη ναύλωση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2025-2045.....	121

Λίστα διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Αύξηση της μέσης θερμοκρασίας παγκοσμίως (Demming, 2023)	19
Διάγραμμα 2: Παγκόσμιο ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης της μεθανόλης (MMSA (Methanol Market services Asia), 2023).....	30
Διάγραμμα 3: Η αναμενόμενη άνοδος της παγκόσμιας αγοράς μεθανόλης, η ζήτηση για κάθε παράγωγο της (Maximize Market Research, 2023)	32
Διάγραμμα 4: Το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς μεθανόλης, ανά γεωγραφική περιοχή, 2021-2030 (Research Dive, 2022)	35
Διάγραμμα 5: Η παγκόσμια παραγωγή μεθανόλης, ανά βιομηχανία (Research Dive, 2022).....	37
Διάγραμμα 6: Συγκριτικό διάγραμμα των ενεργειακών κι εξεργειακών αποδόσεων της μεθόδου παραγωγής μεθανόλης από βιομάζα με βάση τις διατάξεις B-CLG και B-CLHP (Aziz & Sun, 2021)	52
Διάγραμμα 7: Το μέγεθος της αγοράς πράσινης μεθανόλης σε διάστημα των ετών 2021-2031 (Research Dive, 2023)	55
Διάγραμμα 8: Η αγορά πράσινης μεθανόλης, ανά τύπο για το έτος 2021 (Research Dive, 2023)	56
Διάγραμμα 9: Η αγορά πράσινης μεθανόλης ανά πρώτη ύλη, για το έτος 2021 (Research Dive, 2023)...	57
Διάγραμμα 10: Η αγορά πράσινης μεθανόλης ανά εφαρμογή, για το έτος 2021 (Research Dive, 2023) .	57
Διάγραμμα 11: Η αγορά πράσινης μεθανόλης ανά βιομηχανία, για το έτος 2021 (Research Dive, 2023)	58
Διάγραμμα 12: Το όριο των εκπομπών SO _x ιστορικά, όπως διαμορφώθηκε από τον IMO (WinGD, 2019)	59
Διάγραμμα 13: Παραγγελίες πλοίων που λειτουργούν με διπλό καύσιμο, ανά κατηγορία (Mandra, 2024)	61
Διάγραμμα 14: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής των καυσίμων (Forsyth, Longspur Research, 2023).....	68
Διάγραμμα 15: Εκπομπές CO ₂ κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR σε τόνους ανά έτος.....	71
Διάγραμμα 16: Οι εκπομπές NO _x του κινητήρα ME-LGIM G95 στη λειτουργία διπλού καυσίμου με και χωρίς το EGR (MAN Energy Solutions, 2023)	72
Διάγραμμα 17: Διαφορά στην ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα ME-LGIM G95 στη λειτουργία διπλού καυσίμου με και χωρίς το σύστημα EGR (MAN Energy Solutions, 2023).....	73
Διάγραμμα 18: Επίδραση από τη χρέωση της παραγόμενης βιομεθανόλης στην NPV	94
Διάγραμμα 19: Επίδραση από τη χρέωση της παραγόμενης βιομεθανόλης στην NPV	95
Διάγραμμα 20: Επίδραση από την χρέωση της παραγόμενης μεθανόλης στην NPV	107
Διάγραμμα 21: Επίδραση από την χρέωση της παραγόμενης μεθανόλης στην NPV	108

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό να εξετάσει την εφικτότητα χρήσης της πράσινης μεθανόλης ως ναυτιλιακό καύσιμο με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής της. Στην τεχνοοικονομική μελέτη που ακολουθεί, γίνεται εκτίμηση του κόστους παραγωγής, μεταφοράς και καύσης της με βάση τις διάφορες μεθόδους σύνθεσης που αναλύονται.

Η χρονική περίοδος επιλογής, έρευνας και συγγραφής της παρούσας μελέτης συμπίπτει με την εισαγωγή νέων κανονισμών στη ναυτιλία που στόχο έχουν την ελαχιστοποίηση των εκπομπών των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου για τους οποίους, ευθύνεται ο συγκεκριμένος τομέας. Το μείζονος σημασίας ζήτημα της κλιματικής κρίσης που ταλανίζει την ανθρωπότητα τη σημερινή εποχή, είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που έχει συναντήσει ο άνθρωπος από την αγροτική επανάσταση έως σήμερα. Στην προσπάθεια εξεύρεσης λύσεων για την αναχαίτηση του συγκεκριμένου φαινομένου, απαραίτητη είναι και η συνδρομή των πανεπιστημιακών ιδρυμάτων που μέσω της ενδεδειγμένης έρευνας είναι σε θέση να λειτουργούν συμβουλευτικά προς τις νομοθετικές και ρυθμιστικές αρχές ώστε αυτές, να λάβουν αποφάσεις σχετικά με το κρίσιμο αυτό πρόβλημα. Η ναυτιλία από την πλευρά της αντιμετωπίζει την πρόκληση να μειώσει το ενεργειακό της αποτύπωμα με τις ελάχιστες δυνατές αναταράξεις στην αγορά δίχως όμως, να γίνει συμβιβασμός της ασφαλούς, οικονομικής και ταχείας μεταφοράς αγαθών. Οι επιστήμονες σε συνεργασία με τη χημική βιομηχανία, εργάζονται πυρετωδώς επάνω στην ανάπτυξη οικολογικών μεθόδων σύνθεσης και μαζικής παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων προκειμένου αυτά, να διανεμηθούν προς χρήση στην αγορά. Παράλληλα, εταιρείες – κολοσσοί που δραστηριοποιούνται στη ναυτιλία έχουν εφεύρει κινητήρες διπλού καυσίμου που θα επιφέρουν σημαντική μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η πράσινη μεθανόλη καθότι παράγεται με περιβαλλοντικά βιώσιμες μεθόδους, υφίσταται σε αυτή τη συζήτηση σαν ένα νέο εναλλακτικό καύσιμο που θα αντικαταστήσει τα υπάρχοντα. Στην τεχνοοικονομική ανάλυση που πραγματοποιείται, μελετάται η παραγωγή πράσινης μεθανόλης τεσσάρων ποικιλιών που προσφέρουν ουδέτερο, είτε αρνητικό αποτύπωμα άνθρακα. Για την εκτίμηση του κόστους μεταφοράς και καύσης της, λαμβάνεται ένα σενάριο που βασίζεται σε ένα υπαρκτό δεξαμενόπλοιο που λειτουργεί με κύριο καύσιμο πρόωσης τη μεθανόλη. Η εκλογή του κόστους μεταφοράς γίνεται με τη μελέτη του προβλήματος από την πλευρά της ναυτιλιακής εταιρείας που ναυπηγεί και διαχειρίζεται το συγκεκριμένο πλοίο ενώ, η εκτίμηση του κόστους χρήσης της μεθανόλης, από την πλευρά εταιρείας που το ναυλώνει για εμπορική χρήση.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τη μελέτη εφικτότητας χρήσης πράσινης μεθανόλης (green methanol) ως καύσιμο σε πλοία με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής. Αρχικά, στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση του καίριου ζητήματος της κλιματικής αλλαγής το οποίο, αποτελεί ένα μείζον πρόβλημα που απασχολεί ιδιαίτερα την ανθρωπότητα σήμερα. Επισημαίνεται ο τρόπος με τον οποίο, θα επηρεαστεί η ναυτιλία από τις εξαγγελίες κι αποφάσεις του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού και της Ευρωπαϊκής Ένωσης που πρωτοστατούν στην αντιμετώπιση του συγκεκριμένου φαινομένου ενώ, γίνεται αναφορά και στα εναλλακτικά καύσιμα και τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας που έχουν τεθεί προς διαβούλευση με στόχο την αντικατάσταση των παραδοσιακών που επιφέρουν σημαντικό αποτύπωμα άνθρακα. Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά της σύστασης της μεθανόλης ενώ, εξετάζεται και η αγορά της ανά γεωγραφική περιοχή, πρώτη ύλη και τομέα χρήσης. Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των μεθόδων παραγωγής πράσινης μεθανόλης, από βιομάζα, υδρογόνο και δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα και της απόδοσης αυτών. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται και η αγορά της πράσινης μεθανόλης. Στο 4^ο κεφάλαιο εξετάζεται η πράσινη μεθανόλη ως ναυτιλιακό καύσιμο βάσει των περιβαλλοντικών αποφάσεων που τίθενται από νομοθετικές και ρυθμιστικές αρχές, ενώ παράλληλα, γίνεται ανάλυση των νέων τεχνικών προδιαγραφών που υφίστανται με την εισαγωγή της στην εμπορική ναυτιλία. Επιπλέον, εξετάζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκαλούνται κατά τη χρήση της στην πρόωση των πλοίων, κατά τα πρότυπα ενός κινητήρα διπλού καυσίμου που χρησιμοποιεί ως βασικό καύσιμο μεθανόλη και πετρέλαιο ως πιλοτικό, αντίστοιχα. Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση ορισμένων κριτηρίων και της μεθοδολογίας για την οικονομική αξιολόγηση μίας εξεταζόμενης επένδυσης. Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεchnοοικονομική μελέτη των σταδίων παραγωγής, μεταφοράς και τελικώς, καύσης της πράσινης μεθανόλης για την πρόωση πλοίων. Σκοπός της μελέτης είναι η εκτίμηση του κόστους παραγωγής και κατανάλωσης του συγκεκριμένου καυσίμου προκειμένου, να εξεταστεί εάν είναι οικονομικά εφικτή η χρήση της στη ναυτιλία.

Abstract

The present thesis concerns the feasibility study of using green methanol as a marine fuel based on its life-cycle analysis. Initially, in the 1st chapter, an analysis is made of the critical issue of climate change, a major problem that deeply concerns mankind today. It highlights how the maritime industry will be affected by the announcements and policies of International Maritime Organization and European Union, which are leading the struggle to tackle this phenomenon. A reference is made to alternative fuels and renewable energy forms that have been put forward for consultation with the aim of substituting the traditional ones which have a significant carbon footprint. In the 2nd chapter, basic characteristics of methanol composition are presented, while its market is examined by geographical regions, raw materials and sectors of use. The 3rd chapter provides a detailed presentation of green methanol's production methods, derived from biomass, hydrogen and captured carbon dioxide, and their efficiency. Additionally, the green methanol market is presented. In the 4th chapter green methanol as a marine fuel is examined based on environmental regulations set by legislative and regulatory authorities, while, an analysis is made of the new technical specifications introduced with its adoption in commercial shipping. Furthermore, carbon dioxide emissions caused by its use in ship propulsion are examined following the standards of a dual-fuel engine that operates with methanol as the main fuel and diesel as the pilot fuel. The 5th chapter presents some criteria and the methodology for the economic evaluation of a proposed investment. Finally, in the 6th chapter, a technoeconomic study of the production, transportation, and ultimately, combustion of green methanol for ship propulsion is presented. The purpose of this study is the estimation of production and consumption cost of this particular fuel to assess whether its use in shipping is economically feasible.

Βιβλιογραφική επισκόπηση

Στο συγκεκριμένο εδάφιο γίνεται μία σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση αναφορικά με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας με θέμα τη μελέτη εφικτότητας χρήσης πράσινης μεθανόλης ως καύσιμο σε πλοία με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής. Καθώς οι τεχνολογίες της μεθόδου παραγωγής πράσινης μεθανόλης και χρήσης ως ναυτιλιακό καύσιμο πρόωσης δεν είναι αρκετά ώριμες και ακόμη πραγματοποιείται εκτενής έρευνα σχετικά με το παρόν ζήτημα, η βιβλιογραφία είναι περιορισμένη.

Ο ορισμός της κλιματικής αλλαγής από ανθρωπογενή αίτια παρουσιάζεται και διαχωρίζεται με σαφήνεια από το (UNFCCC, 1992). Οι τρόποι με τους οποίους, αυτή επιδρά και κάνει εμφανή πλέον την παρουσία της, αναφέρονται στο (Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας, χ.χ.). Παράλληλα, από το (British Geological Survey, n.d.) λαμβάνεται και παρατίθεται η σειρά δραστηριότητας των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου τα οποία, επιδρούν καθοριστικά στην όξυνσή του. Παρουσιάζεται επιπλέον η στρατηγική του IMO (DNV, 2023) και της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Commission, 2023) προκειμένου, να επιτευχθεί η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Από σχετική έρευνα που έγινε, στα (Maximize Market Research, 2023), (Research Dive, 2022), (Allied Market Research, 2022), (The Insight Partners, 2022) αποτυπώνονται με σαφή τρόπο τα δεδομένα για την αγορά της μεθανόλης. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται στοιχεία για την αναμενόμενη ανάπτυξη της εν λόγω αγοράς, την επίδραση της πανδημίας του COVID-19 καθώς, και για τον διαμερισμό της ανά πρώτη ύλη, γεωγραφική περιοχή και βιομηχανία. Τέλος, δεδομένα για την αγορά της πράσινης μεθανόλης παρείχε η έρευνα του (Research Dive, 2023) όπου, έγινε εκ νέου διαμερισμός ανά πρώτη ύλη, τομέα και γεωγραφική περιοχή, προκειμένου να ληφθεί μία ευκρινέστερη εικόνα από τη συγκεκριμένη αγορά που αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς.

Στην έρευνα των (Aziz & Sun, 2021) παρουσιάζεται και αναλύεται διεξοδικά η μέθοδος παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα. Συγκεκριμένα, εξηγούνται και παρατίθενται τα διαγράμματα ροής της μεθόδου σύνθεσης μεθανόλης για την άμεση αεριοποίηση βιομάζας με βάση τις διαδικασίες B-CLG, B-CLHP. Η μεθοδολογία παραγωγής πράσινης μεθανόλης, με πρώτες ύλες, υδρογόνο που συντίθεται με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης και δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα, παρατίθεται από τους (Abbas, et al., 2022). Στη συγκεκριμένη έρευνα γίνεται διαχωρισμός στην ανάλυση ενσωματωμένης σχεδίασης (integrated design) και 100 % αειφόρου σχεδίασης (100 % renewable design). Στη δημοσίευση της (IRENA, 2021) παρουσιάζεται και μία μέθοδος που συνδυάζει τις δύο ανωτέρω, που στόχος της είναι ο συσχετισμός των πλεονεκτημάτων των δύο μεθόδων, ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των CAPEX και OPEX. Τέλος, παρατίθενται στοιχεία για την αποδοτικότητα των μεθόδων με σκοπό την αξιολόγηση και την εκλογή του ενεργειακού βαθμού απόδοσής τους.

Η δημοσιευμένη έρευνα του (Forsyth, Longspur Research, 2022) παρείχε δεδομένα για την ανάλυση των εκπομπών των προτεινόμενων εναλλακτικών καυσίμων της ναυτιλίας που έχουν τεθεί προς διαβούλευση και κάποια εκ των οποίων, αναμένεται αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά που ήδη χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα στον Πίνακα 3, παρατίθενται οι βασικές παράμετροι των συγκεκριμένων εναλλακτικών καυσίμων ενώ, στο Διάγραμμα 14 παρουσιάζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που αποδίδει καθένα από αυτά καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Στοιχεία για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που αποδίδει ένας κινητήρας διπλού καυσίμου χρησιμοποιώντας ως κύριο καύσιμο μεθανόλη, λαμβάνονται από το λογισμικό CEAS που έχει αναπτύξει η (MAN Energy Solutions, n.d.). Με τη χρήση του προγράμματος, γίνεται μελέτη για τις εκπομπές που αποδίδει συγκεκριμένη προωστήρια εγκατάσταση, τα στοιχεία της οποίας, βασίζονται σε αυτά του κινητήρα ενός υπαρκτού πλοίου.

Το φυλλάδιο της (MAN Energy Solutions, 2023) περιλαμβάνει αναλυτικά στοιχεία για τον τρόπο λειτουργίας των κινητήρων διπλού καυσίμου μεθανόλης – πετρελαίου, των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου που αποδίδονται και των σχεδιαστικών ζητημάτων ασφάλειας που υπεισέρχονται με την εισαγωγή του συγκεκριμένου καυσίμου σε εμπορικά πλοία.

Η τεχνοοικονομική μελέτη εφικτότητας που πραγματοποιείται, βασίζεται σε πληθώρα στοιχείων σχετικά με το κόστος στα στάδια παραγωγής, μεταφοράς και χρήσης πράσινης μεθανόλης ως καύσιμο σε πλοία. Με βάση την εκτενή έρευνα της (IRENA, 2021) γίνεται εκτίμηση του αρχικού κεφαλαίου και των λειτουργικών εξόδων που απαιτούνται για την υλοποίηση, διαχείριση και λειτουργία μονάδων παραγωγής βιομεθανόλης και e-μεθανόλης, αντίστοιχα. Τα στοιχεία αυτά αφορούν κυρίως υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ενώ, δεδομένα όπως το εύρος του κόστους των πρώτων υλών, η απόδοση των μεθόδων παραγωγής και η πίστωση άνθρακα παρείχαν τη δυνατότητα εκτίμησης ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

Στο δεύτερο στάδιο όπου, μελετάται η μεταφορά και κατανάλωση του συγκεκριμένου καυσίμου, λήφθηκε σενάριο τόσο από την πλευρά ναυτιλιακής εταιρείας που ναυπηγεί και διαχειρίζεται δεξαμενόπλοιο μεταφοράς χημικών, όσο και από την πλευρά εταιρείας που ναυλώνει το συγκεκριμένο πλοίο με σκοπό τη μεταφορά πράσινης μεθανόλης. Τα στοιχεία για το κόστος ναυπήγησης και λειτουργίας αντλήθηκαν σε συνεννόηση με τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Γεώργιο Δημόπουλο κι από τη δημοσιευμένη έρευνα της (Drewry, 2022). Παράλληλα, εξετάζοντας το πρόβλημα από την πλευρά της εταιρείας που ναυλώνει το συγκεκριμένο πλοίο, λαμβάνονται στοιχεία του κόστους καυσίμου για τον κινητήρα με βάση τον οποίο γίνεται η μελέτη από το λογισμικό CEAS της (MAN Energy Solutions, n.d.). Ενώ, τα κόστη του καυσίμου των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών και του πιλοτικού της κύριας μηχανής προήλθαν από τη διαδικτυακή ιστοσελίδα (Ship & Bunker, n.d.).

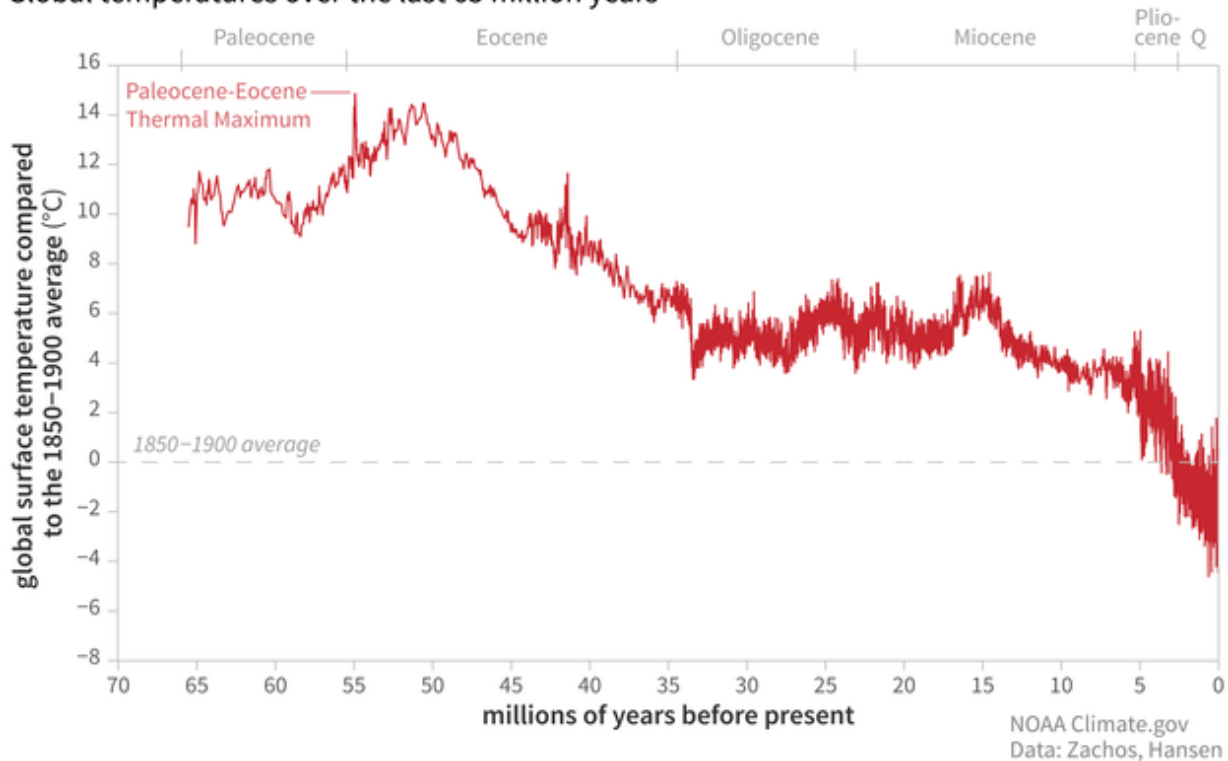
1 Το φαινόμενο της κλιματικής κρίσης και οι νέες προκλήσεις για τη ναυτιλία

1.1 Η κλιματική αλλαγή και οι προσπάθειες για το μετριασμό της

Από τον 19^ο αιώνα κι έπειτα, συντελείται μια συνεχιζόμενη αλματώδης αύξηση της ανθρώπινης παραγωγικότητας και υπερκατανάλωσης που θράφηκαν από τα μεγάλα τεχνολογικά επιτεύγματα εκείνης της εποχής και των μετέπειτα ετών. Ειδικότερα, οι περίοδοι της Βιομηχανικής και Τεχνολογικής Επανάστασης αποτελούν ορόσημο για τον άνθρωπο ο οποίος, κατάφερε να βελτιώσει τη ζωή του και να διευκολύνει την καθημερινότητά του. Πριν από αυτές τις περιόδους, το κύριο μέσο που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την ικανοποίηση των καθημερινών αναγκών του ανθρώπου, ήταν η μυϊκή δύναμη που κατείχε ο ίδιος, είτε αυτή κάποιου οικόσιτου ζώου. Η έλευση των μηχανών και των τεχνολογικών ανακαλύψεων τον 19^ο και τον 20^ο αιώνα, σηματοδότησε μια εποχή πρωτόγνωρης παραγωγικότητας αγαθών, νέων πρώτων υλών κι έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη ραγδαία αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού πάνω στη Γη η οποία, συνεχίζεται με αμείωτους ρυθμούς μέχρι και σήμερα. Το κόστος όλων αυτών των επιτευγμάτων όμως, ήταν η υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος, η ρύπανση του εδάφους και της ατμόσφαιρας και η αλλοίωση της κλιματικής ισορροπίας που προκλήθηκε ως συνέπεια των προηγούμενων. (Harari, 2015)

Η κλιματική αλλαγή ως έννοια, αφορά τη μεταβολή του κλίματος και των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στο πλαίσιο μιας μεγάλης χρονικής κλίμακας. Αποτελεί ένα παγκόσμιο φαινόμενο το οποίο, μπορεί να οφείλεται είτε σε φυσικούς, είτε σε ανθρωπογενείς παράγοντες. Σύμφωνα με τη Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (United Nations Framework Convention on Climate Change), στην οποία διαχωρίζεται η παγκόσμια μεταβολή στο κλίμα σε φυσικά και ανθρωπογενή αίτια, στο άρθρο 1 παρουσιάζεται ο ορισμός της έννοιας της “κλιματικής αλλαγής”. Συγκεκριμένα, χαρακτηρίζεται ως “μία αλλαγή στο κλίμα η οποία, οφείλεται στην άμεση ή έμμεση επίδραση της ανθρώπινης δραστηριότητας και μεταβάλλει τη σύσταση της παγκόσμιας ατμόσφαιρας και δρα επιπρόσθετα της κλιματικής μεταβλητότητας που παρατηρείται σε συγκρίσιμες χρονικές περιόδους.” (UNFCCC, 1992)

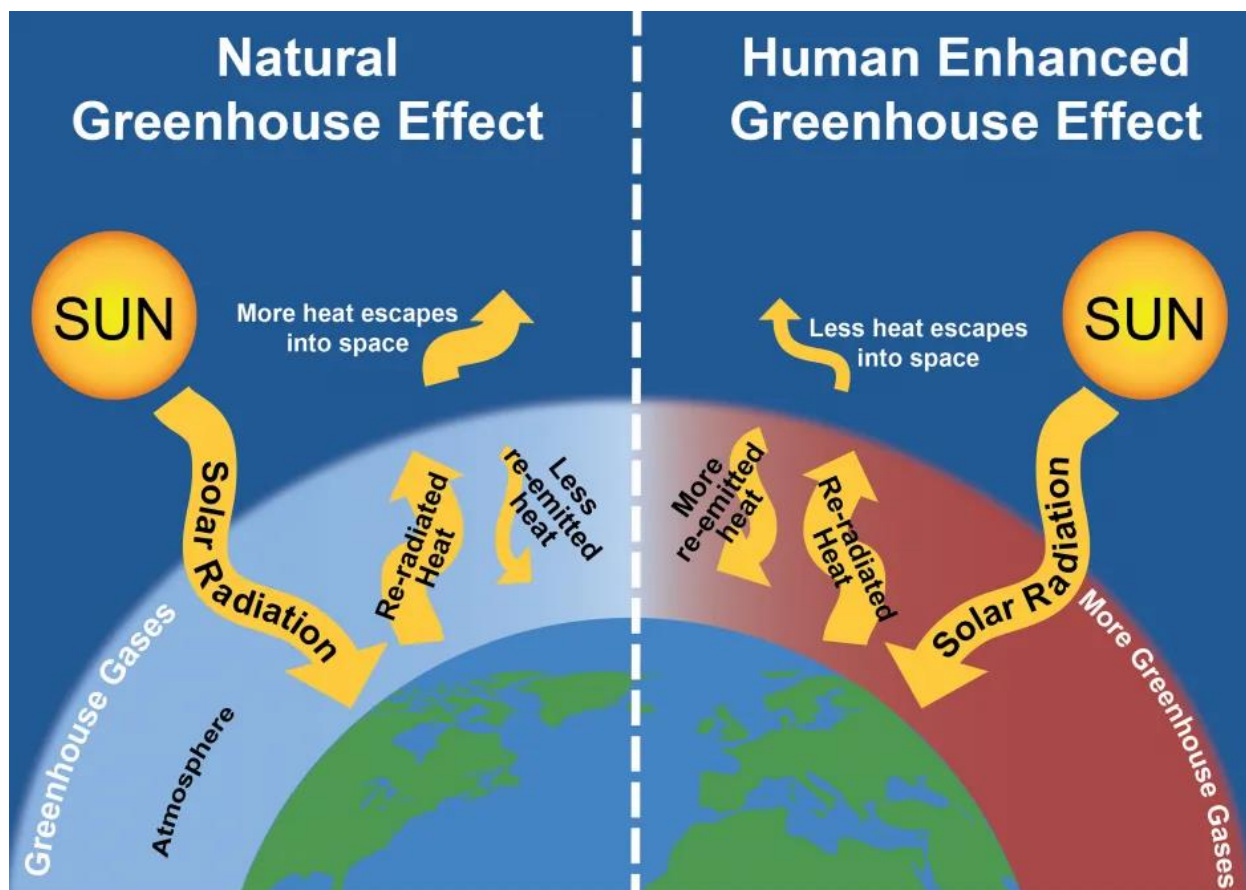
Global temperatures over the last 65 million years



Εικόνα 1: Η μεταβολή της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας της Γης τα τελευταία 65 εκατομμύρια χρόνια (Scott & Lindsey, 2023)

Ένα από τα κύρια φαινόμενα που σχετίζονται με την κλιματική κρίση και δρουν καταλυτικά στην έντασή της είναι η όξυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Με τον όρο “φαινόμενο του θερμοκηπίου” μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τη διαδικασία κατά την οποία, ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε μορφή θερμότητας, εγκλωβίζεται στην ατμόσφαιρα της Γης εμποδιζόμενο να διαφύγει στο διάστημα από τα λεγόμενα “αέρια του θερμοκηπίου”. Τα αέρια αυτά αντανακλούν θερμότητα στην επιφάνεια της Γης, θερμαίνοντας τη με αυτό τον τρόπο. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι καθοριστικής σημασίας για την ύπαρξη ζωής στον πλανήτη ενώ χωρίς την παρουσία του, η μέση θερμοκρασία της Γης θα ήταν σε επίπεδα κάτω των 0 °C. Τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου τα οποία, συνεισφέρουν περισσότερο στην όξυνση του φαινομένου κατά σειρά αύξουσας δραστηριότητας είναι τα ακόλουθα: (British Geological Survey, n.d.)

- Υδρατμοί νερού (H₂O)
- Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)
- Υποξείδιο του αζώτου (N₂O)
- Μεθάνιο (CH₄)
- Όζον (O₃)



Εικόνα 2: Το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η όξυνσή του από τον ανθρώπινο παράγοντα. (University of Michigan, 2023)

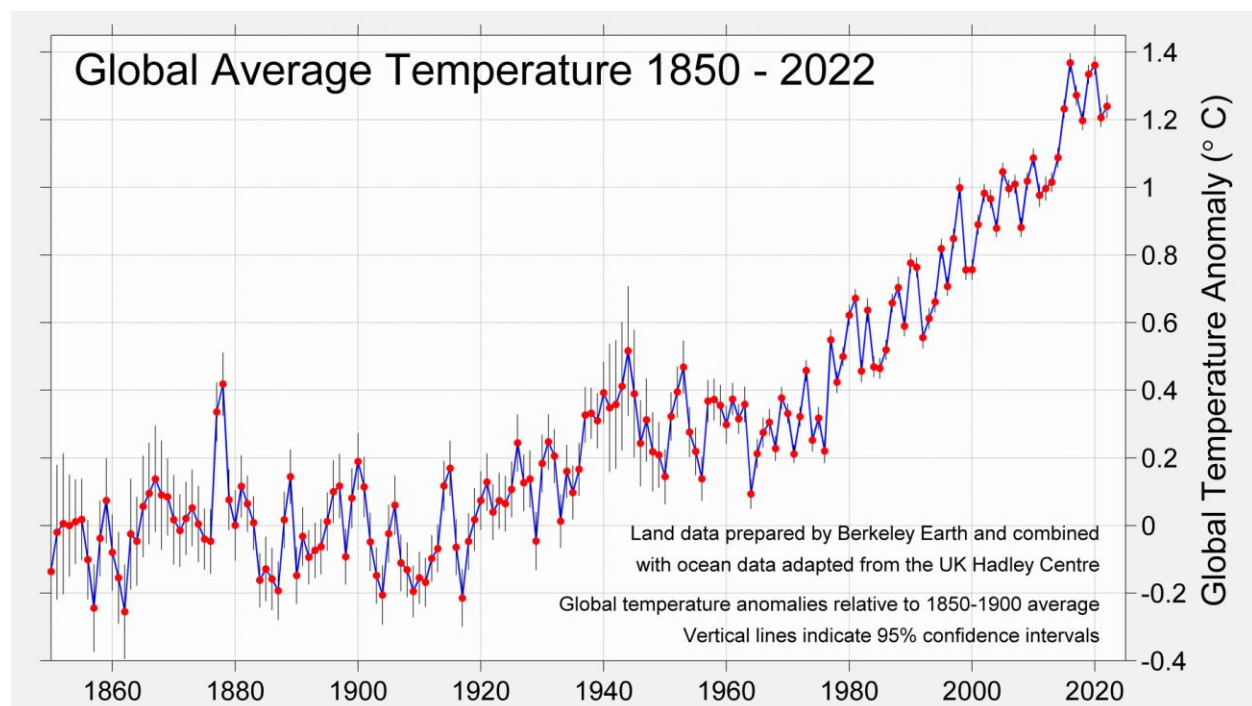
Σύμφωνα, με την Πέμπτη Έκθεση της Διακυβερνητικής Αξιολόγησης (AR5) για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), το ποσό της ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα του πλανήτη είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με αυτό που εξέρχεται, και ήδη από το 1970 παρατηρούνται τα εξής φαινόμενα που σχετίζονται με τη μεταβολή του κλίματος λόγω ανθρώπινης παρέμβασης: (Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας, n.d.)

- Παγκόσμια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, σε χερσαίες και θαλάσσιες περιοχές του πλανήτη
- Διατάραξη της κλιματικής ισορροπίας, ένταση των βροχοπτώσεων σε υγρές περιοχές και μείωση αυτών σε ξηρές
- Εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων με μεγαλύτερη συχνότητα
- Λιώσιμο των πάγων
- Άνοδος της στάθμης του νερού των ωκεανών

Με την ένταση της ανθρώπινης παραγωγικότητας από τη Βιομηχανική Επανάσταση κι έπειτα και με την ραγδαία αυξανόμενη χρήση ορυκτών καυσίμων, τα επίπεδα των αερίων του θερμοκηπίου και ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα, γνώρισαν μια ταχύτατη άνοδο. Συνέπεια αυτού, ήταν η ραγδαία αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης κατά 1.2 °C στο διάστημα των ετών 1850-2022 όπως παρουσιάζεται και στο Διάγραμμα 1. Δεδομένων των αδιάσειστων στοιχείων για την αρνητική επίδραση της ανθρώπινης

δραστηριότητας που οδηγεί στην ένταση της κλιματικής αλλαγής οι διεθνείς, εθνικοί και τοπικοί οργανισμοί ανέλαβαν δράση και έθεσαν νομοθετικά πλαίσια για την άμβλυνση του εν λόγω φαινομένου. Στις ανεπτυγμένες κυρίως χώρες, τα τελευταία χρόνια οι κυβερνήσεις είναι περισσότερο ευαισθητοποιημένες για την καταπολέμηση αυτού του καιρίου ζητήματος, η αντιμετώπιση του οποίου αποτελεί επιτακτική ανάγκη για τη σταθεροποίηση της παγκόσμιας κλιματικής ισορροπίας. Σε συνεργασία μεταξύ τους έχουν θέσει το πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής ως υψίστης σημασίας στη διεθνή πολιτική ατζέντα.

Ειδικότερα, έντονες είναι οι προσπάθειες για τη θεσμοθέτηση νομοθετικών πλαισίων στους τομείς της βιομηχανίας, των χερσαίων και θαλασσίων μεταφορών που στόχο έχουν να θέσουν υπό έλεγχο τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Έχει αναδειχθεί η αναγκαιότητα της αντικατάστασης των συμβατικών ορυκτών καυσίμων με άλλα τα οποία, έχουν είτε χαμηλότερο, είτε μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα. Μία από αυτές τις εναλλακτικές λύσεις αποτελεί και η μεθανόλη που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Διάγραμμα 1: Αύξηση της μέσης θερμοκρασίας παγκοσμίως (Demming, 2023)

1.2 Οι αλλαγές που αναμένεται να επέλθουν στη ναυτιλιακή βιομηχανία

Από τα αρχαία χρόνια κι από τα κοίλα πλοία που δημιουργήθηκαν κατά τη μινωική περίοδο, έως τα πλοία της γραμμής του Βρετανικού Βασιλικού Ναυτικού των αρχών του 19^{ου} αιώνα κι από τα πρώτα πλοία που κινούνταν με ατμό, έως σήμερα που τα πλοία κινούνται με κινητήρες Diesel πολύ μεγάλων διαστάσεων κι έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν πολλές χιλιάδες τόνους ωφέλιμου φορτίου, η ναυτιλία αποτελεί τον κύριο τρόπο μεταφοράς αγαθών και ανθρώπων. Σήμερα, παρά την πρόοδο της τεχνολογίας και την ανάπτυξη προηγμένων επίγειων κι εναέριων μέσων μεταφοράς, η ναυτιλία εξακολουθεί να κυριαρχεί, με το 90 % του παγκοσμίου εμπορίου να διενεργείται δια θαλάσσης. Γίνεται εύκολα αντιληπτή η καθοριστική σημασία του εν λόγω τομέα, που ιστορικά έπαιξε πολύ σημαντικό ρόλο στη δόμηση, την ανάπτυξη και την ευημερία διαφόρων κοινωνιών τόσο σε οικονομικό όσο και σε πολιτισμικό και κοινωνικό επίπεδο. Σημειώνεται δε, ότι αποτελεί τον αποδοτικότερο και οικονομικότερο τρόπο μεταφοράς αγαθών κι ότι συγκρινόμενη με τους τομείς των χερσαίων κι εναέριων μεταφορών, είναι η λιγότερο επιβλαβής για το

περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψη τους ρύπους που εκπέμπονται ανά τόνο μεταφερόμενου φορτίου επί τα χιλιόμετρα που διανύονται. Παρουσιάζεται και στην Εικόνα 3 που ακολουθεί.



Comparison of typical CO₂ emissions between modes of transport, in grams/tonne-km

Source: ICS Fuelling the Fourth Propulsion Revolution: Full Report, based on IMO, Second GHG Study, 2009

*AP Moller-Maersk, 2014

■ KEY POINT:

Maritime transport has lower emissions in comparison with other transport modes; consequently, a shift towards maritime transport is beneficial for the climate.

Εικόνα 3: Σύγκριση εκπομπών CO₂ μεταξύ διαφόρων μέσων μεταφορών σε gr/(tonne*km) (International Chamber of Shipping, χ.χ.)

Με την εκθετική αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού που έχει συντελεστεί τις τελευταίες δεκαετίες, η ζήτηση και η μεταφορά αγαθών διογκώνεται ολοένα και περισσότερο, με την ανάγκη για νέα πλοία και περισσότερα ενεργειακά αποθέματα να είναι σε μία εξακολουθητικά ανοδική τάση. Την παρούσα χρονική περίοδο, λειτουργούν πάνω από 50000 εμπορικά πλοία σε κάθε μέρος του πλανήτη, εγγεγραμμένα σε 159 διαφορετικές χώρες και απασχολούνται τουλάχιστον 1 εκατομμύριο ναυτικοί κάθε εθνικότητας, σε πλοία όπου μεταφέρεται κάθε είδος εμπορεύματος. (Wind Rose Network, χ.χ.)

1.2.1 Η στρατηγική του IMO για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου

Ωστόσο, παρά τον κρίσιμο ρόλο που παίζει η εν λόγω βιομηχανία στην ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας, τη μεταφορά αγαθών με βέλτιστο τρόπο και την ενεργειακή αποδοτικότητα που χαρακτηρίζει το εμπόριο δια θαλάσσης σε σύγκριση με άλλους τρόπους μεταφορών, ευθύνεται για ένα σημαντικό μέρος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σύμφωνα με τη μελέτη για τα αέρια του θερμοκηπίου που έγινε από το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) το 2018 οι εκπομπές λόγω των δραστηριοτήτων του ναυτιλιακού τομέα συνολικά, ανήλθαν στα 1.056 δισεκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), δηλαδή ένα ποσοστό περίπου 2.9 % των συνολικών εκπομπών που οφείλονται σε ανθρωπογενή αίτια. Για αυτόν τον λόγο το 2018, ο IMO υιοθέτησε μια στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου που οφείλονται στις δραστηριότητες της παγκόσμιας ναυτιλίας. Η σύμβαση αυτή αναθεωρήθηκε το 2023 περιλαμβάνοντας περισσότερο φιλόδοξους στόχους. Η αναθεωρημένη διάταξη του IMO περιλαμβάνει τις ακόλουθες αλληλένδετες φιλοδοξίες: (DNV, 2023)

- Μείωση του αποτυπώματος του άνθρακα που οφείλεται στις δραστηριότητες της ναυτιλίας σε ποσοστό τουλάχιστον 40 % το 2030, με έτος σύγκρισης το 2008
- Υιοθέτηση τεχνολογιών που θα αποδίδουν μηδενικές είτε ελάχιστες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, με τις συγκεκριμένες πηγές ενέργειας ή καύσιμα να αντιπροσωπεύουν το 5 % της συνολικής αποδιδόμενης ενέργειας έως το 2030 με προσπάθειες για άνοδο στο 10 %

- Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου που οφείλονται στην παγκόσμια ναυτιλία να φτάσουν σε μηδενικό, είτε σχεδόν μηδενικό επίπεδο μέχρι το 2050

Επιπλέον, η εν λόγω στρατηγική έχει θέσει τους παρακάτω στόχους προς εκπλήρωση:

- Τη μείωση των συνολικών ετήσιων εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστό τουλάχιστον 20 %, με προσπάθειες για μείωση σε 30 %, μέχρι το 2030
- Τη μείωση των συνολικών ετήσιων εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστό τουλάχιστον 70 %, με προσπάθειες για μείωση σε 80 %, μέχρι το 2040

Για να επιτευχθούν οι ανωτέρω στόχοι, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (ΙΜΟ) στην προσπάθεια του να θεσπίσει το νομοθετικό πλαίσιο υιοθέτησε τους ακόλουθους δείκτες αξιολόγησης ενεργειακής αποδοτικότητας για τα πλοία της παγκόσμιας ναυτιλίας: (DNV, 2023)

- Energy Efficiency Design Index (EEDI): Αφορά νέες κατασκευές πλοίων και αποσκοπεί στην βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης
- Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI): Αφορά υπάρχοντα πλοία και αποσκοπεί στην βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης, καθορίζεται όμοια με τον δείκτη EEDI
- Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP): Αποτελεί πρακτικό εργαλείο το οποίο, υιοθετήθηκε για να βοηθήσει τους πλοιοκτήτες ώστε να πετύχουν την καλύτερη διαχείριση της λειτουργίας και της απόδοσης πλοίων και στόλων που διαθέτουν
- Carbon Intensity Indicator (CII): Μετρά και καταγράφει την ετήσια απόδοση όλων των πλοίων με χωρητικότητα άνω των 5000 GT με μονάδα μέτρησης την ποσότητα του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά καθαρό βάρος DWT επί την απόσταση που διανύεται
- Fuel Oil Consumption Data Collection System (DCS): Υποβάλλει ετήσια έκθεση για τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κι άλλα δεδομένα για όλα τα πλοία με χωρητικότητα άνω των 5000 GT

Τα παραπάνω μέτρα τα οποία θέτει ο ΙΜΟ καθορίζουν ένα σαφή στόχο για την παγκόσμια ναυτιλία προς την κατεύθυνση της αποδέσμευσης από τον άνθρακα. Η ενεργειακή μετάβαση στην πράσινη ναυτιλία μπορεί να γίνει πραγματικότητα με τη συνεργασία των κυβερνήσεων των κρατών και των διεθνών οργανισμών που θα καταστήσουν αυτή τη μετάβαση δυνατή, όχι μόνο με τη θεσμοθέτηση νομοθετικού πλαισίου που το επιβάλλει αλλά και με τη δημιουργία υποδομών, προϋποθέσεων και κινήτρων ούτως ώστε, η παραγωγή καυσίμων με χαμηλό αποτύπωμα σε άνθρακα ή ο πλήρης εξηλεκτρισμός να γίνει με τρόπο οικονομικά αποδεκτό κι εφικτό και να υπάρχει παγκόσμια προσβασιμότητα.

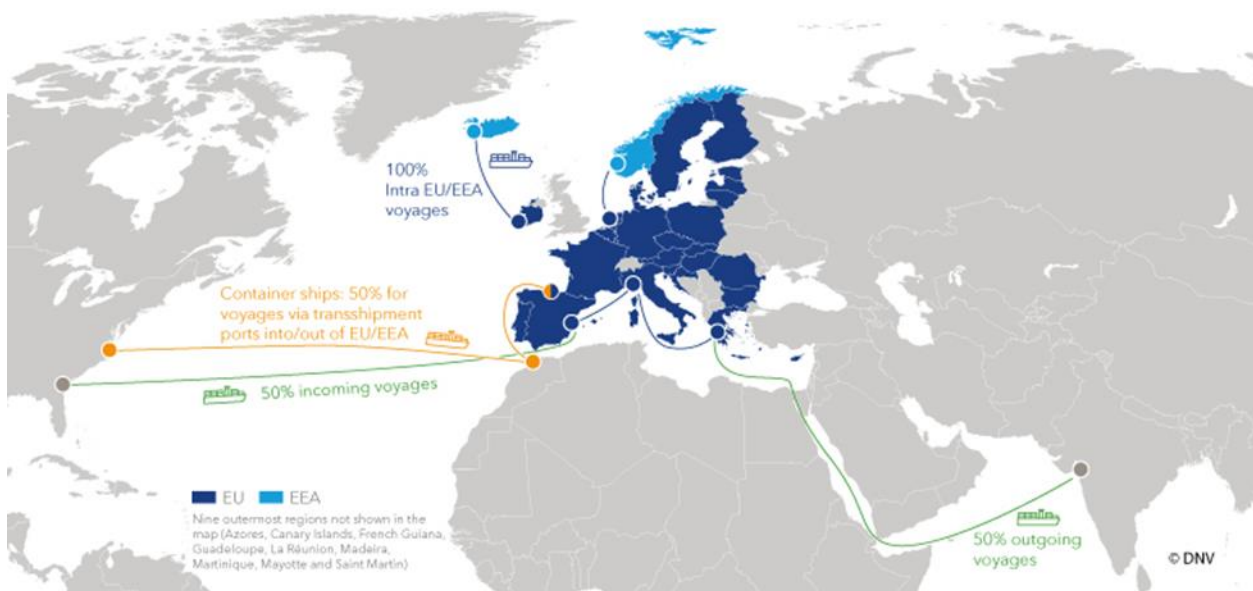
Η καθυστέρηση της διεθνούς κοινότητας να λάβει μέτρα για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής θα έχει δυσμενείς συνέπειες για χώρες που ήδη μαστίζονται από τα αποτελέσματα που τη συνοδεύουν. Επιπλέον, οι επενδύσεις σε πράσινες τεχνολογίες στη ναυτιλία αναμένεται να απαιτήσουν μεγαλύτερα κεφάλαια για την πραγματοποίησή τους, όσο η μετάβαση αυτή δε γίνεται με γρήγορους ρυθμούς κι αναβάλλεται για μεταγενέστερες χρονικές περιόδους. Συνοψίζοντας, είναι σημαντικό να παρθούν αποφάσεις άμεσα καθώς, μεγαλύτερες καθυστερήσεις θα έχουν σοβαρότατες συνέπειες τόσο από περιβαλλοντική όσο και από οικονομική σκοπιά. (Sidenvall Jegou, Laffineur, Spiegelenberg, & Leitão, 2023)

1.2.2 Η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου

Το σύστημα εμπορίας ρύπων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU ETS) είναι ένα σύστημα Cap and Trade το οποίο, υιοθετήθηκε από αυτή το 2003 και τέθηκε για πρώτη φορά σε εφαρμογή το 2005. Στο εν λόγω σύστημα τίθεται ένα ανώτατο όριο εκπομπών από τη ίδια την Ευρωπαϊκή Ένωση για τις βιομηχανίες που δραστηριοποιούνται εντός των γεωγραφικών ορίων της στις οποίες, διατίθενται ή πλειστηριάζονται άδειες. Σε περίπτωση που οι επιχειρήσεις ξεπερνούν το συγκεκριμένο όριο θα πρέπει να αναζητήσουν και να αγοράσουν νέες άδειες από την αγορά ρύπων που διατίθενται από άλλες επιχειρήσεις με περίσσεια αδειών. Έτσι, λοιπόν γίνεται ταυτόχρονη αντιμετώπιση του προβλήματος της κλιματικής κρίσης ενσαρκώνοντας παράλληλα τα οφέλη που προσφέρει η αρχής της προσφοράς και ζήτησης. Αποτελεί τη μεγαλύτερη αγορά εμπορίας ρύπων σε παγκόσμιο επίπεδο ήδη από τη δημιουργία της και τη βασικότερη μέθοδο καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής από την Ευρωπαϊκή Ένωση καθώς, καλύπτει το 50 % του συνολικού όγκου των αερίων του φαινομένου το θερμοκηπίου. Αριθμεί 30 μέλη στις τάξεις του, εκ των οποίων είναι τα 27 κράτη – μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το Λιχτενστάιν, η Ισλανδία και η Νορβηγία. (Πετρόπουλος, 2017) Μέλος αυτού συστήματος δεν αποτελεί πλέον η Μεγάλη Βρετανία έπειτα, από την έξοδο της από την Ευρωπαϊκή Ένωση ενώ, από την 1^η Ιανουαρίου του 2021 ανέπτυξε το δικό της σύστημα εμπορίας ρύπων UK ETS. (Natural Resources Wales, 2024)

Από την 1^η Ιανουαρίου 2024 έγινε η εισαγωγή του συστήματος εμπορίας ρύπων και στον τομέα της ναυτιλίας και αφορά τα πλοία με χωρητικότητα 5000 GT και άνω. Θα καλύπτει τις εκπομπές αερίων από κάθε πλοίο που εισέρχεται στα λιμάνια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ανεξάρτητα από τη σημαία τους. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα εμπορίας ρύπων θα περιλαμβάνει:

- Το 50 % των εκπομπών CO₂ για πλοία που εκτελούν δρομολόγια με εναρκτήριο ή τερματικούς σταθμούς σε λιμάνια εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης.
- Το 100 % των εκπομπών CO₂ για πλοία που εκτελούν δρομολόγια σε λιμάνια εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης.



Εικόνα 4: Χάρτης με τα κράτη της Ευρώπης που συμμετέχουν στο EU ETS (DNV, 2023)

Για την ομαλή προσαρμογή της οικονομίας στα νέα αυτά δεδομένα που θέτει το EU ETS, το ποσοστό των εκπομπών για τις οποίες θα πρέπει να αγοράζονται άδειες, θα αυξάνεται σταδιακά τα πρώτα τρία χρόνια σύμφωνα με τον ακόλουθο τρόπο:

- Το 2025 θα καλύπτεται το 40 % των εκπομπών που καταγράφηκαν το 2024
- Το 2026 θα καλύπτεται το 70 % των εκπομπών που καταγράφηκαν το 2025
- Από το 2027 θα καλύπτεται το 100 % των εκπομπών που καταγράφηκαν το προηγούμενο έτος

Τα συστήματα ETS και MRV (Monitoring Reporting Verification) της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις εκπομπές των πλοίων είναι από τις κύριες μεθόδους που αυτή έχει θεσπίσει για το μετριασμό του αποτυπώματος άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, όσον αφορά το σύστημα EU MRV, υποχρεώνει ήδη από το 2023 τους πλοιοκτήτες να καταγράφουν τις εκπομπές CO₂ ενώ, το 2024 θα αποτελέσει και την πρώτη χρονιά που θα καταγράφονται στοιχεία για εκπομπές υποξειδίου του αζώτου (N₂O) και μεθανίου (CH₄). (European Commission, 2023)

Οι προσπάθειες για την απανθρακοποίηση της ναυτιλιακής βιομηχανίας αναμένεται να εντατικοποιηθούν ακόμη περισσότερο με την υιοθέτηση του κανονισμού FuelEU Maritime από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Με την εισαγωγή του από την 1^η Ιανουαρίου προβλέπεται ότι θα οδηγήσει στη σταδιακή αντικατάσταση του παραδοσιακού πετρελαίου από νέα εναλλακτικά καύσιμα με χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα. Πλοία τα οποία, επιχειρούν σε λιμάνια εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα πρέπει να καλύπτουν τις ενεργειακές απαιτήσεις τους με καύσιμα χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο μετρούμενο σε μονάδες gCO_{2e}/MJ. Το ενεργειακό αποτύπωμα των εν λόγω καυσίμων θα προσδιορίζεται με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής του από την εξαγωγή, τις διαδικασίες παραγωγής, τη μεταφορά και την καύση του, τελικώς, για την πρόωση των πλοίων. Το όριο των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου θα έχει σχετική συνεχή μείωση ανά 5 έτη από το 2025 έως το 2050 και ως έτος βάσης θα τεθεί το έτος του 2020 κατά το οποίο, με βάση δεδομένων που συλλέχθηκαν από το σύστημα EU MRV υπολογίστηκε ίσο με 91.16 gCO_{2e}/MJ. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται αναλυτικά η στρατηγική μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από την Ευρωπαϊκή Ένωση. (ABS, n.d.)

Έτος	Ποσοστιαία μείωση	Ένταση εκπομπών GHG (gCO _{2e} /MJ)
2020	-	91.16
2025	2%	89.34
2030	6%	85.69
2035	14.5%	77.94
2040	31%	62.90
2045	62%	34.64
2050	80%	18.23

Πίνακας 1: Αναμενόμενη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τον κανονισμό FuelEU Maritime (ABS, n.d.)

Τα αέρια του θερμοκηπίου που καλύπτονται από τον εν λόγω κανονισμό είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και το μεθάνιο (CH₄). Καθώς, οι μονάδες μέτρησης της έντασης των εκπομπών είναι σε gCO_{2e}/MJ θα πρέπει να γίνει αναγωγή των παραπάνω αερίων σε CO₂.

Τέλος, το σύστημα FuelEU Maritime θα περιλαμβάνει τις παρακάτω περιπτώσεις: (ClassNK, n.d.)

- Για πλοία που εκτελούν δρομολόγια με εναρκτήριους ή τερματικούς σταθμούς μεταξύ λιμένων εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης και κάποιας τρίτης χώρας θα καλύπτεται το 50 % των εκπομπών των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου
- Για πλοία που εκτελούν δρομολόγια εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα καλύπτεται το 100 % των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου
- Για πλοία που ελλιμενίζονται εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα καλύπτεται το 100 % των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου

1.2.3 Η εισαγωγή εναλλακτικών καυσίμων για την μείωση του αποτυπώματος το άνθρακα της παγκόσμιας ναυτιλίας

Είναι φανερό ότι για να εκπληρωθούν οι στόχοι του οποίους έχει εξαγγείλει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) με το σχετικό ρυθμιστικό πλαίσιο που έχει τεθεί σε ισχύ, το παραδοσιακό καύσιμο Diesel που χρησιμοποιείται κατά κόρον για την πρόωση των εμπορικών κι επιβατηγών πλοίων, θα πρέπει να αντικατασταθεί από ένα ή περισσότερα εναλλακτικά καύσιμα ή πηγές ενέργειας τα οποία, θα αποτελούν λύσεις περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον. Η ναυτιλιακή βιομηχανία κινούμενη προς αυτή την κατεύθυνση έχει εξετάσει διάφορες επιλογές εναλλακτικών μορφών ενέργειας ούτως ώστε, να εισχωρήσει περαιτέρω στον κόσμο της αειφόρου ανάπτυξης. Εκτός των ανωτέρω, έχουν εξεταστεί διάφορες προτάσεις οι οποίες είναι πιθανό να οδηγήσουν στη βελτίωση της αποδοτικότητας των πλοίων. Η τοποθέτηση ιστίων και φωτοβολταϊκών πάνελ στα καταστρώματα εμπορικών πλοίων, το σύστημα αερολίπανσης της γάστρας καθώς και προηγμένα συστήματα ανάκτησης ενέργειας στα μηχανοστάσια των πλοίων είναι κάποιες ιδέες τις οποίες, εάν δεν τίθετο το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής και της δημιουργίας πλοίων που θα χρησιμοποιούν πράσινες τεχνολογίες, ενδεχομένως δε θα γνωρίζαμε σήμερα. Ωστόσο, είναι εμφανές ότι με τις επικρατούσες συνθήκες που έχουν επέλθει λόγω του ζητήματος της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής, έχουν δημιουργηθεί οι προϋποθέσεις ώστε, να τεθούν υπό διαβούλευση και κάποιες αντισυμβατικές προτάσεις. Μεγαλύτερη συζήτηση γίνεται βέβαια για την εισαγωγή εναλλακτικών καυσίμων και τον τρόπο με τον οποίο, αυτά θα καταφέρουν να υποκαταστήσουν το παραδοσιακό Diesel. Συν τοις άλλοις, η απόφαση που πάρθηκε από τον IMO και τέθηκε σε ισχύ το 2020, με σκοπό να περιοριστούν οι εκπομπές των οξειδίων του θείου (SO_x) σε 0.5 % παγκοσμίως και 0.1 % στις περιοχές ECA, έπαιξε καταλυτικό ρόλο στην ενίσχυση αυτών των προτάσεων.



Εικόνα 5: Απεικόνιση ιστιοφόρου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (The Maritime Executive , 2022)



Εικόνα 6: Σύστημα αερολίπανσης της γάστρας σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Marine Insight, 2021)

Εναλλακτικά καύσιμα ή μορφές ενέργειας όπως το φυσικό αέριο (LNG), το υγραέριο (LPG), η μεθανόλη, τα βιοκαύσιμα, το υδρογόνο (H₂), η αμμωνία (NH₃) και ο ηλεκτρισμός έχουν ξεκινήσει ήδη να εισέρχονται στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Μεγάλες εταιρείες που κατασκευάζουν ναυτικούς κινητήρες όπως η MAN Energy Solutions και η Wärtsilä έχουν ήδη προχωρήσει στην παραγωγή και προσφορά διπλού καυσίμου όπου, το diesel παραμένει ως δευτερεύον πιλοτικό καύσιμο και το κύριο καύσιμο είναι κάποιο εκ των LNG, LPG και μεθανόλη. Αναμένεται τεθεί στην αγορά και κινητήρας διπλού καυσίμου που θα καταναλώνει αμμωνία και diesel ως πιλοτικό καύσιμο εντός του 2024. (MAN Energy Solutions, 2023) Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλές προκλήσεις ακόμη οι οποίες, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη προτού γίνει εφικτή η ομαλή μετάβαση σε κάποια εκ των ανωτέρω λύση.

Όσον αφορά τη μεθανόλη ως ναυτιλιακό καύσιμο, παρατηρείται ιδιαίτερη κινητικότητα στην αγορά με την MAN Energy Solutions και την WinGD να έχουν ήδη διαμορφώσει τους κινητήρες ME-LGIM και X-DF-M αντίστοιχα. Τόσο ο IMO όσο και οι νηογνώμονες έχουν ήδη θέσει το νομοθετικό και ρυθμιστικό πλαίσιο υπό το οποίο, θα λειτουργούν πλοία που θα έχουν ως καύσιμο τη μεθανόλη. Ήδη λειτουργούν κάποια πλοία, αν και λίγα στον αριθμό, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν αυτή ως καύσιμο πρόωσης. Πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων της εταιρείας-κολοσσού A.P. Moller – Maersk αναμένεται να παραδοθεί το πρώτο τρίμηνο του 2024 και είναι το πρώτο εκ των 25 πλοίων τα οποία, θα διαθέτουν κινητήρα διπλού καυσίμου ικανό να λειτουργήσει με μεθανόλη ως καύσιμο. Τα 12 πλοία από αυτά τα οποία ακόμη βρίσκονται στο βιβλίο των παραγγελιών, θα μπορούν να μεταφέρουν 16,000 TEUs, 6 από αυτά θα έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς 17,000 TEUs και τα υπόλοιπα 6 μέχρι και 9,000 TEUs. (Maersk, 2023) Μια ακόμη σημαντική στιγμή για το έτος του 2023 σηματοδοτήθηκε με την πρώτη διαδικασία τροφοδότησης μεθανόλης (methanol bunkering) σε πλοίο της ίδιας εταιρείας στο Port Said της Αιγύπτου. (Safety4Sea, 2023)



Εικόνα 7: Το επιβατηγό πλοίο που χρησιμοποιεί μεθανόλη ως καύσιμο, Stena Germanica, με καθαρό βάρος 50,000 DWT (IRENA, 2021)

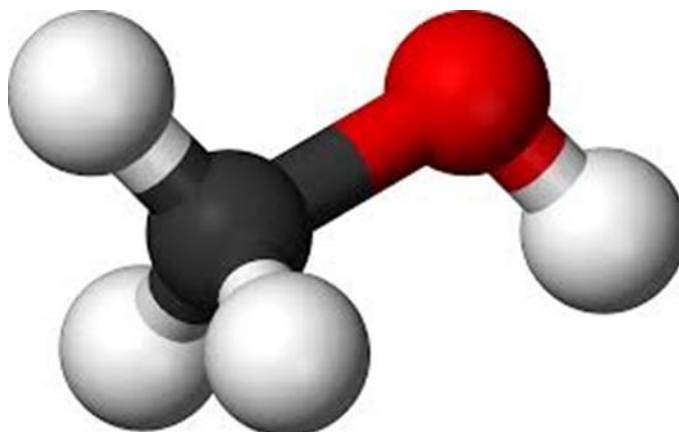


Εικόνα 8: Πλοίο μεταφοράς πετρελαιοειδών που λειτουργεί με μεθανόλη ως καύσιμο (IRENA, 2021)

2 Περιγραφή της μεθανόλης και εισαγωγή στην αγορά μεθανόλης

2.1 Η οργανική ένωση της μεθανόλης: βασικά στοιχεία, μέθοδοι παραγωγής και εφαρμογές

Η μεθυλική αλκοόλη ή αλλιώς μεθανόλη (CH_3OH) είναι μία οργανική ένωση που ανήκει στην κατηγορία των αλκοολών οι οποίες, περιέχουν στο μόριο τους ένα ή περισσότερα υδροξύλια (OH). Αποτελεί την απλούστερη χημική ένωση εκ των αλκοολών και το μόριο της συγκροτείται από 1 άτομο άνθρακα (C), 1 άτομο οξυγόνου (O) και 4 άτομα υδρογόνου (H).



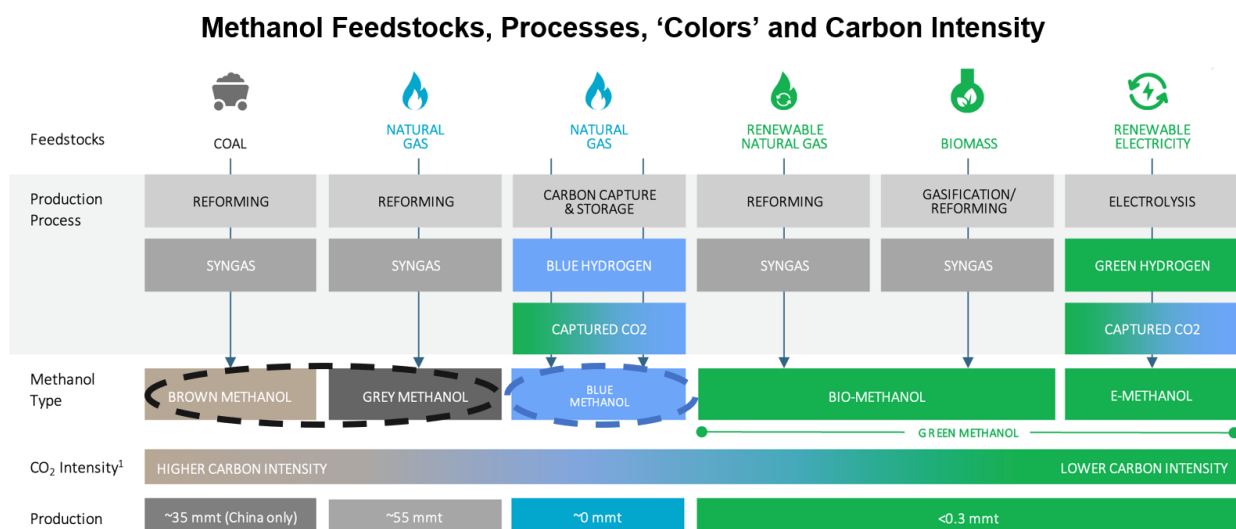
Εικόνα 9: Το μόριο της μεθανόλης (Openclipart, 2015)

Η μεθανόλη είναι μία άχρωμη, πτητική ένωση η οποία, σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου συναντάται σε υγρή μορφή. Έχει σημείο ζέσης στους $64.96\text{ }^\circ\text{C}$, ενώ το σημείο πήξης της είναι στους $-93.9\text{ }^\circ\text{C}$, έχει πυκνότητα 0.791 kg/m^3 στους $20\text{ }^\circ\text{C}$ και μοριακό βάρος 32.04 g/mol . Επιπλέον, μπορεί να αναμιχθεί με το νερό και να λειτουργήσει ως διαλυτική ουσία. Τέλος, έχει τη δυνατότητα να σχηματίζει εκρηκτικές ενώσεις με τον αέρα και η φλόγα που παράγει όταν καίγεται είναι άχρωμη. (Petruzzello, 2023)

Σε παλαιότερες αναφορές ειδικότερα και στη διεθνή βιβλιογραφία, εμφανιζόταν με την συνήθη ονομασία “ξύλοπνευμα” ή “wood alcohol”. Η ονομασία αυτή οφείλεται στη μέθοδο που χρησιμοποιούνταν ιστορικά για την παραγωγή της. Η παρασκευή της μεθανόλης βασιζόταν στην ξηρά απόσταξη (πυρόλυση) των ξύλων, διαδικασία κατά την οποία, μεγάλες ποσότητες ξύλου τοποθετούνταν σε μεταλλικούς αποστακτήρες και στη συνέχεια θερμαίνονταν σε υψηλές θερμοκρασίες και με την αργή καύση τους αποδιδόταν ως παραπροϊόν μεθυλική αλκοόλη σε αέρια μορφή και μαζί με τα υπόλοιπα αέρια που παράγονταν από τη διαδικασία αυτή συμπυκνώνονταν και αποθηκεύονταν σε δεξαμενές όπου, μετά από διαδοχικές κλασματικές αποστάξεις παραγόταν το τελικό προϊόν. (Βαλαβανίδης & Ευσταθίου, 2010) Η διαδικασία αυτή όμως που περιγράφεται καθώς, ήταν ιδιαίτερα ενεργοβόρα και οικονομικά ασύμφορη για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων, σταδιακά αντικαταστάθηκε από νέες πιο προηγμένες μεθόδους παρασκευής μεθανόλης. Τη σημερινή εποχή ορισμένες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της, είναι με τη χρήση συνθετικού αερίου, υδρογόνου και τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα. Επιπρόσθετα, υπάρχει μεγάλη πληθώρα πρώτων υλών οι οποίες, χρησιμοποιούνται για την παρασκευή μεθανόλης, όπως ξύλο, γαιάνθρακας, φυσικό αέριο, υδρογόνο, βιομάζα, κατάλοιπα ζωικής και φυτικής προέλευσης αλλά κι από ηλεκτρική ενέργεια προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές. Παρόλα αυτά, η πλειονότητα της παραγωγής εξακολουθεί να βασίζεται στο φυσικό αέριο εξαιτίας της ευελιξίας, αποδοτικότητας και αξιοπιστίας που χαρακτηρίζει αυτή τη μέθοδο δημιουργίας. (Above-Ground Fuel Systems, 2011)

Ένα διαφορετικό σύστημα κατηγοριοποίησης των μεθόδων παραγωγής της μεθανόλης και του ενεργειακού αποτυπώματος που τις χαρακτηρίζει με σαφή διάκριση ως προς την παραγωγή μέσω ορυκτών καυσίμων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η χρήση χρωμάτων ως κωδική ονομασία. Πιο συγκεκριμένα η διάκριση είναι η εξής: (Wärtsilä, 2023)

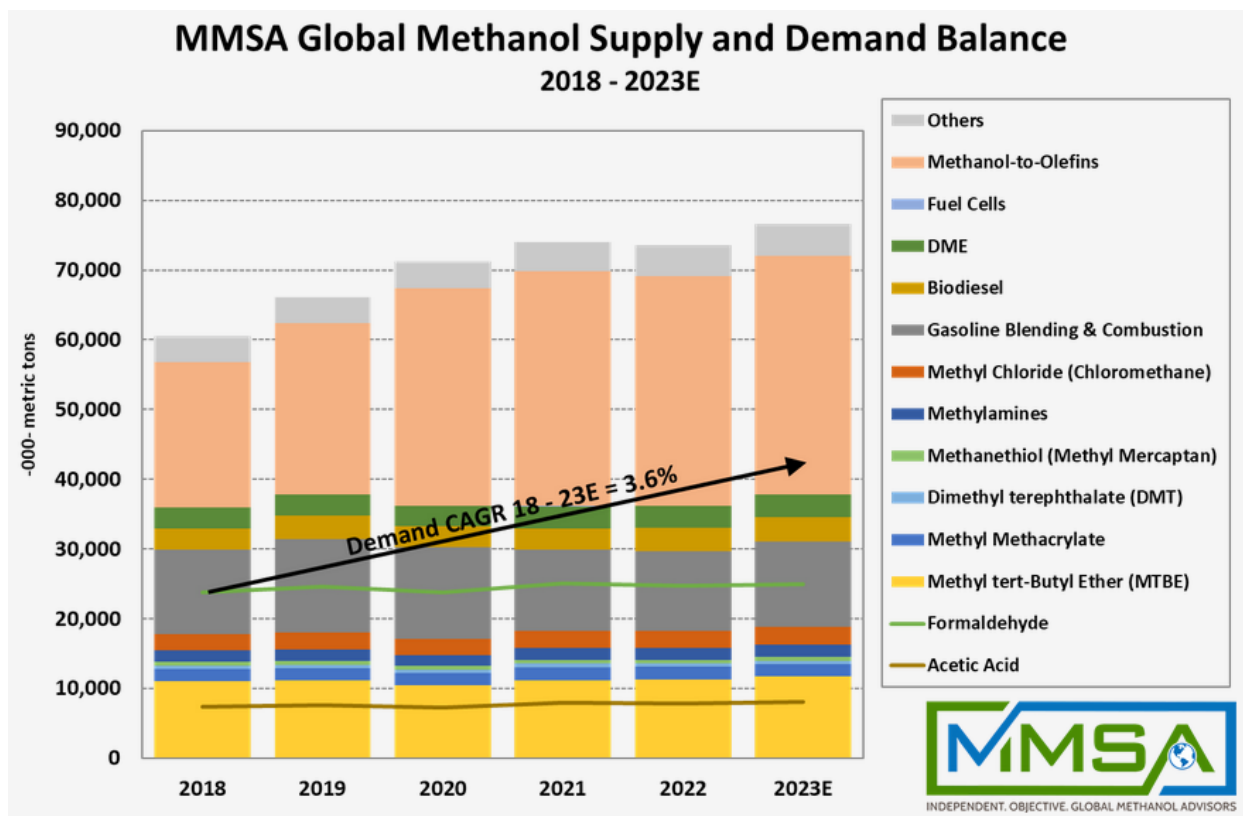
- **Καφέ μεθανόλη** η οποία, σχηματίζεται με πρώτη ύλη τον γαιάνθρακα
- **Γκριζα μεθανόλη** της οποίας, η παραγωγή γίνεται με τη χρήση φυσικού αερίου
- **Γαλάζια μεθανόλη** που παρασκευάζεται με πρώτη ύλη το γαλάζιο υδρογόνο, είτε ως παραπροϊόν της τεχνολογίας δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα
- **Πράσινη μεθανόλη** η οποία, μπορεί να παραχθεί μέσω της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και βιομάζας



Εικόνα 10: Πρώτες ύλες, χρωματικοί κώδικες, ένταση άνθρακα, μέθοδοι και όγκος παραγωγής της μεθανόλης (Carr, 2022)

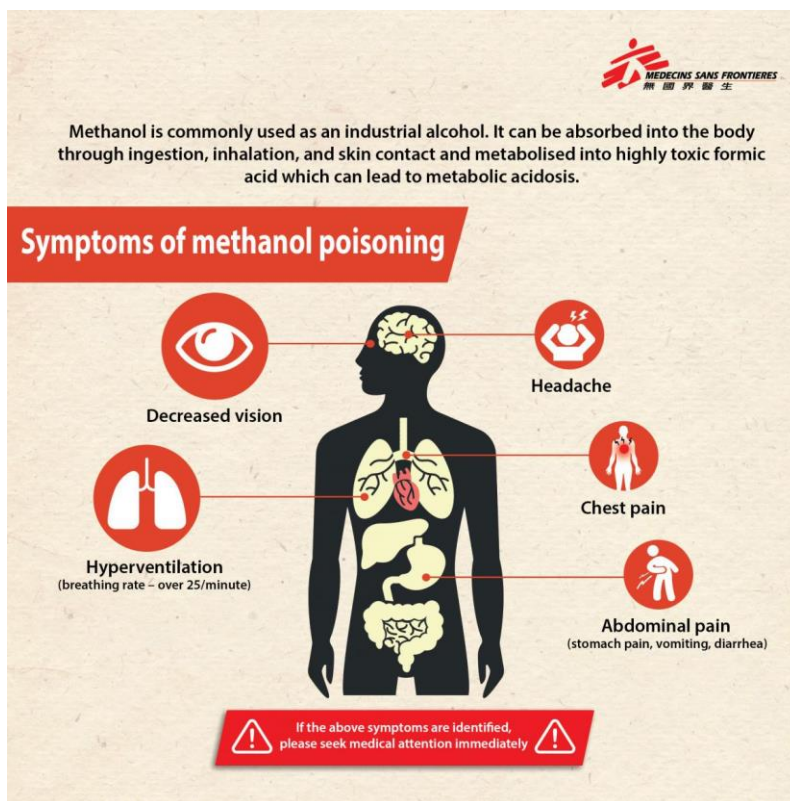
Ο σημαντικός ρόλος της μεθυλικής αλκοόλης στη χημική βιομηχανία, διαφαίνεται από το γεγονός ότι χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παρασκευή χημικών ενώσεων όπως, φορμαλδεΐδης, οξικού οξέος, DME (διμεθυλαιθέρα), και άλλων. Επιπλέον, συναντάται στη βιομηχανία παραγωγής χρωμάτων, ναλικών, ταπήτων κι άλλων καθημερινών προϊόντων. (Methanol Institute, χ.χ.) Το υπόλοιπο ποσοστό της παραγόμενης μεθανόλης χρησιμοποιείται ως καύσιμο για χερσαίες, θαλάσσιες μεταφορές αλλά και σε βιομηχανικό επίπεδο. Επιπλέον, αποτελεί την πρώτη ύλη για την παρασκευή βιοντίζελ, και σαν άλλες εφαρμογές του συγκαταλέγονται η χρήση του ως διαλυτικό χημικών ουσιών, η λειτουργία του σαν αντιπηκτικό σε σωληνώσεις και στο σύστημα ψεκασμού παραθύρων στην αυτοκινητοβιομηχανία αλλά κι ως μετουσιωτική ουσία σε αιθυλικές αλκοόλες στην οποία διαδικασία, οφείλει και το χαρακτηριστικό όνομα που της αποδίδεται ως “μεθυλιωμένο οινόπνευμα” (methylated spirit). (The Chemical Company, n.d.)

Στο Διάγραμμα 2 που ακολουθεί, παρατίθενται λεπτομερή δεδομένα σχετικά με την προσφορά και ζήτηση της μεθανόλης σε μετρικούς τόννους για το χρονικό διάστημα 2018-2023, μεταξύ κάποιων σημαντικών παραγών αυτή ως πρώτη ύλη. Είναι άξιο να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια η παραγωγή και η ζήτηση μεθανόλης έχουν αυξηθεί σε ποσοστό 3.6%.



Διάγραμμα 2: Παγκόσμιο ισοζύγιο προσφοράς και ζήτησης της μεθανόλης (MMSA (Methanol Market services Asia), 2023)

Παρά το γεγονός ότι αποτελεί μία ουσία η οποία έχει ευρείες εφαρμογές, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι, η μεθανόλη είναι ιδιαίτερα τοξική και μπορεί να θέσει σε σημαντικό κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία. Η έκθεση σε αυτή μπορεί να συμβεί από εκούσια είτε ακούσια κατάποση, εισπνοή και με την επαφή στο μάτι. Κάποια αρχικά δυσμενή συμπτώματα που μπορεί να προκαλέσει η εν λόγω δηλητηρίαση είναι ναυτία, εμετός, ζάλη, έντονος στομαχικός πόνος και οπτικές διαταραχές. Σε πολύ σοβαρές καταστάσεις ο μεταβολισμός των παραπροϊόντων της μεθανόλης, δύναται να προκαλέσει μεταβολική οξέωση, νευρολογικές επιπλοκές, τύφλωση και αν η έκθεση είναι σε υπερβολικό βαθμό ακόμη και θάνατο. Τα κύρια αντίδοτα που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις δηλητηρίασης από μεθανόλη, είναι η φομεπιζόλη και η αιθανόλη, με την πρώτη όμως να αποτελεί τον πιο αποτελεσματικό τρόπο αντιμετώπισής της. (Jahan, Mahmood, & Fahim, 2015)



Εικόνα 11: Προκληθέντα συμπτώματα λόγω δηλητηρίασης από μεθανόλη (無國界醫生, 2020)

2.2 Η αγορά της μεθανόλης

Σύμφωνα με μελέτες που έγιναν, η αγορά της μεθανόλης αναμένεται να μεγαλώσει σε σημαντικό επίπεδο μέχρι το 2030. Υπολογίζεται ότι το συνολικό μέγεθος της αγοράς για το έτος 2023 διαμορφώθηκε περίπου στα 30.8 δισεκατομμύρια δολάρια και οι προβλέψεις για την αναμενόμενη συνολική αξία αυτής, να εκτιμούν μία αύξηση που αναμένεται να αγγίξει τα 43.05 δις μέχρι το 2030. Η ραγδαία αυτή ανάπτυξη της αγοράς της μεθανόλης διαφαίνεται από το γεγονός ότι, οι εκτιμήσεις δίνουν σύνθετο ετήσιο ρυθμό αύξησης (CAGR) περί τα 4.9 %. Ο λόγος πίσω από τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων που έγιναν, οφείλεται στο γεγονός ότι καταγράφεται ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση για μεθανόλη από τους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, των κατασκευών και της ναυτιλίας.

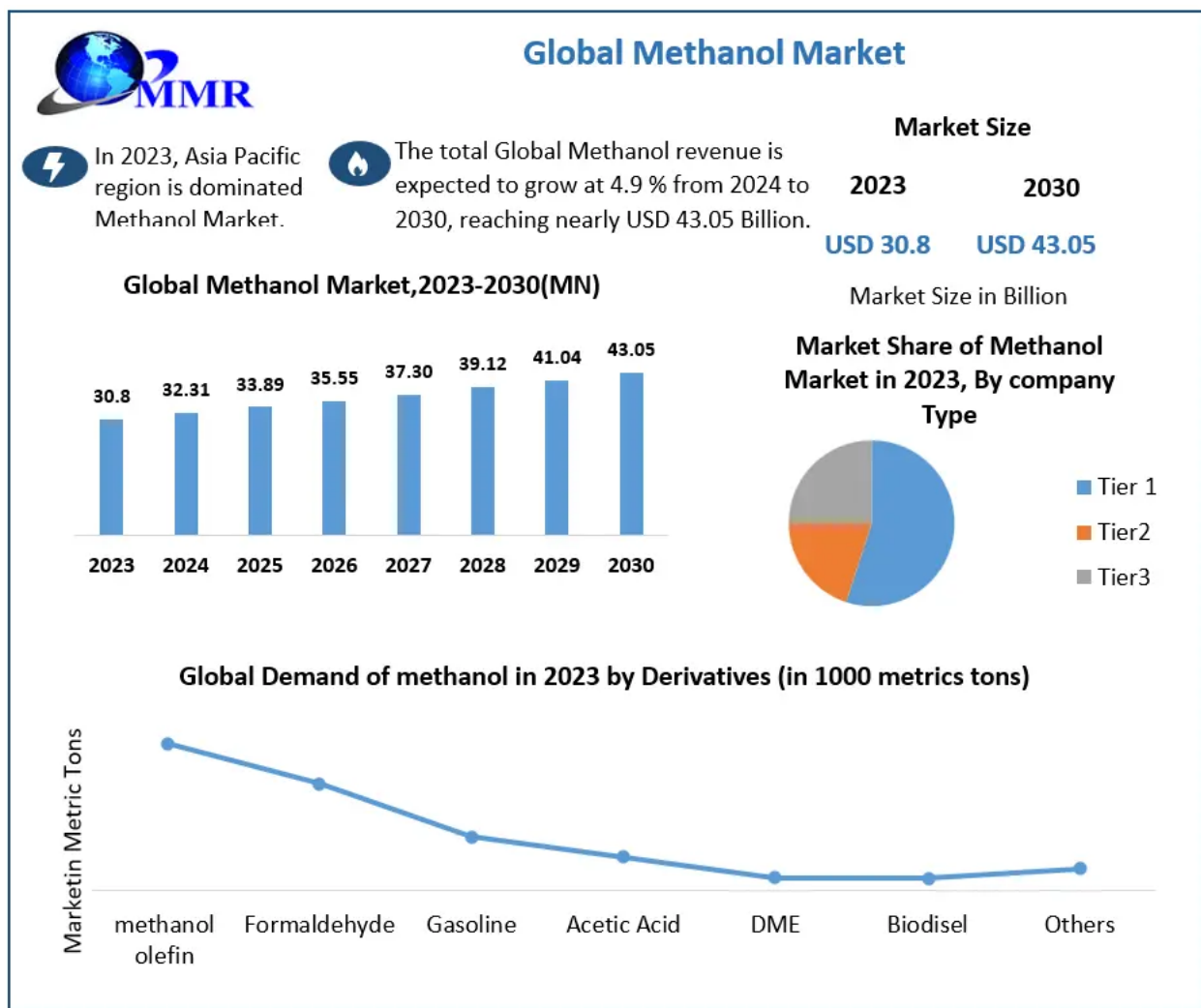
Συγκεκριμένα, στο ναυτιλιακό τομέα παρατηρείται ιδιαίτερη κινητικότητα με την εισαγωγή νέων στόχων που αποσκοπούν στη μείωση του αποτυπώματος του άνθρακα από το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (ΙΜΟ) αλλά, και με την εισαγωγή της ναυτιλίας στο σύστημα εμπορίας ρύπων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Για τους παραπάνω λόγους οι επιχειρηματίες που δραστηριοποιούνται στον κλάδο αναζητούν οικολογικές λύσεις και νέα καύσιμα με χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα, με τη μεθανόλη να αποτελεί μία εκ των επιλογών. Συγκεκριμένα, τόσο η ανάπτυξη της πράσινης μεθανόλης που είναι μία εκ των καθαρότερων λύσεων, όσο και η δημιουργία κινητήρων πλοίων διπλού καυσίμου που θα λειτουργούν με την καύση μεθανόλης και πιλοτικού diesel oil από εταιρείες που κατασκευάζουν μηχανές, έχουν δημιουργήσει το εύφορο κλίμα για την εισαγωγή αυτής στη θαλάσσια βιομηχανία ως κύριο ναυτιλιακό καύσιμο.

Στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, καθώς κι εκεί εντείνονται οι προσπάθειες εισαγωγής αειφόρων λύσεων οι οποίες, θα οδηγήσουν στη δημιουργία αυτοκινήτων που θα εκπέμπουν χαμηλότερα ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα, η μεθανόλη εξετάζεται ως ένα προσωρινό καύσιμο πριν την πλήρη

απανθρακοποίηση των χερσαίων μεταφορών. Βασικά πλεονεκτήματα της μεθανόλης έναντι άλλων καυσίμων για την αντικατάσταση της βενζίνης που χρησιμοποιείται σήμερα, αποτελούν ο υψηλός αριθμός οκτανίων, η καθαρότητα της καύσης της, η δυνατότητά της να αναμιγνύεται με τη βενζίνη για τη βελτίωση της απόδοσης του οχήματος και η μείωση ενός πιθανού ρίσκου βίαιης ανάφλεξης.

Σε βιομηχανικό επίπεδο, η παραγωγή των ολεφινών αναμένεται να παίζει πρωταρχικό ρόλο στην κορύφωση της ζήτησης στην αγορά μεθανόλης, όπως παρουσιάζεται και ανωτέρω στο Διάγραμμα 3. Ο λόγος αυτής της σημαντικής αύξησης που επίκειται, είναι η τεράστια ζήτηση για πλαστικά, πολυαιθυλένιο και πολυπροπυλένιο, είδη τα οποία συναντώνται κυρίως σε καταναλωτικά προϊόντα. Συνεπώς, σημειώνεται αύξηση των σταθμών παραγωγής ολεφινών από μεθανόλη στην Κίνα, συνεισφέροντας στη ραγδαία ανάπτυξη της αγοράς της μεθανόλης στη γεωγραφική ζώνη Ασίας-Ειρηνικού Ωκεανού.

Τέλος, η ολοένα και αυξανόμενη τάση εισαγωγής και χρήσης κυψελών υδρογόνου κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία ως μία φιλική προς το περιβάλλον πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αναμένεται να δώσει ισχυρή ώθηση στην παγκόσμια βιομηχανία και αγορά της μεθανόλης στα έτη που ακολουθούν. (Maximize Market Research, 2023)



Διάγραμμα 3: Η αναμενόμενη άνοδος της παγκόσμιας αγοράς μεθανόλης, η ζήτηση για κάθε παράγωγό της (Maximize Market Research, 2023)

2.2.1 Οι επιπτώσεις του COVID-19 στην αγορά μεθανόλης

Η πανδημία του COVID-19 προκάλεσε μία άνευ προηγουμένου κατάσταση στην παγκόσμια αγορά γενικότερα με δυσμενέστερες συνέπειες σε οικονομίες τόσο σε τοπικό, εθνικό αλλά και παγκόσμιο επίπεδο. Τα lockdown, οι περιορισμοί στις μετακινήσεις και η προσωρινή διακοπή επιχειρήσεων παγκοσμίως έθεσαν ισχυρά εμπόδια τα οποία, επηρέασαν δυσμενώς όλους τους τομείς τις οικονομίας, συμπεριλαμβανομένης της χημικής βιομηχανίας. Η διατάραξη της λειτουργίας των εφοδιαστικών αλυσίδων, το κλείσιμο εργοστασίων παραγωγής, οι καθυστερήσεις σε παραγγελίες προϊόντων είχαν ως αποτέλεσμα πολλές εταιρείες να αντιμετωπίσουν καθίζηση των πωλήσεων και μείωση των εσόδων τους. Ειδικότερα, ο κατασκευαστικός κλάδος και η αυτοκινητοβιομηχανία ήταν οι τομείς που επλήγησαν βαθύτερα εξαιτίας της έλλειψης εργατών, της ανεπάρκειας πρώτων υλών και βιομηχανικού υλικού καθώς, και της χαμηλής ζήτησης από πλευράς καταναλωτών.

Στη γεωγραφική περιοχή Ασίας – Ειρηνικού Ωκεανού, η παραγωγή μεθανόλης διεξαγόταν με χαμηλότερους ρυθμούς καθ' όλη τη διάρκεια της πανδημίας του COVID-19, ενώ, η ύφεση που αντιμετώπισαν οι τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, των μεταφορών και των κατασκευών είχαν ως άμεση συνέπεια την πτώση της ζήτησης μεθανόλης. Η Κίνα έπειτα κι από την εφαρμογή της πολιτικής των μηδενικών κρουσμάτων ως μέσο καταπολέμησης του νέου κορονοϊού και καθώς, η κινεζική αυτοκινητοβιομηχανία κατέχει ένα μεγάλο μερίδιο της αγοράς μεθανόλης, γνώρισε μία προσωρινή αναστολή της ανοδικής τάσης στην εν λόγω αγορά. Ακόμη δυσχερέστερη έγινε η κατάσταση και με την προσωρινή διακοπή του κατασκευαστικού τομέα στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη στις οποίες, η ζήτηση μεθανόλης για τον κατασκευαστικό κλάδο είναι σημαντική. Ωστόσο, η φθορά που προκάλεσε η πανδημία του COVID-19 κατάφερε να ανατραπεί σε πολλές βιομηχανίες έπειτα κι από την άρση των περιορισμών που είχαν τεθεί. Επιπρόσθετα, η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών κι εν μέσω εξαγγελιών από διακρατικούς φορείς που προάγουν τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας, δημιουργούν τις προϋποθέσεις ούτως ώστε, να επεκταθεί η αγορά της μεθανόλης. (The Insight Partners, 2022)

2.2.2 Το μέγεθος της αγοράς μεθανόλης ανά γεωγραφική περιοχή

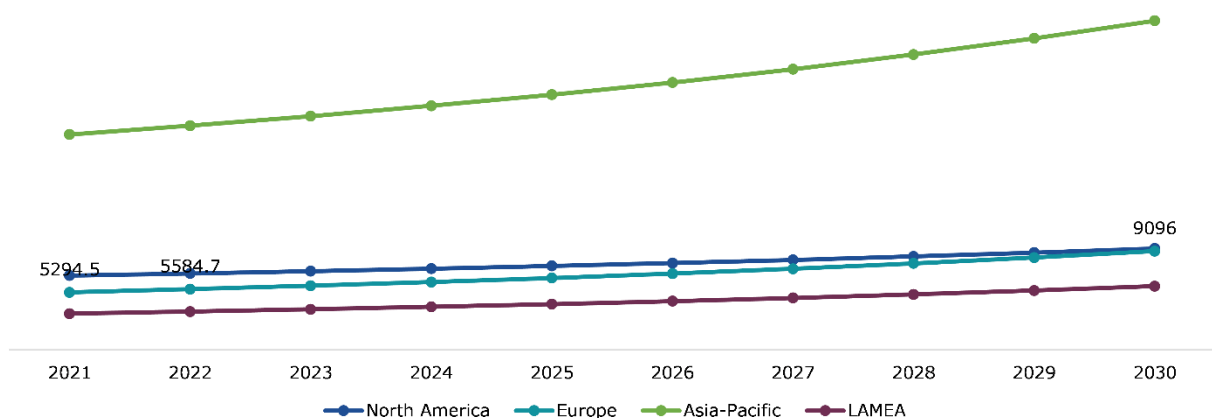
Η γεωγραφική περιοχή Ασίας – Ειρηνικού Ωκεανού κυριαρχεί αυτή τη στιγμή στην παγκόσμια αγορά μεθανόλης κι αναμένεται να διατηρήσει αυτή τη ραγδαία ανάπτυξη και σε βάθος δεκαετίας όπως φαίνεται κι από το Διάγραμμα 4 που ακολουθεί. Συγκεκριμένα, για το έτος 2021 η συνολική αξία της συγκεκριμένης αγοράς στην περιοχή Ασίας – Ειρηνικού Ωκεανού υπολογίστηκε περί τα 19.85 δισεκατομμύρια δολάρια ενώ, θεωρείται ότι θα συνεχίσει να αναπτύσσεται μέχρι και το 2030 με σύνθετο ετήσιο ρυθμό αύξησης (CAGR) περίπου ίσο με 4.9 %. Η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση οφείλεται στο γεγονός ότι, η μεθανόλη αποτελεί ένα εναλλακτικό καύσιμο με μεγάλη προοπτική καθώς, με το χαμηλότερο αποτύπωμά του σε άνθρακα, γίνεται εφικτό να εξασφαλιστούν οι στόχοι για τη συρρίκνωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. (Research Dive, 2022)



Εικόνα 12: Στόλος από ταξί που λειτουργούν με καύσιμο μεθανόλη, στην πόλη Γκουϊγιάνγκ της Κίνας (IRENA, 2021)

Τελευταία, παρατηρείται η ολοένα και αυξανόμενη κινητικότητα στην αγορά μεθανόλης, με την Κίνα και την Ινδία, δύο χώρες που κατέχουν ένα μεγάλο μερίδιο αυτής στη γεωγραφική περιοχή Ασίας – Ειρηνικού Ωκεανού, να στρέφονται στο καύσιμο – μεθανόλη ως μία εναλλακτική αειφόρα λύση. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στις δύο αυτές χώρες, ο συνολικός πληθυσμός ξεπερνά το 1 δισεκατομμύριο ανθρώπους, ο ζυγός ισορροπίας στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας γέρνει ξεκάθαρα προς την περιοχή της Άπω Ανατολής. Στην Κίνα σηματοδοτήθηκε μία νέα περίοδος προς την αειφόρο ανάπτυξη με το άνοιγμα του πρώτου εργοστασίου μετατροπής διοξειδίου του άνθρακα σε μεθανόλη. Αποτελεί την πρώτη εγκατάσταση που χρησιμοποιεί διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο για την παραγωγή μεθανόλης. Επιπλέον, αυτή τη στιγμή στο συγκεκριμένο κράτος λειτουργούν με καύσιμο μεθανόλη περισσότερα από 7 εκατομμύρια αυτοκίνητα, ένα ποσοστό περίπου 5 % από τα συνολικά οχήματα που κινούνται στη χώρα. Το κινεζικό Υπουργείο Βιομηχανίας και Τεχνολογίας Πληροφοριών ανακοίνωσε το σχέδιό του να προωθήσει την τεχνολογία της μεθανόλης στα οχήματα, προκειμένου να αυξηθεί η δημοφιλία της ως εναλλακτικό καύσιμο. Ο λόγος πίσω από αυτή την πρωτοβουλία είναι ότι αυτή παρουσίασε αισθητά χαμηλότερο αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα συγκρινόμενη με τη βενζίνη, κατά το ποσοστό των 26% περίπου ακόμα και σε τεχνικές που η παραγωγή της έχει ως πρώτη ύλη το γαιάνθρακα. Κάποιες από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες οχημάτων της Ιαπωνίας όπως, οι Kawasaki, Honda, Toyota, Yamaha, Nissan, Suzuki, αντιλαμβανόμενες τα οφέλη και την προοπτική που προσφέρει η μεθανόλη σχεδιάζουν να δημιουργήσουν οχήματα που λειτουργούν με αυτή

ούτως ώστε, να επιτευχθούν οι στόχοι μείωσης της εξάρτησης από τα παραδοσιακά καύσιμα έως το 2030. Πρόσφατα, η Σιγκαπούρη η οποία, αποτελεί το κέντρο του εμπορίου της Άπω Ανατολής, άρχισε να λαμβάνει μέρος στις προσπάθειες για τη δημιουργία υποδομών εγκατάστασης, αποθήκευσης και μεταφοράς μεθανόλης που θα χρησιμοποιείται ως ναυτιλιακό καύσιμο. Επιπλέον, αναμένεται να γίνει η πρώτη χώρα στην οποία, θα λειτουργεί εγκατάσταση πράσινης μεθανόλης προς χρήση για τη ναυτιλία. (Global Information, 2023) Το Σεπτέμβριο του 2021 στο Χιντεραμπάντ της Ινδίας λειτούργησε για πρώτη φορά μονάδα μετατροπής άνθρακα υψηλής τέφρας σε μεθανόλη. Αυτή αποτελεί μία προσπάθεια της ινδικής κυβέρνησης να μειώσει τις εισαγωγές και την εξάρτηση από το πετρέλαιο και να στραφεί σε καθαρότερες τεχνολογίες. (Allied Market Research, 2022)

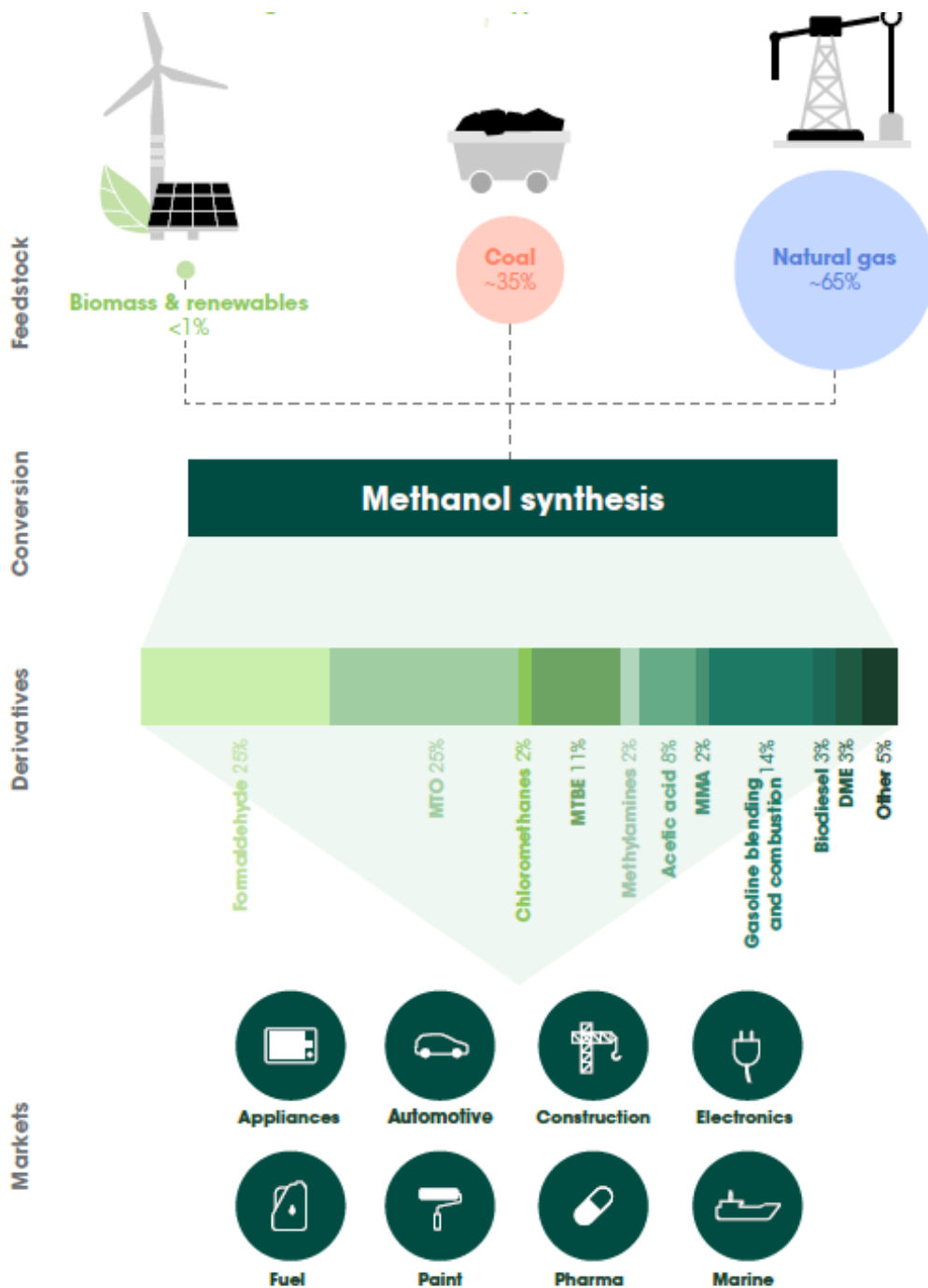


Διάγραμμα 4: Το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς μεθανόλης, ανά γεωγραφική περιοχή, 2021-2030 (Research Dive, 2022)

2.2.3 Το μέγεθος της αγοράς μεθανόλης ανά πρώτη ύλη

Όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 13, ο κυρίαρχος τρόπος παρασκευής μεθανόλης γίνεται με σύνθεση από φυσικό αέριο. Το 2021 συγκεκριμένα, η συνολική παραγωγή μεθανόλης από φυσικό αέριο είχε ένα μερίδιο της τάξης των 14.951 δισεκατομμυρίων δολαρίων, με εκτιμήσεις να αναφέρουν ότι αυτό το ποσό μέχρι το 2030 ενδέχεται να φτάσει μέχρι και τα 23.5 δις δολάρια, με διαμορφούμενο σύνθετο ετήσιο ρυθμό αύξησης (CAGR) περί τα 5.15 %. Η παραγωγή μεθανόλης με τη χρήση φυσικού αερίου είναι μία απλή και αξιόπιστη διαδικασία λόγω της χαμηλότερης αναφλεξιμότητας που προσφέρει αυτό σε σχέση με καύσιμα που βασίζονται στη βενζίνη ενώ, παρουσιάζει χαμηλότερα λειτουργικά κόστη και αποδοτικότητα σε επίπεδα της τάξεως του 50-60 %.

Ο γαιάνθρακας αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη πρώτη ύλη για την παραγωγή μεθανόλης καθώς, αναμένεται μέχρι το 2030 να ευθύνεται για ένα μερίδιο της τάξης των 13.6 δισεκατομμυρίων δολαρίων. Η συνολική αξία της μεθανόλης με πρώτη ύλη παρασκευής το γαιάνθρακα είχε συνολική αξία ίση με 8.021 δις δολάρια το 2021 επομένως, ο σύνθετος ετήσιος ρυθμός αύξησης (CAGR) θα διαμορφωθεί σε ποσοστό 6.04 % περίπου. Η πρόβλεψη για αυτή τη ραγδαία αύξηση οφείλεται στη χαμηλή τιμή σε συνδυασμό με τα πλούσια αποθέματα σε γαιάνθρακα, δύο λόγοι οι οποίοι έχουν προκαλέσει αυξημένη ζήτηση στην αγορά. Το Σεπτέμβριο του 2021, η μεγαλύτερη ινδική εταιρεία παραγωγής εξοπλισμού εργοστασίων ηλεκτρικής ισχύος Bharat Heavy Electricals Limited (BHEL), παρήγαγε επιτυχώς μεθανόλη χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη το γαιάνθρακα. (Research Dive, 2022)



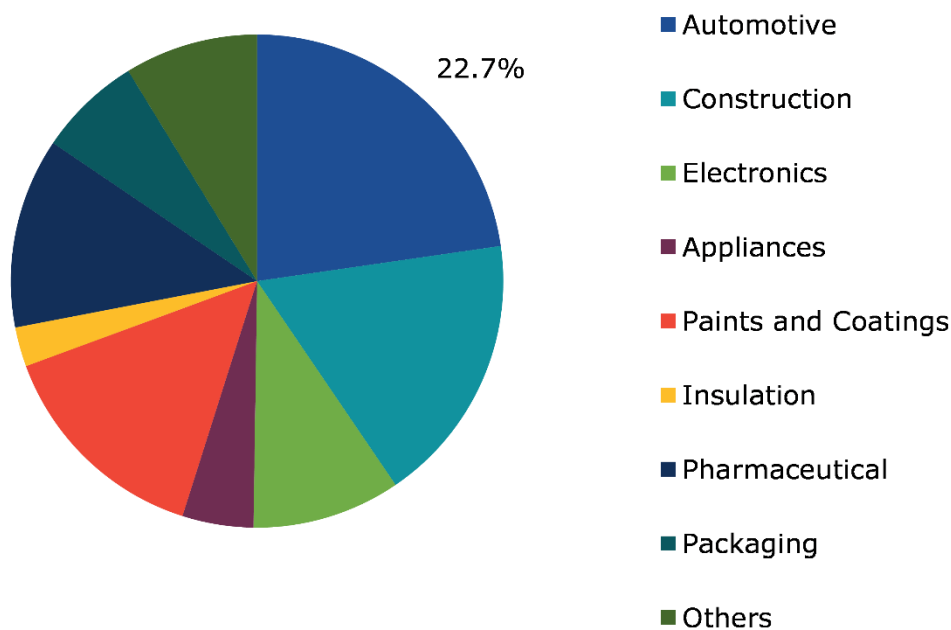
Εικόνα 13: Οι πρώτες ύλες και οι εφαρμογές της μεθανόλης (IRENA, 2021)

2.2.4 Το μέγεθος της αγοράς μεθανόλης ανά βιομηχανία

Στη βιομηχανία, όπως απεικονίζεται και στο Διάγραμμα 5 που ακολουθεί, η αγορά μεθανόλης παρουσιάζει μία ισορροπημένη κατανομή και δεν εμφανίζονται αισθητά μεγάλες διαφορές μεταξύ των τομέων, σχετικά με το μερίδιο που κατέχουν στην παγκόσμια αγορά. Η αυτοκινητοβιομηχανία κυριαρχεί στην αγορά μεθανόλης, κατέχοντας το μεγαλύτερο ποσοστό μεταξύ όλων των τομέων στους οποίους εντοπίζεται αυτή είτε ως καύσιμο κίνησης οχημάτων και μηχανών, είτε ως πρώτη ύλη για την παρασκευή χημικών προϊόντων

ενώ, το μερίδιο της αποτιμούνται σε ποσοστό περίπου ίσο με 22.7 % το 2022. Σημαντικό μέρος της αγοράς κατέχουν και οι βιομηχανίες που σχετίζονται με κατασκευές, χρώματα, φαρμακευτικά και ιατρικά είδη, ηλεκτρονικά και άλλες εφαρμογές.

Η συνολική αξία της αγοράς μεθανόλης που δεσμεύεται στις υπηρεσίες του κλάδου της αυτοκίνησης ανερχόταν στα 8.026 δισεκατομμύρια δολάρια το 2021 και μέχρι το 2030 αναμένεται να αγγίξει τα 11 δις. Τα σαφή πλεονεκτήματα της μεθανόλης ως ένα καύσιμο με υψηλό αριθμό οκτανίων, όπως αναφέρθηκε κι ανωτέρω, προσφέρουν θετικές επιδράσεις στην απόδοση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση των οχημάτων. Επιπλέον, η χρήση της ως καύσιμο αεριοστροβίλων, παράγει κατά 80% χαμηλότερους ρύπους οξειδίων του θείου (NOx) σε σχέση με άλλα καύσιμα. Συνεπώς, η απόδοση της μεθανόλης και η χαμηλή τιμή ανά μονάδα παραγόμενης θερμίδας, αναμένεται να παίξει καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξή της κατά την περίοδο που μελετάται. (Research Dive, 2022)



Διάγραμμα 5: Η παγκόσμια παραγωγή μεθανόλης, ανά βιομηχανία (Research Dive, 2022)

2.3 Η μεθανόλη με βάση τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η αυξανόμενη ανησυχία που έχει προκληθεί λόγω της ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής, σε συνδυασμό με τα μέτρα που λαμβάνονται για τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από διεθνείς οργανισμούς και κρατικούς φορείς, έχει καταστήσει αναγκαία την ανάπτυξη τεχνολογιών φιλικότερων προς το περιβάλλον για τους τομείς της βιομηχανίας και των μεταφορών. Συνεπώς, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τη δημιουργία και παραγωγή ουσιών όπως η μεθανόλη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο ως καύσιμα αλλά κι ως πρώτες ύλες με ευρείες εφαρμογές στο εμπόριο, αποτελούν ένα σημαντικό βήμα για την ενίσχυση της προσπάθειας αποδέσμευσης από τον άνθρακα. Η προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μεθανόλη που παρασκευάζεται από πρώτες ύλες όπως τη βιομάζα, τα αγροτικά και αστικά λύματα, το βιοαέριο (biogas) κι απόβλητα ονομάζεται βιομεθανόλη (biomethanol). Ενώ, η μεθανόλη που προέρχεται από τη δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και πράσινου υδρογόνου σε συνδυασμό με ηλεκτρόλυση ονομάζεται e-methanol. Η βιομεθανόλη και η e-methanol από κοινού

συνιστούν την πράσινη μεθανόλη η οποία, έχει το χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα από οποιαδήποτε άλλο είδος που βασίζεται κυρίως σε ορυκτά καύσιμα. Δεν παρουσιάζει κάποια διαφοροποίηση στις χημικές ιδιότητες από τη μεθανόλη που παρασκευάζεται βάσει των υπόλοιπων μεθόδων παραγωγής, ωστόσο οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου που αναμένεται να αποδώσει καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της είναι αισθητά χαμηλότερες σε σχέση με τις μεθόδους που έχουν ως πρώτη ύλη ορυκτά καύσιμα. Σε εμπορικό επίπεδο, η μαζική παραγωγή πράσινης μεθανόλης δίνει τη δυνατότητα σε τοπικές οικονομίες να ανεξαρτηθούν από εισαγωγές με υψηλό αποτύπωμα άνθρακα. (IRENA, 2021)

3 Πράσινη μεθανόλη

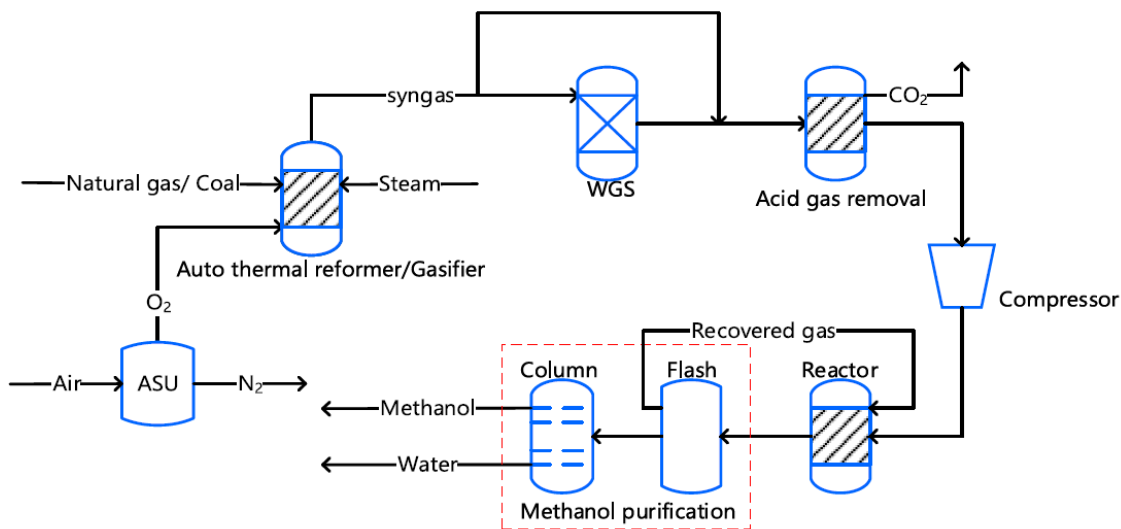
Έχει γίνει σαφές ότι η παρούσα χρονική περίοδος να αποτελεί ένα ενδεχόμενο σημείο καμπής όσον αφορά, την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Η ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων για τη χρήση τους στη ναυτιλιακή βιομηχανία γίνεται με ραγδαίους ρυθμούς. Η μεθανόλη είναι μία από τις προτεινόμενες λύσεις για τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος του τομέα, ιδιαιτέρως όταν ο τρόπος παραγωγής αυτής είναι με περιβαλλοντικά βιώσιμο τρόπο δηλαδή, προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, θα πρέπει να εξεταστεί το γεγονός αν αποτελεί και μία ρεαλιστική επιλογή και οικονομικά βιώσιμη λύση του ζητήματος της μείωσης των εκπεμπόμενων από τη ναυτιλία αερίων του θερμοκηπίου.

3.1 Μέθοδοι παραγωγής

3.1.1 Παραγωγή πράσινης μεθανόλης από βιομάζα

Αρχικά, παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής μεθανόλης από μη ανανεώσιμες πρώτες ύλες όπως το φυσικό αέριο και ο γαιάνθρακας καθώς, σε αυτή τη μέθοδο βασίζεται και η παραγωγή της πράσινης μεθανόλης από βιομάζα.

Στην εικόνα 14 παρουσιάζεται ένα απλό σχεδιάγραμμα της μεθόδου παραγωγής μεθανόλης σε βιομηχανικό επίπεδο. Ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα για την παραγωγή αυτής τα οποία, είναι η παραγωγή συνθετικού αερίου και η προετοιμασία αυτού (SC - Syngas Conditioning) καθώς, και η σύνθεση και ο καθαρισμός του τελικού προϊόντος της μεθανόλης. Σε πρώτο στάδιο, η πρώτη ύλη η οποία χρησιμοποιείται, αεριοποιείται προκειμένου να παραχθεί μείγμα υδρογόνου (H_2), μονοξειδίου (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Ο διαχωριστής του αέρα παράγει καθαρό οξυγόνο το οποίο, εισάγεται στον αεριοποιητή για την καύση μέρους του αερίου ώστε να παραχθεί θερμότητα απαραίτητη για την ενδόθερμη αντίδραση αεριοποίησης. Σε επόμενο στάδιο, μέρος του παραγόμενου συνθετικού αερίου υποβάλλεται σε αντίδραση μετατροπής υδαταερίου (WGS - water-gas shift) προκειμένου να αυξήσει τη συγκέντρωση υδρογόνου και να αναμιχθεί με συνθετικό αέριο το οποίο δεν πέρασε την παραπάνω διαδικασία. Η περισσευούμενη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) αφαιρείται ούτως ώστε να διατηρηθεί ο λόγος $((H_2 - CO_2)/(CO + CO_2))$ περίπου ίσος με 2. Σε τελευταίο στάδιο πραγματοποιείται η σύνθεση και η δύλιση μεθανόλης (MS&P – Methanol Synthesis and Purification). Η σύνθεση μεθανόλης πραγματοποιείται σε πολυβάθμιο αντιδραστήρα, όπου το μη αντιδρών αέριο ανακυκλώνεται στον αντιδραστήρα. Η μεθανόλη που λαμβάνεται από την παραπάνω διαδικασία αρχικώς, διαχωρίζεται από διαφορετικές ουσίες κι έπειτα από την απόσταξη που υφίσταται, το τελικό προϊόν είναι μεθανόλη με μεγάλη καθαρότητα. Για την παραγωγή μεθανόλης με βιώσιμο τρόπο είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί αντί των παραδοσιακών πρώτων υλών του φυσικού αερίου και του γαιάνθρακα η βιομάζα η οποία, έχει ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα και είναι σε μεγάλο βαθμό διαθέσιμη.



Εικόνα 14: Σχεδιάγραμμα συστήματος παραγωγής μεθανόλης από φυσικό αέριο ή γαιάνθρακα (Aziz & Sun, 2021)

Για την βελτιστοποίηση του τρόπου παραγωγής μεθανόλης, έγινε μελέτη για την άμεση αεριοποίηση βιομάζας με τις διαδικασίες καύσης με χημικό βρόχο (B-CLG – biomass direct chemical looping combustion) και παραγωγής υδρογόνου με χημικό βρόχο (B-CLHP – biomass direct chemical looping hydrogen production) που αντικατέστησαν το σύστημα διαχωρισμού του αέρα που περιλαμβάνει η συμβατική μέθοδος. Στα ακόλουθα εδάφια αναλύονται οι εν λόγω τρόποι παραγωγής πράσινης μεθανόλης. (Aziz & Sun, 2021)

3.1.1.1 Παραγωγή μεθανόλης με βάση τη διαδικασία B-CLG

Η βιομάζα υποβάλλεται στις ενδόθερμες αντιδράσεις της πυρόλυσης, αεριοποίησης και μερικής οξείδωσης στον αντιδραστήρα καυσίμου. Η αναγέννηση στο μεταφερόμενο οξυγόνο είναι ισχυρά εξώθερμη αντίδραση και μέρος της θερμότητας προσδίδεται στον αντιδραστήρα καυσίμου (FR – Fuel Reactor) μέσω αυτού του μεταφερόμενου οξυγόνου. Η θερμότητα που προέρχεται από το συνθετικό αέριο (ροή 3) και το πλούσιο σε άζωτο (N₂) αέριο (ροή 32) από τον αντιδραστήρα αέρος (AR – Air Reactor), όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα της Εικόνας 15, ανακτάται μέσω των εναλλακτών θερμότητας HE1 και HE5, αντίστοιχα. Οι αντιδράσεις που γίνονται κατά την καύση με χημικό βρόχο είναι οι ακόλουθες:

Fuel Reactor:

Biomass → Char + Tar + Volatiles (CO, H₂, CH₄, etc.)

$C + H_2O + H + H_2$ και $C + CO_2 \rightarrow 2CO$

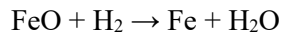
$CO + 3Fe_2O_3 \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2$

$H_2 + 3Fe_2O_3 \rightarrow 2Fe_3O_4 + H_2O$

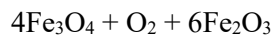
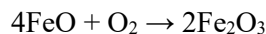
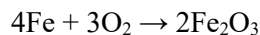
$Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2$

$Fe_3O_4 + H_2 \rightarrow 3FeO + H_2O$

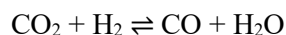
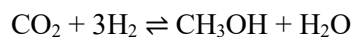
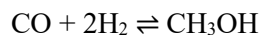
$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$



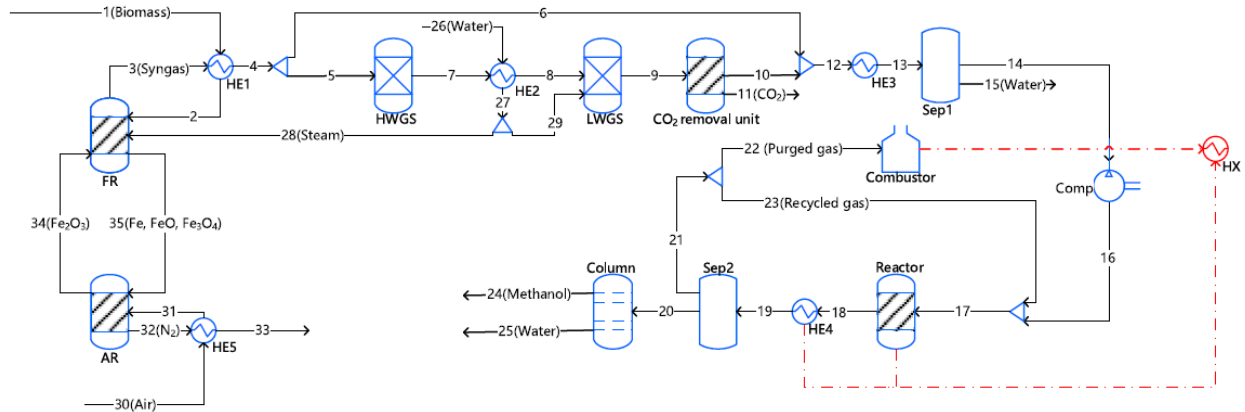
Air Reactor:



Έπειτα, από την προθέρμανση της βιομάζας στον εναλλάκτη θερμότητας HE1, η θερμοκρασία της ροής 3 στην έξοδο του εναλλάκτη μειώνεται στους 250 °C. Το συνθετικό αέριο το οποίο έχει υποστεί μετατροπή, εξέρχεται από τον αντιδραστήρα μετατροπής υδαταερίου μεγάλης θερμοκρασίας (HWGS – high-temperature WGS) (ροή 7) και προσδίδει θερμότητα στο νερό που εισέρχεται στον εναλλάκτη θερμότητας HE2 (ροή 26), με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας της ροής 8 στους 210 °C. Το νερό που εξέρχεται από τον εναλλάκτη HE2 χωρίζεται στη ροή 28 όπου το ζεσταμένο νερό χρησιμοποιείται για τη διαδικασία αεριοποίησης στον αντιδραστήρα καυσίμου και στη ροή 29 που μαζί με το συνθετικό αέριο που έχει υποστεί μετατροπή (ροή 8) εισέρχονται στον αντιδραστήρα μετατροπής υδαταερίου χαμηλής θερμοκρασίας (LWGS – low-temperature WGS), ώστε να αφαιρεθεί η περίσσεια ποσότητας CO₂. Με το πέρας της αντίδρασης υδαταερίου (WGS) δύο βαθμών, το σύνολο του CO έχει μετατραπεί σε CO₂, το οποίο και αφαιρείται όπως σημειώθηκε ανωτέρω. Το πλούσιο σε υδρογόνο (H₂) συνθετικό αέριο (ροή 10) αναμιγνύεται με ποσότητα συνθετικού αερίου που δεν έχει υποστεί την παραπάνω διβάθμια αντίδραση (ροή 6) και η ποιότητα του προκύπτοντος αερίου (ροή 12), καθορίζεται από τον λόγο ((H₂ – CO₂)/(CO+CO₂)), που είναι περίπου ίσος με 2. Η ροή 14 συμπιέζεται στα 80 bar με την επίδραση τριβάθμιου συστήματος συμπιεστών με διπλή ενδιάμεση ψύξη. Το συμπιεσμένο συνθετικό αέριο της ροής 16 έπειτα κι από την ανάμιξη του με ανακυκλωμένο αέριο (ροή 23) κατευθύνεται προς τον αντιδραστήρα σύνθεσης μεθανόλης χωρίς να έχει προηγηθεί προθέρμανση, προκειμένου να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της θερμότητας που εκπέμπεται από την εξώθερμη αντίδραση της σύνθεσης μεθανόλης. Υπό θερμοκρασία και πίεση 250 °C και 80 bar, αντίστοιχα, πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις υδρογονοποίησης του CO και CO₂ και η αντίστροφη αντίδραση υδαταερίου (WGS). Παρακάτω, παρουσιάζονται αναλυτικά οι εν λόγω αντιδράσεις:



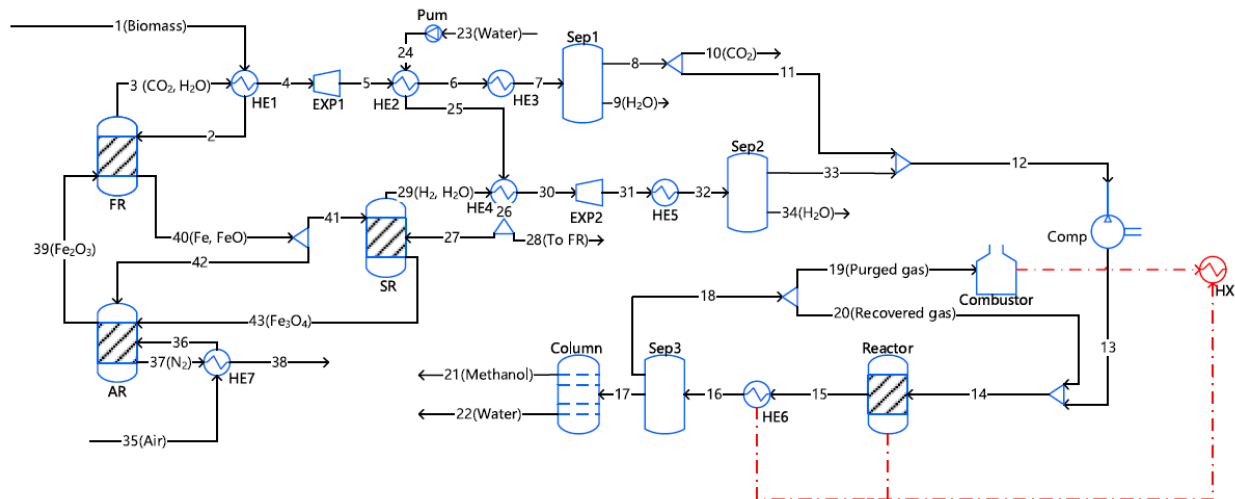
Η παραγόμενη ροή 18 έπειτα από τη διαδικασία της σύνθεσης, αποτελείται κυρίως από μεθανόλη, νερό, αέριο που δεν έχει αντιδράσει και ρύπους. Ψύχεται στους 30 °C στον εναλλάκτη θερμότητας HE4 κι έπειτα εισέρχεται στον διαχωριστή απ' όπου εξέρχονται ακατέργαστη μεθανόλη (ροή 20) και αέριο (ροή 21). Έπειτα, η ακατέργαστη μεθανόλη εκτονώνεται σε πίεση 1 atm και εισέρχεται σε στήλη όπου πραγματοποιείται η απόσταξη της σε καθαρή μεθανόλη (ροή 24) και νερό (ροή 25). (Aziz & Sun, 2021)



Εικόνα 15: Σχεδιάγραμμα συστήματος παραγωγής πράσινης μεθανόλης με βάση τη διαδικασία B-CLG (Aziz & Sun, 2021)

3.1.1.2 Παραγωγή μεθανόλης με βάση τη διαδικασία B-CLHP

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται το απλουστευμένο σχεδιάγραμμα μονάδας παραγωγής μεθανόλης που βασίζεται στη μέθοδο B-CLHP. Στην εν λόγω μέθοδο τα συστήματα του αντιδραστήρα μετατροπής υδαταερίου (WGS) και του διαχωριστή CO₂ που υπάρχουν κατά τη διαδικασία παραγωγής μεθανόλης με βάση τη B-CLHP αφαιρούνται. Οι αντιδράσεις οι οποίες, πραγματοποιούνται στον αντιδραστήρα καυσίμου (FR) είναι η πλήρης οξειδωση της βιομάζας που χρησιμοποιείται σαν καύσιμο και το προϊόν που λαμβάνεται είναι ένα μείγμα CO₂ και ατμού. Μέρος του μείγματος Fe και FeO οξειδώνεται σε Fe₃O₄ από τον αντιδραστήρα ατμού (SR – Steam Reactor) προκειμένου να εκλυθεί αέριο πλούσιο σε H₂ (ροή 29) ενώ, αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται για την παραγωγή αερίου πλούσιου σε N₂ από τον αντιδραστήρα αέρος (AR) (ροή 37). Ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με την εισροή των αερίων των ροών 4 και 30 στους στροβίλους EXP1 και EXP2, αντίστοιχα. Ο εναλλάκτης θερμότητας HE2, ανακτά μέρος της θερμότητας της ροής 5, ενώ η παραγόμενη ροή 25 θερμαίνεται περαιτέρω στον εναλλάκτη HE4 κι έπειτα, διαχωρίζεται στις ροές 27 και 28 που οδηγούνται στους αντιδραστήρες αέρος (AR) και καυσίμου (FR), αντίστοιχα. Στους διαχωριστές 1, 2 αφαιρείται το νερό και λαμβάνονται αντιστοίχως, διυλισμένο CO₂ (ροή 8) και H₂ (ροή 33). Το περισσεύον CO₂ (ροή 10) που αφαιρείται μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς. Το αντιδρόν αέριο συμπιέζεται και οδηγείται στον αντιδραστήρα σύνθεσης μεθανόλης μαζί με το αέριο που ανακτάται. Η διαδικασία σύνθεσης και διύλισης του τελικού προϊόντος της μεθανόλης (MS&P) είναι παρόμοια με αυτή που ακολουθείται κατά τη διαδικασία B-CLG. (Aziz & Sun, 2021)



Εικόνα 16: Σχεδιάγραμμα συστήματος παραγωγής πράσινης μεθανόλης με βάση τη διαδικασία B-CLHP (Aziz & Sun, 2021)

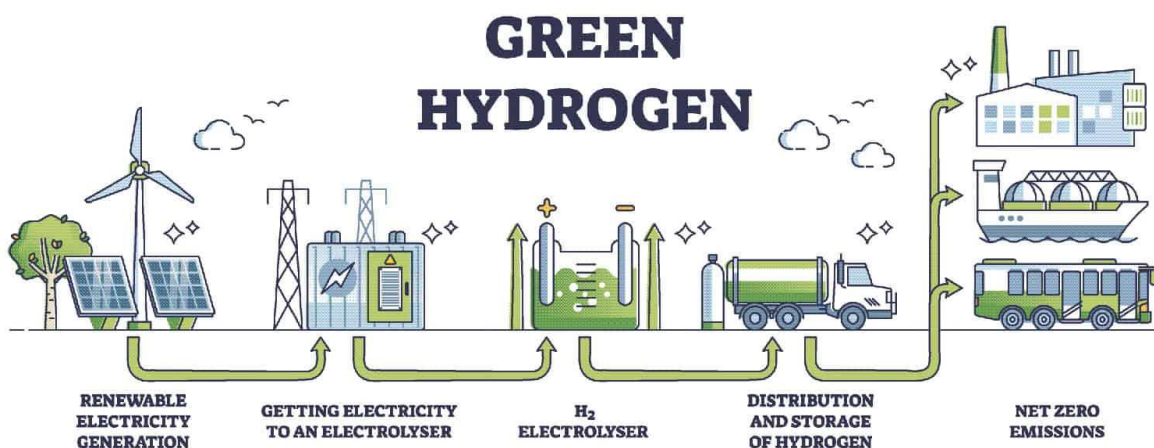
3.1.2 Παραγωγή πράσινης μεθανόλης με την τεχνολογία δέσμευσης άνθρακα και πράσινου υδρογόνου

Προτού γίνει εκτενής μελέτη του συστήματος παραγωγής μεθανόλης με την τεχνολογία δέσμευσης του άνθρακα και πράσινου υδρογόνου θα γίνει προσπάθεια προσέγγισης και αποσαφήνισης των δύο όρων. Θα εστιάσουμε στα οφέλη που προσφέρει η συγκεκριμένη διαδικασία σε σύγκριση με άλλες μεθόδους, λιγότερο βιώσιμες και οικολογικές.

3.1.2.1 Πράσινο υδρογόνο: Ορισμός και μέθοδος παρασκευής

Το υδρογόνο (H_2) αποτελεί το απλούστερο και σε μεγαλύτερη αφθονία, χημικό στοιχείο στη φύση. Είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο, εύφλεκτο και συναντάται σε αέρια μορφή σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Το άτομο του υδρογόνου (H) αποτελείται από ένα ηλεκτρόνιο και τον πυρήνα του ο οποίος διαθέτει ένα μόνο πρωτόνιο, δηλαδή ο ατομικός του αριθμός είναι ίσος με 1 και δύναται να σχηματίσει υπό κανονικές συνθήκες το διατομικό μόριο H_2 . (Jolly, 2024)

Με τον όρο “πράσινο υδρογόνο” κατ’ αντιστοιχία και με την “πράσινη μεθανόλη” εννοείται ότι, ο τρόπος παραγωγής της εν λόγω χημικής ουσίας γίνεται με οικολογικούς τρόπους κι από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συγκεκριμένα, το υδρογόνο που λαμβάνεται με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού (H_2O) με χρήση ηλεκτρισμού παραγόμενου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως, την αιολική, την ηλιακή και την υδροηλεκτρική ενέργεια, καλείται πράσινο υδρογόνο και η παραπάνω μέθοδος χαρακτηρίζεται από μηδενικές εκπομπές άνθρακα. Είναι αντιληπτό δηλαδή, ότι αποτελεί ιδιαίτερα αξιόλογη μέθοδο παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη ότι είναι 100 % βιώσιμη. (Deign, 2020) Ωστόσο, το μεγάλο κόστος, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας και ορισμένα ζητήματα ασφαλείας που σχετίζονται κυρίως με την πτητικότητα και την ευφλεκτότητα της εν λόγω χημικής ουσίας είναι κάποια μειονεκτήματα που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. (Iberdrola, n.d.)

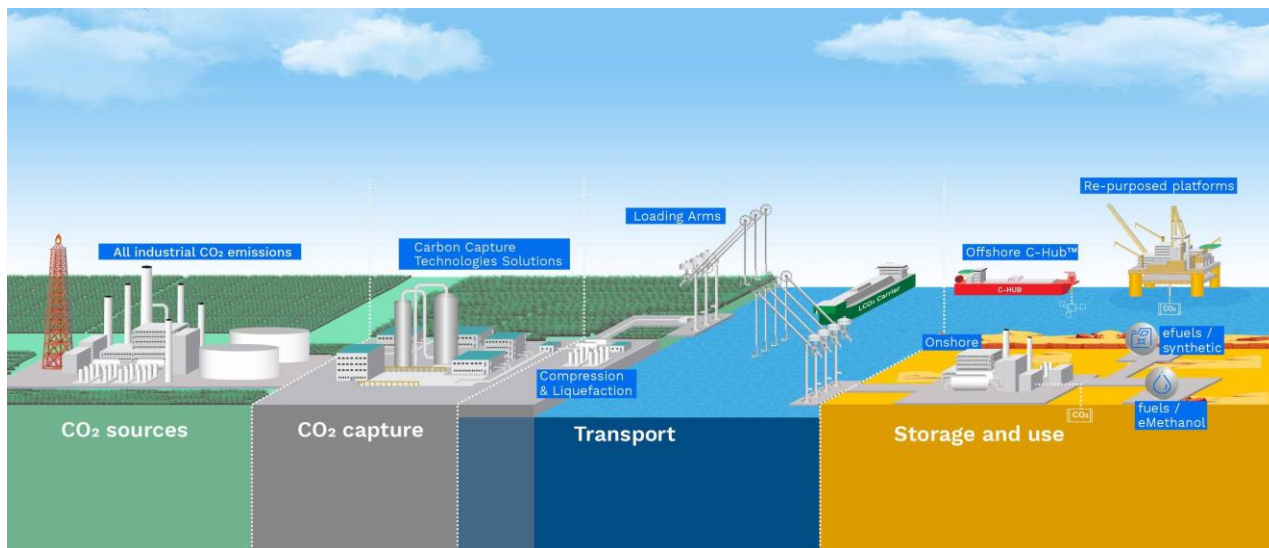


Εικόνα 17: Ο κύκλος της εφοδιαστικής αλυσίδας του πράσινου υδρογόνου (Technetics Group, n.d.)

3.1.2.2 Δέσμευση άνθρακα (Carbon capture)

Ο όρος “δέσμευση άνθρακα” (carbon capture) αναφέρεται στο σύνολο των τεχνολογιών που μπορούν να βοηθήσουν στον περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα από σημεία συγκέντρωσης αυτού όπως, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, διυλιστήρια πετρελαίου, πλοία και διάφορες άλλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις ενώ δύναται να πραγματοποιηθεί και απευθείας δέσμευσή του από την ατμόσφαιρα. (Serin, 2023) Συναντάται στη βιβλιογραφία κι ως δέσμευση, χρήση και αποθήκευση άνθρακα (CCUS – Carbon Capture Utilization Storage).

Αρχικά, γίνεται δέσμευση των εκπομπών CO₂ που παράγονται από την καύση ορυκτών καυσίμων όπως προαναφέρθηκε και ανωτέρω κι έπειτα, είτε μεταφέρονται με τη βοήθεια σωληνώσεων αλλά και δια θαλάσσης σε μέρη, όπου το CO₂ αντλείται στο εσωτερικό της Γης σε σημεία όπου προϋπήρχαν κοιτάσματα υδρογονανθράκων (CCS – Carbon Capture Storage), είτε γίνεται απευθείας χρήση του (CCU - Carbon Capture Utilization). Είναι εμφανή τα οφέλη της παραπάνω τεχνολογίας από την πλευρά της μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα κι ως εκ τούτου, την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα, με την ανάπτυξη της εν λόγω διαδικασίας γίνεται συνεχής έρευνα ούτως ώστε, το παραγόμενο προϊόν της αντίδρασης της καύσης διοξειδίου του άνθρακα, να χρησιμεύσει ως πρώτη ύλη για την παραγωγή υλικών και ουσιών όπως πλαστικά, τσιμέντο, ίνες άνθρακα, μεθανόλης, βιοκαυσίμων, λιπασμάτων και ζωοτροφών. (Herzog, 2023)



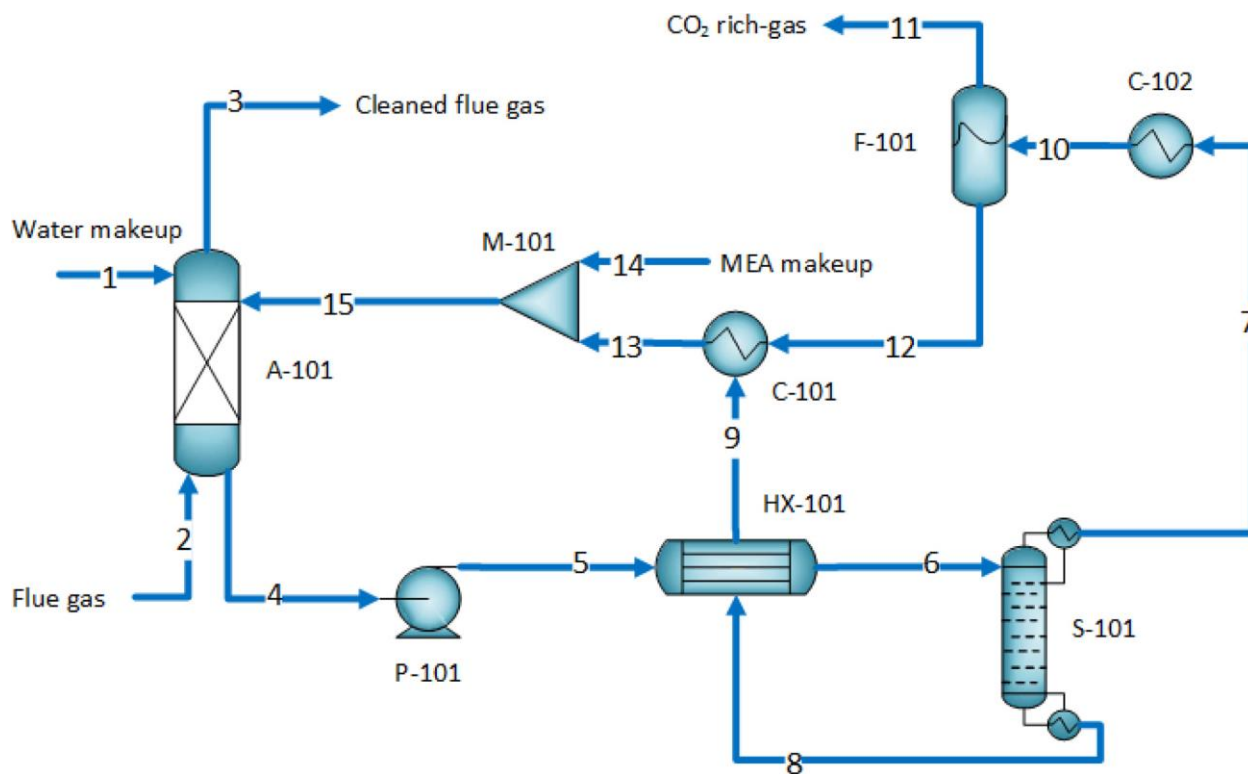
Εικόνα 18: Ο κύκλος της δέσμευσης, μεταφοράς, αποθήκευσης και χρήσης CO₂ (Technip Energies, n.d.)

3.1.2.3 Μεθοδολογία της διαδικασίας παραγωγής

Η παραγωγή πράσινης μεθανόλης μέσω πράσινου υδρογόνου και της τεχνολογίας δέσμευσης άνθρακα είναι μια μέθοδος η οποία, θα πρέπει να σχεδιαστεί και να οργανωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδυάζει τη βιωσιμότητα τόσο από οικονομικής, όσο και από περιβαλλοντικής πλευράς.

Αρχικά, θα πρέπει να τονιστεί ότι, το υδρογόνο που είναι απαραίτητο για τη συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία πρέπει να εξαχθεί μέσω ηλεκτρόλυσης για την οποία, διοχετεύεται ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συνεπώς, εάν χρησιμοποιείται η ηλιακή ενέργεια, καθίσταται προφανές ότι τα φωτοβολταϊκά από όπου θα παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα, θα πρέπει να εγκατασταθούν σε περιοχές με μεγάλη μέση ηλιοφάνεια ανά ημέρα σε ένα χρόνο.

Η δέσμευση CO₂ από τα καυσαέρια μονάδας παραγωγής ενέργειας που λειτουργεί με γαιάνθρακα γίνεται με τη βοήθεια της μονοαιθανολαμίνης (MEA – methanolamine) προκειμένου να ληφθεί αέριο πλούσιο σε CO₂ (ροή 11). Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα ροής της διαδικασίας που ακολουθείται. Όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 19, καυσαέριο εισάγεται στο κάτω μέρος του απορροφητή (A-101) (ροή 2) και νερό εισάγεται στο επάνω (ροή 1) ενώ, ο διαλύτης (ροή 15) εισάγεται σε δεύτερο στάδιο. Η στήλη λειτουργεί σε πίεση 1 bar και διαχωρίζει το καθαρό καυσαέριο (cleaned flue gas) (ροή 3) από το πλούσιο σε CO₂ αέριο (ροή 4) το οποίο, περιέχει νερό και διαλύτη. Έπειτα, η ροή 4 αντλείται στον απογυμνωτή (stripper) (S-101) ούτως, ώστε να γίνει διαχωρισμός του CO₂ από τον διαλύτη και να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία στο σύστημα F-101 απ' όπου λαμβάνεται το τελικά χρησιμοποιούμενο αέριο CO₂. Ο διαλύτης και η μονοαιθανολαμίνη (MEA) στο κάτω μέρος του απογυμνωτή ανακυκλώνεται και οδηγείται στον απορροφητή έπειτα από την συμπλήρωση ποσότητας μονοαιθανολαμίνης (MEA) (ροή 14) και νερού (ροή 1). (Abbas, et al., 2022)

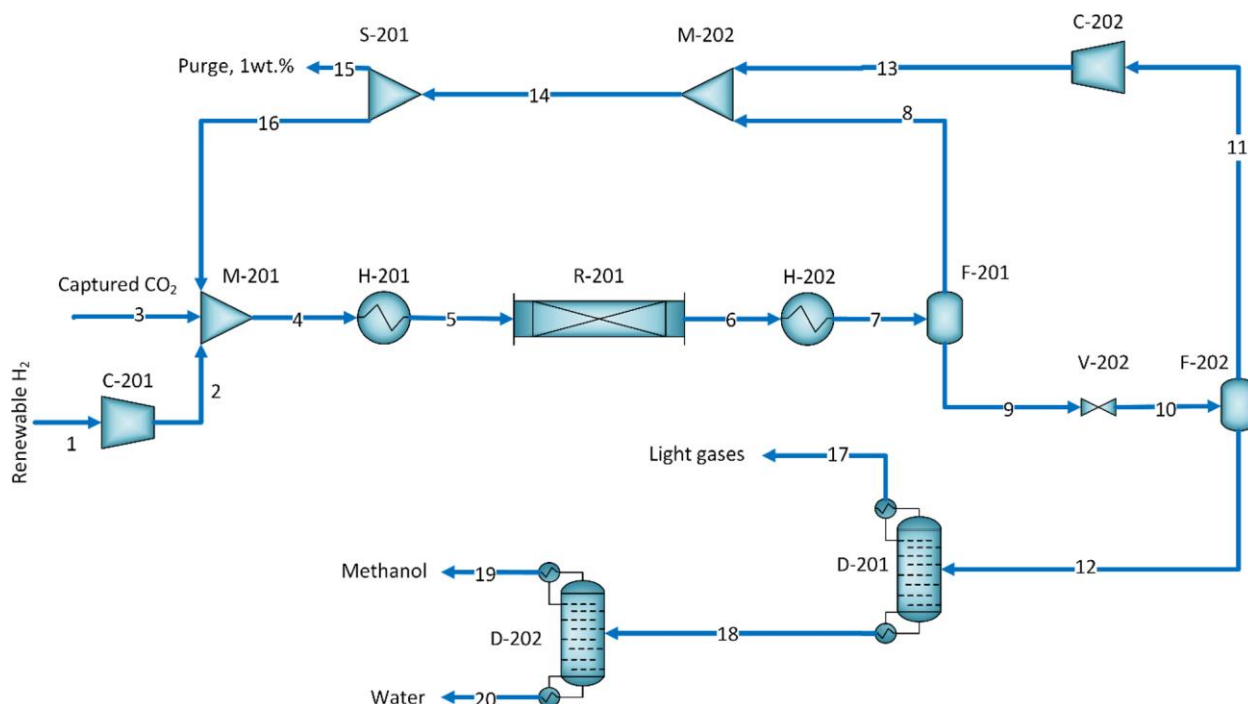


Εικόνα 19: Διαδικασία δέσμευσης CO₂ από τα καυσαέρια μονάδας παραγωγής ενέργειας με καύσιμο το γαιάνθρακα και χρήση μονοαιθανολαμίνης (MEA) (Abbas, et al., 2022)

Στο παρόν εδάφιο, παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις της μεθόδου παραγωγής οι οποίες, είναι η βασική, η ενσωματωμένη και η πλήρως αιεφόρος σχεδίαση. Στη βασική σχεδίαση (base design) που αναλύεται παρακάτω διεξοδικά, η μεθανόλη παράγεται από τη χρήση πράσινου υδρογόνου και δεσμευμένου CO₂ χωρίς θερμική ενσωμάτωση (heat integration), ενώ οι ενεργειακές απαιτήσεις της διαδικασίας καλύπτονται από την αξιοποίηση εφαρμογών που χρησιμοποιούν υδρογονάνθρακες. Η ενσωματωμένη σχεδίαση είναι ανάλογη με την προαναφερθείσα, ωστόσο γίνεται χρήση θερμικής ενσωμάτωσης προκειμένου να μειωθεί η ανάγκη των ενεργειακών απαιτήσεων. Τέλος, στην πλήρως αιεφόρο σχεδίαση, πράσινη μεθανόλη παράγεται με τη χρήση θερμικής ενσωμάτωσης και την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων από την αξιοποίηση εφαρμογών που λειτουργούν από την καύση πράσινου υδρογόνου. Η κατανάλωση υδρογόνου είναι αυξημένη σε αυτή τη σχεδίαση καθώς, δεσμεύεται μέρος αυτού, το οποίο, διαφορετικά θα αξιοποιείτο για την παραγωγή μεθανόλης.

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα ροής της μεθόδου παραγωγής πράσινης μεθανόλης από υδρογόνο και CO₂ σύμφωνα με τη βασική σχεδίαση (basic design). Η διαδικασία ξεκινά με τη συμπίεση πράσινου υδρογόνου (ροή 1) στον συμπιεστή C-201 σε πίεση περίπου ίση με 90 bar κι έπειτα, ακολουθεί η ανάμιξη με καθαρό CO₂ (ροή 3) που λήφθηκε από την μέθοδο που αναλύθηκε ανωτέρω και μία ανακυκλωμένη ροή (ροή 16) στο σύστημα ανάμιξης (M-201). Η θερμοκρασία στην έξοδο της ροής του συστήματος ανάμιξης καθορίζεται στο επίπεδο των 250 °C με την αξιοποίηση του εναλλάκτη θερμότητας H-201 που απεικονίζεται στην εικόνα. Η υδρογονοποίηση του CO₂ γίνεται στον αυλωτό αντιδραστήρα (plug flow reactor) (R-201) στον οποίο, πραγματοποιούνται ορισμένες αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα τη σύνθεση μείγματος μεθανόλης και νερού. Η μετατροπή διοξειδίου του άνθρακα σε μεθανόλη γίνεται με μία σειρά εξώθερμων και θερμοδυναμικά ευνοϊκών αντιδράσεων σε χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Έπειτα από τη σύνθεση της μεθανόλης, τα προϊόντα της αντίδρασης ψύχονται

στον εναλλάκτη θερμότητας H-202 κι έπειτα, οδηγούνται στα περιστροφικά τύμπανα (flash drums) υψηλής και χαμηλής πίεσης F-201 και F-202, αντίστοιχα, προκειμένου να ανακτηθούν πρώτες ύλες που δεν έχουν αντιδράσει. Οι ροές 8 και 11 που εξέρχονται από τα περιστροφικά τύμπανα F-201 και F-202 αναμιγνύονται και ύστερα το 99 % της προκύπτουσας ροής (ροή 16) ανακυκλώνεται ενώ, το υπόλοιπο 1 % (ροή 15) αποβάλλεται. Η ροή 12 που φεύγει από το F-202, οδηγείται για απόσταξη πρώτα στη στήλη D-201 από όπου αποβάλλονται τα ελαφρά αέρια κι έπειτα στη στήλη D-202 που διωλίζεται η μεθανόλη από νερό και άλλες ακαθαρσίες. (Abbas, et al., 2022)



Εικόνα 20: Σχεδιάγραμμα ροής της διαδικασίας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από πράσινο υδρογόνο και δεσμευμένο CO₂ σύμφωνα με τη βασική σχεδίαση (Abbas, et al., 2022)

Στην ανάλυση της ενσωματωμένης σχεδίασης (integrated design) είναι απαραίτητο να μειωθούν οι διαδικασίες και οι απαιτήσεις εφαρμογών ούτως ώστε, να μεγιστοποιηθεί η ενεργειακή απόδοση μίας μονάδας παραγωγής μεθανόλης. Στα διαγράμματα ροής που παρατέθηκαν ανωτέρω είναι δυνατή πληθώρα σχεδιάσεων και χωρικής κατανομής των σωληνώσεων και των εξαρτημάτων που αποτελούν τη διαδικασία παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και CO₂. Ωστόσο, με την εισαγωγή της θερμικής ενσωμάτωσης τίθενται κάποιοι φυσικοί περιορισμοί ως προς τη διάταξη που θα έχουν τα διάφορα υποσυστήματα, ενώ πρακτικές δυσκολίες εμφανίζονται σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται μεταφορά θερμότητας μεταξύ διαφορετικών φάσεων των ουσιών και υλικών. Επιπλέον, θα πρέπει να υπάρξει και συμβιβασμός κόστους-ενεργειακής αποδοτικότητας ως προς την επιλογή του εναλλάκτη θερμότητας για την εν λόγω μέθοδο παραγωγής.

Στην πλήρως αιωφόρο σχεδίαση (100 % renewable design) δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις αυστηρές προδιαγραφές που θέτουν οι απαιτήσεις αυτής της μεθόδου, δηλαδή την παραγωγή της μεθανόλης από πράσινο υδρογόνο και CO₂ με τρόπο οικολογικό και περιβαλλοντικά βιώσιμο. Η εν λόγω διαδικασία διαφοροποιείται από τις προηγούμενες στο γεγονός ότι οι απαραίτητες εφαρμογές για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων της μεθόδου αξιοποιείται μέρος του πράσινου υδρογόνου από το οποίο,

αναμένεται να γίνει η σύνθεση της μεθανόλης. Στις προηγούμενες σχεδιάσεις οι εφαρμογές αυτές καλύπτονταν από διαδικασίες που είχαν χαμηλό μεν, αλλά υπαρκτό αποτύπωμα άνθρακα. (Abbas, et al., 2022)

3.1.3 Παραγωγή πράσινης μεθανόλης με συνδυασμό μεθόδων

Στο παρόν εδάφιο θα γίνει μελέτη του τρόπου παραγωγής πράσινης μεθανόλης με συνδυασμό των τεχνολογιών δέσμευσης CO₂, υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και με τη χρήση βιομάζας που αναλύθηκαν εκτενώς ανωτέρω. Όπως επισημάνθηκε και στο εδάφιο 3.1.1 η παραγωγή μεθανόλης από βιομάζα παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή από υδρογονάνθρακες υψηλού ενεργειακού αποτυπώματος όπως γαιάνθρακα και βαρέως πετρελαίου. Το CO₂ εξάγεται μέσω ενός αεριοποιητή διαμέσου αντιδράσεων ενδόθερμης φύσης κι επιπλέον αυτού, οι πρώτες ύλες οι οποίες χρησιμοποιούνται στην εν λόγω διαδικασία παράγουν συνθετικό αέριο με χαμηλό λόγο H₂/CO, ο οποίος διαμορφώνεται σε έναν αριθμό της τάξης του 2, προκειμένου να παρασκευαστεί μεθανόλη. Για τη διαμόρφωση του λόγου αυτού στο συγκεκριμένο επίπεδο, μέρος του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) του συνθετικού αερίου μετατρέπεται σε H₂ μέσω της αντίδρασης υδαταερίου (WGS – water-gas shift) ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι υπεύθυνη για την εκπομπή CO₂ το οποίο, έπειτα από το διαχωρισμό του απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Γι' αυτό το λόγο η παραγωγή μεθανόλης από βιομάζα παρουσιάζει χαμηλότερη απόδοση.

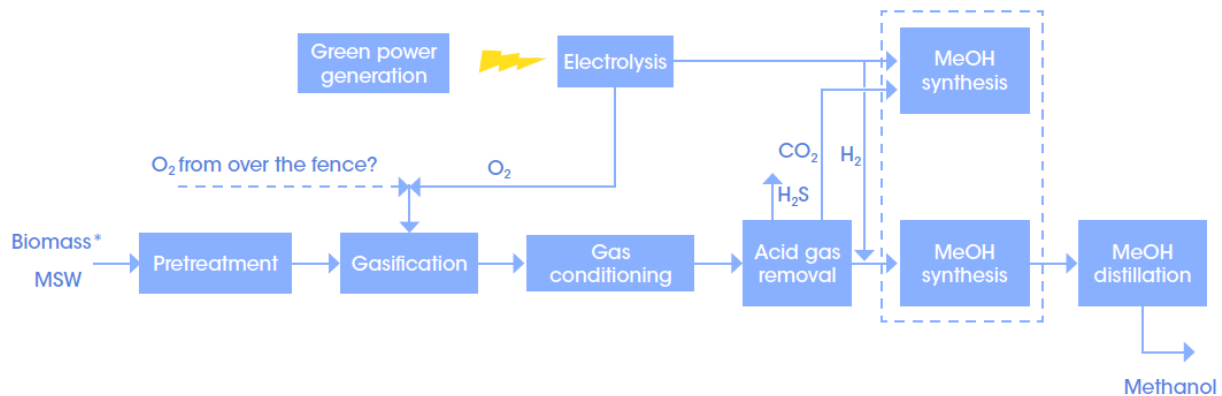
Για την αύξηση της αποδοτικότητας της μεθόδου μία καλή λύση θα ήταν η διοχέτευση του CO₂ που εκπέμπεται προς αντίδραση με υδρογόνο κάτι το οποίο, θα οδηγούσε σε αυξημένη παραγωγικότητα μεθανόλης. Με το συνδυασμό των δύο μεθόδων που αναλύθηκαν στα εδάφια 3.1.1 και 3.1.2 είναι δυνατό να οργανωθεί μία νέα υβριδική διαδικασία στην οποία θα γίνεται πλήρης εκμετάλλευση της βιομάζας, που ως πρώτη ύλη θα εισάγεται στο σύστημα για την παρασκευή μεθανόλης και θα επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση. Η εν λόγω διαδικασία απεικονίζεται σε ποιοτικό σχήμα στην Εικόνα 21 που ακολουθεί. Το υδρογόνο όπως και στην διαδικασία παραγωγής που εξετάστηκε στο εδάφιο 3.1.2 διοχετεύεται στο σύστημα μέσω ηλεκτρόλυσης η οποία, κατέστη δυνατή με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική. Η ελαχιστοποίηση των εκπομπών του CO₂ γίνεται με την έγχυση H₂ προκειμένου, να διαμορφωθεί ο λόγος H₂/CO περίπου ίσος με 2 ώστε, να μην είναι αναγκαία η ύπαρξη αντιδραστήρα υδαταερίου (WGS) και να πραγματοποιηθεί αντίδραση με το εναπομείναν CO₂ για την παραγωγή μεθανόλης. Όπως, παρουσιάζεται και στην Εικόνα 21, αυτή η διαδικασία ακολουθείται σε δύο ξεχωριστές μονάδες σύνθεσης μεθανόλης οι οποίες όμως, από κοινού οδηγούνται για περαιτέρω επεξεργασία και διύλιση σε μία. Η μονάδα διαχωρισμού όξινων αερίων (AGR – acid gas removal) αποβάλλει από το σύστημα ρύπους και θειούχους παράγοντες. Η απουσία ύπαρξης αντιδραστήρα υδαταερίου (WGS) προσδίδει στη μονάδα παραγωγής ορισμένα πλεονεκτήματα με κυριότερα εκ των οποίων να είναι τα ακόλουθα: (IRENA, 2021)

- Χαμηλότερο κόστος επένδυσης λόγω μη ύπαρξης του WGS.
- Απουσία έγχυσης ατμού υψηλής πίεσης στο συνθετικό αέριο για την πραγματοποίηση της αντίδρασης υδαταερίου.
- Μη ύπαρξη απωλειών νερού τροφοδοσίας λέβητα του WGS.
- Μηδενικές απώλειες συνθετικού αερίου όπως, θα γινόταν σε περίπτωση ύπαρξης του WGS.
- Αυξημένη παραγωγικότητα συνθετικού αερίου σε επίπεδα που φτάνουν τα 45-55 %.
- Χαμηλότερα λειτουργικά κόστη για τη μονάδα καθαρισμού αερίου εξαιτίας χαμηλότερου ποσοστού CO₂ για την παραγωγή μεθανόλης.

- Χαμηλότερο σχετικό κόστος επένδυσης για τις μονάδες παραγωγής συνθετικού αερίου και μεθανόλης λόγω οικονομίας κλίμακας.
- Η ύπαρξη διαχωριστή αέρος (ASU – air separation unit) δεν καθίσταται πλέον αναγκαία καθώς, με την παραγωγή καθαρού οξυγόνου από τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης που ακολουθείται δύναται να αντικαταστήσει το οξυγόνο που λαμβάνεται από το συγκεκριμένο σύστημα.
- Το CO₂ προέρχεται με βάση τη βιομάζα ως πρώτη ύλη ενώ, η ποσότητα αυτού είναι εύκολα μετρήσιμη.
- Καθώς, είναι διαθέσιμο ήδη στη μονάδα παραγωγής κι έτοιμο για παραγωγή μεθανόλης με την επίδραση του υδρογόνου.
- Είναι δυνατό να διοχετευθεί και για άλλες χρήσεις σε περίπτωση που υποστεί διαχωρισμό από κάποια μονάδα AGR όπως και στην Εικόνα 21 που παρουσιάζεται.

Σημειώνεται επιπρόσθετα, ότι στην παρούσα διαδικασία η έγχυση H₂ δεν συνοδεύεται από αποτελέσματα που μπορούν να φέρουν κάποιο αρνητικό αντίκτυπο.

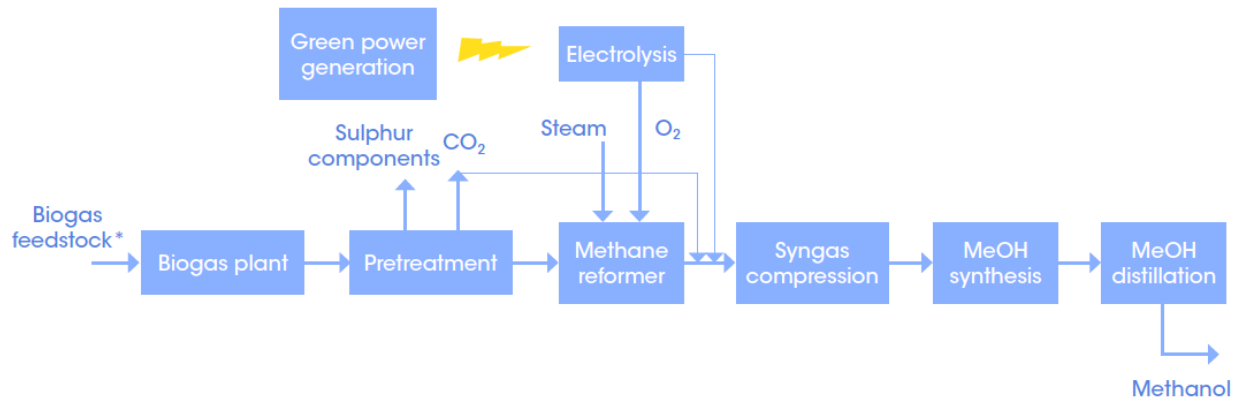
Συνοψίζοντας, ο συνδυασμός των δύο μεθόδων παραγωγής πράσινης μεθανόλης επιτρέπει την μέγιστη εκμετάλλευση του άνθρακα που προέρχεται από τη βιομάζα και η απόδοση της παραγωγής δεδομένης ποσότητας βιομάζας συνολικά, δύναται να φτάσει σε ποσοστά από 60 έως 140 %. Δηλαδή για 1 MWh βιομάζας προστιθέμενη με την απαραίτητη ενέργεια που θα χρειαστεί για την παρασκευή και εκμετάλλευση του H₂, ενδέχεται να ληφθεί ως προϊόν ποσότητα ίση με 1.4 MWh μεθανόλης. (IRENA, 2021)



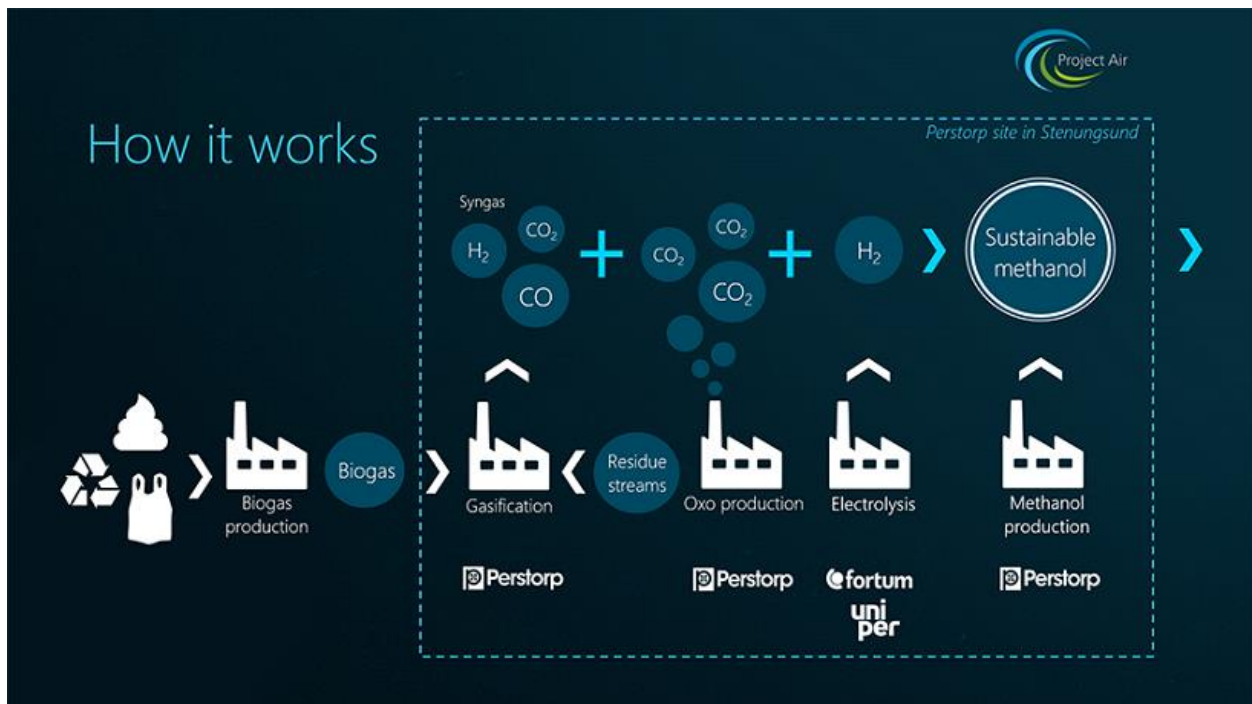
Εικόνα 21: Συνδυασμός μεθόδων παραγωγής πράσινης μεθανόλης με την τεχνολογία δέσμευσης CO₂ και χρήση πράσινου υδρογόνου και βιομάζας ως πρώτες ύλες (IRENA, 2021)

Μία επιπλέον μέθοδος που συνδυάζει τις δύο διαδικασίες παραγωγής της τεχνολογίας δέσμευσης CO₂ με πράσινο υδρογόνο και βιομάζας εμφανίζει ομοιότητες με αυτή που περιγράφηκε ανωτέρω ωστόσο, διαφοροποιείται στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη βιοαέριο. Στο ποιοτικό σχήμα της Εικόνας 22 που παρατίθεται, παρουσιάζεται η μέθοδος εξαγωγής του CO₂ στο στάδιο προεπεξεργασίας (pretreatment) του βιοαερίου. Μπορεί να είναι είτε μέρος των αντιδράσεων στον αναμορφωτή μαζί με ατμό, οξυγόνο και μεθάνιο είτε, να εξαρτάται από την ισορροπία των αερίων στον αναμορφωτή μεθανίου (methane reformer), να τον προσπερνά και να προστίθεται στο σύστημα σε επόμενο στάδιο της διαδικασίας. Για την παρασκευή της βέλτιστης σύστασης του αερίου που προορίζεται για τη δημιουργία μεθανόλης κρίνεται επιτακτική η

ανάγκη εισαγωγής επιπλέον ποσότητας H_2 . Ένας τρόπος που θα οδηγήσει στην επιπλέον μείωση των εκπομπών του CO_2 από τη συγκεκριμένη μέθοδο παραγωγής είναι με τη θέρμανση του αναμορφωτή με τη βοήθεια ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ανανεώσιμες πηγές. Μονάδα παραγωγής μεθανόλης που θα χρησιμοποιεί την εν λόγω τεχνολογία, κατασκευάζεται από την εταιρεία Perstrop στο Stenungsund της Σουηδίας κι αναμένεται να εκκινήσει την παραγωγή μέχρι το 2025. Η ετήσια μείωση των εκπομπών του CO_2 , αναμένεται να φτάσει περίπου τους 500,000 τόνους σε σχέση με άλλες μεθόδους παραγωγής που έχουν αξιοσημείωτο ενεργειακό αποτύπωμα. (Kihlberg, n.d.)



Εικόνα 22: Συνδυασμός μεθόδων παραγωγής πράσινης μεθανόλης με την τεχνολογία δέσμευσης CO_2 και χρήση πράσινου υδρογόνου και βιοαερίου ως πρώτες ύλες (IRENA, 2021)



Εικόνα 23: Διαδικασία παραγωγής πράσινης μεθανόλης από τη μονάδα Project Air της εταιρείας Perstrop (Kihlberg, n.d.)

Συνοψίζοντας, με τη διαδικασία που αναλύθηκε παραπάνω είναι δυνατή η μετατροπή όλης της ποσότητας της πρώτης ύλης σε μεθανόλη κάτι το οποίο, οδηγεί σε ιδιαίτερα αυξημένη αποδοτικότητα όσον αφορά την παραγωγή από δεδομένη ποσότητα βιοαερίου. Ενώ σημειώνεται, ότι η αξιοποίηση βιοαερίου για τον εν λόγω σκοπό, παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση από ότι οι χρήσεις του που είναι ήδη σε εφαρμογή, όπως η παραγωγή θερμότητας κι ενέργειας. (IRENA, 2021)

3.2 Απόδοση των μεθόδων παραγωγής

Στις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής μεθανόλης από γαιάνθρακα και φυσικό αέριο που χρησιμοποιούνται κατά κόρον παρατηρούνται υψηλοί συντελεστές απόδοσης της τάξεως του 50 – 60 % και 70 %, αντίστοιχα. (IRENA, 2021) Καθώς, οι μονάδες παραγωγής μεθανόλης βασιζόμενες σε τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οικολογικών καυσίμων οι οποίες βρίσκονται σε λειτουργία είναι ελάχιστες, τα αποτελέσματα που λαμβάνονται βασίζονται κυρίως σε επιστημονικές μελέτες.

Στο παρόν εδάφιο, θα γίνει ανάλυση των ενεργειακών αποδόσεων των διαδικασιών παραγωγής πράσινης μεθανόλης με πρώτη ύλη τη βιομάζα και με την τεχνολογία δέσμευσης CO₂ και την επίδραση H₂, παραγόμενου με οικολογικά βιώσιμες μεθόδους. Έπειτα, θα ακολουθήσει σύγκριση των εν λόγω αποτελεσμάτων.

3.2.1 Απόδοση μεθόδου παραγωγής πράσινης μεθανόλης από βιομάζα

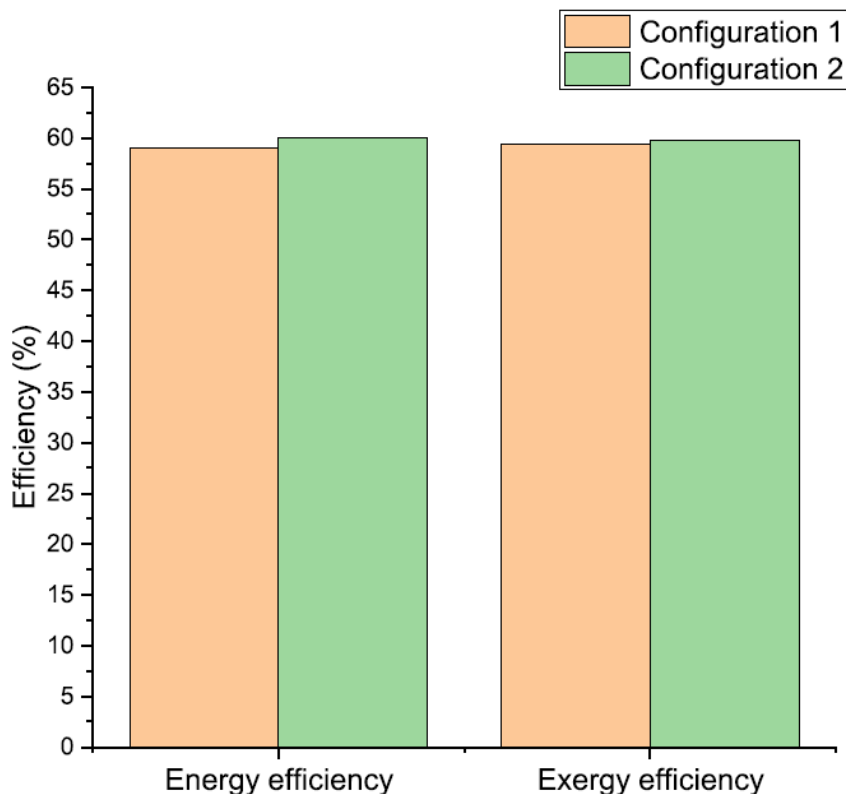
Η παρασκευή μεθανόλης με χρήση βιομάζας ως πρώτη ύλη καθορίζεται πλήρως σύμφωνα με τις διατάξεις B-CLG και B-CLHP που παρουσιάζονται στις εικόνες 15 και 16. Σύμφωνα με τους (Aziz & Sun, 2021), ο προσδιορισμός του ενεργειακού κι εξεργειακού συντελεστή βάσει των οποίων αξιολογούνται θερμοδυναμικά οι δύο διατάξεις γίνεται κατ' αντιστοιχία, ως ακολούθως:

$$\eta_{th} = \frac{\sum W_{exp} + m_{pro}LHV_{pro} - W_{com}}{m_{bio}LHV_{bio} + W_{ext}}$$

$$\eta_{ex} = \frac{\sum W_{exp} + m_{pro}\beta_{pro}LHV_{pro} - W_{com}}{m_{bio}\beta_{bio}LHV_{bio} + W_{ext}}$$

Στις παραπάνω σχέσεις οι εκφράσεις W_{exp} , W_{com} , W_{ext} αποτελούν τα έργα κατ' αντιστοιχία, που παράγονται από τους στροβίλους (Εικόνα 15, καταναλώνονται από τους συμπιεστές και του ηλεκτρικού ρεύματος που προσδίδεται. Επιπλέον, τα m_{bio} , m_{pro} ορίζουν το ρυθμό ροής της μάζας της βιομάζας και της μεθανόλης αντίστοιχα ενώ, τα LHV_{bio} , LHV_{pro} εκφράζουν την ελάχιστη θερμογόνο ισχύ αυτών.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω συντελεστών όπως υπολογίζονται από τους (Aziz & Sun, 2021) για τη διάταξη B-CLG είναι $\eta_{th} = 59\%$ και $\eta_{ex} = 59.38\%$ και για τη B-CLHP $\eta_{th} = 60.08\%$, $\eta_{ex} = 59.79\%$, όπου παρουσιάζονται ως Configuration 1 και 2 στο Διάγραμμα 6, αντίστοιχα. Παρατηρείται λοιπόν, ότι η παραγωγή μεθανόλης από βιομάζα σύμφωνα με τη διάταξη B-CLHP είναι περισσότερο αποδοτική με χαμηλή ωστόσο απόκλιση. Παρ' όλα αυτά, οι δύο διαδικασίες είναι ενεργειακά ισοδύναμες καθώς, με την B-CLG το τελικό αποτέλεσμα λαμβάνει υπόψη αποκλειστικά το έργο το οποίο, καταναλώνεται για την σύνθεση μεθανόλης ενώ, με τη B-CLHP λαμβάνεται και υπόψη το έργο που παράγεται από τους στροβίλους και προορίζεται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα 6: Συγκριτικό διάγραμμα των ενεργειακών κι εξεργειακών αποδόσεων της μεθόδου παραγωγής μεθανόλης από βιομάζα με βάση τις διατάξεις B-CLG και B-CLHP (Aziz & Sun, 2021)

Με τα παραπάνω στοιχεία συμφωνεί και η μελέτη του (IRENA, 2021) από την οποία, προέκυψαν οι βαθμοί απόδοσης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 για τα βήματα της διαδικασίας που ακολουθείται για την παραγωγή πράσινης μεθανόλης.

Διαδικασία	Ενεργειακός βαθμός απόδοσης
Αεριοποίηση πρώτης ύλης	0.7 - 0.8
WGS	0.95 - 0.97
Σύνθεση μεθανόλης	0.79 - 0.8
Σύνολο	0.53 - 0.62

Πίνακας 2: Ενεργειακοί βαθμοί απόδοσης της διαδικασίας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από βιομάζα (IRENA, 2021)

Ο βαθμός απόδοσης της διαδικασίας αεριοποίησης της πρώτης ύλης παρουσιάζει μεγάλο εύρος καθώς, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά αυτής όπως, η θερμοκρασία αεριοποίησης, τα επίπεδα της υγρασίας που επικρατεί και των αδρανών αερίων που υπάρχουν. Ενώ, για την αντίδραση υδαταερίου (WGS) σημαντικό ρόλο παίζει ο λόγος H_2/CO όπως, επισημάνθηκε και σε προηγούμενο εδάφιο. Ο συνολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης όλων των βημάτων της διαδικασίας παραγωγής πράσινης μεθανόλης προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των βαθμών απόδοσης των επιμέρους αυτών βημάτων.

Συμπεραίνοντας, προκύπτει ότι κι από τις δύο μελέτες ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μεθόδου παραγωγής πράσινης μεθανόλης από βιομάζα αποδίδει διαμορφώνεται σε ένα ποσοστό περίπου ίσο με 60 %.

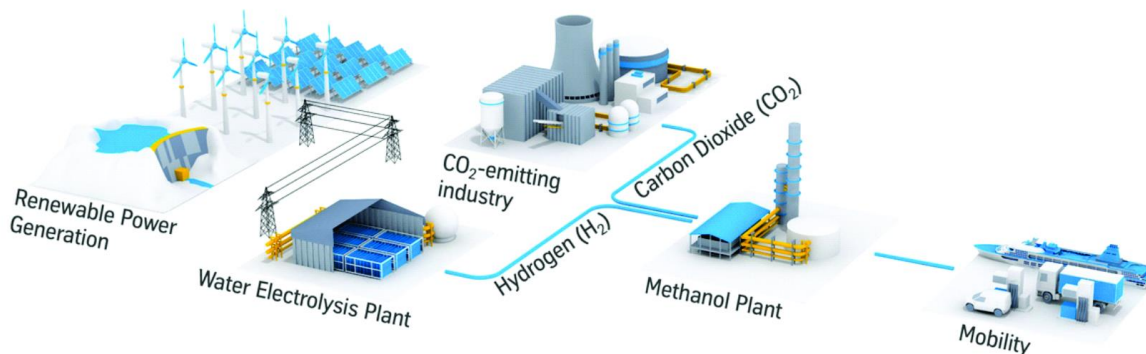
3.2.2 Απόδοση μεθόδου παραγωγής πράσινης μεθανόλης από πράσινο υδρογόνο και την τεχνολογία δέσμευσης άνθρακα

Η συγκεκριμένη διαδικασία παραγωγής πράσινης μεθανόλης μπορεί να εξεταστεί σε 3 επιμέρους βήματα, την ηλεκτρόλυση και παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τη δέσμευση CO₂ είτε κατευθείαν από την ατμόσφαιρα, είτε από την καύση υδρογονανθράκων και τη σύνθεση του τελικού προϊόντος.

Η ηλεκτρόλυση του νερού ως τεχνολογία είναι διαθέσιμη, ευρέως διαδεδομένη και σχετικά απλή. Οι ενεργειακές αποδόσεις που παρουσιάζει είναι μεταξύ 75 – 85 % για αλκαλική και ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM electrolysis – Proton Exchange Membrane electrolysis). (IRENA, 2018) Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι ηλεκτρολύτες τύπου PEM αν και είναι περισσότερο αποδοτικοί σε σχέση, με τους αντίστοιχους αλκαλικούς απαιτούν μεγαλύτερο αρχικό κεφάλαιο κτήσης. Επιπλέον, η παράμετρος που επηρεάζει το βαθμό ενεργειακής απόδοσης σημαντικά είναι και η μέθοδος με την οποία παράγεται ηλεκτρική ενέργεια απαραίτητη για τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης.

Ο διαχωρισμός και η δέσμευση CO₂ από τα καυσαέρια μπορεί να γίνει από πληθώρα τεχνικών με παράγοντες που επηρεάζονται κυρίως από την πίεση, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του CO₂. Οι τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα από βιομηχανικές διεργασίες είναι γνωστές και διαθέσιμες όμως, απαιτούνται ειδικές μελέτες για τον τομέα παραγωγής ενέργειας όπου υπάρχουν διατάξεις πολύ μεγάλης ισχύος. Ενώ, σημειώνεται ότι οι παραπάνω πηγές ενέργειας δεν είναι ανανεώσιμες και υπάρχει αισθητό αποτύπωμα άνθρακα καθώς, βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Αντίθετα, οι τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα από την ατμόσφαιρα (DAC – direct air capture) προσφέρουν το βασικό πλεονέκτημα της συνεχούς λειτουργίας καθώς, ο αέρας αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή CO₂ κι ως εκ τούτου δεν υπάρχουν γεωγραφικοί περιορισμοί ως προς τη λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας. Συνεπώς, η δέσμευση άνθρακα κατευθείαν από τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι μία μέθοδος πολλά υποσχόμενη και με υψηλές προοπτικές.

Η σύνθεση της μεθανόλης όπως, αναλύθηκε και σε προηγούμενο εδάφιο προκύπτει σε μονάδα όπου πραγματοποιείται αντίδραση H₂ και CO₂. Αυτή η αντίδραση είναι εξώθερμη, δηλαδή απελευθερώνει θερμότητα η οποία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διύλιση του τελικού προϊόντος. Στη συγκεκριμένη μέθοδο το βήμα της αεριοποίησης το οποίο, είναι υπεύθυνο για υψηλές απώλειες ενέργειας έχει αφαιρεθεί σε σύγκριση με τη μέθοδο παραγωγής μεθανόλης από βιομάζα. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μεθόδου παραγωγής μεθανόλης από πράσινο υδρογόνο και CO₂ κυμαίνεται σε ένα εύρος περίπου ίσο με 50 – 60 % κι αυτό καθώς, υπάρχουν μεγάλες απώλειες ενέργειας στην παραγωγή υδρογόνου από τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης του νερού. (IRENA, 2021) Σύμφωνα με την εκτενή μελέτη που έγινε από τους (Bos, Kersten, & Brilman, 2020) όπου, η ηλεκτρόλυση που γίνεται για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου απαιτούμενου για τη διαδικασία, καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από ανεμογεννήτριες και εμφανίζει συνολικό ποσοστό ενεργειακής απόδοσης 51 %.

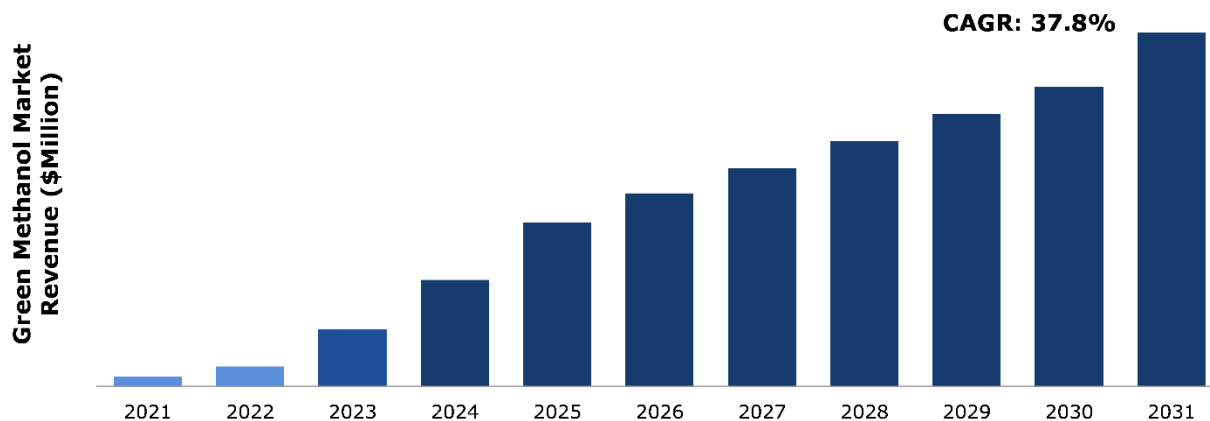


Εικόνα 24: Σκίτσο μονάδας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από H_2 και CO_2 (SADC Mining & Construction News, 2023)

3.3 Η αγορά της πράσινης μεθανόλης

Από μελέτες που διεξήχθησαν η αγορά της πράσινης μεθανόλης εμφανίζει πολύ μεγάλη προοπτική και αναμένεται να αυξηθεί δραματικά μέσα στα επόμενα χρόνια. Οι ευρείες εφαρμογές που έχει αυτή και η ανάγκη για τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος τόσο στο κομμάτι της παραγωγής της μεθανόλης, όσο και στο κομμάτι των εφαρμογών της, είτε αυτή χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παρασκευή χημικών ουσιών και εμπορικών προϊόντων, είτε ως καύσιμο στους τομείς της βιομηχανίας, των χερσαίων και των θαλασσίων μεταφορών, έχουν δράσει καταλυτικά στην ταχύτατη ανάπτυξη της. Καθώς, παρουσιάζει σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα αλλά και τη μεθανόλη η οποία, παράγεται από αυτά, την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική ως λύση που θα μπορούσε να αντικαταστήσει τα υπάρχοντα καύσιμα που έχουν αρνητικό αντίκτυπο όσον αφορά τη διόγκωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ωστόσο, παράγοντες όπως το υψηλό κόστος που απαιτείται για την επένδυση κεφαλαίων, ούτως ώστε να δημιουργηθούν υποδομές στις οποίες, θα είναι δυνατό να παράγεται υπό ευρεία κλίμακα και να διατίθεται στους διάφορους τομείς του εμπορίου ως μία οικονομικά αποδεκτή λύση θέτουν ακόμη σημαντικά εμπόδια. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό, ότι θα πρέπει να δοθούν τα κίνητρα από κυβερνήσεις και διακρατικούς οργανισμούς που θα οδηγήσουν στην πραγματοποίηση τέτοιων επενδύσεων. (Business Research Insights, 2024)

Το 2021 το συνολικό μέγεθος της αγοράς της πράσινης μεθανόλης υπολογίζεται ότι ήταν στο επίπεδο των 349 εκατομμυρίων δολαρίων, με μελέτες να δείχνουν πως η αξία αυτή αναμένεται να αγγίξει τα 12,480 εκατομμύρια δολάρια μέχρι το έτος του 2031. Εμφανίζεται δηλαδή μία εξωπραγματική τιμή του σύνθετου ετήσιου ρυθμού αύξησης (CAGR) περίπου ίση με 37.8 %. (Research Dive, 2023)



Διάγραμμα 7: Το μέγεθος της αγοράς πράσινης μεθανόλης σε διάστημα των ετών 2021-2031 (Research Dive, 2023)

Αναφορικά, με τις γεωγραφικές περιοχές στις οποίες γίνεται η κατανομή της αγοράς πράσινης μεθανόλης, φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς κατέχει η περιοχή Ασίας – Ειρηνικού Ωκεανού καθώς, σε αυτή υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συμπεριλαμβανομένης της βιομάζας που προσφέρουν τη δυνατότητα παραγωγής μεθανόλης με περιβαλλοντικά βιώσιμους τρόπους όπως, αυτοί που αναλύθηκαν στο εδάφιο 3.1. Επιπλέον, στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή ανήκουν κράτη με ταχύτατα αναπτυσσόμενες οικονομίες που επενδύουν μεγάλα κεφάλαια στην εκβιομηχάνιση και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών όπως η Κίνα, η Ινδία και η Ιαπωνία. Οι αυξημένες ανάγκες σε οικολογικά βιώσιμες λύσεις και η στήριξη που παρέχουν οι κυβερνήσεις των εν λόγω κρατών με τη διαμόρφωση νομοθετικού ρυθμιστικού πλαισίου που δημιουργεί κίνητρα σε επιχειρήσεις προς επένδυση κεφαλαίων για τέτοιους σκοπούς, έχει οδηγήσει στην ταχύτατη ανάπτυξη της αγοράς πράσινης μεθανόλης στη γεωγραφική περιοχή Ασίας – Ειρηνικού Ωκεανού.

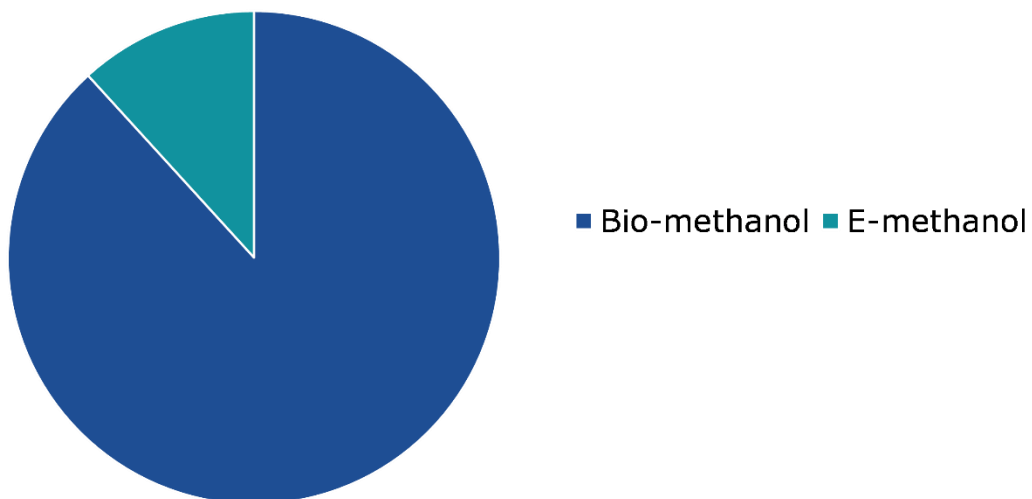
3.3.1 Το μέγεθος της αγοράς πράσινης μεθανόλης ανά τύπο και πρώτη ύλη

Γίνεται διαχωρισμός του τρόπου παραγωγής της πράσινης μεθανόλης ανά τύπο, δηλαδή σύμφωνα με τη μέθοδο την οποία αυτή παράγεται. Χωρίζεται σε βιο-μεθανόλη (bio-methanol) και e-μεθανόλη (e-methanol) οι οποίες, παράγονται από βιομάζα ή αστικά λύματα και υδρογόνο παραγόμενο με τη βοήθεια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με δεσμευμένο από την ατμόσφαιρα, διοξείδιο του άνθρακα, αντίστοιχα. Όπως παρουσιάζεται και στο Διάγραμμα 8, η μέθοδος παραγωγής που κυριαρχούσε το 2021 ήταν η πρώτη, με τη δεύτερη ωστόσο να παρουσιάζει τη γρηγορότερη ανάπτυξη μέσα στο διάστημα των ετών 2021-2031.

Η βιο-μεθανόλη θεωρείται οικολογικό καύσιμο καθώς, έχει αισθητά χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα σε σχέση με τη μεθανόλη που συντίθεται με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής, που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο ή τον γαιάνθρακα. Στόχος αποτελεί η αντικατάσταση της μεθανόλης που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα στην πλειονότητα των εφαρμογών της, ως καύσιμο μεταφορών αλλά και στους τομείς της παραγωγής ενέργειας και χημικών.

Από την άλλη πλευρά ο τύπος της e-μεθανόλης όπως, αναφέρθηκε κι ανωτέρω αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη μέθοδο παραγωγής. Η άνοδος αυτή οφείλεται στην αυξανόμενη ζήτησή της ως καύσιμο στους τομείς των μεταφορών και ιδιαίτερα στη ναυτιλία προκειμένου να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος. Αυτή μέθοδος παραγωγής θεωρείται ότι έχει ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα καθώς, οι εκπομπές που παρουσιάζει κατά την παραγωγή πράσινης μεθανόλης είναι ίσες με αυτές που χρησιμοποιεί κατά τη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα. Επομένως, αποτελεί μία εναλλακτική λύση

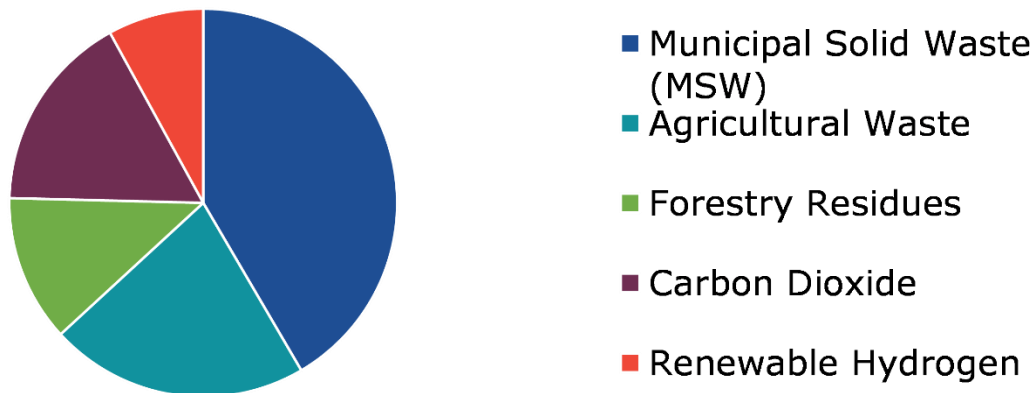
με προοπτική να αντικαταστήσει την ήδη χρησιμοποιούμενη βενζίνη και diesel, που συμβάλλουν δραματικά στη διόγκωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής, κατά συνέπεια.



Διάγραμμα 8: Η αγορά πράσινης μεθανόλης, ανά τύπο για το έτος 2021 (Research Dive, 2023)

Στο Διάγραμμα 9 γίνεται ένας επιπλέον διαχωρισμός για τη μελέτη της αγοράς της πράσινης μεθανόλης με βάση τις πρώτες ύλες. Όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, σημαντικό μερίδιο στην παραγωγή πράσινης μεθανόλης κατέχουν τα αστικά και γεωργικά λύματα, τα δασικά υπολείμματα, το διοξείδιο του άνθρακα και το πράσινο υδρογόνο. Από αυτά, οι τρεις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την εν λόγω διαδικασία παραγωγής εμπίπτουν στην κατηγορία της βιο-μεθανόλης και οι υπόλοιπες σε αυτή της e-μεθανόλης. Συνεπώς, παρά το γεγονός ότι τα αστικά λύματα οφείλονταν κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στην παραγωγή πράσινης μεθανόλης, το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί την πρώτη ύλη που παρουσιάζει την ταχύτερη ανάπτυξη.

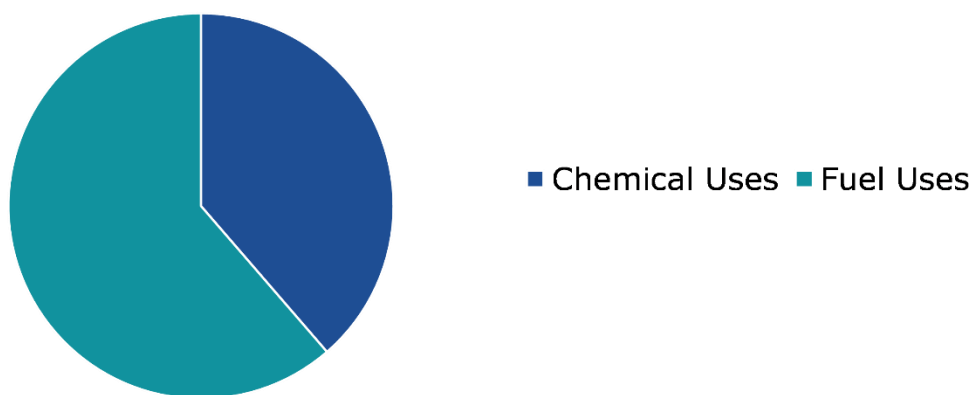
Η παραγωγή πράσινης μεθανόλης με χρήση βιομάζας και αστικών λυμάτων κυριάρχησαν στο έτος του 2021 λόγω της απλής εφοδιαστικής αλυσίδας που τα χαρακτηρίζει, με την ύπαρξη άφθονων πόρων σε περιοχές όπου γίνεται η σύνθεση της μεθανόλης. Ομοίως, προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα από πλευράς οικονομικού οφέλους. Παράλληλα, η ταχεία ανάπτυξη του διοξειδίου του άνθρακα ως πρώτη ύλη για τη συγκεκριμένη διαδικασία είναι δυνατό να δώσει ώθηση στην κυκλική οικονομία με ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα μειώνοντας με αυτό τρόπο καθοριστικά τις εκπομπές στην ατμόσφαιρα. (Research Dive, 2023)



Διάγραμμα 9: Η αγορά πράσινης μεθανόλης ανά πρώτη ύλη, για το έτος 2021 (Research Dive, 2023)

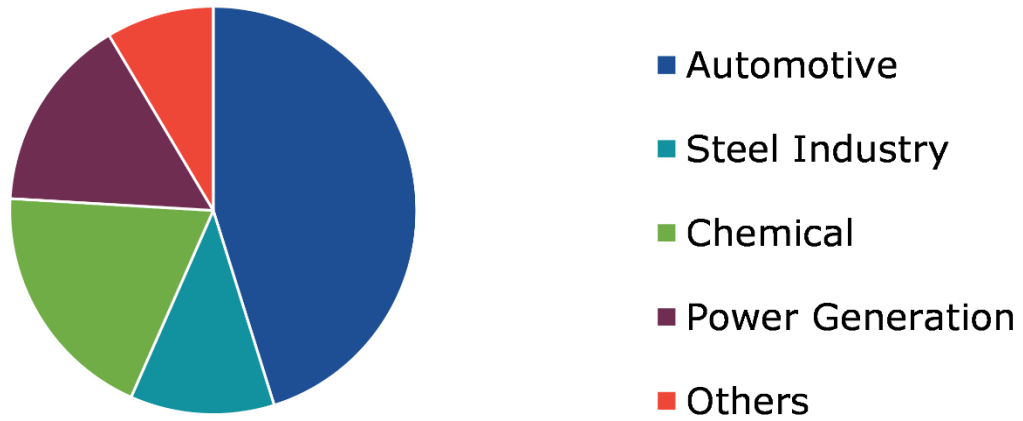
3.3.2 Το μέγεθος της αγοράς πράσινης μεθανόλης ανά εφαρμογή και βιομηχανία

Όσον αφορά τις εφαρμογές της πράσινης μεθανόλης, αυτές μπορούν να διαχωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τη μεθανόλη που αξιοποιείται για την παρασκευή χημικών ουσιών και αυτή που χρησιμοποιείται ως καύσιμο κίνησης ή παραγωγής ενέργειας. Από το Διάγραμμα 10 που παρατίθεται παρακάτω, φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος της πράσινης μεθανόλης το έτος 2021 προορίζονταν για την παρασκευή χημικών ουσιών όπως, πλαστικά, χρώματα κι άλλα παράγωγα.



Διάγραμμα 10: Η αγορά πράσινης μεθανόλης ανά εφαρμογή, για το έτος 2021 (Research Dive, 2023)

Επιπρόσθετα, οι τομείς στους οποίους διαμοιράζεται το μερίδιο της αγοράς πράσινης μεθανόλης είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, η βιομηχανία παραγωγής χάλυβα, χημικών και ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη κυριάρχησε το 2021 όπως, παρουσιάζεται και στο Διάγραμμα 11 εξαιτίας της δυνατότητας που παρέχει αυτή ως καύσιμο για την τροφοδότηση μηχανών εσωτερικής καύσης και κυψελών υδρογόνου. (Research Dive, 2023) Ωστόσο, η ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί έναν τομέα στον οποίο, η πράσινη μεθανόλη καθίσταται ιδιαίτερα ελκυστική έπειτα κι από την εισαγωγή νέων νομοθεσιών που θεσμοθετούν την ανάγκη μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Συνεπώς, αναμένεται να γνωρίσει ταχύτατη ανάπτυξη στο εγγύς μέλλον. (EIN Presswire, 2018)



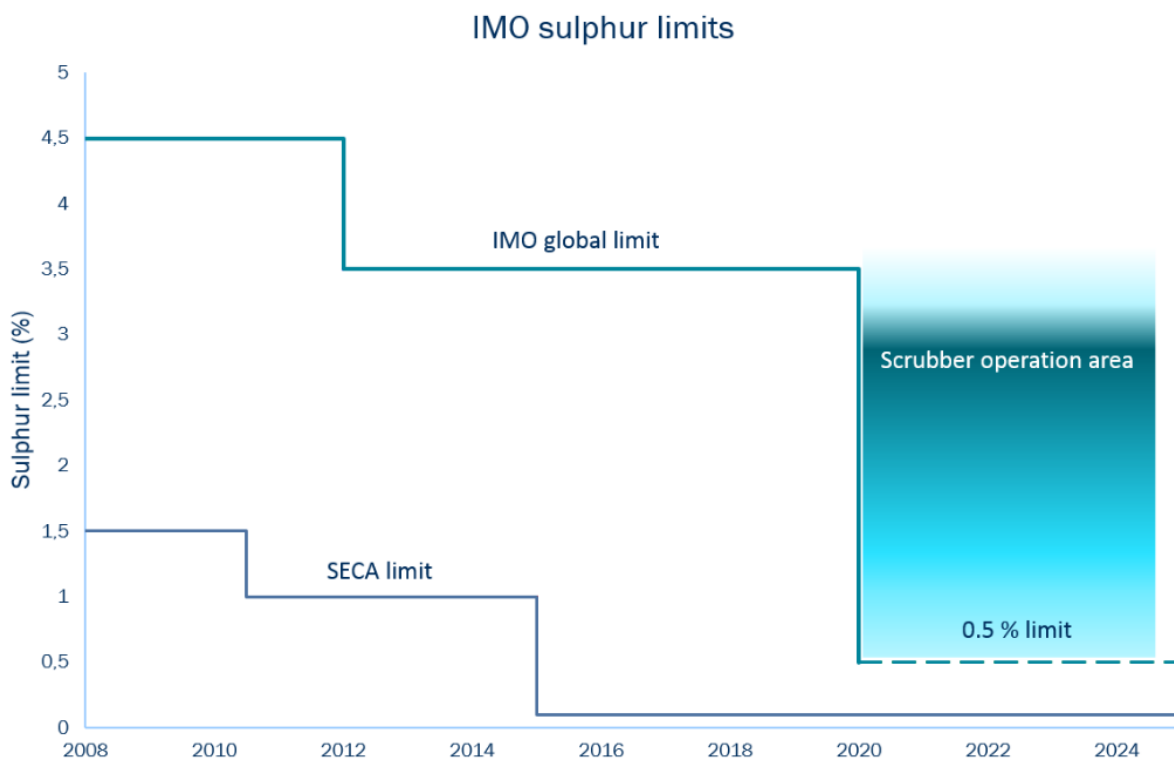
Διάγραμμα 11: Η αγορά πράσινης μεθανόλης ανά βιομηχανία, για το έτος 2021 (Research Dive, 2023)

4 Πράσινη μεθανόλη ως ναυτιλιακό καύσιμο

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Τα εναλλακτικά καύσιμα έχουν μπει ολοένα και περισσότερο στο προσκήνιο έπειτα κι από τη δέσμευση του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) να επιτύχει την πλήρη απανθρακοποίηση της ναυτιλίας μέχρι το 2050 με βάση τους φιλόδοξους στόχους που έχει θέσει προς εκπλήρωση. Είναι φανερό ότι με το παραδοσιακό καύσιμο Diesel που χρησιμοποιείται σήμερα είναι αδύνατο να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι. Συνεπώς όπως τονίστηκε και στο εδάφιο 1.2.2, η αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων τα οποία, θα είναι ικανά να οδηγήσουν στην ελαχιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος της ναυτιλίας με περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμο τρόπο καθίσταται αναγκαία.

Επιπλέον περιορισμοί έχουν τεθεί και για άλλα επιβλαβή για την ατμόσφαιρα αέρια, όπως τα οξειδία του αζώτου (NO_x) και του θείου (SO_x) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM). Συγκεκριμένα, ο IMO έχει υιοθετήσει συγκεκριμένες διατάξεις για την κατά το δυνατόν ελαχιστοποίησή τους τόσο σε παγκόσμια κλίμακα όσο και σε συγκεκριμένες περιοχές. Ήδη από το Μάιο 2005 τέθηκε σε ισχύ η σύμβαση Annex VI της MARPOL στην οποία, προβλεπόταν το όριο των 4.5 % περιεκτικότητα των καυσαερίων σε θείο. Ύστερα, το 2008 υιοθετήθηκαν οι περιοχές ECA (Emission Control Areas) στις οποίες, το όριο αυτών των εκπομπών τέθηκε στο 1.5 %. Έπειτα από διαδοχικές τροποποιήσεις που ακολούθησαν, την 1^η Ιανουαρίου 2020 τέθηκε σε ισχύ το νομοθετικό πλαίσιο που εφαρμόζεται έως σήμερα στο οποίο, το όριο των εκπομπών των οξειδίων του θείου (SO_x) παγκοσμίως διαμορφώνεται στο 0.5 % ενώ, στις περιοχές ECA στο 0.1 %. (Grimmer, 2017) Όσον αφορά τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου (NO_x), ακολουθείται το πρότυπο εκπομπών Tier III του IMO όπου τα όρια των εκπομπών αζώτου διαμορφώνονται μεταξύ 2 – 3.4 g/kWh από το 2016 στις περιοχές ECA της Βορείου Αμερικής και Η.Π.Α. κι από το 2021 στις περιοχές ECA της Βαλτικής και Βόρειας Θάλασσας. (IMO, n.d.)



Διάγραμμα 12: Το όριο των εκπομπών SO_x ιστορικά, όπως διαμορφώθηκε από τον IMO (WinGD, 2019)



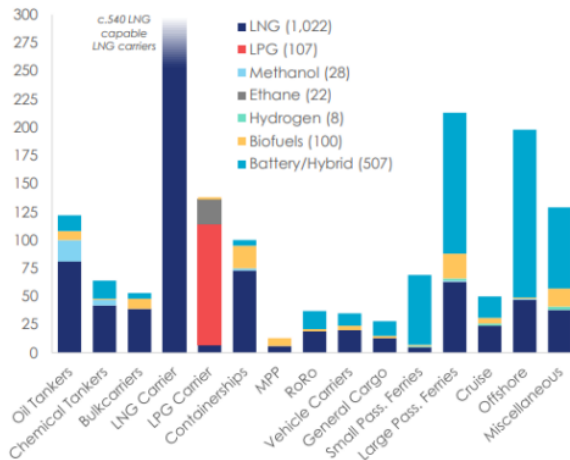
Εικόνα 25: Χάρτης με τις περιοχές ECA στις οποίες ισχύουν οι νομοθεσίες για τις εκπομπές SO_x, NO_x (Isalos.net, 2016)

Ένα προσωρινό μέτρο που πάρθηκε για τον περιορισμό των εκπομπών SO_x και NO_x ήταν η τοποθέτηση συστημάτων καθαρισμού των καυσαερίων (Exhaust Gas Cleaning Systems), γνωστών κι ως Scrubbers. Με τα συγκεκριμένα συστήματα είναι δυνατό τα πλοία να χρησιμοποιούν ως καύσιμο πρόωσης Heavy Fuel Oil (HFO) χωρίς να καταστρατηγούν τη νομοθεσία για τις εκπομπές των συγκεκριμένων αερίων. Περιορίζουν με αυτό τον τρόπο το λειτουργικό κόστος το οποίο, καλούνται να αναλάβουν οι πλοιοκτήτες με τη χρήση καυσίμου Diesel χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (VLSFO) με τη χρήση του οποίου όμως, το λειτουργικό κόστος είναι σημαντικά μεγαλύτερο. (Hellenic Shipping News, 2022)

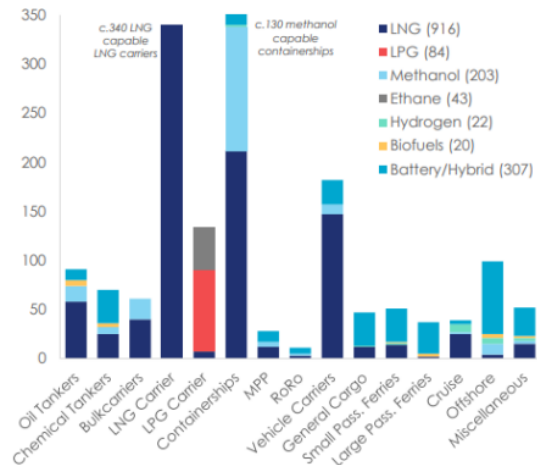
4.2 Προβλέψεις για τα εναλλακτικά καύσιμα

Οι εξαγγελίες από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), η επέκταση του συστήματος εμπορίας ρύπων (EU ETS) από την Ευρωπαϊκή Ένωση στη ναυτιλία και οι πιέσεις που δέχονται οι πλοιοκτήτες από τους ναυλωτές για πλοία με χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα έχουν αποδώσει, με τις παραγγελίες σε πλοία διπλού καυσίμου να είναι σε υψηλά επίπεδα. Σύμφωνα με τα όσα ανέφερε ο Steve Gordon, επικεφαλής της Clarkson Research, το 2023 ήταν ένα έτος ιδιαίτερης σημασίας όσον αφορά τις προσπάθειες του κλάδου προς την πλήρη απαρθρακοποίηση, με το 49 % σε ποσοστό χωρητικότητας (Gross Tonnage) των παραγγελιών σε νέες κατασκευές να αφορά πλοία με δυνατότητα λειτουργίας υπό διπλού καυσίμου. (Mandra, 2024) Στο Διάγραμμα 13 παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνολικές παραγγελίες πλοίων διπλού καυσίμου, ανά κατηγορία κι όπως φαίνεται, το φυσικό αέριο κατέχει τα πρωτεία, με τις εναλλακτικές επιλογές μπαταριών και μεθανόλης να ακολουθούν.

Fleet (100+ GT) Using Alternative Fuels



Orderbook (100+ GT) Set To Use Alternative Fuels



Διάγραμμα 13: Παραγγελίες πλοίων που λειτουργούν με διπλό καύσιμο, ανά κατηγορία (Mandra, 2024)

Ίδανικά τα καύσιμα του μέλλοντος για τη ναυτιλία θα πρέπει να συνδυάζουν κάποιες παραμέτρους και με αυτόν τρόπο να αποτελούν εναλλακτικές επιλογές που αναμένεται να δώσουν προοπτική και να μην υπονομεύσουν την ανάπτυξη στον εν λόγω τομέα. Θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή απόδοση ούτως ώστε, η μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε άλλες μορφές που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για την πρόωση των πλοίων αλλά και τις διάφορες λειτουργίες αυτών να επιτελείται με το χαμηλότερο δυνατό λειτουργικό κόστος. Μια άλλη πολύ σημαντική παράμετρος είναι η ασφαλής επιχειρησιακή λειτουργία του εν λόγω καυσίμου κατά τη χρήση και την αποθήκευσή του. Θα πρέπει να εξεταστεί σοβαρά από πλευράς τοξικότητας, συνεπειών που θα μπορούσε να προκαλέσει τυχόν διαρροή και ευφλεκτότητας που το χαρακτηρίζει. Είναι απαραίτητο να μην προκύψουν ενδεχόμενοι κίνδυνοι που αφορούν την ανθρώπινη ζωή, το θαλάσσιο περιβάλλον και τη λειτουργία του ίδιου του πλοίου. Ύστερα, είναι σημαντικό τα καύσιμα τα οποία, θα κληθούν να αντικαταστήσουν τα υπάρχοντα να χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση ενέργειας ώστε να μην απαιτούνται μεγαλύτερες δεξαμενές κι ως εκ τούτου, χαμηλότερη ποσότητα ωφέλιμου φορτίου για την κάλυψη των αναγκών του ταξιδιού στην απαιτούμενη ακτίνα ενέργειας. Επιπλέον, οι κατά το δυνατό ανταγωνιστικές τιμές, η διαθεσιμότητα και η μαζικότητα της παραγωγής των προτεινόμενων εναλλακτικών καυσίμων θα παίξουν καταλυτικό ρόλο ως προς την υιοθέτησή τους ή μη καθώς, υπάρχει άμεση συσχέτιση των εν λόγω παραμέτρων με τη διαμορφούμενη τιμή των ναύλων των πλοίων. Τέλος και σημαντικότερο όλων, τα εναλλακτικά καύσιμα τα οποία πρόκειται να αντικαταστήσουν το Diesel που χρησιμοποιείται σήμερα θα πρέπει να αποδίδουν μηδενικές ή τις χαμηλότερες δυνατές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Καθώς, αυτός αποτελεί και το βασικότερο λόγο που γίνεται όλη η συζήτηση για την αντικατάσταση των ήδη χρησιμοποιούμενων καυσίμων, είναι αντιληπτό ότι δε νοείται να μην πληρείται αυτή η προϋπόθεση. (Tennent, 2022)

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται σύγκριση των εναλλακτικών καυσίμων βάσει ορισμένων μεταβλητών τους.

Τύπος καυσίμου	LHV (MJ/kg)	Συγκέντρωση ενέργειας ανά όγκο (MJ/l)	Πίεση αποθήκευσης (bar)	Θερμοκρασία αποθήκευσης (°C)	Όγκος δεξαμενής
Αμμωνία	19	12.7	1 or 10	3.4 or 2.0	4.1
Υδρογόνο	120	8.5	1	-253	7.6
Μεθανόλη	20	15.8	1	Περιβάλλοντος	2.14
LNG	50	23.4	1	-162	2.3
LPG	46	25.5	1	-42	2
MGO	43	36.6	1	Περιβάλλοντος	1
HFO	40	35	1	Περιβάλλοντος	1

Πίνακας 3: Παράμετροι εναλλακτικών καυσίμων (Forsyth, Longspur Research, 2022)

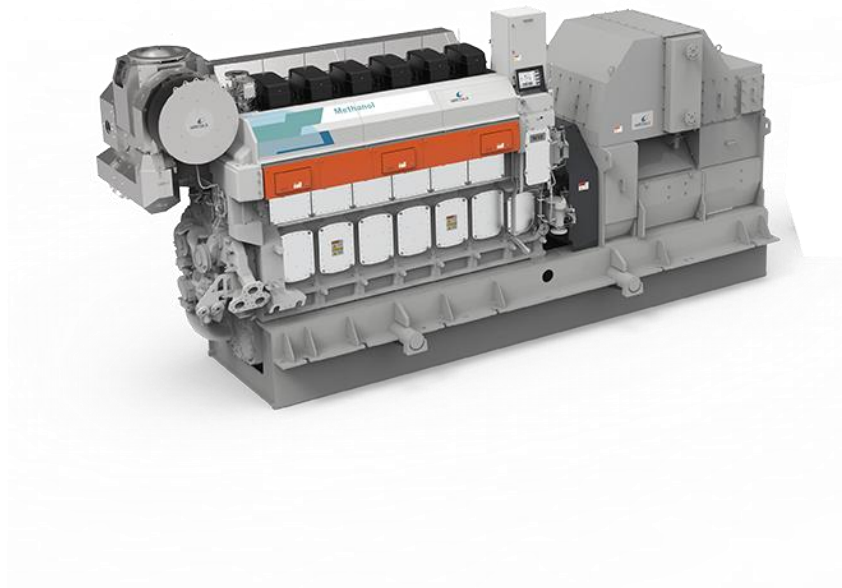
Σημειώνεται ότι οι τιμές του Πίνακα 3 στη στήλη του όγκου δεξαμενής εκφράζουν το κατά πόσο μεγαλύτερες πολλαπλασιαστικά πρέπει να είναι σε σχέση με τον όγκο δεξαμενής του καυσίμου diesel HFO για να παραμένει σταθερή η ακτίνα ενέργειας του πλοίου.

4.3 Κινητήρες διπλού καυσίμου Diesel – Μεθανόλης

Με την ανάγκη αντικατάστασης του παραδοσιακού καυσίμου diesel από εναλλακτικά καύσιμα χαμηλότερου ενεργειακού αποτυπώματος, προέκυψε και η ανάγκη δημιουργίας κι ανάπτυξης νέων κινητήρων. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις μεταξύ τους λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των επιμέρους καυσίμων με τα οποία, λειτουργούν. Συγκεκριμένα, ορισμένες εταιρείες – κολοσσοί έχουν αναλάβει το βάρος ανάπτυξης τέτοιων μηχανών διπλού καυσίμου που θα χρησιμοποιούν κάποιο από τα εναλλακτικά καύσιμα ως κύριο και diesel ως δευτερεύων (πιλοτικό). Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί οι δίχρονοι κινητήρες ME-LGIM και X-DF-M που λειτουργούν στο πρότυπο του κύκλου diesel από τις εταιρείες MAN Energy Solutions και WinGD, αντίστοιχα. Επιπλέον, τετράχρονοι κινητήρες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την πρόωση και την ηλεκτροπαραγωγή είναι ο L21/31DF-M της MAN Energy Solutions και ο Wärtsilä 32.



Εικόνα 26: Δίχρονος κινητήρας διπλού καυσίμου μεθανόλης – diesel, MAN ME-LGIM (Maritime Informed, n.d.)



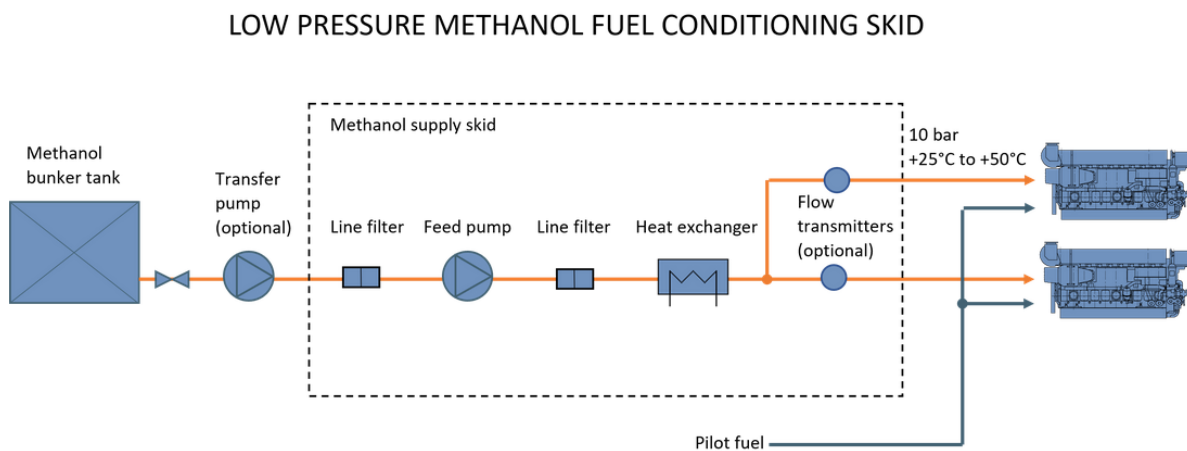
Εικόνα 27: Τετράχρονος κινητήρας διπλού καυσίμου μεθανόλης – diesel, Wärtsilä 32 (Wärtsilä, n.d.)

Οι δίχρονοι κινητήρες διπλού καυσίμου μεθανόλης και diesel έχουν τη δυνατότητα λειτουργίας με δύο τρόπους, του διπλού καυσίμου και του μονού καυσίμου με την επιλογή χρήσης μόνο πετρελαίου κατά τα πρότυπα των παραδοσιακών ναυτικών κινητήρων. Αυτό αποτελεί καθοριστικό πλεονέκτημα για τις εν λόγω μηχανές καθώς, προσφέρεται η ευελιξία στους πλοιοκτήτες και διαχειριστές να εφαρμόσουν την επιλογή που τους συμφέρει οικονομικά, προσδίδοντας τους όμως ταυτόχρονα τη δυνατότητα να κάνουν χρήση της φιλικότερης προς το περιβάλλον λειτουργίας διπλού καυσίμου. Καθώς οι συγκεκριμένοι κινητήρες χρησιμοποιούν ως αρχή λειτουργίας τον θεωρητικό κύκλο Diesel, η χρήση μεθανόλης ως κύριο καύσιμο και πετρελαίου ως δευτερεύον, έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την εφαρμογή μονού καυσίμου. Ενώ, η διεργασία αυτή καθ' αυτή και η απόδοση ισχύος επηρεάζονται παρά μόνο από την ποιότητα της μεθανόλης κι όχι από τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον.

Η μεθανόλη ως ναυτικό καύσιμο έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών επενδυτών που δραστηριοποιούνται στη ναυτιλία καθώς, χαρακτηρίζεται από ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα, είναι εύκολο να αποθηκευτεί λόγω της υγρής μορφής στην οποία βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και της μηδενικής περιεκτικότητας σε θείο. Επιπλέον, κατά την έγχυσή της στον κύλινδρο βρίσκεται σε υγρή φάση, όμοια με την περίπτωση του πετρελαίου. Συνεπώς, ενώ αρχικά οι παραγγελίες μηχανών διπλού καυσίμου με μεθανόλη αφορούσαν κυρίως δεξαμενόπλοια πετρελαιοειδών που έφεραν αυτή ως φορτίο, τελευταία, έχει παρατηρηθεί αύξηση της ζήτησης και σε διαφορετικού τύπου εμπορικά πλοία όπως, containerships. Μεγάλες εταιρείες liner που έχουν εισέλθει δυναμικά στη ναυπήγηση πλοίων που θα λειτουργούν με μεθανόλη ως καύσιμο πρόωσης και χρησιμοποιούν τη μηχανή ME-LGIM της MAN Energy Solutions είναι οι A.P. Moller – Maersk, CMA – CGM, Evergreen και China Merchant Shipping. (MAN Energy Solutions, 2023)

4.3.1 Συστήματα παροχής μεθανόλης υψηλής και χαμηλής πίεσης

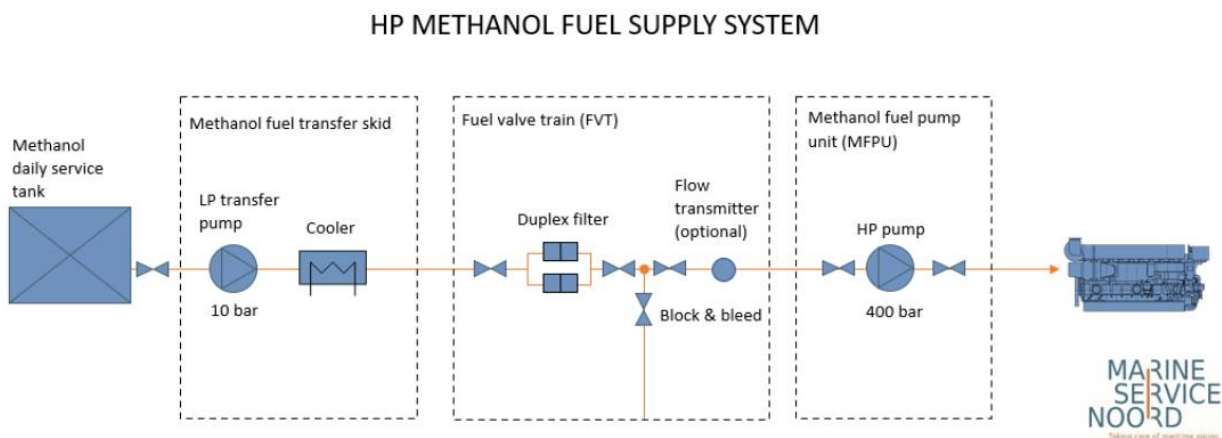
Εταιρείες όπως οι Anglo Belgian Corporation NV, Rolls – Royce, Caterpillar, Hyundai Heavy Industries, China State Ship Building έχουν διαμορφώσει συστήματα παροχής μεθανόλης χαμηλής πίεσης στους κυλίνδρους του κινητήρα. Από το σχεδιάγραμμα που παρουσιάζεται και στην Εικόνα 28 ο ψεκασμός της μεθανόλης στον κύλινδρο γίνεται στα 10 bar και σε θερμοκρασία μεταξύ 25 – 50 °C. (Methanol Institute, 2023)



Εικόνα 28: Σχεδιάγραμμα συστήματος παροχής μεθανόλης χαμηλής πίεσης (Marine Service Noord, n.d.)

Η MAN Energy Solutions στον κινητήρα ME-LGIM και η Wärtsilä έχουν αναπτύξει συστήματα παροχής μεθανόλης υψηλής πίεσης. Η πίεση του συστήματος παροχής του κινητήρα ME-LGIM λειτουργεί στα 13 bar με ένα μικρό περιθώριο ± 0.5 bar ενώ, ο ψεκασμός στον κύλινδρο μέσω του FBIV (Fuel Booster

Injection Valve) γίνεται σε πίεση ίση με 600 bar. (MAN Energy Solutions, 2023) Από την άλλη πλευρά, η αντίστοιχη πίεση παροχής στον κινητήρα που έχει αναπτύξει η Wärtsilä και άλλοι κατασκευαστές είναι ίση με 10 bar, ενώ η πίεση ψεκασμού κυμαίνεται στα 400 bar. Με αυτή τη μέθοδο δίνεται η δυνατότητα ανάμιξης του νερού με μεθανόλη, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο οφέλη τόσο από πλευράς κόστους όσο και από πλευράς εκπομπών.



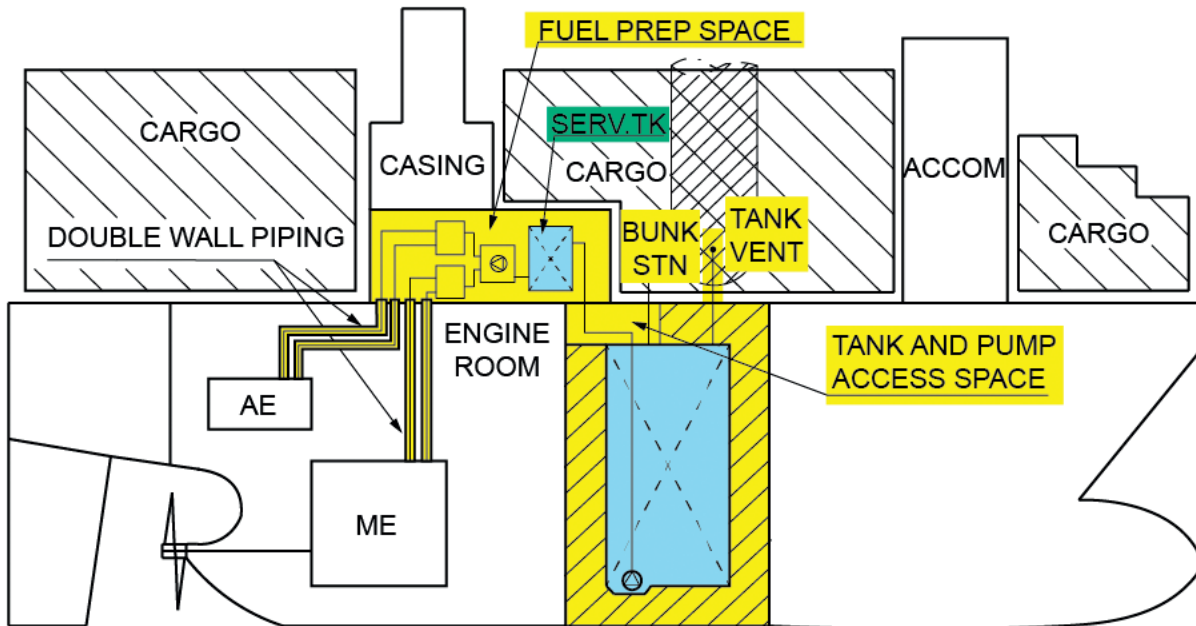
Εικόνα 29: Σχεδιάγραμμα συστήματος παροχής μεθανόλης υψηλής πίεσης (Marine Service Noord, n.d.)

4.3.2 Θέματα ασφαλείας και σχεδιαστικές ιδιαιτερότητες

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθανόλης είναι η χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης που τη χαρακτηρίζει η οποία, κυμαίνεται στους 12 °C περίπου. Σε θερμοκρασίες 12 °C και άνω είναι δυνατό να εκλυθούν και να περάσουν στην αέρια φάση ατμοί από μεθανόλη σε σημαντικές ποσότητες και να παραχθεί μείγμα αέρα – ατμών υψηλής ευφλεκτότητας. Επιπλέον, καθώς σε ξηρό αέρα το εύρος ευφλεκτότητας της μεθανόλης είναι μεταξύ 6 και 36.5 % ελλοχεύει ο κίνδυνος δημιουργίας περιβάλλοντος στο οποίο, θα ευνοείται η δημιουργία εκρήξεων και αναφλέξεων. Το γεγονός ότι η φλόγα που προκαλείται από την καύση της μεθανόλης είναι σχεδόν αόρατη στο ηλιακό φως, δυσχεραίνει ακόμη περισσότερο το χειρισμό της και θέτει επιπλέον ζητήματα ασφαλείας. Επιπρόσθετα, το μοριακό βάρος της μεθανόλης είναι μεγαλύτερο από εκείνο του αέρα κι ως εκ τούτου όταν αυτή βρίσκεται σε αέρια φάση επικάθεται χαμηλά στο έδαφος και σε δυσπρόσιτα σημεία. Συνεπώς, απαιτούνται ειδικές μελέτες όσον αφορά τα συστήματα εξαέρωσης, τον εντοπισμό διαρροών, τον έλεγχο της θερμοκρασίας και τα συστήματα πυρόσβεσης σε μηχανοστάσια στα οποία, λειτουργούν κινητήρες που χρησιμοποιούν αυτή ως καύσιμο.

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω στο 2^ο Κεφάλαιο, η μεθανόλη είναι ιδιαίτερη τοξική κι επικίνδυνη για τον ανθρώπινο οργανισμό και η κατάποση ή η εισπνοή της σε μεγάλες ποσότητες μπορούν να προκαλέσουν ακόμη και τον θάνατο. Με την υιοθέτηση κανονισμών από τον IMO σχετικά με τη χρήση καυσίμων μεθυλικής και αιθυλικής αλκοόλης για την πρόωση εμπορικών πλοίων τέθηκε το ρυθμιστικό πλαίσιο και οι σχεδιαστικές ιδιαιτερότητες στις οποίες, θα πρέπει να υπόκεινται πλοία που φέρουν τη μεθανόλη ως καύσιμο. (IMO, 2020) Για την ασφαλή χρήση της μεθανόλης επάνω σε πλοία κάθε στοιχείο που φέρει αυτή, θα πρέπει να καλύπτεται από διπλό εξωτερικό τοίχωμα ούτως ώστε, να αποτραπεί η παραμικρή πιθανότητα διαρροής της στο μηχανοστάσιο ή σε χώρους φορτίου. Οι δεξαμενές αποθήκευσης που περιέχουν αυτή, θα πρέπει να παρεμβάλλονται από κενούς χώρους σε περιπτώσεις που γειτνιάζουν με τον χώρο φορτίου ή του μηχανοστασίου ενώ, απαιτείται η ύπαρξη αποδοτικού συστήματος εξαέρωσης και συστήματος πυρόσβεσης που λειτουργεί με τη χρήση διοξειδίου του άνθρακα και αφρού ανθεκτικού σε υγρή αλκοόλη. Επιπλέον, οι σωληνώσεις από τις οποίες γίνεται η παροχή της μεθανόλης στους κυλίνδρους

του κινητήρα θα πρέπει να αποτελούνται από διπλό τοίχωμα. Ειδικότερα, ο ενδιάμεσος χώρος μεταξύ των δύο τοιχωμάτων στις σωληνώσεις θα πρέπει να έχει σύστημα εξαερισμού κι απομάκρυνσης της μεθανόλης σε περίπτωση διαρροών. Επιπρόσθετα, αναγκαία είναι η τοποθέτηση αυτόματων αισθητήρων ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση πιθανών διαρροών και να γίνεται άμεση αλλαγή στη λειτουργία σε καύσιμο diesel χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, VLSFO ή ULSFO, αναλόγως με τη γεωγραφική περιοχή στην οποία επιχειρεί το πλοίο. (MAN Energy Solutions, 2023)



Εικόνα 30: Σχεδιάγραμμα πλοίου που παρουσιάζει τις ειδικές μελέτες για τη χρήση μεθανόλης ως καύσιμο (MAN Energy Solutions, 2023)

Τέλος, καθώς η μεθανόλη προκαλεί διάβρωση σε μεταλλικά υλικά όπως το αλουμίνιο και τα κράματα τιτανίου από τα οποία, κατασκευάζονται συχνά δίκτυα σωληνώσεων ορυκτών καυσίμων, είναι σημαντικό να εφαρμοστεί αντιδιαβρωτική επένδυση στην επιφάνεια των υλικών που θα παρέχει και προστασία από όξινες ακαθαρσίες. Διαφορετικά, τα δίκτυα σωληνώσεων και οι δεξαμενές από τις οποίες, κυκλοφορεί μεθανόλη θα μπορούσαν να κατασκευαστούν από μη μεταλλικά υλικά όπως, nylon και νεοπρένιο τα οποία, αποτρέπουν το φαινόμενο της διάβρωσης. (Methanol Institute, 2023)

4.3.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω διαρροής στη θάλασσα

Σε σύγκριση με άλλα καύσιμα από τη σκοπιά της περιβαλλοντικής μόλυνσης που θα μπορούσε να προκληθεί από τυχόν διαρροή μεθανόλης στη θάλασσα, έχει εμφανή πλεονεκτήματα. Καθώς, εκ των ιδιοτήτων της αποτελεί μία ένωση η οποία, είναι υδατοδιαλυτή και βιοδιασπώμενη, πιθανή διαρροή μεθανόλης στη θάλασσα λόγω ατυχήματος δε θα είχε εξαιρετικά δυσμενείς συνέπειες στο υδατικό περιβάλλον και την υποθαλάσσια χλωρίδα και πανίδα σε περιπτώσεις που δε χαρακτηρίζεται από μεγάλες συγκεντρώσεις. Σε συγκεντρώσεις χαμηλότερες των 3,000 mg/l οι μικροοργανισμοί έχουν τη δυνατότητα να διασπάσουν τη μεθανόλη στις χημικές ενώσεις διοξειδίου του άνθρακα και νερού με τη συγκέντρωση αυτής στην επιφάνεια της θάλασσας να διαρκεί μόνο από 1 – 7 ημέρες προτού διασπαστεί εξ ολοκλήρου. Ωστόσο, σε συγκεντρώσεις που ξεπερνούν τα 1,000 mg/l και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις από 10,000 mg/l και άνω μπορεί να γίνει ιδιαίτερα τοξική για την υποθαλάσσια πανίδα. Το μέγεθος σύμφωνα με το οποίο,

μπορεί να μετρηθεί η τοξικότητα μίας χημικής ουσίας είναι η Μέση Θανατηφόρος Δόση (Lethal Concentration 50 – LC₅₀). Αυτή η ποσότητα στο νερό για τους υδατικούς οργανισμούς διαμορφώνεται στα 15,400 mg/l για τη μεθανόλη ενώ, για το βαρύ πετρέλαιο HFO η αντίστοιχη συγκέντρωση είναι 79 mg/l. Δηλαδή, για να προκληθεί η ίδια περιβαλλοντική μόλυνση και θάνατος μεγάλου μέρους της υποθαλάσσιας πανίδας από μεθανόλη σε σύγκριση με αυτή που θα προκαλούνταν από βαρύ πετρέλαιο HFO στη θάλασσα, θα πρέπει η ποσότητα αυτής που θα διαρρεύσει να είναι 200 φορές μεγαλύτερη. Το αντίστοιχο μέγεθος της μέσης θανατηφόρου δόσης για την αμμωνία είναι μόλις 0.068 mg/l, κάτι το οποίο την καθιστά ιδιαίτερα τοξική. Αναλυτικά παρουσιάζεται ο πίνακας που αναγράφει τη μέση θανατηφόρο δόση του κάθε υπάρχοντος και προτεινόμενου καυσίμου πρόωσης για τη ναυτιλία. (Methanol Institute, 2023)

Τύπος καυσίμου	LC ₅₀ (mg/l)
Αμμωνία	0.068
Βενζίνη	8.2
LNG	49.9
MDO	65
HFP	79
Μεθανόλη	15400

Πίνακας 4: Μέση θανατηφόρος δόση LC₅₀ για την υποθαλάσσια πανίδα (Methanol Institute, 2023)

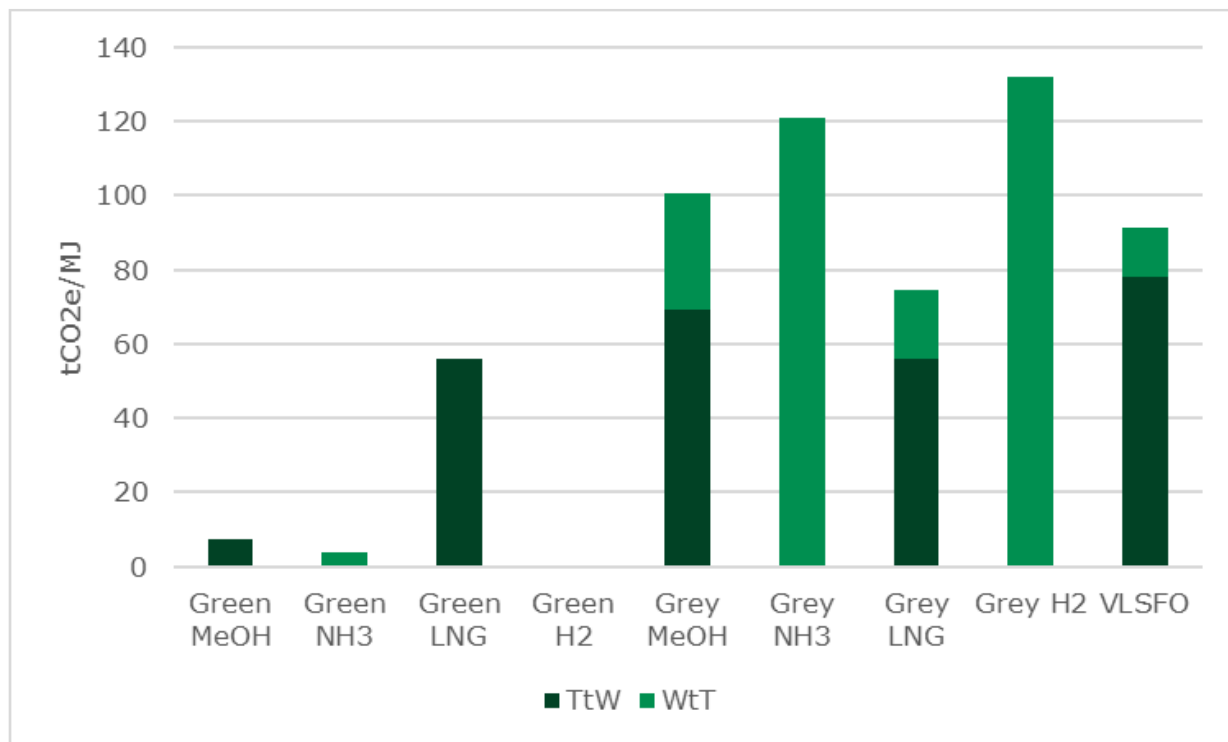
Συνεπώς, λόγω του χαμηλού ρίσκου μόλυνσης του υδατικού οικοσυστήματος, είναι δυνατό η παροχή μεθανόλης από σταθμούς σε πλοία να γίνεται και στη θάλασσα. Τέλος, καθώς με την καύση της μεθανόλης εκπέμπεται σημαντικά χαμηλότερο ποσοστό αιωρούμενων σωματιδίων, η χρήση της ενδείκνυται σε ευαίσθητα οικοσυστήματα όπως, η Αρκτική όπου, επηρεάζονται ισχυρά από την κλιματική αλλαγή.

4.4 Εκπομπές αερίων

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των μεθόδων παραγωγής πράσινης μεθανόλης από πηγές όπως βιομάζα και διοξείδιο του άνθρακα είναι η συνολική μείωση που προσφέρει στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Για την ανάλυση εκπομπών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής (well – to – wake analysis), θα πρέπει να εξεταστούν όλα τα βήματα, της παραγωγής, της διανομής και της χρήσης της πράσινης μεθανόλης. Η διάκριση των εν λόγω βημάτων μπορεί να γίνει με απλούστερο τρόπο ως well – to – tank (WtT) και tank – to – wake (TtW). Αυτές οι διαδικασίες εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους όπως, τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, τη μέθοδο με την οποία εκτελούνται οι εν λόγω διαδικασίες και την ενεργειακή απόδοση καθεμίας εξ αυτών. Έτσι, τίθεται η βάση υπό την οποία, είναι δυνατό να γίνει η σύγκριση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούνται από καύσιμα που χρησιμοποιούν άλλες μεθόδους παραγωγής και προέρχονται διαφορετικές πρώτες ύλες.

Έχοντας ως καύσιμο αναφοράς το πετρέλαιο VLSFO, η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη από τη Ρύπανση των Πλοίων (MARPOL) υπολόγισε το αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα του εν λόγω καυσίμου ίσο με 3.114 t-CO₂/t-fuel. Εναλλακτικά καύσιμα όπως η αμμωνία και το υδρογόνο όταν παράγονται από ορυκτές πηγές, παρουσιάζουν υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, δεδομένης των υψηλών ποσών ενέργειας που απαιτούνται για τη διαδικασία παρασκευής τους. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από αμμωνία και υδρογόνο είναι κατά 48 % και 64 % υψηλότερες σε σχέση με το πετρέλαιο VLSFO, αντίστοιχα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Το LNG παρουσιάζει κατά 12 % χαμηλότερες εκπομπές σε σχέση με το πετρέλαιο, με το αποτύπωμα διοξειδίου κατά την καύση του να διαμορφώνεται στα 2.750 t-CO₂/t-fuel. Ενώ, το bio-LNG έχει τη δυνατότητα να εξαλείφει πλήρως τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα. Η γκρίζα μεθανόλη που παράγεται χρησιμοποιώντας ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο έχει ελάχιστα μεγαλύτερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με το πετρέλαιο

VLSFO κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της ωστόσο, παρουσιάζει μειωμένες εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων και οξειδίων του θείου (SO_x) και αζώτου (NO_x). Τέλος, η πράσινη μεθανόλη όταν παράγεται από υδρογόνο που προέρχεται από τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης και της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα ενδέχεται να είναι πλήρως απαλλαγμένη από εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα κατευθείαν από την ατμόσφαιρα μειώνει τις εν λόγω εκπομπές κατά 100 % και το ελάχιστο ποσοστό αυτών οφείλεται στην καύση του πιλοτικού καυσίμου. (Forsyth, Longspur Research, 2023) Γενικότερα, με την παραγωγή πράσινης μεθανόλης που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι δυνατό να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε εύρος 65 – 95 % σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα.



Διάγραμμα 14: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής των καυσίμων (Forsyth, Longspur Research, 2023)

Η χρήση της μεθανόλης ως ναυτιλιακό καύσιμο αποφέρει πολύ χαμηλότερο ενεργειακό αποτύπωμα σε σχέση με κινητήρες που χρησιμοποιούν αμιγώς πετρέλαιο diesel. Αυτό παρουσιάζεται ενδεικτικά, στον παρακάτω πίνακα που παρατίθεται οποίο, παρουσιάζονται τα ποσοστά μείωσης των εκπομπών αερίων βλαβερών για την ατμόσφαιρα όπως, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), τα οξείδια αζώτου (NO_x) και θείου (SO_x) με τη χρήση μεθανόλης που παράγεται από μη ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.

Χημική ένωση	Ποσοστό μείωσης
CO ₂	10%
PM	90%
NO _x	90 - 97%
SO _x	30 - 50%

Πίνακας 5: Ποσοστό μείωσης εκπομπών αερίων με τη χρήση μεθανόλης ως καύσιμο πρόωσης (MAN Energy Solutions, 2023)

Αναφορικά, με το CO₂ που παράγεται με τη χρήση μεθανόλης από κινητήρες διπλού καυσίμου πραγματοποιείται η ακόλουθη μελέτη στην οποία, θα εξεταστούν στοιχεία του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR. Μελετάται η περίπτωση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης, θεωρώντας ως δεδομένα το βάρος καθαρού φορτίου (DWT) ίσο με 50,000 t, το βάρος κενού σκάφους 10,000 t και τη συνολική ισχύ του κινητήρα 9000 kW σε στροφές λειτουργίας 90 rpm κατά τα πρότυπα του πλοίου Stena Pro Marine της εταιρείας Stena Bulk. (Marine Link, 2022) Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να προσδιοριστούν στοιχεία για την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές CO₂ που παράγονται κατά την καύση με τη χρήση του προγράμματος CEAS της MAN Energy Solutions. (MAN Energy Solutions, n.d.) Οι καταστάσεις που εξετάζονται είναι σε τροπικές συνθήκες (θερμοκρασία αέρα = 45 °C, θερμοκρασία νερού = 36 °C) και στις ρυθμίσεις λειτουργίας Tier II, Tier III όπως, αυτές ορίζονται από τον IMO. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες

Methanol							
Power (%MCR)	Power (kW)	Revolutions per min	b _e (g/kWh)	m _{FO} (kg/s)	m _{FO} (t/day)	m _{FO} (t/y)	m _{CO2} (t/y)
100	9000	90	346.5	0.86625	74.844	22453.2	30873.15
95	8550	88.5	340.5	0.85125	73.548	22064.4	30338.55
90	8100	86.9	334.9	0.83725	72.3384	21701.52	29839.59
85	7650	85.3	329.7	0.82425	71.2152	21364.56	29376.27
80	7200	83.5	327.9	0.81975	70.8264	21247.92	29215.89
75	6750	81.8	326.2	0.8155	70.4592	21137.76	29064.42
70	6300	79.9	320.8	0.802	69.2928	20787.84	28583.28
65	5850	78	315	0.7875	68.04	20412	28066.5
60	5400	75.9	315.3	0.78825	68.1048	20431.44	28093.23
55	4950	73.7	315.8	0.7895	68.2128	20463.84	28137.78
50	4500	71.4	316.4	0.791	68.3424	20502.72	28191.24
45	4050	69	316.6	0.7915	68.3856	20515.68	28209.06
40	3600	66.3	316.7	0.79175	68.4072	20522.16	28217.97
35	3150	63.4	316.4	0.791	68.3424	20502.72	28191.24
30	2700	60.2	316	0.79	68.256	20476.8	28155.6
25	2250	56.7	314.5	0.78625	67.932	20379.6	28021.95

Πίνακας 6: Κατανάλωση μεθανόλης του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier III Mode)

Pilot Oil							
Power (%MCR)	Power (kW)	Revolutions per min	b _e (g/kWh)	m _{FO} (kg/s)	m _{FO} (t/day)	m _{FO} (t/y)	m _{CO2} (t/y)
100	9000	90	8.7	0.02175	1.8792	563.76	775.17
95	8550	88.5	9	0.0225	1.944	583.2	801.9
90	8100	86.9	9.3	0.02325	2.0088	602.64	828.63
85	7650	85.3	9.7	0.02425	2.0952	628.56	864.27
80	7200	83.5	10.1	0.02525	2.1816	654.48	899.91
75	6750	81.8	10.5	0.02625	2.268	680.4	935.55
70	6300	79.9	11	0.0275	2.376	712.8	980.1
65	5850	78	11.6	0.029	2.5056	751.68	1033.56
60	5400	75.9	12.2	0.0305	2.6352	790.56	1087.02
55	4950	73.7	12.9	0.03225	2.7864	835.92	1149.39
50	4500	71.4	13.8	0.0345	2.9808	894.24	1229.58
45	4050	69	14.8	0.037	3.1968	959.04	1318.68
40	3600	66.3	16	0.04	3.456	1036.8	1425.6
35	3150	63.4	17.4	0.0435	3.7584	1127.52	1550.34
30	2700	60.2	19.3	0.04825	4.1688	1250.64	1719.63
25	2250	56.7	21.8	0.0545	4.7088	1412.64	1942.38

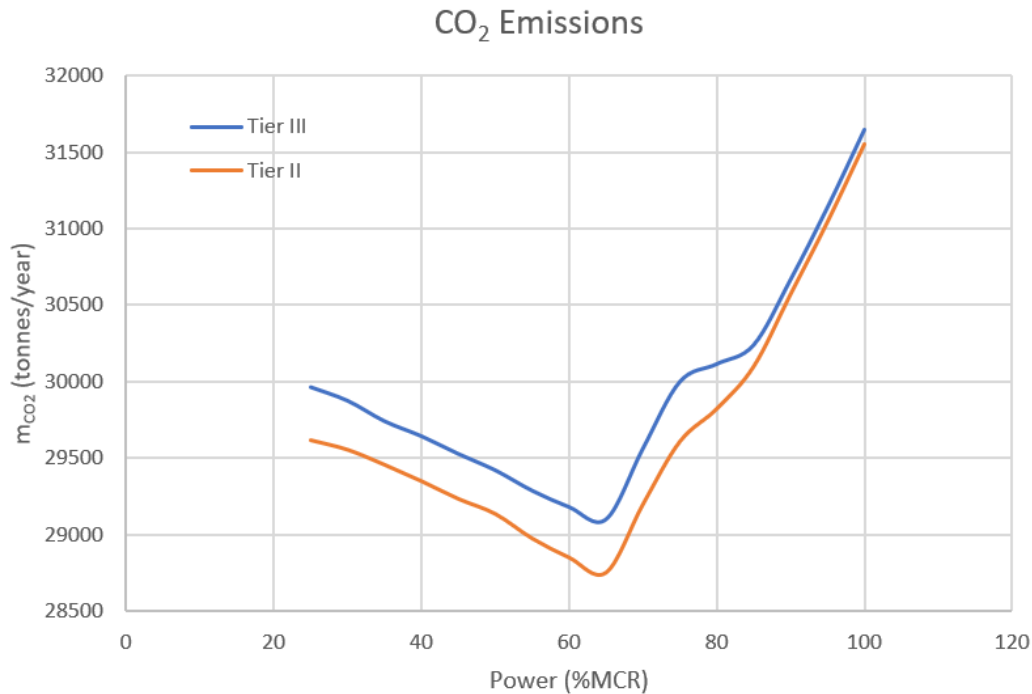
Πίνακας 7: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier III Mode)

Methanol							
Power (%MCR)	Power (kW)	Revolutions per min	b _e (g/kWh)	m _{FO} (kg/s)	m _{FO} (t/day)	m _{FO} (t/y)	m _{CO2} (t/y)
100	9000	90	345.4	0.8635	74.6064	22381.92	30775.14
95	8550	88.5	339.4	0.8485	73.3104	21993.12	30240.54
90	8100	86.9	333.8	0.8345	72.1008	21630.24	29741.58
85	7650	85.3	328.1	0.82025	70.8696	21260.88	29233.71
80	7200	83.5	324.6	0.8115	70.1136	21034.08	28921.86
75	6750	81.8	321.8	0.8045	69.5088	20852.64	28672.38
70	6300	79.9	316.7	0.79175	68.4072	20522.16	28217.97
65	5850	78	311.1	0.77775	67.1976	20159.28	27719.01
60	5400	75.9	311.6	0.779	67.3056	20191.68	27763.56
55	4950	73.7	312.3	0.78075	67.4568	20237.04	27825.93
50	4500	71.4	313.2	0.783	67.6512	20295.36	27906.12
45	4050	69	313.3	0.78325	67.6728	20301.84	27915.03
40	3600	66.3	313.4	0.7835	67.6944	20308.32	27923.94
35	3150	63.4	313.2	0.783	67.6512	20295.36	27906.12
30	2700	60.2	312.4	0.781	67.4784	20243.52	27834.84
25	2250	56.7	310.6	0.7765	67.0896	20126.88	27674.46

Πίνακας 8: Κατανάλωση μεθανόλης του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier II Mode)

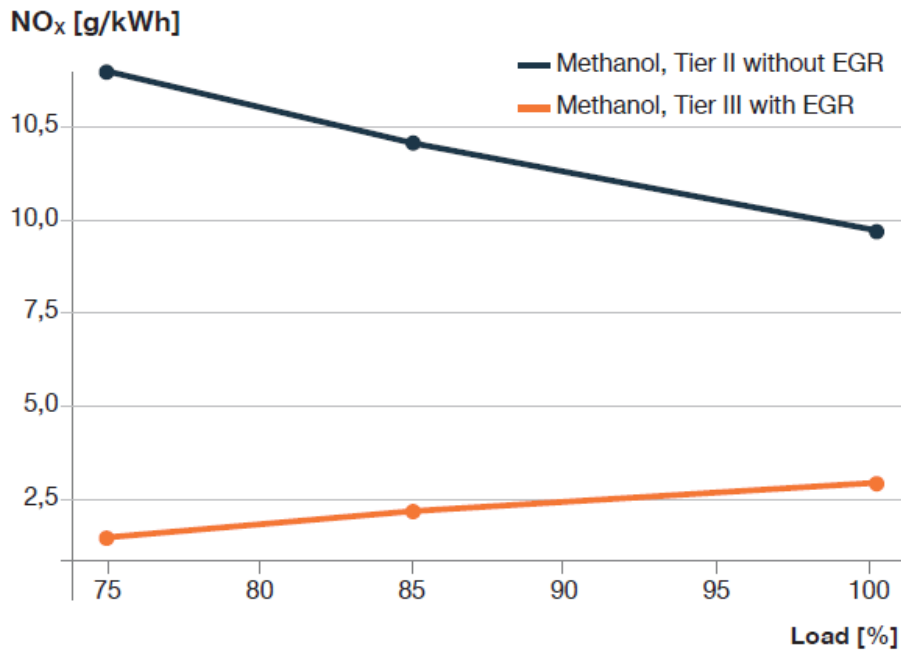
Pilot Oil							
Power (%MCR)	Power (kW)	Revolutions per min	b_e (g/kWh)	m_{FO} (kg/s)	m_{FO} (t/day)	m_{FO} (t/y)	m_{CO_2} (t/y)
100	9000	90	8.7	0.02175	1.8792	563.76	775.17
95	8550	88.5	9	0.0225	1.944	583.2	801.9
90	8100	86.9	9.3	0.02325	2.0088	602.64	828.63
85	7650	85.3	9.7	0.02425	2.0952	628.56	864.27
80	7200	83.5	10.1	0.02525	2.1816	654.48	899.91
75	6750	81.8	10.5	0.02625	2.268	680.4	935.55
70	6300	79.9	11	0.0275	2.376	712.8	980.1
65	5850	78	11.6	0.029	2.5056	751.68	1033.56
60	5400	75.9	12.2	0.0305	2.6352	790.56	1087.02
55	4950	73.7	12.9	0.03225	2.7864	835.92	1149.39
50	4500	71.4	13.8	0.0345	2.9808	894.24	1229.58
45	4050	69	14.8	0.037	3.1968	959.04	1318.68
40	3600	66.3	16	0.04	3.456	1036.8	1425.6
35	3150	63.4	17.4	0.0435	3.7584	1127.52	1550.34
30	2700	60.2	19.3	0.04825	4.1688	1250.64	1719.63
25	2250	56.7	21.8	0.0545	4.7088	1412.64	1942.38

Πίνακας 9: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier II Mode)

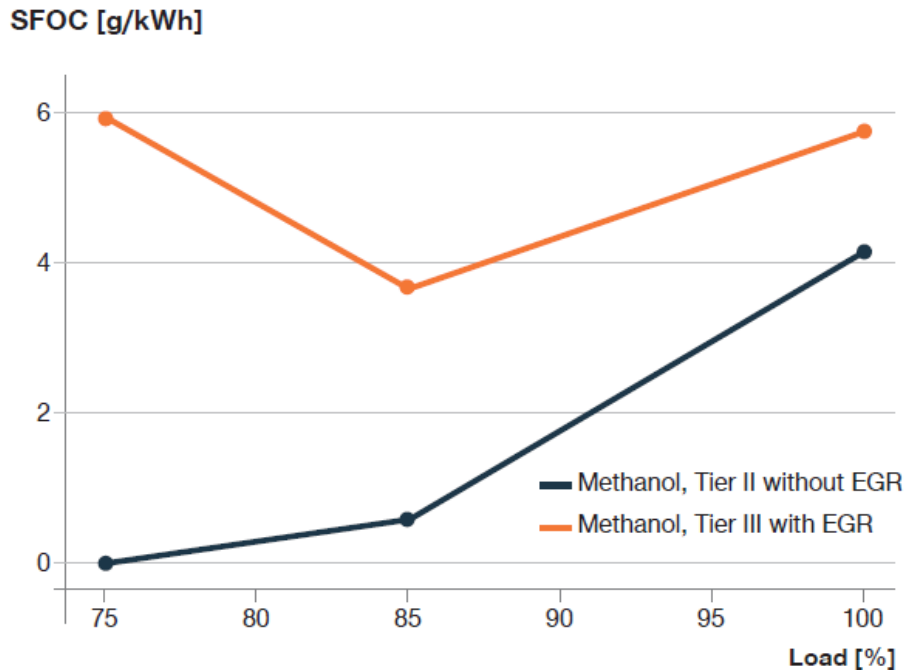


Διάγραμμα 15: Εκπομπές CO₂ κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR σε τόνους ανά έτος

Η MAN Energy Solutions στη σειρά κινητήρων ME-LGIM που έχει αναπτύξει, έχει σχεδιάσει και προσθέσει το σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation – EGR) το οποίο, εξασφαλίζει τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς του IMO για τα NO_x και συγκεκριμένα την λειτουργία σύμφωνα με το πρότυπο εκπομπών Tier III. Το σύστημα ανακύκλωσης καυσαερίων επιδρά στις εκπομπές των NO_x με τη μείωση του ποσοστού του οξυγόνου στον αέρα εισαγωγής της μηχανής. Με αυτό τον τρόπο μετριάζεται η θερμοκρασία της φλόγας που παράγεται κι έτσι μειώνονται και οι παραγόμενες εκπομπές NO_x στα καυσαέρια. Στο Διάγραμμα 16 παρουσιάζεται η σύγκριση λειτουργίας με σύστημα EGR και χωρίς, που συμμορφώνονται με τα πρότυπα εκπομπών Tier III και Tier II, αντίστοιχα, για τη μηχανή ME-LGIM G95 της MAN Energy Solutions. Το εύρος του φορτίου στο διάγραμμα είναι μεταξύ 75 – 100 % καθώς, αυτή είναι η κρισιμότερη περιοχή λειτουργίας του κινητήρα. Η διαφορά στην κατανάλωση μεθανόλης των επιλογών χρήσης ή μη του συστήματος EGR παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 17 όπου, παρατηρείται ότι η επίδραση του στην κατανάλωση καυσίμου είναι ελάχιστη σε αντίθεση με την περίπτωση λειτουργίας αμιγώς μονού καυσίμου. Συνεπώς, γίνεται εμφανές ότι σε περιπτώσεις που απαιτείται η συμμόρφωση με το κανονιστικό πλαίσιο Tier III για τα NO_x που τίθεται από τον IMO, η συνδυαστική λειτουργία καυσίμου μεθανόλης και του συστήματος EGR παρουσιάζει εξαιρετικά αποτελέσματα. (MAN Energy Solutions, 2023)



Διάγραμμα 16: Οι εκπομπές NO_x του κινητήρα ME-LGIM G95 στη λειτουργία διπλού καυσίμου με και χωρίς το EGR (MAN Energy Solutions, 2023)



Διάγραμμα 17: Διαφορά στην ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα ME-LGIM G95 στη λειτουργία διπλού καυσίμου με και χωρίς το σύστημα EGR (MAN Energy Solutions, 2023)

4.5 Μεταφορά – Αποθήκευση

Η μεταφορά μεθανόλης γίνεται κυρίως δια θαλάσσης με δεξαμενόπλοια μεταφοράς χημικών και πετρελαιοειδών ειδικά σχεδιασμένα να μεταφέρουν εύφλεκτα υλικά με τον απαραίτητο εξοπλισμό ασφαλείας. Η μεταφορά της απαιτεί την πιστή συμβατότητα με τους κανονισμούς που τίθενται από τον IMO ούτως ώστε, να ελαχιστοποιούνται κίνδυνοι που σχετίζονται με την τοξικότητα και την ευφλεκτότητα της μεθανόλης. Επιπλέον, τα συγκεκριμένα πλοία που επιτελούν το ρόλο μεταφοράς μεθανόλης δύναται να εγκαταστήσουν κινητήρα διπλού καυσίμου που θα χρησιμοποιεί πράσινη μεθανόλη ως κύριο καύσιμο για την πρόωση του δεξαμενοπλοίου. Δεξαμενόπλοια μεταφοράς μεθανόλης που λειτουργούν χρησιμοποιώντας αυτή ως κύριο καύσιμο έχει αναπτύξει ήδη ο όμιλος Stena Group που αποτέλεσε κι από τους πρώτους επενδυτές στη ναυτιλία που συνεχίζουν να διαθέτουν υψηλά κεφάλαια για την ανάπτυξη πλοίων που θα χρησιμοποιούν την πράσινη μεθανόλη ως καύσιμο λειτουργίας. (Schuler, 2024)



Εικόνα 31: Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς μεθανόλης (Ship Technology, 2019)

Σε αντίθεση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα της ναυτιλίας που προτείνονται ως αντικαταστάτες του πετρελαίου όπως, το LNG, η αμμωνία και το υδρογόνο, η μεθανόλη παρουσιάζει σαφή πλεονεκτήματα ως προς τη δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς της. Καθώς, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι σε υγρή μορφή μικρές μόνο μετατροπές που αφορούν κυρίως το χαμηλό σημείο ανάφλεξης της μεθανόλης είναι αναγκαίο να γίνουν σε υπάρχουσες υποδομές και συστήματα. Τα κύρια συστήματα ασφαλείας που θα πρέπει να ληφθούν, κάποια εκ των οποίων αναλύθηκαν και ανωτέρω, είναι η κατάλληλη τοποθεσία επάνω στο πλοίο και η προστασία της μεθανόλης, η αδρανοποίηση της ατμόσφαιρας και η ύπαρξη κατάλληλου συστήματος εξαερισμού των δεξαμενών, τα συστήματα πυρόσβεσης και κατάσβεσης σε περίπτωση πυρκαγιάς. Επιπλέον, απαραίτητη είναι και η συνεχής εκπαίδευση του πληρώματος σε ζητήματα ασφαλείας για την αντιμετώπιση περαιτέρω κινδύνων που αναμένεται να προκύψουν από την παρουσία μεθανόλης ως φορτίο ή ως καύσιμο επάνω στο πλοίο. (ABS, n.d.)

4.6 Ανεφοδιασμός (bunkering)

Αυτή τη στιγμή, υπάρχουν κι έχουν καταγραφεί πάνω από 100 τερματικοί σταθμοί ανεφοδιασμού πλοίων με μεθανόλη σε λιμάνια όλου του κόσμου και συνεχίζουν να αναπτύσσονται καινούριοι με ταχείς ρυθμούς. (DNV, 2023) Η μεθανόλη καθότι είναι σε υγρή φάση σε συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης περιβάλλοντος, η διαδικασία τροφοδότησής της σε εμπορικά πλοία εμφανίζει πολλές ομοιότητες με την αντίστοιχη διαδικασία που ακολουθείται για καύσιμα πετρελαίου όπως, το HFO και MGO. Οι κύριοι τρόποι ανεφοδιασμού ενός πλοίου με μεθανόλη είναι με φορτηγά, μπάρτζες και από τερματικούς σταθμούς σε λιμάνια. Τον Ιανουάριο του 2024 η Κίνα εγκαινίασε το πρώτο της πλοίο το οποίο, μπορεί να εκτελέσει υπηρεσίες ανεφοδιασμού μεθανόλης από πλοίο – σε – πλοίο (ship – to – ship) στη θάλασσα. (Offshore Energy, 2024)

Ο ανεφοδιασμός με μεθανόλη από μπάρτζα – σε – πλοίο (barge – to – ship) δίνει τη δυνατότητα τροφοδότησης στο λιμάνι ή στη θάλασσα όταν το πλοίο είναι αγκυροβολημένο. Τον Μάιο του 2021 εκτελέστηκε η πρώτη διαδικασία ανεφοδιασμού στο πλοίο Takarua Sun στο λιμάνι του Rotterdam. (NYK Line, 2021) Από αυτή τη διαδικασία φάνηκε ότι ο ανεφοδιασμός μεθανόλης από μπάρτζα – σε -πλοίο είναι αξιόπιστη εφόσον, ακολουθούνται τα πρωτόκολλα ασφαλείας όπως και στην περίπτωση των συμβατικών καυσίμων.

Με την ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση πλοίων που λειτουργούν με μεθανόλη ως καύσιμο πρόωσης είναι φανερό πλέον ότι οι διαχειριστές των λιμένων απαιτείται να επενδύσουν κεφάλαια για την εγκατάσταση δεξαμενών αποθήκευσης και συστημάτων τροφοδότησης της. Λιμένες που έχουν ήδη επιχειρήσει αυτό το βήμα φαίνεται να συγκεντρώνουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες να αναπτυχθούν ως πιθανοί κόμβοι στο παγκόσμιο εμπόριο για την παραγωγή, μεταφορά και τροφοδότηση πράσινης μεθανόλης. (Methanol Institute, 2023)



Εικόνα 32: Παγκόσμιος χάρτης με τους τερματικούς σταθμούς ανεφοδιασμού μεθανόλης (Bunker Ports News Worldwide, 2022)



Εικόνα 33: Δεξαμενόπλοιο ανεφοδιασμού μεθανόλης Hai Gang Zhi Yuan (Offshore Energy, 2024)

5 Μεθοδολογία

Για την πραγματοποίηση μίας μελέτης εφικτότητας μίας επένδυσης με επιστημονικά άρτιες μεθόδους είναι αναγκαίο να εξεταστούν κάποιοι οικονομικοί συντελεστές για να κριθεί εάν αυτή η επένδυση είναι οικονομικά συμφέρουσα να πραγματοποιηθεί ενώ, μελετώνται επιπλέον, τα οφέλη που αναμένεται να αποδώσει στους επιχειρηματίες που σκοπεύουν να συνεισφέρουν με κεφάλαια για την πραγματοποίησή της. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι οικονομικοί συντελεστές βάσει των οποίων, θα γίνει η μελέτη εφικτότητας χρήσης πράσινης μεθανόλης ως ναυτιλιακό καύσιμο με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής της. Τα κριτήρια με τα οποία, πραγματοποιούνται τέτοιους είδους επενδύσεις είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR), ο Συντελεστής Ανάκτησης Κεφαλαίου (CRF), ο Χρόνος Αποπληρωμής (PP) και ο Συντελεστής Κερδοφορίας (PP). Παρακάτω γίνεται εκτενής ανάλυση των συγκεκριμένων κριτηρίων.

5.1 Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) ορίζεται ως η συνολική διαφορά μεταξύ των χρηματικών εισροών και εκροών μίας επένδυσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της, με ανατοκισμό του ποσού στο παρόν. (Corporate Finance Institute, n.d.) Ενώ, υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση: (Ψαραύτης, 2005)

$$NPV(i) = \sum_{t=0}^N \frac{R_t}{\prod_{k=0}^N (1 + i_k)}$$

Όπου:

- R_t : Οι χρηματοροές (έσοδα – έξοδα) σε ένα χρονικό διάστημα t .
- i_t : Το επιτόκιο αναγωγής στη χρονική περίοδο t , με $i_0=0$. Το επιτόκιο αναγωγής χρησιμοποιείται για τον ανατοκισμό ενός ποσού σε παρούσες αξίες.
- N : Η οικονομική διάρκεια ζωής της επένδυσης. Υπάρχει ενδεχόμενο η οικονομική διάρκεια ζωής να είναι διαφορετική από την πραγματική. (Chen, Investopedia, 2020)

Κατά τη διαδικασία αξιολόγησης μίας υπό διαβούλευση επένδυσης είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η Καθαρή Παρούσα Αξία καθώς, με το αποτέλεσμα που θα έχει, αναμένεται να ληφθεί η απόφαση πραγματοποίησης ή μη της εξεταζόμενης επένδυσης. Ειδικότερα, εάν η NPV δίνει αρνητικό αποτέλεσμα ($NPV < 0$) αυτό σημαίνει ότι, υλοποιώντας το συγκεκριμένο έργο η εταιρεία θα έχει απώλεια χρηματοροών. Επομένως, εάν η Καθαρή Παρούσα Αξία είναι θετική ($NPV > 0$) τότε, η εταιρεία που έχει αναλάβει να πραγματοποιήσει τη συγκεκριμένη επένδυση αναμένεται να αποκομίσει κέρδη. Τέλος, όταν η NPV μηδενίζεται ($NPV = 0$) δεν αναμένεται να υπάρξουν ούτε κέρδη ούτε απώλειες από την υλοποίηση του υπό μελέτη έργου. (Tuoniva, Investopedia, 2021)

Σε περιπτώσεις όπου στη μελέτη που διεξάγεται, εξετάζονται παραπάνω από μία επενδύσεις στο ίδιο χρονικό διάστημα, τότε, η επένδυση ή ο συνδυασμός αυτών που αποδίδουν τη μεγαλύτερη τιμή Καθαρής Παρούσας Αξίας προτιμώνται έναντι των εναλλακτικών επιλογών. Αναλυτικότερα οι επιλογές αυτές μπορεί να είναι οι ακόλουθες σε περίπτωση που εξετάζονται δύο πιθανές επενδύσεις, A και B:

- Η πραγματοποίηση και των δύο εξεταζόμενων επενδύσεων.
- Η πραγματοποίηση της υπό μελέτη επένδυσης A.
- Η πραγματοποίηση της υπό μελέτη επένδυσης B.

- Η μη πραγματοποίηση καμίας εκ των δύο πιθανών επενδύσεων.

Καθώς δεν είναι γνωστός ο συντελεστής αναγωγής i_t δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί η NPV των εξεταζόμενων επενδύσεων A, B κι ως εκ τούτου δεν είναι δυνατή η επιλογή κάποιας εκ των ανωτέρω τεσσάρων εναλλακτικών λύσεων. Συνεπώς, για την αξιολόγηση της εφικτότητας μίας επένδυσης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός αυτού του συντελεστή.

Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που οι εξεταζόμενες επενδύσεις δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και συνεπώς, με την πραγματοποίησή τους, η τελική NPV που θα προκύψει δε θα είναι ίση με το άθροισμα των NPV των χρηματοροών των επιμέρους αυτών επενδύσεων. (Ψαράτης, 2005)

5.1.1 Δανεισμός

Με τον όρο δάνειο χαρακτηρίζεται μία μορφή χρέους που επιβάλλεται από κάποιο τρίτο πρόσωπο ή οργανισμό. Ο δανειστής μπορεί να αποτελεί μία εταιρεία, ένα χρηματοπιστωτικό ίδρυμα ή την κυβέρνηση ενός κράτους και προσφέρει ένα οικονομικό ποσό προς τον δανειολήπτη. Ο δανειολήπτης σε αντάλλαγμα, συμφωνεί σε μία σειρά από όρους όπως, την οικονομική του επιβάρυνση, το επιτόκιο δανεισμού και την χρόνο αποπληρωμής του δανείου. (Kagan, 2024) Κατά τον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας το ποσό δανεισμού υπολογίζεται στις εισροές ενώ, οι δόσεις αποπληρωμής στις εκροές. Συμπερασματικά, η τιμή της NPV μίας επένδυσης θα επηρεαστεί άμεσα σε περίπτωση που προκύψει έπειτα από δανεισμό μέρους ή ολόκληρου του αρχικού κεφαλαίου που χρησιμοποιείται. Ωστόσο, για να κριθεί εάν είναι συμφέρουσα για τον επενδυτή η κάλυψη του αρχικού κεφαλαίου σε ένα μέρος ή εξ ολοκλήρου από δανεισμό θα πρέπει να πληρούνται και να εξεταστούν οι ακόλουθοι παράγοντες: (Ψαράτης, 2005)

- Το επιτόκιο δανεισμού r το οποίο, είναι διαφορετικό από το επιτόκιο αναγωγής i , είναι το επιπλέον ποσό που καλείται να αποπληρώσει ο δανειολήπτης ως ποσοστό του κεφαλαίου που αποκόμισε κατά τον δανεισμό. Για να είναι συμφέρων ο δανεισμός πρέπει το επιτόκιο δανεισμού r να είναι μικρότερο από το επιτόκιο αναγωγής i ($r < i$).
- Τη ρευστότητα που χαρακτηρίζει την επιχείρηση που αναμένεται να πραγματοποιήσει μία επένδυση. Η ρευστότητα εκφράζει την ικανότητά της εν λόγω επιχείρησης να διασφαλίζει την οικονομική της δραστηριότητα επιτυχώς σε περιόδους κρίσεων. Η υψηλή ρευστότητα προσφέρει καλύτερη πιστοληπτική ικανότητα και χαμηλότερες ανάγκες δανεισμού από χρηματοπιστωτικά ιδρύματα. (Σχινάς & Λυρίδης, 2002)
- Τους όρους του δανείου και ειδικότερα την περίοδο αποπληρωμής, τον αριθμό των δόσεων στο συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα και τον τρόπο επιβάρυνσης του δανειολήπτη όσον αφορά, την αποπληρωμή των τόκων του κεφαλαίου.

5.1.2 Φόροι – Αποσβέσεις

Οι φόροι αποτελούν υποχρεωτικές εισφορές που επιβάλλονται σε επιχειρήσεις και κερδοσκοπικούς οργανισμούς από κάποια εθνική ή τοπική κυβερνητική αρχή. Από τα φορολογικά έσοδα είναι δυνατό να χρηματοδοτούνται δημόσια έργα και υπηρεσίες που εξυπηρετούν τους πολίτες που κατοικούν και τις επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στη συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. (Gorton, 2023) Αποτελούν ποσοστό του φορολογητέου εισοδήματος ο οποίος, συντελεστής καθορίζεται από την νομοθεσία του κράτους που πραγματοποιείται η επένδυση. Εισάγονται στον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας ως έξοδα. Λαμβάνονται ίσοι με το ακαθάριστο φορολογητέο εισόδημα, μείον τα λειτουργικά έξοδα της επιχείρησης, μείον τις αποσβέσεις, μείον τους τόκους αποπληρωμής δανείων. (Ψαράτης, 2005)

Η απόσβεση είναι μία λογιστική μέθοδος διάχυσης της αξίας ενός πραγματικού είτε πλασματικού περιουσιακού στοιχείου καθ' όλη τη διάρκεια της οικονομικής του ζωής. Η απόσβεση αντιπροσωπεύει τη

μείωση της αξίας ενός περιουσιακού στοιχείου κατά τη διάρκεια χρήσης του και δίνει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις να αποσβένουν το φορολογηθέν εισόδημά τους. (Tuonila, Investopedia, 2023) Παρά το γεγονός ότι δε λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας την επηρεάζει έμμεσα καθώς, ο φόρος που αποδίδεται εν τέλει είναι χαμηλότερος. Οι αποσβέσεις υπολογίζονται με βάση τις νομοθετικές διατάξεις του κάθε κράτους. (Ψαραύτης, 2005)

5.2 Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)

Ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR) αποτελεί ένα μέτρο αξιολόγησης υπό μελέτη επενδύσεων που ισούται με το επιτόκιο αναγωγής για την οποία, η τιμή της Καθαρής Παρούσας Αξίας των χρηματοροών καθ' όλη τη διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής της επένδυσης μηδενίζεται. (Fernando, 2024) Ισχύει ότι:

$$\text{Εάν: } i_t = i = \text{σταθερό, τότε: } NPV(i) = \sum_{t=0}^N \frac{R_t}{\prod_{k=0}^t (1+i_k)}$$

Εάν $NPV(i) = 0$, τότε: $i = IRR$

Μεταξύ πολλαπλών εξεταζόμενων επενδύσεων αυτή που εμφανίζει το μεγαλύτερο Εσωτερικό Συντελεστή Απόδοσης, προτιμάται έναντι των υπολοίπων. Γενικότερα, οι επενδύσεις που εμφανίζουν μεγάλους συντελεστές IRR είναι περισσότερο αποδοτικές καθώς, είναι δυνατό με την εμφάνιση υψηλότερου επιτοκίου αναγωγής η Καθαρή Παρούσα Αξία να διατηρείται θετική. Ωστόσο, αν και ο IRR προκύπτει από την NPV, οι δύο συντελεστές είναι τελείως ανεξάρτητοι και ενδέχεται να παρουσιάζουν αντικρουόμενα αποτελέσματα μεταξύ τους όταν αξιολογούνται δύο πιθανές επενδύσεις. Ενώ, η τιμή της NPV μπορεί να παρουσιάζει ως βέλτιστη επιλογή την πρώτη επένδυση, είναι δυνατό ο IRR να εμφανίζει τη δεύτερη λόγω εξάρτησής του από το επιτόκιο αναγωγής.

Παρόλα αυτά υπάρχουν και περιπτώσεις όπου η εφαρμογή του Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης δεν εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα είτε δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί. Αυτό συμβαίνει όταν:

- Εξισώνοντας την Καθαρή Παρούσα Αξία με το μηδέν ($NPV(i)=0$) προκύπτουν παραπάνω από μία ρίζες για το συντελεστή i . Συνεπώς, καθίσταται δυσχερής η χρήση του ως κριτήριο αξιολόγησης πιθανών επενδύσεων.
- Καθώς αποτελεί αδιάστατο συντελεστή δε λαμβάνεται υπόψη το μέγεθος της επένδυσης και του απαιτούμενου αρχικού κεφαλαίου που πρέπει να διοχετευθεί για την πραγματοποίησή της. Επομένως, χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλης κλίμακας επενδύσεις.
- Πρέπει το επιτόκιο αναγωγής να είναι σταθερό προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο συγκεκριμένος συντελεστής.

5.3 Συντελεστής Ανάκτησης Κεφαλαίου (CRF)

Ο Συντελεστής Ανάκτησης Κεφαλαίου (CRF) ισούται με την αναλογία στο παρόν σταθερών ετήσιων εσόδων εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού εύρους. (National Renewable Energy Laboratory, n.d.)

Υπολογίζεται σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$CRF = \frac{IRR(1 + IRR)^N}{(1 + IRR)^N - 1}, CRF = \frac{E}{K}$$

Όπου:

- E: Οι εισροές ανά χρονική περίοδο

- K: Το αρχικό κεφάλαιο που είναι απαραίτητο για την υλοποίηση της επένδυσης

Το συγκεκριμένο κριτήριο αξιολόγησης επενδύσεων είναι ισοδύναμο με αυτό του Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης (IRR). (Ψαρούτης, 2005) Κατά τη διαδικασία σύγκρισης πιθανών επενδύσεων, η επιλογή που εμφανίζει το μεγαλύτερο Συντελεστή Ανάκτησης Κεφαλαίου προτιμάται λόγω της χαμηλότερης ανάγκης σε χρηματικές εισροές που χρειάζονται προκειμένου να ανακτηθεί το αρχικό κεφάλαιο που προσφέρθηκε για την υλοποίηση της επένδυσης. (Twin, 2023)

5.4 Χρόνος Αποπληρωμής (PP)

Ο Χρόνος Αποπληρωμής μίας επένδυσης αποτελεί το κριτήριο που εξετάζει τη χρονική διάρκεια που απαιτείται ούτως ώστε, η χρηματικές εισροές μίας επένδυσης αθροιστικά να είναι ίσες με το αρχικό κεφάλαιο που επενδύθηκε για την πραγματοποίηση ενός έργου. Λαμβάνοντας το συγκεκριμένο κριτήριο ως μέσο σύγκρισης μεταξύ κάποιων επιλογών, προτιμάται η υλοποίηση μίας επένδυσης που αναμένεται να έχει το χαμηλότερο Χρόνο Αποπληρωμής.

Ωστόσο, καθώς δε λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η αξία του χρήματος μέσα στην εξεταζόμενη χρονική περίοδο και το μέγεθος της επένδυσης στο μέλλον το συγκεκριμένο κριτήριο θεωρείται μη αξιόπιστο και συνήθως δε λαμβάνεται υπόψη σε μία σύνθετη οικονομική μελέτη αξιολόγησης επενδύσεων. Παρουσιάζει σαφή αδυναμία όσον αφορά την πρόβλεψη με ακρίβεια της αναμενόμενης κερδοφορίας μίας επένδυσης επομένως, είναι προτιμότερο η βάση σύγκρισης να τεθεί με διαφορετικούς οικονομικούς συντελεστές. (Ψαρούτης, 2005)

5.5 Συντελεστής Κερδοφορίας (PI)

Ο Συντελεστής Κερδοφορίας είναι ο λόγος της παρούσας αξίας των εισροών και της παρούσας αξίας των εκροών μίας επένδυσης. Αποτελεί ένα εργαλείο προσδιορισμού των οικονομικών οφελών που αποδίδονται για κάθε μονάδα χρήματος που επενδύεται, με τις χρηματοροές ανατοκισμένες στο παρόν. Ο Συντελεστής Κερδοφορίας είναι ένα μέτρο αξιολόγησης της ελκυστικότητας μίας εξεταζόμενης επένδυσης για την απόφαση υλοποίησης ή μη ενός έργου.

Ο τύπος για τον υπολογισμό του Συντελεστή Κερδοφορίας είναι ο ακόλουθος:

$$PP = \frac{PV}{II}, \quad PP = \frac{(NPV + II)}{II}$$

Όπου:

- II (Initial Investment): Το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης.
- PV (Present Value of future cashflows): Η παρούσα αξία των μελλοντικών εισροών όπου, υπολογίζεται από την σχέση: $PV = NPV + II$

Ο Συντελεστής Κερδοφορίας μπορεί να λάβει μόνο θετικές τιμές και ειδικότερα σε περιπτώσεις που είναι μεγαλύτερος από 1 ($PP > 1$) η επένδυση αναμένεται να αποδώσει κέρδος ενώ, εάν είναι μικρότερος από αυτή την τιμή ($PP < 1$) τότε, οι εισροές θα είναι χαμηλότερες από το αρχικό κεφάλαιο. Συνεπώς, η οριακή τιμή του Συντελεστή Κερδοφορίας είναι ίση με 1 ($PP = 1$) όπου, η υλοποίηση της εξεταζόμενης επένδυσης δε θα αποδώσει ούτε κέρδη ενώ, δε θα προκαλέσει ούτε ζημιές. (Wall Street Prep, n.d.)

Όταν γίνεται σύγκριση μεταξύ επενδύσεων, αυτή η οποία, θα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή PI θα είναι και η περισσότερο συμφέρουσα. Παρά το γεγονός, ότι ο εν λόγω συντελεστής είναι όμοιος με την Καθαρή Παρούσα Αξία ενδέχεται μία οικονομική μελέτη να παρουσιάσει αντικρουόμενα αποτελέσματα. Σε σύγκριση μεταξύ δύο επενδύσεων όπου, η πρώτη παρουσιάζει μεγαλύτερη Καθαρή Παρούσα Αξία και η

δεύτερη, αντιστοίχως, μεγαλύτερο Συντελεστή Κερδοφορίας, η βέλτιστη θα είναι η τελευταία. (Chen, Investopedia, 2024)

6 Μελέτη εφικτότητας χρήσης πράσινης μεθανόλης ως καύσιμο σε πλοία με βάση την ανάλυση κύκλου ζωής

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η μελέτη εφικτότητας. Καθώς, εξετάζεται η ανάλυση του κύκλου ζωής της πράσινης μεθανόλης η οικονομική μελέτη θα γίνει σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο εξετάζεται η παραγωγή πράσινης μεθανόλης από μεθόδους που αναλύθηκαν ανωτέρω σε προηγούμενα εδάφια, με πρώτες ύλες τη βιομάζα, τα αστικά λύματα, το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο. Έπειτα γίνεται οικονομική εκτίμηση ναυπήγησης και λειτουργίας δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης με εγκατεστημένο κινητήρα διπλού καυσίμου χρήσης πράσινης μεθανόλης ως κύριο καύσιμο από ναυτιλιακή εταιρεία. Τέλος, γίνεται οικονομική αξιολόγηση ναύλωσης του συγκεκριμένου πλοίου σε άλλη εταιρεία που αναλαμβάνει τη μεταφορά πράσινης μεθανόλης από σημεία στα οποία, γίνεται η παρασκευή της είτε για χρήση εντός της ναυτιλίας είτε για την αξιοποίησή της από τρίτες βιομηχανίες.

6.1 Στάδιο παραγωγής πράσινης μεθανόλης

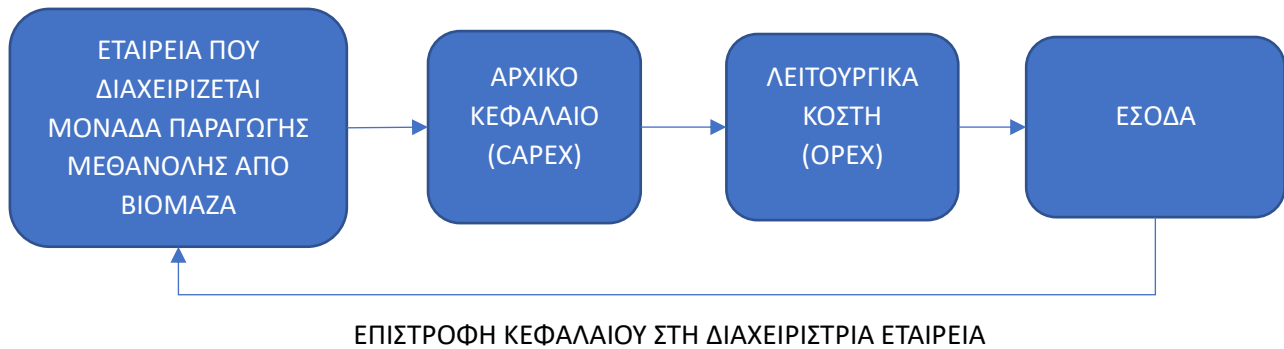
Οι διαδικασίες παραγωγής πράσινης μεθανόλης είναι αρκετά σύνθετες και απαιτητικές τεχνολογικά καθώς, αποτελούν καινοτόμες λύσεις με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα κι ακόμη δεν παρουσιάζουν ευρεία εφαρμογή στην αγορά. Η συλλογή των δεδομένων για το αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται, τα λειτουργικά κόστη, το κόστος των πρώτων υλών και η πίστωση που αποδίδεται στον παραγωγό ανάλογα με την τιμή του διοξειδίου του άνθρακα σε συνάρτηση με την ενεργειακή απόδοση των μεθόδων που αναλύονται παρακάτω, προσφέρουν τη δυνατότητα να αναλυθούν διεξοδικά τα κόστη και τα οφέλη που λαμβάνονται από μία σχετική επένδυση. Τα δεδομένα λήφθηκαν από το σύγγραμμα “Innovation Outlook: Renewable Methanol” της (IRENA, 2021).

Γίνεται εκτίμηση του κόστους παραγωγής πράσινης μεθανόλης σε Αμερικανικά δολάρια ανά τόνο παραγομένου ωφέλιμου προϊόντος (USD/t) με τέσσερις συνολικά μεθόδους που εμπίπτουν στις κατηγορίες παραγωγής “βιομεθανόλης” και “e-μεθανόλης”, που αναλύονται ακολούθως ως σενάριο 1 και 2, αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται εκτίμηση των χρηματικών εκροών σε βάθος 20ετίας (2026-2045) στις οποίες, το αρχικό κεφάλαιο που πρέπει να καταβληθεί για την υλοποίηση της συγκεκριμένης επένδυσης διαιρείται στα δύο πρώτα έτη (2024-2025) κατασκευής του έργου. Κατά τη διάρκεια των ετών 2024-2025 καθώς, το έργο είναι υπό κατασκευή δεν αποφέρει κέρδη και ζημίες, με τα λειτουργικά κόστη και τα έσοδα να υπολογίζονται για το διάστημα 2026-2045. Επιπλέον, γίνεται προσδιορισμός των απαιτούμενων εσόδων που απαιτείται να έχει η συγκεκριμένη μονάδα παραγωγής ούτως ώστε, η Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης να είναι μηδενική (NPV=0). Ωστόσο, για να έχει οφέλη για τον επενδυτή η πραγματοποίηση του συγκεκριμένου έργου, προσδιορίζονται οι χρηματικές εισροές με μία προσαύξηση 15% των εσόδων σε σχέση με τις εισροές που αποδίδουν μηδενική Καθαρή Παρούσα Αξία.

6.1.1 Σενάριο 1°

Σε αυτό το σενάριο αναλύεται η μέθοδος παραγωγής “βιομεθανόλης” με διαφορετικές πρώτες ύλες. Εξετάζονται τα κόστη και τα οφέλη που θα αποδώσει η παραγωγή μεθανόλης από βιομάζα και αστικά λύματα, αντίστοιχα. Παρατίθενται αναλυτικοί πίνακες με το κόστος του αρχικού κεφαλαίου για την υλοποίηση κάθε μονάδας παραγωγής και τα συνολικά λειτουργικά κόστη. Η διαδικασία που ακολουθείται παρουσιάζεται συνοπτικά στα σχήματα που ακολουθούν:

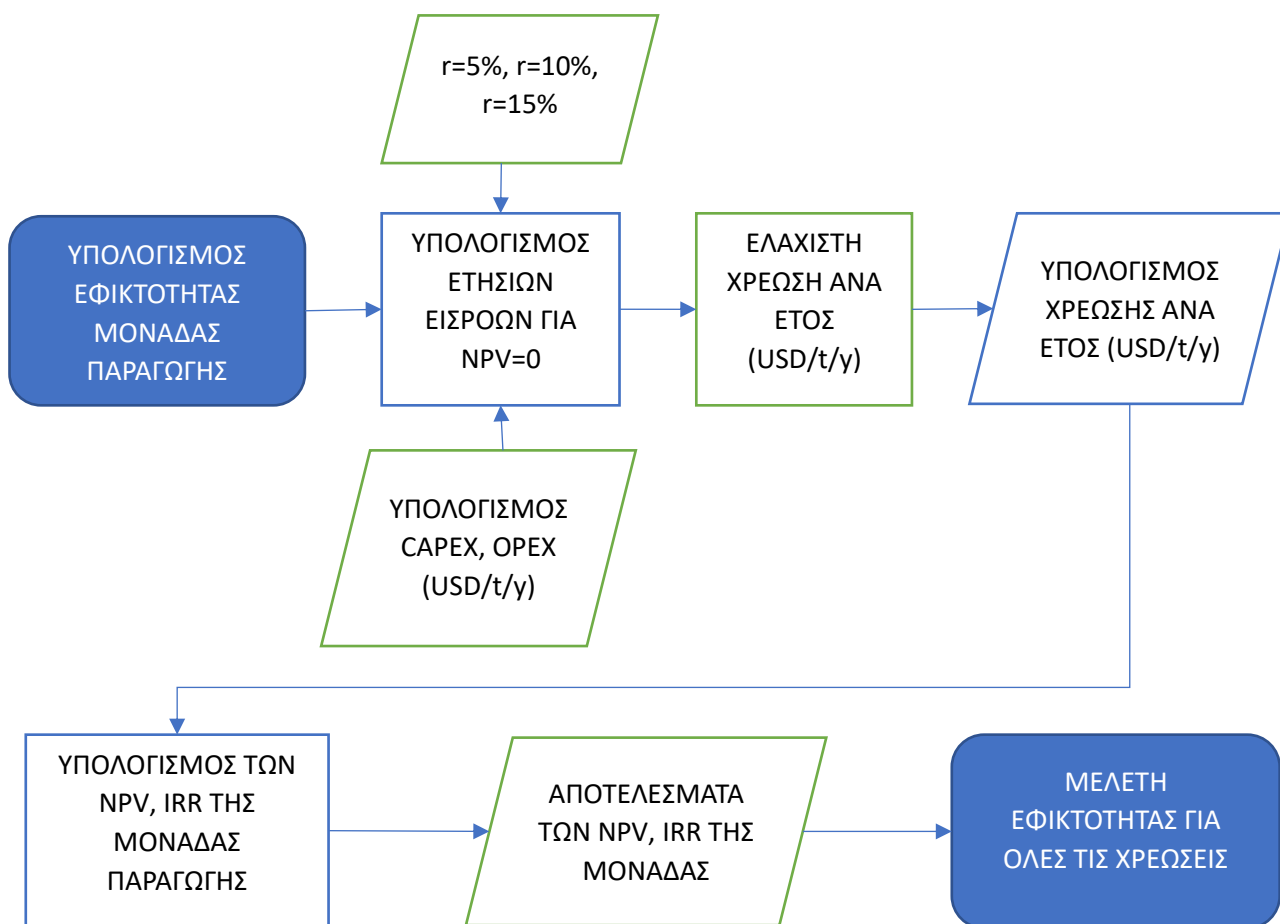
Σενάριο 1: Εταιρείες που διαχειρίζονται και κατέχουν μονάδες παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα και αστικά λύματα



Εικόνα Α.Ι: Γενική ιδέα μελέτης 1^{ου} σεναρίου για μονάδα παραγωγής πράσινης μεθανόλης από βιομάζα



Εικόνα Α.ΙΙ: Γενική ιδέα μελέτης 1^{ου} σεναρίου για μονάδα παραγωγής πράσινης μεθανόλης από βιομάζα



Εικόνα Α.ΙΙΙ: Αναλυτικό σχεδιάγραμμα ροής της μελέτης εφικτότητας μονάδων παραγωγής βιομεθανόλης

Αρχικά, για τις δύο περιπτώσεις μονάδων παραγωγής βιομεθανόλης που εξετάζονται στο συγκεκριμένο εδάφιο και της γενικής ιδέας της μελέτης που απαιτείται να γίνει και παρουσιάζεται ανωτέρω στις Εικόνες Α.Ι, Α.ΙΙ, Α.ΙΙΙ, είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί το αρχικό κεφάλαιο και τα λειτουργικά κόστη που απαιτούνται για την υλοποίηση και λειτουργία μίας τέτοιας επένδυσης. Έπειτα, η περαιτέρω ανάλυση που διεξάγεται για τον υπολογισμό των οικονομικών κριτηρίων αξιολόγησης της επένδυσης όπως, αναφέρθηκε και στο 5^ο Κεφάλαιο της παρούσας τεχνικής μελέτης, γίνεται αφού προσδιοριστούν με ακρίβεια οι ετήσιες χρηματοροές για τα έτη 2024-2045.

Το απαιτούμενο αρχικό κεφάλαιο (CAPEX) για την πραγματοποίηση της επένδυσης λαμβάνεται μέσω δεδομένων που διατίθενται από το “Innovation Outlook: Renewable Methanol” της (IRENA, 2021). Καθώς, τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται από μονάδες σύνθεσης με διαφορετική χωρητικότητα σε τόνους η καθεμία ανάλυση που γίνεται παρακάτω είναι σε χρηματικές μονάδες USD/t. Πιο συγκεκριμένα το εύρος

του αρχικού κεφαλαίου για μονάδες παραγωγής βιομεθανόλης που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη είτε βιομάζα, είτε αστικά λύματα παρουσιάζεται στους ακόλουθους πίνακες:

CAPEX		
Πρώτη ύλη	Εύρος κόστους (USD/t)	Μέση τιμή (USD/t)
Βιομάζα	1560 - 2220	1890
MSW	2000 - 2780	2390

Πίνακας 10: Εκλογή αρχικού κεφαλαίου (CAPEX) μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης (IRENA, 2021)

Ως αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης των μονάδων παραγωγής βιομεθανόλης λαμβάνεται η μέση τιμή του εύρους και στις δύο περιπτώσεις ενώ, το κόστος αυτό καταβάλλεται στο διάστημα των δύο πρώτων ετών (2024-2025), σε ισόποσες δόσεις, που συμπίπτει με την απαιτούμενη χρονική περίοδο υλοποίησης του έργου.

Αναφορικά με τα λειτουργικά κόστη (OPEX) της επένδυσης, προσδιορίζονται στη συνέχεια σε χρηματικές μονάδες USD/t/y και τα ποσά που λαμβάνονται από τον συγκεντρωτικό πίνακα 12 αποτελούν τα λειτουργικά κόστη της μελέτης που διεξάγεται για τα έτη 2026-2045. Στα OPEX περιλαμβάνονται διάφορες κατηγορίες εξόδων όπως οι ακόλουθες: (IRENA, 2021)

- Κόστη που σχετίζονται με τις πρώτες ύλες επί του έργου
- Πρώτες ύλες
- Εργασιακά κόστη
- Ενεργειακό κόστος
- Διαχείριση έργου
- Συντήρηση μονάδας παραγωγής κι επισκευές
- Ανταλλακτικά
- Διαχείριση και απόρριψη παραπροϊόντων

Στον Πίνακα 11 που παρατίθεται ακολούθως παρουσιάζεται το εύρος του λειτουργικού κόστους των μονάδων παραγωγής βιομεθανόλης με πρώτη ύλη τη βιομάζα και τα αστικά λύματα. Το OPEX λαμβάνεται ως 5% και 10% του αντίστοιχου CAPEX της μονάδας. Συνεπώς, με διπλή γραμμική παρεμβολή και στις δύο περιπτώσεις για τα CAPEX που ελήφθησαν ανωτέρω, αλλά και για μέση τιμή του OPEX ίση με το 7.5% του αρχικού κεφαλαίου, εκλέγονται τα δύο ποσά για την κάθε περίπτωση που παρατίθενται στην τελευταία γραμμή.

Κόστη	Βιομάζα		MSW	
	Εύρος κόστους (USD/t)	Μέση τιμή (USD/t)	Εύρος κόστους (USD/t)	Μέση τιμή (USD/t)
CAPEX	1560 - 2220	1890	2000 - 2780	2390
OPEX (5%*CAPEX)	78 - 111	94.5	100 - 139	119.5
OPEX (10%*CAPEX)	156 - 222	189	200 - 278	239
OPEX (7.5%*CAPEX)	-	141.75	-	179.25

Πίνακας 11: Εκλογή λειτουργικού κόστους (OPEX) μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης (IRENA, 2021)

Στον πίνακα 12 παρουσιάζεται ο συνολικός πίνακας των λειτουργικών εσόδων, συν το κόστος των πρώτων υλών, μείον την πίστωση άνθρακα που λαμβάνει η μονάδα παραγωγής μεθανόλης καθώς, με την παραγωγή 1 t βιομεθανόλης παρουσιάζεται μείωση σε εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα κατά 1.64 t CO₂-eq.

Η απόδοση της ενεργειακής μετατροπής πρώτων υλών για τη βιομάζα και τα αστικά λύματα (MSW) διαμορφώνεται σε ποσοστό ίσο με 70 % κι 60 %, αντίστοιχα και το κόστος των πρώτων υλών λαμβάνεται ίσο με 8.25 USD/GJ. (IRENA, 2021)

OPEX (USD/t)	Βιομάζα	MSW
Απόδοση μετατροπής πρ. υλών	70%	60%
OPEX (χωρίς πρώτες ύλες)	141.75	179.25
Πρώτες ύλες (USD 8.25/GJ)	234.5	274
USD 100/t CO ₂	-164	-164
SUM (USD/t)	212.25	289.25

Πίνακας 12: Συγκεντρωτικός πίνακας λειτουργικού κόστους (OPEX) σε USD/t/γ μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης (IRENA, 2021)

Ύστερα, ακολουθεί η διαδικασία εκπόνησης της μελέτης του πρώτου σεναρίου.

Year	MSW	
	CAPEX (USD/t)	OPEX (USD/t)
2024	1195	0
2025	1195	0
2026	0	289.25
2027	0	289.25
2028	0	289.25
2029	0	289.25
2030	0	289.25
2031	0	289.25
2032	0	289.25
2033	0	289.25
2034	0	289.25
2035	0	289.25
2036	0	289.25
2037	0	289.25
2038	0	289.25
2039	0	289.25
2040	0	289.25
2041	0	289.25
2042	0	289.25
2043	0	289.25
2044	0	289.25
2045	0	289.25

Πίνακας 13: Χρηματικές εκροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW για το χρονικό διάστημα 2024-2045

Βιομάζα		
Year	CAPEX (USD/t)	OPEX (USD/t)
2024	945	0
2025	945	0
2026	0	212.25
2027	0	212.25
2028	0	212.25
2029	0	212.25
2030	0	212.25
2031	0	212.25
2032	0	212.25
2033	0	212.25
2034	0	212.25
2035	0	212.25
2036	0	212.25
2037	0	212.25
2038	0	212.25
2039	0	212.25
2040	0	212.25
2041	0	212.25
2042	0	212.25
2043	0	212.25
2044	0	212.25
2045	0	212.25

Πίνακας 14: Χρηματικές εκροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα για το χρονικό διάστημα 2024-2045

Με τη χρήση του κριτηρίου της Καθαρής Παρούσας Αξίας, προσδιορίζονται οι ελάχιστες ετήσιες χρηματικές εισροές ούτως ώστε, να ισχύει $NPV=0$ και να είναι οικονομικά συμφέρουσα κι εφικτή η υλοποίηση του συγκεκριμένου έργου. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιτοκίων αναγωγής, για $r=5\%$, $r=10\%$, $r=15\%$. Όπως επισημαίνεται και παραπάνω καθώς, το έργο είναι υπό κατασκευή τα έτη 2024-2025 δεν παρουσιάζουν κέρδη και ζημίες επομένως, τόσο τα λειτουργικά κόστη όσο και οι ετήσιες εισροές αφορούν τα έτη 2026-2045. Αναλυτικότερα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες που ακολουθούν:

MSW	
Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	
r = 5%	485.824278
r = 10%	584.0149284
r = 15%	699.7171578

Πίνακας 15: Ελάχιστες ετήσιες εισροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW για το χρονικό διάστημα 2026-2045

Βιομάζα	
Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	
r = 5%	367.699952
r = 10%	445.3486254
r = 15%	536.8453675

Πίνακας 16: Ελάχιστες ετήσιες εισροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα για το χρονικό διάστημα 2026-2045

Έπειτα από τον προσδιορισμό των ελάχιστων απαιτούμενων χρεώσεων πώλησης βιομεθανόλης ανά τόνο προκειμένου να είναι οικονομικά εφικτή η υλοποίηση της επένδυσης και να ισχύει $NPV=0$ γίνεται και ο υπολογισμός των πραγματικών χρεώσεων. Οι πραγματικές ετήσιες εισροές θεωρούνται κατά 15% αυξημένες σε σχέση με τις απαιτούμενες και γίνεται ο υπολογισμός για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιτοκίου αναγωγής ($r=5\%$, $r=10\%$, $r=15\%$) για την καθεμία από τις δύο περιπτώσεις μονάδων παραγωγής βιομεθανόλης. Τέλος, για την αξιολόγηση της συγκεκριμένης επένδυσης χρησιμοποιούνται τα οικονομικά κριτήρια της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) και του Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης (IRR) βάσει των ετήσιων ταμειακών ροών που διαμορφώνονται κατά το διάστημα 2024-2045.

MSW		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	485.824278	558.6979197
2027	485.824278	558.6979197
2028	485.824278	558.6979197
2029	485.824278	558.6979197
2030	485.824278	558.6979197
2031	485.824278	558.6979197
2032	485.824278	558.6979197
2033	485.824278	558.6979197
2034	485.824278	558.6979197
2035	485.824278	558.6979197
2036	485.824278	558.6979197
2037	485.824278	558.6979197
2038	485.824278	558.6979197
2039	485.824278	558.6979197
2040	485.824278	558.6979197
2041	485.824278	558.6979197
2042	485.824278	558.6979197
2043	485.824278	558.6979197
2044	485.824278	558.6979197
2045	485.824278	558.6979197

Πίνακας 17: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW, με επιτόκιο αναγωγής 5%

Βιομάζα		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	367.699952	422.8549448
2027	367.699952	422.8549448
2028	367.699952	422.8549448
2029	367.699952	422.8549448
2030	367.699952	422.8549448
2031	367.699952	422.8549448
2032	367.699952	422.8549448
2033	367.699952	422.8549448
2034	367.699952	422.8549448
2035	367.699952	422.8549448
2036	367.699952	422.8549448
2037	367.699952	422.8549448
2038	367.699952	422.8549448
2039	367.699952	422.8549448
2040	367.699952	422.8549448
2041	367.699952	422.8549448
2042	367.699952	422.8549448
2043	367.699952	422.8549448
2044	367.699952	422.8549448
2045	367.699952	422.8549448

Πίνακας 18: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα, με επιτόκιο αναγωγής 5%

MSW		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	584.0149284	671.6171676
2027	584.0149284	671.6171676
2028	584.0149284	671.6171676
2029	584.0149284	671.6171676
2030	584.0149284	671.6171676
2031	584.0149284	671.6171676
2032	584.0149284	671.6171676
2033	584.0149284	671.6171676
2034	584.0149284	671.6171676
2035	584.0149284	671.6171676
2036	584.0149284	671.6171676

2037	584.0149284	671.6171676
2038	584.0149284	671.6171676
2039	584.0149284	671.6171676
2040	584.0149284	671.6171676
2041	584.0149284	671.6171676
2042	584.0149284	671.6171676
2043	584.0149284	671.6171676
2044	584.0149284	671.6171676
2045	584.0149284	671.6171676

Πίνακας 19: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW, με επιτόκιο αναγωγής 10%

Βιομάζα		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	445.3486254	512.1509192
2027	445.3486254	512.1509192
2028	445.3486254	512.1509192
2029	445.3486254	512.1509192
2030	445.3486254	512.1509192
2031	445.3486254	512.1509192
2032	445.3486254	512.1509192
2033	445.3486254	512.1509192
2034	445.3486254	512.1509192
2035	445.3486254	512.1509192
2036	445.3486254	512.1509192
2037	445.3486254	512.1509192
2038	445.3486254	512.1509192
2039	445.3486254	512.1509192
2040	445.3486254	512.1509192
2041	445.3486254	512.1509192
2042	445.3486254	512.1509192
2043	445.3486254	512.1509192
2044	445.3486254	512.1509192
2045	445.3486254	512.1509192

Πίνακας 20: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα, με επιτόκιο αναγωγής 10%

MSW		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	699.7171578	804.6747315
2027	699.7171578	804.6747315
2028	699.7171578	804.6747315
2029	699.7171578	804.6747315
2030	699.7171578	804.6747315
2031	699.7171578	804.6747315
2032	699.7171578	804.6747315
2033	699.7171578	804.6747315
2034	699.7171578	804.6747315
2035	699.7171578	804.6747315
2036	699.7171578	804.6747315
2037	699.7171578	804.6747315
2038	699.7171578	804.6747315
2039	699.7171578	804.6747315
2040	699.7171578	804.6747315
2041	699.7171578	804.6747315
2042	699.7171578	804.6747315
2043	699.7171578	804.6747315
2044	699.7171578	804.6747315
2045	699.7171578	804.6747315

Πίνακας 21: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW, με επιτόκιο αναγωγής 15%

Βιομάζα		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	536.8453675	617.3721726
2027	536.8453675	617.3721726
2028	536.8453675	617.3721726
2029	536.8453675	617.3721726
2030	536.8453675	617.3721726
2031	536.8453675	617.3721726
2032	536.8453675	617.3721726
2033	536.8453675	617.3721726
2034	536.8453675	617.3721726
2035	536.8453675	617.3721726
2036	536.8453675	617.3721726

2037	536.8453675	617.3721726
2038	536.8453675	617.3721726
2039	536.8453675	617.3721726
2040	536.8453675	617.3721726
2041	536.8453675	617.3721726
2042	536.8453675	617.3721726
2043	536.8453675	617.3721726
2044	536.8453675	617.3721726
2045	536.8453675	617.3721726

Πίνακας 22: Ετήσιες εισροές από τη χρήση μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα, με επιτόκιο αναγωγής 15%

Έπειτα, με τη άθροιση των ετήσιων εισροών κι εκροών για την κάθε περίπτωση από αυτές που αναλύονται είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι ετήσιες χρηματοροές της επένδυσης και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, να γίνει η αξιολόγησή της με βάση τα οικονομικά κριτήρια που επισημάνθηκαν παραπάνω.

MSW			
	Συνολικές χρηματοροές (USD/t)		
Έτος	5%	10%	15%
2024	-1195	-1195	-1195
2025	-1195	-1195	-1195
2026	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2027	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2028	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2029	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2030	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2031	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2032	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2033	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2034	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2035	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2036	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2037	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2038	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2039	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2040	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2041	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2042	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2043	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2044	269.4479197	382.3671676	515.4247315
2045	269.4479197	382.3671676	515.4247315

Πίνακας 23: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από MSW

Βιομάζα			
	Συνολικές χρηματοροές (USD/t)		
Έτος	5%	10%	15%
2024	-945	-945	-945
2025	-945	-945	-945
2026	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2027	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2028	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2029	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2030	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2031	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2032	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2033	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2034	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2035	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2036	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2037	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2038	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2039	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2040	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2041	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2042	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2043	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2044	210.6049448	299.9009192	405.1221726
2045	210.6049448	299.9009192	405.1221726

Πίνακας 24: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές μονάδας παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα

Ακολούθως, προσδιορίζονται οι συντελεστές NPV, IRR της επένδυσης χρησιμοποιώντας ως δεδομένο της παραπάνω χρηματοροές για καθεμία περίπτωση.

MSW		
R	NPV (USD/t)	IRR
5%	864.92	8.80%
10%	678.01	13.84%
15%	571.27	19.09%

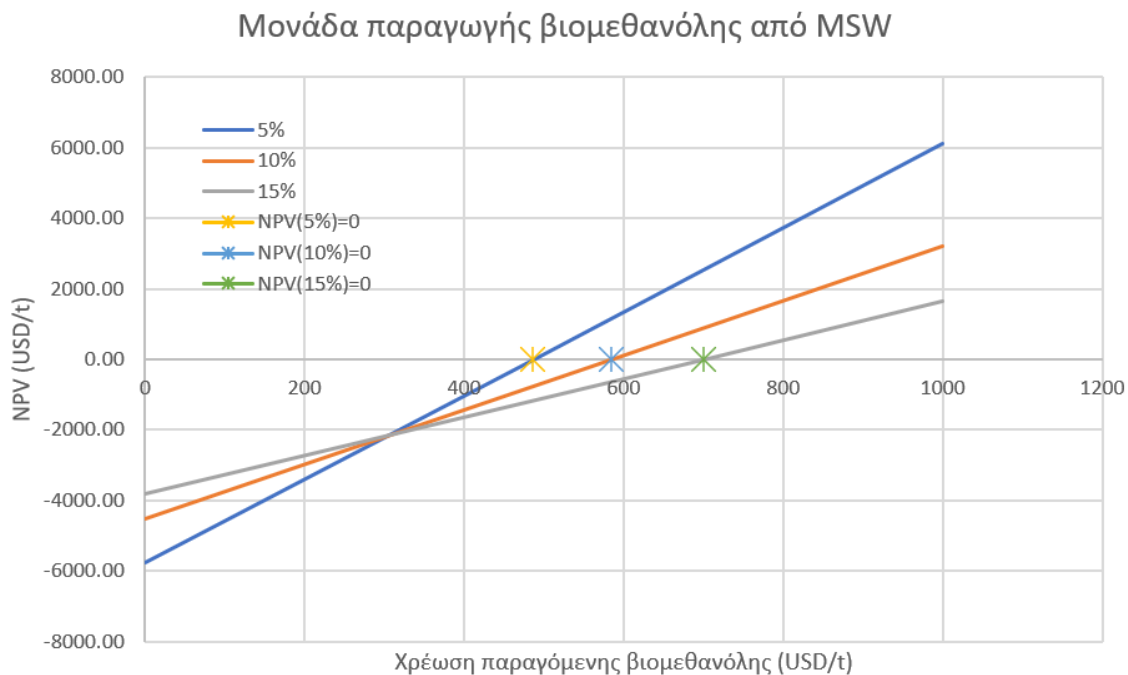
Πίνακας 25: Τελικές τιμές NPV, IRR

Βιομάζα		
R	NPV (USD/t)	IRR
5%	654.62	8.65%
10%	517.02	13.71%
15%	438.30	18.97%

Πίνακας 26: Τελικές τιμές NPV, IRR

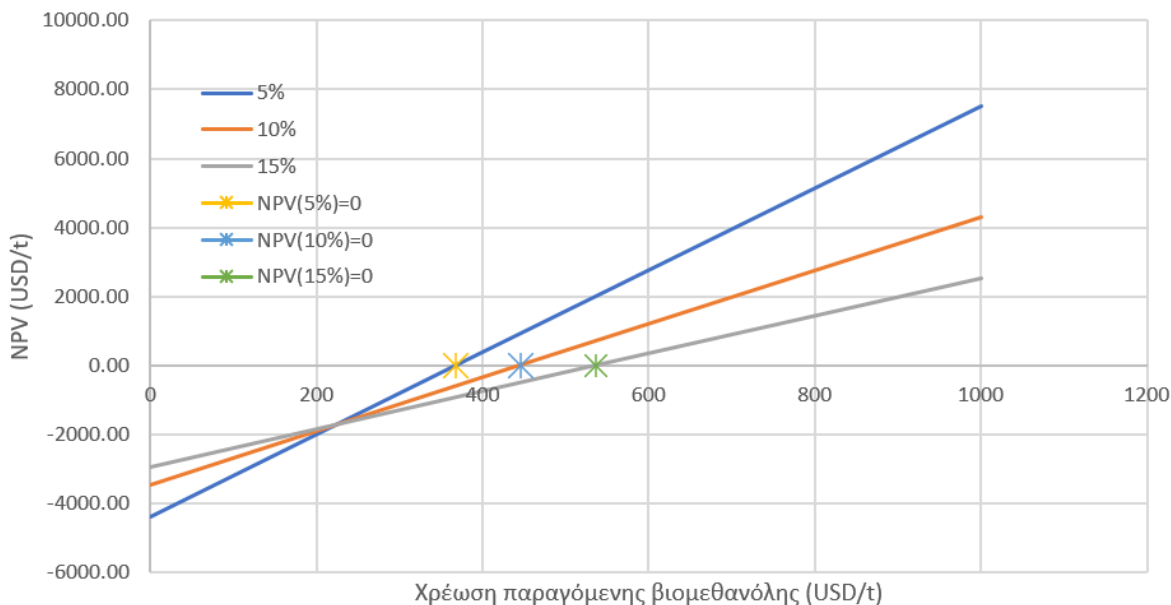
Βάσει των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται για τις τιμές των NPV, IRR που παρουσιάζονται στους Πίνακες 25, 26, παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις που αναλύονται για αυξανόμενο επιτόκιο αναγωγής η τιμή της NPV είναι χαμηλότερη ενώ, ο IRR είναι μεγαλύτερος. Αυτό εξηγείται καθώς, για μεγαλύτερες τιμές του επιτοκίου αναγωγής αναμένεται ο IRR να είναι αυξημένος. Ωστόσο, παρατηρείται ότι κατά την αύξηση του επιτοκίου αναγωγής οι διαφορές μεταξύ αυτού και του IRR μειώνονται, δηλαδή, από τις τιμές του Πίνακα 25, η διαφορά ($r=5\%$ και $IRR=8.8\%$) είναι μεγαλύτερη από ($r=10\%$ και $IRR=13.84\%$) και ($r=15\%$ και $IRR=19.09\%$). Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα που λαμβάνονται και στην περίπτωση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 26. Επιπλέον της τελευταίας συνθήκης με την αύξηση των εσόδων να είναι ίδια και για τις τρεις περιπτώσεις επιτοκίων αναγωγής, η διαφοράς στον NPV φθίνουν.

Τέλος, παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα τα αποτελέσματα των τιμών της NPV σε χρηματικές μονάδες USD/t για ένα ευρώς χρέωσης της παραγόμενης μεθανόλης από 0 έως 1000 USD/t για τις δύο περιπτώσεις που αναλύθηκαν προηγουμένως και για επιτόκια αναγωγής 5%, 10% και 15%.



Διάγραμμα 18: Επίδραση από τη χρέωση της παραγόμενης βιομεθανόλης στην NPV

Μονάδα παραγωγής βιομεθανόλης από βιομάζα

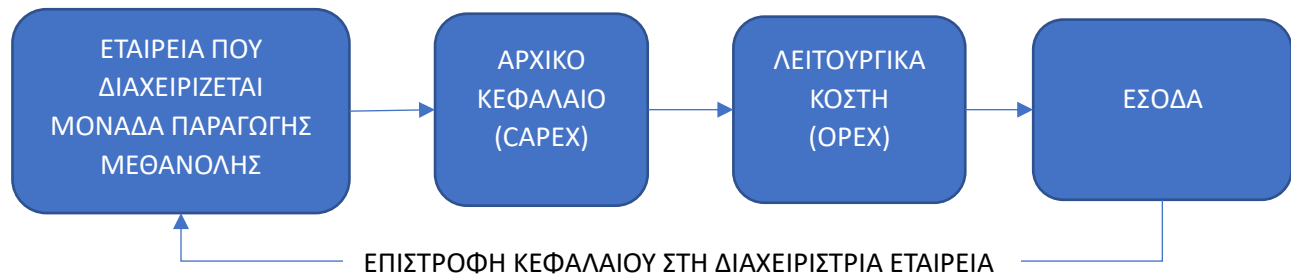


Διάγραμμα 19: Επίδραση από τη χρέωση της παραγόμενης βιομεθανόλης στην NPV

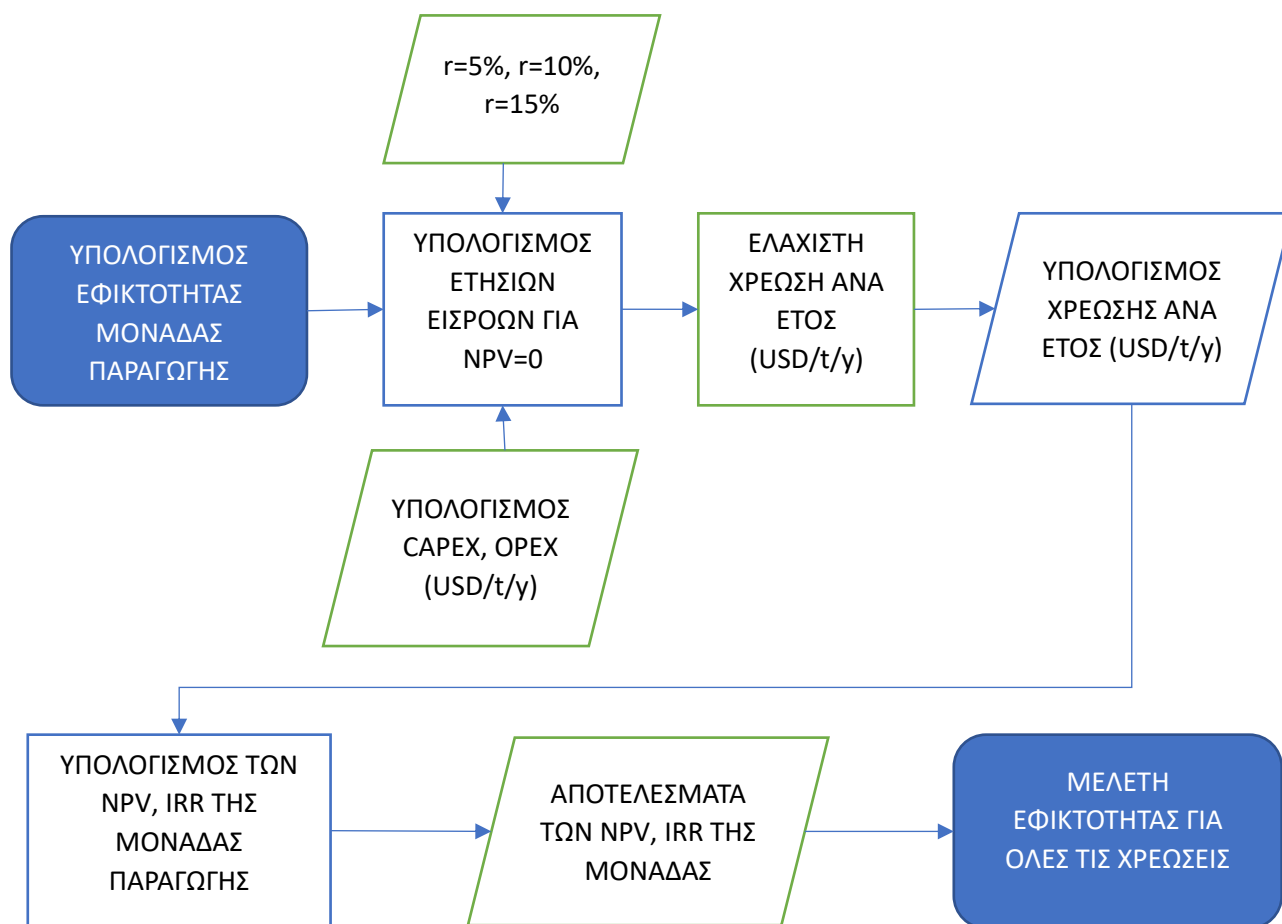
6.1.2 Σενάριο 2°

Κατά το 2° σενάριο μελετάται η δυνατότητα υλοποίησης και λειτουργίας μονάδας παραγωγής “e-μεθανόλης” από οικονομικής σκοπιάς. Η ανάλυση γίνεται για την παραγωγή μεθανόλης μέσω δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα και πράσινου υδρογόνου προερχομένου από ηλεκτρόλυση που πραγματοποιείται με τη βοήθεια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εξετάζονται οι δύο περιπτώσεις όπου, η δέσμευση του CO₂ μπορεί να γίνεται είτε απευθείας από τον ατμοσφαιρικό αέρα, είτε από βιομηχανικές μονάδες με σημαντικό αποτύπωμα άνθρακα. Καθώς, η διαφορά των δύο περιπτώσεων έγκειται μόνο στην πηγή από την οποία παρασκευάζεται το διοξείδιο του άνθρακα θα γίνει ενιαία ανάλυση, με τις διαφοροποιήσεις να εντοπίζονται στο λειτουργικό κόστος της μονάδας παραγωγής και το αρχικό κεφάλαιο να διατηρείται ίδιο. Αρχικά, παρατίθενται πίνακες που παρουσιάζουν με αναλυτικό τρόπο τα κόστη που απαιτούνται για την υλοποίηση του συγκεκριμένου έργου με την μορφή του αρχικού κεφαλαίου και τα λειτουργικά έξοδα για τη λειτουργία και συντήρηση της εν λόγω μονάδας παραγωγής “e-μεθανόλης”. Με τα ακόλουθα σχήματα που παρουσιάζονται γίνεται εφικτή η καλύτερη αποτύπωση της διαδικασίας που εφαρμόζεται.

Σενάριο 2: Εταιρεία που διαχειρίζεται και κατέχει μονάδα παραγωγής e-μεθανόλης



Εικόνα Α.IV: Γενική ιδέα μελέτης 2^{ου} σεναρίου για μονάδα παραγωγής πράσινης μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα



Εικόνα Α.Υ: Αναλυτικό σκεδιάγραμμα ροής της μελέτης εφικτότητας μονάδας παραγωγής e-μεθανόλης

Σύμφωνα και με τη γενική ιδέα της μελέτης που αναλύεται διεξοδικά παρακάτω αρχικά, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν τα οικονομικά μεγέθη του αρχικού κεφαλαίου (CAPEX) και τα λειτουργικά κόστη (OPEX) που απαιτούνται για την υλοποίηση, τη διαχείριση και τη συντήρηση του εξεταζόμενου έργου. Η αξιολόγηση της συγκεκριμένης επένδυσης γίνεται εντός του χρονικού ορίζοντα 2024-2045. Η διάρκεια υλοποίησης της μονάδας παραγωγής μεθανόλης γίνεται στα έτη 2024-2025 συνεπώς, τα λειτουργικά κόστη και τα οικονομικά οφέλη που αποδίδει η συγκεκριμένη επένδυση είναι μηδενικά σε αυτή τη χρονική διάρκεια. Επιπλέον, το αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται για την πραγματοποίηση της εν λόγω επένδυσης μοιράζεται σε ισόποσες δόσεις τα δύο πρώτα έτη της οικονομικής ζωής του έργου (2024-2045).

Η εκλογή του απαιτούμενου αρχικού κεφαλαίου (CAPEX) για την ανέγερση μονάδας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προσδιορίζεται βάσει υπάρχοντων έργων μέσω δεδομένων που λαμβάνονται από το “Innovation Outlook: Renewable Methanol της (IRENA, 2021). Στον

ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα απαιτούμενα αρχικά κόστη που χρειάστηκαν για την υλοποίηση τέτοιων έργων σε χρηματικές μονάδες USD/t. Η τελική τιμή που λαμβάνεται για την επένδυση που μελετάται είναι η μέση τιμή των CAPEX των μονάδων παραγωγής που παρουσιάζονται στον πίνακα 27.

Μονάδα παραγωγής	CAPEX (USD/t)
Thyssenkrupp	9720
FlexMethanol (bse engineering/BASF)	3100
CRI (Norway)	2000
Swiss Liquid Future (Norway)	4170 - 4780
Μέση τιμή	4170

Πίνακας 27: Εκλογή αρχικού κεφαλαίου (CAPEX) μονάδας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα (IRENA, 2021)

Τα λειτουργικά κόστη (OPEX) της επένδυσης για τις δύο υποπεριπτώσεις που εξετάζονται παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες 28, 29. Στον πίνακα 28 εξετάζονται τα λειτουργικά κόστη που υπεισέρχονται με τη χρήση δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα από συμβατικές πηγές όπως, βιομηχανικές μονάδες ενώ στον πίνακα 29 αυτά τα οποία, προκαλούνται από τη χρήση διοξειδίου του άνθρακα με λαμβάνεται κατευθείαν από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ως μονάδα μέτρησής τους λαμβάνονται τα USD/t/y και ο χρονικός ορίζοντας υπολογισμού των OPEX λαμβάνεται η περίοδος 2026-2045 όπου, η επένδυση είναι ενεργή.

Το κόστος συντήρησης, λειτουργίας και διαχείρισης μονάδας παραγωγής πράσινης μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα λαμβάνεται περίπου ίσο με 150 USD/t, μία τιμή που κυμαίνεται μεταξύ των μονάδων παραγωγής βιομεθανόλης από MSW και βιομάζα όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 12.

Επιπλέον, ισχύει ότι για την παραγωγή 1t μεθανόλης απαιτούνται 0.188 t H₂ και 1.373 t CO₂ επομένως, το κόστος παραγωγής μεθανόλης από τις συγκεκριμένες πρώτες ύλες προκύπτει από την ακόλουθη σχέση (IRENA, 2021):

$$\text{Κόστος } CH_3OH = 0.188 * (\text{Κόστος } H_2) + 1.373 * (\text{Κόστος } CO_2)$$

Τα συνολικά κόστη παραγωγής αφορούν τη σύνθεση της μεθανόλης, τη συντήρηση, λειτουργία και διαχείριση της μονάδας παραγωγής και την πίστωση άνθρακα που λαμβάνει αυτή καθώς, με την παραγωγή 1 t πράσινης μεθανόλης με τη συγκεκριμένη μέθοδο παρασκευής η μείωση σε εκπεμπόμενο διοξείδιο του άνθρακα είναι 1.373 t-CO₂-eq.

	OPEX (USD/t)
Πράσινο H ₂	4000
CO ₂ από συμβατικές πηγές	50
Σύνθεση μεθανόλης	820.65
Διαχείριση, Λειτουργία, Συντήρηση	150
Πίστωση άνθρακα USD 100/t	-164
Σύνολο	806.65

Πίνακας 28: Εκλογή λειτουργικών εξόδων (OPEX) μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές (IRENA, 2021)

	OPEX (USD/t)
Πράσινο H ₂	4000
DAC CO ₂	450
Σύνθεση μεθανόλης	1369.85
Διαχείριση, Λειτουργία, Συντήρηση	150
Πίστωση άνθρακα USD 100/t	-164
Σύνολο	1355.85

Πίνακας 29: Εκλογή λειτουργικών εξόδων (OPEX) μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα (IRENA, 2021)

Παρακάτω αναλύεται η διαδικασία εκπόνησης της μελέτης εφικτότητας του 2^{ου} σεναρίου:

Συμβατικές Πηγές		
Year	CAPEX (USD/t)	OPEX (USD/t)
2024	2085	0
2025	2085	0
2026	0	806.65
2027	0	806.65
2028	0	806.65
2029	0	806.65
2030	0	806.65
2031	0	806.65
2032	0	806.65
2033	0	806.65
2034	0	806.65
2035	0	806.65
2036	0	806.65
2037	0	806.65
2038	0	806.65
2039	0	806.65
2040	0	806.65
2041	0	806.65
2042	0	806.65
2043	0	806.65
2044	0	806.65
2045	0	806.65

Πίνακας 30: Χρηματικές εκροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές για το χρονικό διάστημα 2024-2045

DAC		
Year	CAPEX (USD/t)	OPEX (USD/t)
2024	2085	0
2025	2085	0
2026	0	1355.85
2027	0	1355.85
2028	0	1355.85
2029	0	1355.85
2030	0	1355.85
2031	0	1355.85
2032	0	1355.85
2033	0	1355.85
2034	0	1355.85
2035	0	1355.85
2036	0	1355.85
2037	0	1355.85
2038	0	1355.85
2039	0	1355.85
2040	0	1355.85
2041	0	1355.85
2042	0	1355.85
2043	0	1355.85
2044	0	1355.85
2045	0	1355.85

Πίνακας 31: Χρηματικές εκροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα για το χρονικό διάστημα 2024-2045

Κάνοντας χρήση του κριτηρίου της Καθαρής Παρούσας Αξίας είναι δυνατό να υπολογιστούν οι ελάχιστες ετήσιες εισροές για NPV=0 ούτως ώστε, να είναι εφικτή η υλοποίηση της επένδυσης και να παρουσιάζει ουδέτερα αποτελέσματα αναφορικά με την κερδοφορία της. Λαμβάνονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιτοκίων αναγωγής, όπως και στο 1^ο σενάριο, $r=5\%$, $r=10\%$, $r=15\%$. Καθώς, η υπό εξέταση επένδυση είναι υπό κατασκευή τα έτη πρώτα δύο έτη, το συγκεκριμένο έργο δεν αποφέρει κέρδη και ζημίες. Οι ετήσιες εισροές που υπολογίζονται παρακάτω αφορούν το χρονικό διάστημα 2026-2045 κατά το οποίο, η επένδυση είναι ενεργή. Αναλυτικά φαίνονται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες:

Συμβατικές πηγές	
Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	
$r = 5\%$	1149.626878
$r = 10\%$	1320.946967
$r = 15\%$	1522.820731

Πίνακας 32: Ελάχιστες ετήσιες εισροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές για το χρονικό διάστημα 2026-2045

DAC	
Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	
r = 5%	1698.826878
r = 10%	1870.146967
r = 15%	2072.020731

Πίνακας 33: Ελάχιστες ετήσιες εισροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα για το χρονικό διάστημα 2026-2045

Αφότου έχει γίνει ο υπολογισμός των ελάχιστων απαιτούμενων ετήσιων εισροών της μονάδας παραγωγής προκειμένου να είναι οικονομικά εφικτή η επένδυση και να ισχύει ότι NPV=0 προσδιορίζονται και οι πραγματικές χρεώσεις της παραγόμενης μεθανόλης σε USD/t. Οι τελευταίες λαμβάνονται αυξημένες κατά 15% επί των ελαχίστων απαιτούμενων χρεώσεων ενώ, ο υπολογισμός πραγματοποιείται για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιτοκίων αναγωγής (r=5%, r=10%, r=15%) όπως, έγινε και ανωτέρω. Τέλος, για την αξιολόγηση της συγκεκριμένου έργου χρησιμοποιούνται τα οικονομικά κριτήρια της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV) και του Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης (IRR) για τις ετήσιες χρηματοροές που διαμορφώνονται κατά τα έτη οικονομικής ζωής της επένδυσης (2024-2045).

Συμβατικές πηγές		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	1149.626878	1322.07091
2027	1149.626878	1322.07091
2028	1149.626878	1322.07091
2029	1149.626878	1322.07091
2030	1149.626878	1322.07091
2031	1149.626878	1322.07091
2032	1149.626878	1322.07091
2033	1149.626878	1322.07091
2034	1149.626878	1322.07091
2035	1149.626878	1322.07091
2036	1149.626878	1322.07091
2037	1149.626878	1322.07091
2038	1149.626878	1322.07091
2039	1149.626878	1322.07091
2040	1149.626878	1322.07091
2041	1149.626878	1322.07091
2042	1149.626878	1322.07091
2043	1149.626878	1322.07091
2044	1149.626878	1322.07091
2045	1149.626878	1322.07091

Πίνακας 34: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές, με επιτόκιο αναγωγής 5%

DAC		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	1698.826878	1953.65091
2027	1698.826878	1953.65091
2028	1698.826878	1953.65091
2029	1698.826878	1953.65091
2030	1698.826878	1953.65091
2031	1698.826878	1953.65091
2032	1698.826878	1953.65091
2033	1698.826878	1953.65091
2034	1698.826878	1953.65091
2035	1698.826878	1953.65091
2036	1698.826878	1953.65091
2037	1698.826878	1953.65091
2038	1698.826878	1953.65091
2039	1698.826878	1953.65091
2040	1698.826878	1953.65091
2041	1698.826878	1953.65091
2042	1698.826878	1953.65091
2043	1698.826878	1953.65091
2044	1698.826878	1953.65091
2045	1698.826878	1953.65091

Πίνακας 35: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα, με επιτόκιο αναγωγής 5%

Συμβατικές πηγές		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	1320.946967	1519.089012
2027	1320.946967	1519.089012
2028	1320.946967	1519.089012
2029	1320.946967	1519.089012
2030	1320.946967	1519.089012
2031	1320.946967	1519.089012
2032	1320.946967	1519.089012
2033	1320.946967	1519.089012
2034	1320.946967	1519.089012
2035	1320.946967	1519.089012
2036	1320.946967	1519.089012

2037	1320.946967	1519.089012
2038	1320.946967	1519.089012
2039	1320.946967	1519.089012
2040	1320.946967	1519.089012
2041	1320.946967	1519.089012
2042	1320.946967	1519.089012
2043	1320.946967	1519.089012
2044	1320.946967	1519.089012
2045	1320.946967	1519.089012

Πίνακας 36: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές, με επιτόκιο αναγωγής 10%

DAC		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	1870.146967	2150.669012
2027	1870.146967	2150.669012
2028	1870.146967	2150.669012
2029	1870.146967	2150.669012
2030	1870.146967	2150.669012
2031	1870.146967	2150.669012
2032	1870.146967	2150.669012
2033	1870.146967	2150.669012
2034	1870.146967	2150.669012
2035	1870.146967	2150.669012
2036	1870.146967	2150.669012
2037	1870.146967	2150.669012
2038	1870.146967	2150.669012
2039	1870.146967	2150.669012
2040	1870.146967	2150.669012
2041	1870.146967	2150.669012
2042	1870.146967	2150.669012
2043	1870.146967	2150.669012
2044	1870.146967	2150.669012
2045	1870.146967	2150.669012

Πίνακας 37: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα, με επιτόκιο αναγωγής 10%

Συμβατικές πηγές		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	1522.820731	1751.243841
2027	1522.820731	1751.243841
2028	1522.820731	1751.243841
2029	1522.820731	1751.243841
2030	1522.820731	1751.243841
2031	1522.820731	1751.243841
2032	1522.820731	1751.243841
2033	1522.820731	1751.243841
2034	1522.820731	1751.243841
2035	1522.820731	1751.243841
2036	1522.820731	1751.243841
2037	1522.820731	1751.243841
2038	1522.820731	1751.243841
2039	1522.820731	1751.243841
2040	1522.820731	1751.243841
2041	1522.820731	1751.243841
2042	1522.820731	1751.243841
2043	1522.820731	1751.243841
2044	1522.820731	1751.243841
2045	1522.820731	1751.243841

Πίνακας 38: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές, με επιτόκιο αναγωγής 15%

DAC		
Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	0	0
2026	2072.020731	2382.823841
2027	2072.020731	2382.823841
2028	2072.020731	2382.823841
2029	2072.020731	2382.823841
2030	2072.020731	2382.823841
2031	2072.020731	2382.823841
2032	2072.020731	2382.823841
2033	2072.020731	2382.823841
2034	2072.020731	2382.823841
2035	2072.020731	2382.823841
2036	2072.020731	2382.823841

2037	2072.020731	2382.823841
2038	2072.020731	2382.823841
2039	2072.020731	2382.823841
2040	2072.020731	2382.823841
2041	2072.020731	2382.823841
2042	2072.020731	2382.823841
2043	2072.020731	2382.823841
2044	2072.020731	2382.823841
2045	2072.020731	2382.823841

Πίνακας 39: Ετήσιες εισροές από τη λειτουργία μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα, με επιτόκιο αναγωγής 15%

Ύστερα, από την άθροιση των ετήσιων εισροών κι εκροών που υπεισέρχονται με τη λειτουργία του συγκεκριμένου έργου προκύπτουν οι συνολικές ετήσιες ταμειακές ροές όπου, βάσει αυτών μπορεί να γίνει η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Συμβατικές πηγές			
Συνολικές χρηματοροές (USD/t)			
Έτος	5%	10%	15%
2024	-2085	-2085	-2085
2025	-2085	-2085	-2085
2026	515.42091	712.4390121	944.5938412
2027	515.42091	712.4390121	944.5938412
2028	515.42091	712.4390121	944.5938412
2029	515.42091	712.4390121	944.5938412
2030	515.42091	712.4390121	944.5938412
2031	515.42091	712.4390121	944.5938412
2032	515.42091	712.4390121	944.5938412
2033	515.42091	712.4390121	944.5938412
2034	515.42091	712.4390121	944.5938412
2035	515.42091	712.4390121	944.5938412
2036	515.42091	712.4390121	944.5938412
2037	515.42091	712.4390121	944.5938412
2038	515.42091	712.4390121	944.5938412
2039	515.42091	712.4390121	944.5938412
2040	515.42091	712.4390121	944.5938412
2041	515.42091	712.4390121	944.5938412
2042	515.42091	712.4390121	944.5938412
2043	515.42091	712.4390121	944.5938412
2044	515.42091	712.4390121	944.5938412
2045	515.42091	712.4390121	944.5938412

Πίνακας 40: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από συμβατικές πηγές

DAC			
	Συνολικές χρηματοροές (USD/t)		
Έτος	5%	10%	15%
2024	-2085	-2085	-2085
2025	-2085	-2085	-2085
2026	597.80091	794.8190121	1026.973841
2027	597.80091	794.8190121	1026.973841
2028	597.80091	794.8190121	1026.973841
2029	597.80091	794.8190121	1026.973841
2030	597.80091	794.8190121	1026.973841
2031	597.80091	794.8190121	1026.973841
2032	597.80091	794.8190121	1026.973841
2033	597.80091	794.8190121	1026.973841
2034	597.80091	794.8190121	1026.973841
2035	597.80091	794.8190121	1026.973841
2036	597.80091	794.8190121	1026.973841
2037	597.80091	794.8190121	1026.973841
2038	597.80091	794.8190121	1026.973841
2039	597.80091	794.8190121	1026.973841
2040	597.80091	794.8190121	1026.973841
2041	597.80091	794.8190121	1026.973841
2042	597.80091	794.8190121	1026.973841
2043	597.80091	794.8190121	1026.973841
2044	597.80091	794.8190121	1026.973841
2045	597.80091	794.8190121	1026.973841

Πίνακας 41: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές μονάδας παραγωγής μεθανόλης από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα δεσμευόμενο από την ατμόσφαιρα

Έπειτα, προσδιορίζονται οι τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης NPV, IRR που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Συμβατικές πηγές		
R	NPV (USD/t)	IRR
5%	2046.70	10.03%
10%	1533.54	14.91%
15%	1243.28	20.06%

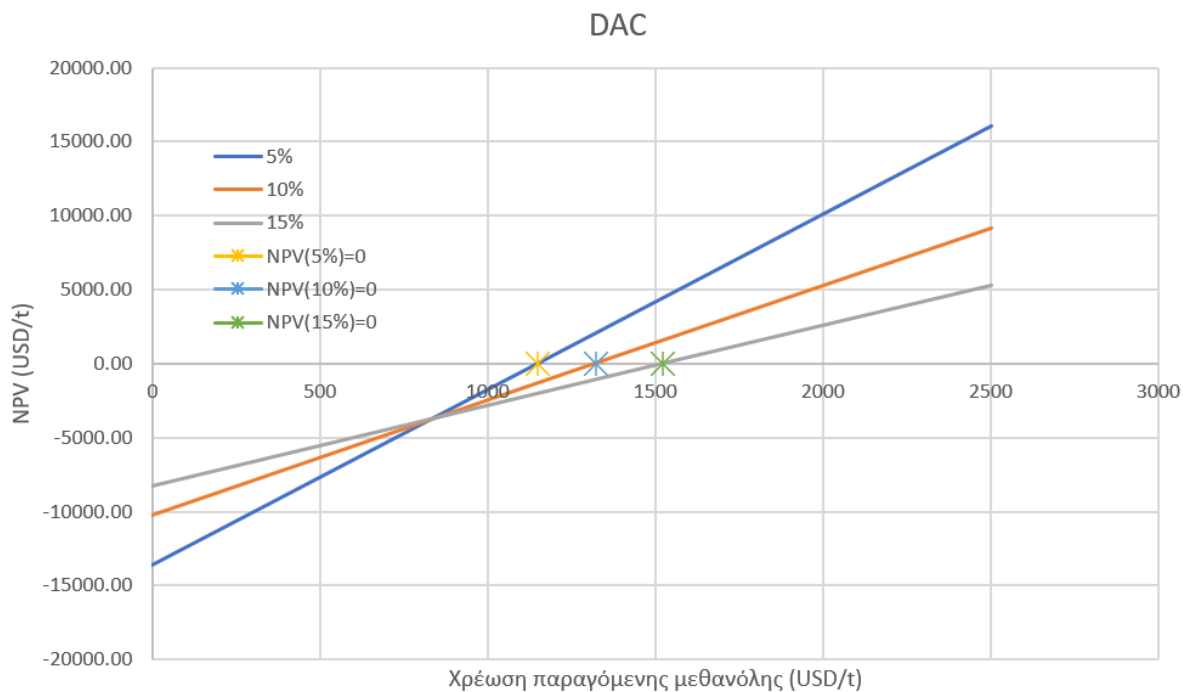
Πίνακας 42: Τελικές τιμές NPV, IRR

DAC		
R	NPV (USD/t)	IRR
5%	3024.45	12.15%
10%	2171.13	16.80%
15%	1691.67	21.78%

Πίνακας 43: Τελικές τιμές NPV, IRR

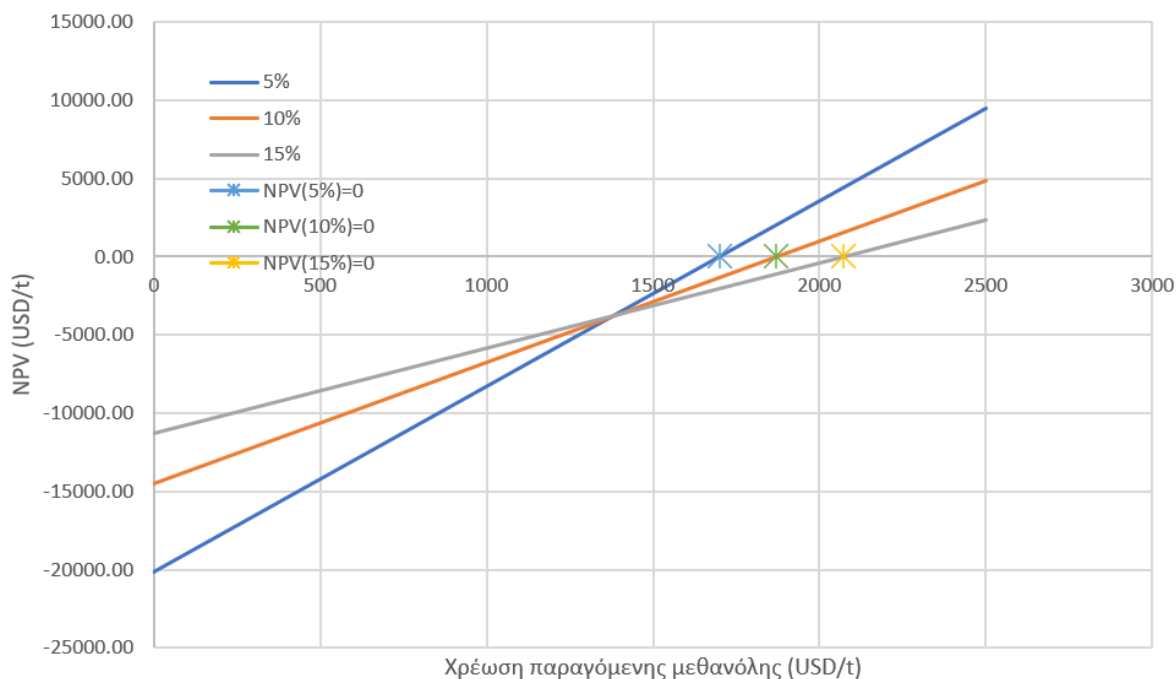
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τους πίνακες 42, 43 ο συντελεστής IRR και στις δύο περιπτώσεις είναι μεγαλύτερος όσο αυξάνει το επιτόκιο αναγωγής. Τα αντίθετα αποτελέσματα έχει ο συντελεστής NPV που μειώνεται με την αύξηση του επιτοκίου αναγωγής. Οι λόγοι για τους οποίους, συμβαίνει αυτό είναι οι ίδιοι με την ανάλογη περίπτωση του 1^{ου} σεναρίου που αναλύθηκαν διεξοδικά ανωτέρω.

Τέλος, στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών της NPV σε χρηματικές μονάδες USD/t για ένα εύρος χρέωσης της παραγόμενης μεθανόλης από 0 έως 2500 USD/t για τις δύο υποπεριπτώσεις που εξετάζονται και για επιτόκια αναγωγής 5%, 10%, 15%.



Διάγραμμα 20: Επίδραση από την χρέωση της παραγόμενης μεθανόλης στην NPV

Συμβατικές πηγές



Διάγραμμα 21: Επίδραση από την χρέωση της παραγόμενης μεθανόλης στην NPV

6.2 Στάδιο μεταφοράς και κατανάλωσης πράσινης μεθανόλης

Η μεταφορά πράσινης μεθανόλης μέσω θαλάσσης από σημεία που γίνεται η σύνθεση και παραγωγή της σε λιμάνια – κόμβους στα οποία, είναι δυνατό είτε να διατεθεί προς χρήση ως ναυτιλιακό καύσιμο είτε προς αξιοποίηση σε άλλες βιομηχανίες, είναι η οικονομικότερη από όλες τις μεθόδους. Ωστόσο, τα πλοία που τη μεταφέρουν οφείλουν να υπόκεινται σε ειδικές σχεδιάσεις και απαιτήσεις για την ασφαλή μεταφορά του συγκεκριμένου φορτίου, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση αυξημένων εκροών για τη συγκεκριμένη επένδυση. Τα πλοία που εκτελούν μεταφορές μεθανόλης ανήκουν στην κατηγορία των δεξαμενοπλοίων μεταφοράς χημικών και πετρελαιοειδών. Η ναυτιλιακή εταιρεία που στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται ότι είναι ιδιοκτήτρια – διαχειρίστρια του πλοίου που αναλύεται διαθέτει αυτό προς ναύλωση σε εταιρεία που αναλαμβάνει τη μεταφορά πράσινης μεθανόλης. Στο παρόν στάδιο της τεχνοοικονομικής μελέτης η αξιολόγηση της επένδυσης γίνεται κι από τις δύο πλευρές, της ναυτιλιακής εταιρείας και της εταιρείας που ναυλώνει το πλοίο.

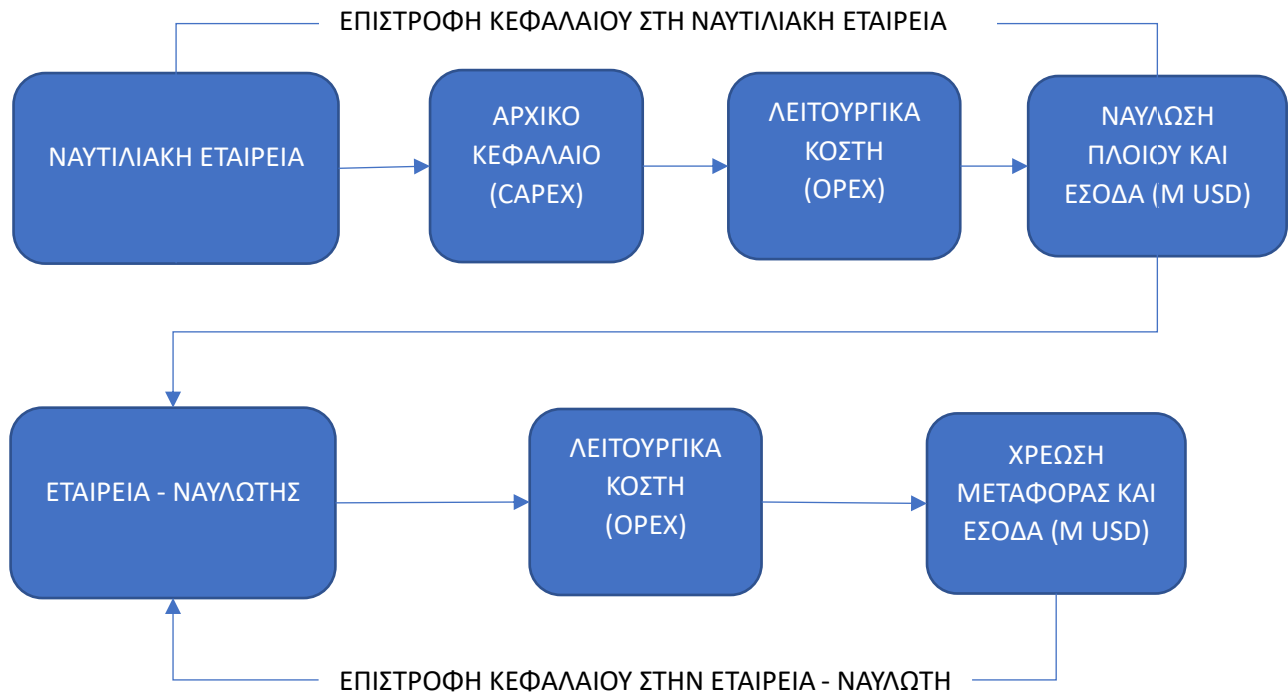
6.2.1 Διαχείριση και λειτουργία από ναυτιλιακή εταιρεία

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται δεξαμενόπλοιο μεταφοράς χημικών ουσιών τύπου MR, με καθαρό βάρος (DWT) 50000 t, βάρος κενού σκάφους (Lightship) 10000 t και κινητήρα συνολικής ισχύος 9000 kW, κατά τα πρότυπα του πλοίου μεταφοράς μεθανόλης Stena Pro Marine της εταιρείας Stena Bulk. Η συλλογή δεδομένων για την εκπόνηση της παρούσας οικονομικής αξιολόγησης που αναλύεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο έγινε από την επιστημονική μελέτη Ship Operating Costs Annual Review and Forecast 2022/23 της (Drewry, 2022) κι από στοιχεία που αντλήθηκαν σε συνεννόηση με τον Αναπλήρωτη Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Γ. Δημόπουλο.

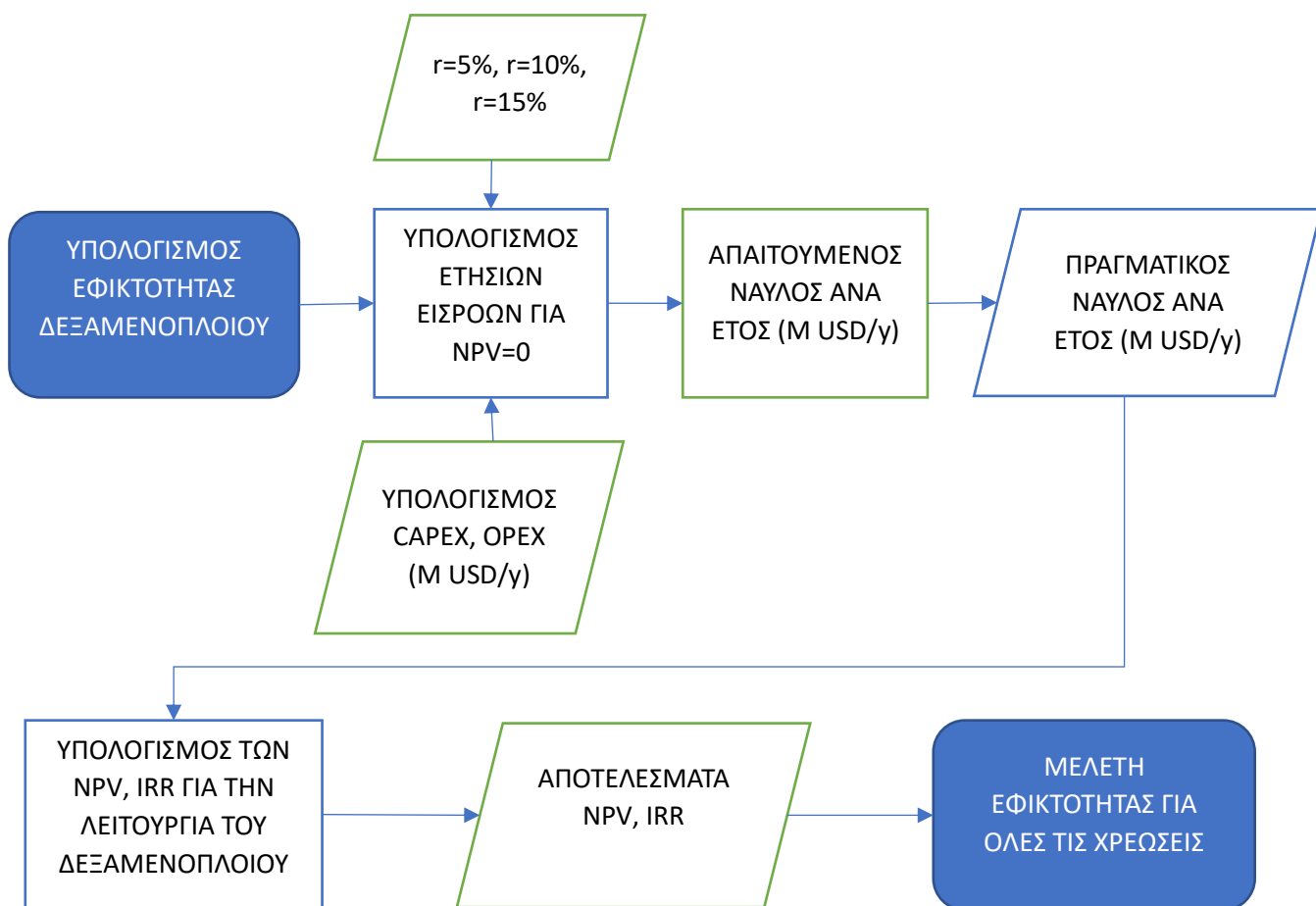
Γίνεται εκτίμηση του αρχικού κεφαλαίου (CAPEX) και των λειτουργικών εξόδων (OPEX) που απαιτούνται για τη ναυπήγηση και λειτουργία του εν λόγω δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης. Καθώς, η διάρκεια

ναυπήγησης ενός δεξαμενοπλοίου κυμαίνεται μεταξύ 9-15 μηνών (Euronav, 2017) στην παρούσα έκθεση η διάρκεια κατασκευής θεωρείται ότι γίνεται κατά το πρώτο έτος της μελέτης (2024). Το συγκεκριμένο έτος η επένδυση δεν προκαλεί ζημίες και δεν αποδίδει οφέλη συνεπώς, το OPEX και τα έσοδα από την ναύλωση αυτού είναι μηδενικά. Ενώ, το CAPEX της επένδυσης καλύπτεται από το 2024 εξ ολοκλήρου κατά τη διάρκεια ναυπήγησης του συγκεκριμένου πλοίου. Γίνεται προσδιορισμός των απαιτούμενων εσόδων προκειμένου να είναι οικονομικά εφικτή η λειτουργία του συγκεκριμένου πλοίου, δηλαδή η Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης να είναι μηδενική ($NPV=0$), υπολογίζοντας με αυτό τον τρόπο τον απαιτούμενο ναύλο (RFR) και στη συνέχεια τον πραγματικό ναύλο που θα είναι αυξημένος κατά 15% σε σχέση με τον προηγούμενο. Όπως, έγινε και στο προηγούμενο στάδιο της μελέτης εφικτότητας η οικονομική αξιολόγηση και στο παρόν εδάφιο θα πραγματοποιηθεί για επιτόκια αναγωγής 5%, 10%, 15%. Η διαδικασία που ακολουθείται παρουσιάζεται συνοπτικά στα παρακάτω σχήματα που χρησιμεύουν στην οπτικοποίηση του εξεταζόμενου προβλήματος.

Στάδιο 2: Ναυτιλιακή εταιρεία ναυπηγεί διαχειρίζεται και ναυλώνει δεξαμενόπλοιο μεταφοράς μεθανόλης σε εταιρεία - ναυλωτή



Εικόνα Β.Ι: Γενική ιδέα μελέτης εφικτότητας δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης



Εικόνα Β.Π: Αναλυτικό σκεδιάγραμμα ροής της μελέτης εφικτότητας δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης

Η αξιολόγηση της συγκεκριμένης επένδυσης γίνεται εντός του χρονικού ορίζοντα 2024-2045. Ο προσδιορισμός του αρχικού κεφαλαίου (CAPEX) που δαπανάται για τη ναυπήγηση του δεξαμενοπλοίου μεταφοράς χημικών γίνεται βάσει των δεδομένων του πίνακα 44 που ακολουθεί για MR Tankers με κινητήρες διπλού καυσίμου χρήσης μεθανόλης ως κύριο καύσιμο. Ο υπολογισμός του συγκεκριμένου κόστους γίνεται σε εκατομμύρια αμερικανικά δολάρια (M USD) κι όπως, αναφέρθηκε προηγουμένως το σύνολο αυτού αποπληρώνεται κατά το πρώτο έτος που συμπίπτει και με τη διαδικασία κατασκευής του πλοίου.

CAPEX	
Μονάδα	Κόστος (M USD)
Δεξαμενόπλοιο μεταφοράς χημικών	48.5
Κινητήρας, Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου	3.42
Αποθηκευτικός χώρος μεθανόλης	2.88
Σύνολο	54.8

Πίνακας 44: Συνολικό CAPEX ναυπήγησης δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης

Αναφορικά, με τα λειτουργικά κόστη (OPEX) που υπεισέρχονται από τη διαχείριση και λειτουργία του συγκεκριμένου πλοίου αυτά υπολογίζονται για τη χρονική διάρκεια 2025-2045 κατά την οποία, το εν λόγω πλοίο είναι ενεργό. Το OPEX προσδιορίζεται σε εκατομμύρια αμερικανικά δολάρια (M USD) και παρουσιάζεται αναλυτικά στον ακόλουθο πίνακα στον οποίο, αναφέρονται και οι διάφορες υποκατηγορίες που το αποτελούν. Σημειώνεται ότι τα λειτουργικά κόστη που παρουσιάζονται αφορούν νέες κατασκευές πλοίων.

OPEX		
Κατηγορία	Κόστος (USD/day)	Κόστος (USD/y)
Επάνδρωση	4554	1662210
Ασφαλιστικά τέλη	638	232870
Προμήθειες	418	152570
Ανταλλακτικά	407	148555
Λιπαντικά έλαια	440	160600
Επισκευές & Συντήρηση	286	104390
Δεξαμενισμός	-	-
Διαχείριση & Λειτουργία	1320	481800
Σύνολο	8063	2942995

Πίνακας 45: Συνολικό OPEX δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης (Drewry, 2022)

Τα έσοδα που θα αποφέρει το παρόν πλοίο αποδίδονται μέσω ναύλωσής του σε τρίτες εταιρείες οι οποίες, πληρώνουν έναν καθημερινό ναύλο στη ναυτιλιακή εταιρεία σύμφωνα με την προσυμφωνημένη διάρκεια της ναύλωσης. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η περίπτωση να προκύψουν έσοδα από την πώληση του πλοίου ή τη διάλυσή του μετά το πέρας της οικονομικής του ζωής. Τα έσοδα από τη διάλυση του πλοίου κυμαίνονται στα 550 USD/LDT (Go Shipping, 2024), με δεδομένο ότι το βάρος κενού σκάφους στην παρούσα επένδυση έχει θεωρηθεί ίσο με 10000 t τότε, τα έσοδα που θα προκύψουν το τελευταίο έτος της οικονομικής ζωής της επένδυσης (2045) θα είναι 5.5 M USD.

Παρακάτω αναλύεται η διαδικασία εκπόνησης της μελέτης εφικτότητας ναυπήγησης και λειτουργίας του δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης.

5%		
Έτος	CAPEX (M USD)	OPEX (M USD)
2024	54.8	0
2025	0	2.942995
2026	0	2.942995
2027	0	2.942995
2028	0	2.942995
2029	0	2.942995
2030	0	2.942995
2031	0	2.942995
2032	0	2.942995
2033	0	2.942995
2034	0	2.942995
2035	0	2.942995
2036	0	2.942995
2037	0	2.942995
2038	0	2.942995
2039	0	2.942995
2040	0	2.942995
2041	0	2.942995
2042	0	2.942995
2043	0	2.942995
2044	0	2.942995
2045	0	2.942995

Πίνακας 46: Χρηματικές εκροές δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2024-2045

Χρησιμοποιώντας το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας υπολογίζεται ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος (RFR) προκειμένου να ισχύει NPV=0. Με αυτή την οριακή συνθήκη, η επένδυση θα είναι οικονομικά εφικτή και δε θα παρουσιάζει κέρδη και ζημίες. Η μελέτη γίνεται για τρεις περιπτώσεις επιτοκίων αναγωγής 5%, 10%, 15%. Οι ετήσιες εισροές που υπολογίζονται αφορούν τη χρονική περίοδο 2025-2045 κατά την οποία, η επένδυση είναι ενεργή και αποδίδει κέρδη στη ναυτιλιακή εταιρεία που διαχειρίζεται το δεξαμενόπλοιο. Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών:

	RFR (M USD/y)	RFR (USD/day)
r = 5%	7.21718167	19773.10047
r = 10%	9.279211561	25422.49743
r = 15%	11.62423517	31847.21964

Πίνακας 47: Υπολογισμός ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου (RFR)

Με τον προσδιορισμό του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου (RFR) είναι δυνατό να υπολογιστεί κι ο πραγματικός ο οποίος, θεωρείται ότι θα είναι αυξημένος κατά 15% σε σχέση με τον προηγούμενο. Ύστερα, από τον υπολογισμό του πραγματικού ναύλου για επιτόκια αναγωγής 5%, 10%, 15% προσδιορίζεται η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) κι ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR) που αναμένεται να διαμορφωθούν από τις ετήσιες ταμειακές ροές κατά τη διάρκεια της οικονομικής ζωής της συγκεκριμένης

επένδυσης. Σημειώνεται ότι οι πραγματικές ετήσιες εισροές που παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες, στην τελευταία στήλη που αφορά το έτος 2045, είναι αυξημένες κατά 5.5 M USD λόγω των εσόδων που προκύπτουν από τη διάλυση του δεξαμενοπλοίου.

Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (M USD)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (M USD)
2024	0	0
2025	7.21718167	8.299758921
2026	7.21718167	8.299758921
2027	7.21718167	8.299758921
2028	7.21718167	8.299758921
2029	7.21718167	8.299758921
2030	7.21718167	8.299758921
2031	7.21718167	8.299758921
2032	7.21718167	8.299758921
2033	7.21718167	8.299758921
2034	7.21718167	8.299758921
2035	7.21718167	8.299758921
2036	7.21718167	8.299758921
2037	7.21718167	8.299758921
2038	7.21718167	8.299758921
2039	7.21718167	8.299758921
2040	7.21718167	8.299758921
2041	7.21718167	8.299758921
2042	7.21718167	8.299758921
2043	7.21718167	8.299758921
2044	7.21718167	8.299758921
2045	7.21718167	13.79975892

Πίνακας 48: Ετήσιες εισροές από τη διαχείριση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης, με επιτόκιο αναγωγής 5%

Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	9.279211561	10.6710933
2026	9.279211561	10.6710933
2027	9.279211561	10.6710933
2028	9.279211561	10.6710933
2029	9.279211561	10.6710933
2030	9.279211561	10.6710933
2031	9.279211561	10.6710933
2032	9.279211561	10.6710933
2033	9.279211561	10.6710933
2034	9.279211561	10.6710933
2035	9.279211561	10.6710933

2036	9.279211561	10.6710933
2037	9.279211561	10.6710933
2038	9.279211561	10.6710933
2039	9.279211561	10.6710933
2040	9.279211561	10.6710933
2041	9.279211561	10.6710933
2042	9.279211561	10.6710933
2043	9.279211561	10.6710933
2044	9.279211561	10.6710933
2045	9.279211561	16.1710933

Πίνακας 49: Ετήσιες εισροές από τη διαχείριση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης, με επιτόκιο αναγωγής 10%

Έτος	Ελάχιστες ετήσιες εισροές (USD/t)	Πραγματικές ετήσιες εισροές (USD/t)
2024	0	0
2025	11.62423517	13.36787045
2026	11.62423517	13.36787045
2027	11.62423517	13.36787045
2028	11.62423517	13.36787045
2029	11.62423517	13.36787045
2030	11.62423517	13.36787045
2031	11.62423517	13.36787045
2032	11.62423517	13.36787045
2033	11.62423517	13.36787045
2034	11.62423517	13.36787045
2035	11.62423517	13.36787045
2036	11.62423517	13.36787045
2037	11.62423517	13.36787045
2038	11.62423517	13.36787045
2039	11.62423517	13.36787045
2040	11.62423517	13.36787045
2041	11.62423517	13.36787045
2042	11.62423517	13.36787045
2043	11.62423517	13.36787045
2044	11.62423517	13.36787045
2045	11.62423517	18.86787045

Πίνακας 50: Ετήσιες εισροές από τη διαχείριση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης, με επιτόκιο αναγωγής 15%

Έπειτα, παρουσιάζονται οι ετήσιες χρηματοροές από τις οποίες, θα γίνει ο υπολογισμός των συντελεστών NPV, IRR για να γίνει η τελική αξιολόγηση της παρούσας επένδυσης.

Συνολικές χρηματοροές (M USD)			
Έτος	5%	10%	15%
2024	-54.8	-54.8	-54.8
2025	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2026	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2027	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2028	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2029	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2030	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2031	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2032	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2033	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2034	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2035	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2036	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2037	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2038	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2039	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2040	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2041	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2042	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2043	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2044	5.356763921	7.728098296	10.42487545
2045	10.85676392	13.2280983	15.92487545

Πίνακας 51: Συνολικές ετήσιες χρηματοροές από τη λειτουργία δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης

Τα αποτελέσματα των τιμών των NPV, IRR, RFR για τις τρεις περιπτώσεις επιτοκίων αναγωγής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

R	NPV (M USD)	IRR	RFR (USD/day)
5%	15.85	7.99%	19773.10047
10%	12.78	13.15%	25422.49743
15%	11.30	18.54%	31847.21964

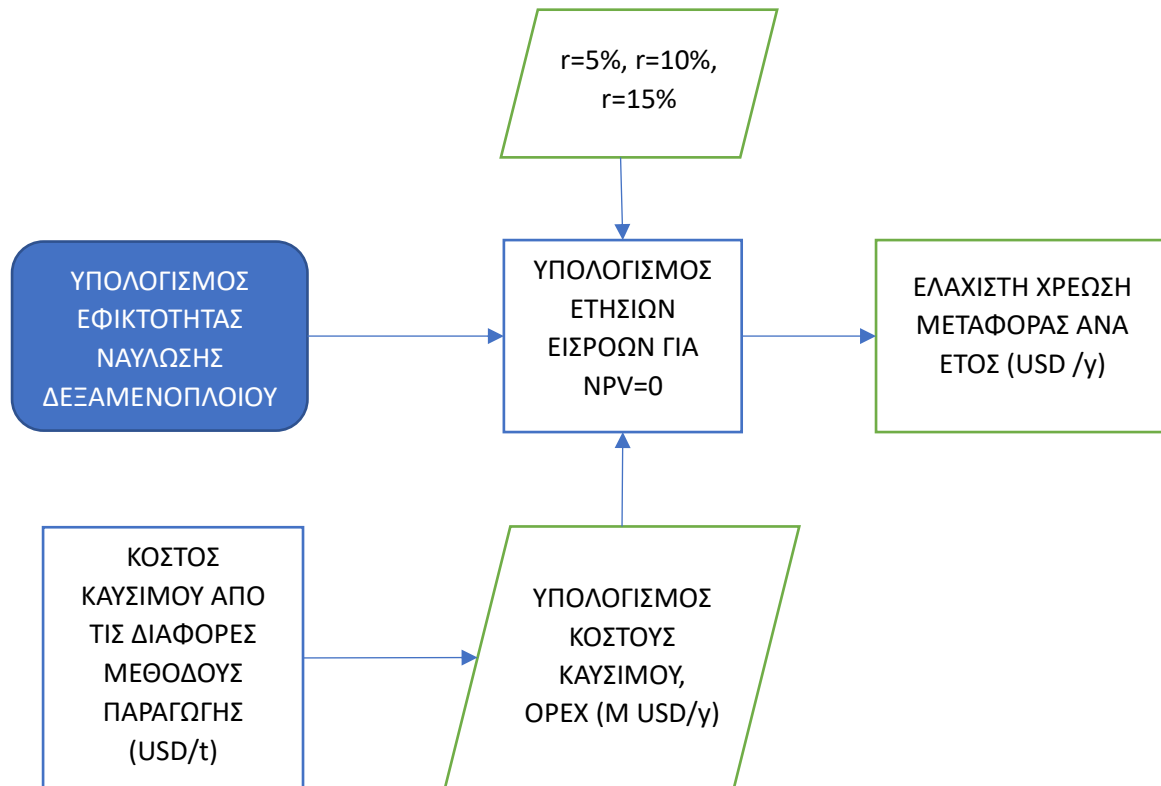
Πίνακας 52: Τελικές τιμές NPV, IRR, ημερησίου RFR

Παρατηρείται ότι, με αυξανόμενο επιτόκιο αναγωγής η τιμή της NPV φθίνει ενώ, ο συντελεστής IRR κι ο απαιτούμενος ναύλος (RFR) μεγαλώνουν. Είναι προφανές ότι η αύξηση του επιτοκίου αναγωγής θα επηρεάζει κι αναλογικά τον IRR ωστόσο, οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των δύο σε καθεμία από τις τρεις περιπτώσεις ταυτόχρονα μειώνονται. Δηλαδή, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του R=5 % τότε, διαμορφώνεται και ο IRR=7.99 %, με την ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των δύο να είναι μεγαλύτερη από αυτή του ζεύγους (R=10 %, IRR=13.15 %) που είναι αντίστοιχα, αυξημένη σε σχέση με το ζεύγος (R=15%,

IRR=18.54%). Επιπλέον, οι διαφορές στην NPV φθίνουν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ποσοστιαία αύξηση του πραγματικού ναύλου σε σχέση με τον απαιτούμενο είναι η ίδια και στις τρεις περιπτώσεις.

6.2.2 Ναύλωση πλοίου από τρίτη εταιρεία που αναλαμβάνει τη μεταφορά μεθανόλης

Στο παρόν εδάφιο αναλύεται η μελέτη εφικτότητας του δευτέρου σταδίου της τεχνοοικονομικής ανάλυσης του κύκλου ζωής της πράσινης μεθανόλης ως καυσίμου σε πλοία. Παρακάτω παρουσιάζεται το αναλυτικό σχεδιάγραμμα ροής της μελέτης από την πλευρά της εταιρείας που ναυλώνει το πλοίο για εμπορική χρήση κι έπειτα, ακολουθεί η ανάλυση της μελέτης.



Εικόνα Β.ΙΙΙ: Αναλυτικό σχεδιάγραμμα ροής της μελέτης εφικτότητας ναύλωσης δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης

Όπως έχει γίνει ήδη και προηγουμένως αρχικά, γίνεται εκτίμηση των εκροών που θα επιφέρει στην εταιρεία που πρόκειται να κάνει αυτή την επένδυση. Το αρχικό κεφάλαιο (CAPEX) στην παρούσα περίπτωση θα είναι μηδενικό καθώς, η εταιρεία ναυλώνει το πλοίο το οποίο, δεν αποτελεί υπό την κυριότητά της. Συνεπώς, τα λειτουργικά έξοδα (OPEX) που θα προκύψουν από τη ναύλωση και η κάλυψη του κόστους των καυσίμων κατά την εμπορική χρήση του πλοίου θα είναι και τα μόνα που θα επιβαρύνουν τη συγκεκριμένη εταιρεία. Το πλοίο καθώς, είναι ανενεργό κατά τη διάρκεια ναυπήγησης του, δεν επιβαρύνει κι ούτε αποφέρει κέρδη στην εταιρεία – ναυλωτή κατά το πρώτο έτος (2024) για το οποίο, γίνεται η μελέτη. Η παρούσα ανάλυση δηλαδή, γίνεται στο χρονικό ορίζοντα 2025–2045.

Από προηγούμενα εδάφια της οικονομικής μελέτης υπολογίστηκε το κόστος το οποίο, αναμένεται να αξιώσει μία εταιρεία που κατέχει και διαχειρίζεται μονάδα παραγωγής πράσινης μεθανόλης από διαφορετικές πρώτες ύλες και μεθόδους παραγωγής. Αναλυτικά, παρουσιάζονται αυτά τα κόστη στον ακόλουθο πίνακα:

Κόστος πράσινης μεθανόλης				
	Biomethanol		E-methanol	
r (%)	MSW (USD/t)	Biomass (USD/t)	DAC (USD/t)	Συμβατικές πηγές (USD/t)
5	558.70	422.85	1953.65	1322.07
10	671.62	512.15	2150.67	1519.09
15	804.67	617.37	2382.82	1751.24

Πίνακας 53: Κόστος πράσινης μεθανόλης

Για το πλοίο που γίνεται η τεχνοοικονομική μελέτη έχει θεωρηθεί ότι το συνολικό καθαρό βάρος (DWT) είναι ίσο με 50,000 t και Η προωστήρια εγκατάσταση που θα χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο πλοίο θα είναι ο κινητήρας MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR κατά τα πρότυπα του πλοίου Stena Pro Marine. (Marine Link, 2022) Θεωρώντας στο σημείο μέγιστης συνεχούς ισχύος του κινητήρα ότι ισχύει: $n = 90 \text{ rpm}$, $MCR = 9000 \text{ kW}$ τότε μπορούν να προσδιοριστούν οι ακριβείς καταναλώσεις με τη βοήθεια του προγράμματος CEAS της MAN Energy Solutions. (MAN Energy Solutions, n.d.)

Για το σημείο του MCR του κινητήρα σε tropical conditions (Θερμοκρασία αέρα = 45 °C, Θερμοκρασία νερού = 36 °C) η ειδική κατανάλωση μεθανόλης και πιλοτικού καυσίμου διαμορφώνονται ως ακολούθως:

$$SPOC = 8.7 \frac{g}{kWh}$$

$$SGC = 346.5 \frac{g}{kWh}$$

Συνεπώς, διαμορφώνονται τα παρακάτω δεδομένα για την κατανάλωση καυσίμου που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

	b_e (g/kWh)	m_{FO} (kg/s)	m_{FO} (t/day)	m_{FO} (t/y)
Πιλοτικό καύσιμο	8.7	0.02175	1.8792	563.76
Μεθανόλη	346.5	0.86625	74.844	22453.2

Πίνακας 54: Καταναλώσεις καυσίμων από τη λειτουργία του κινητήρα MAN 6G50ME-C9.6-LGIM-HPSCR (Tier III Mode)

Θεωρήθηκε ότι το πλοίο είναι εν πλω τις 300 ημέρες από τις 365 ενός έτους. Επιπλέον, η συνολική κατανάλωση σε καύσιμο diesel για τη λειτουργία του ηλεκτρογεννητριών θεωρείται περίπου ίση με 2,500 t ανά έτος. Συνεπώς, προκύπτουν τα παρακάτω κόστη για το πιλοτικό καύσιμο (VLSFO) και το MGO που χρησιμοποιείται.

Κάυσιο	USD/t/y	M USD/y
Πιλοτικό καύσιμο (VLSFO)	550	0.310068
MGO	750	1.875

Πίνακας 55: Κόστος πιλοτικού καυσίμου κύριας μηχανής και MGO των ηλεκτρογεννητριών (Ship & Bunker, n.d.)

Για να προκύψουν τα τελικά έξοδα καυσίμων θα πρέπει να προσδιοριστεί το κόστος της μεθανόλης που θα χρησιμοποιηθεί για την πρόωση του πλοίου και τέλος να γίνει άθροιση του ετήσιου κόστους όλων των καυσίμων που απαιτούνται για τη λειτουργία του πλοίου.

Τα ετήσια έξοδα από τη χρήση μεθανόλης ως καύσιμο και το κόστος της ναύλωσης διαμορφώνονται σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ακόλουθων πινάκων.

r (%)	Βιομεθανόλη		Ε-μεθανόλη	
	MSW (M USD)	Βιομάζα (M USD)	DAC (M USD)	Συμβατικές πηγές (M USD)
5	12.54	9.49	43.87	29.68
10	15.08	11.50	48.29	34.11
15	18.07	13.86	53.50	39.32

Πίνακας 56: Έξοδα καυσίμου μεθανόλης

r (%)	Βιομεθανόλη		Ε-μεθανόλη	
	MSW (M USD)	Βιομάζα (M USD)	DAC (M USD)	Συμβατικές πηγές (M USD)
5	27.93	21.14	97.68	66.10
10	33.58	25.61	107.53	75.95
15	40.23	30.87	119.14	87.56

Πίνακας 57: Έξοδα ναύλωσης

Αθροίζοντας τα έξοδα που προκύπτουν από τους παραπάνω πίνακες μπορεί να γίνει ο υπολογισμός των συνολικών εξόδων της εταιρείας που θα ναυλώσει το πλοίο.

r (%)	Βιομεθανόλη		Ε-μεθανόλη	
	MSW (M USD)	Βιομάζα (M USD)	DAC (M USD)	Συμβατικές πηγές (M USD)
5%	42.66	32.82	143.73	97.97
10%	50.85	39.29	158.01	112.25
15%	60.49	46.92	174.83	129.07

Πίνακας 58: Συνολικά έξοδα της εταιρείας - ναυλωτή

Οι ετήσιες ταμειακές εκροές από τη ναύλωση του πλοίου παρουσιάζονται σε ακόλουθους πίνακες όπου γίνεται ανάλυση για επιτόκια αναγωγής 5%, 10%, 15%. Εν συντομία, οι πρώτες ύλες και τρόποι παραγωγής πράσινης μεθανόλης που αναλύθηκαν και σε προηγούμενα εδάφια συμβολίζονται ως ακολούθως:

- [1]: MSW
- [2]: Βιομάζα
- [3]: DAC
- [4]: Συμβατικές πηγές

r = 5% - OPEX (M USD)				
Έτος	[1]	[2]	[3]	[4]
2024	0	0	0	0
2025	42.66	32.82	143.73	97.97
2026	42.66	32.82	143.73	97.97
2027	42.66	32.82	143.73	97.97
2028	42.66	32.82	143.73	97.97
2029	42.66	32.82	143.73	97.97
2030	42.66	32.82	143.73	97.97
2031	42.66	32.82	143.73	97.97
2032	42.66	32.82	143.73	97.97
2033	42.66	32.82	143.73	97.97
2034	42.66	32.82	143.73	97.97
2035	42.66	32.82	143.73	97.97
2036	42.66	32.82	143.73	97.97
2037	42.66	32.82	143.73	97.97
2038	42.66	32.82	143.73	97.97
2039	42.66	32.82	143.73	97.97
2040	42.66	32.82	143.73	97.97
2041	42.66	32.82	143.73	97.97
2042	42.66	32.82	143.73	97.97
2043	42.66	32.82	143.73	97.97
2044	42.66	32.82	143.73	97.97
2045	42.66	32.82	143.73	97.97

Πίνακας 59: Χρηματικές εκροές από τη ναύλωση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2024-2045 (r=5%)

r = 10% - OPEX (M USD)				
Έτος	[1]	[2]	[3]	[4]
2024	0	0	0	0
2025	50.85	39.29	158.01	112.25
2026	50.85	39.29	158.01	112.25
2027	50.85	39.29	158.01	112.25
2028	50.85	39.29	158.01	112.25
2029	50.85	39.29	158.01	112.25
2030	50.85	39.29	158.01	112.25
2031	50.85	39.29	158.01	112.25
2032	50.85	39.29	158.01	112.25
2033	50.85	39.29	158.01	112.25
2034	50.85	39.29	158.01	112.25
2035	50.85	39.29	158.01	112.25
2036	50.85	39.29	158.01	112.25

2037	50.85	39.29	158.01	112.25
2038	50.85	39.29	158.01	112.25
2039	50.85	39.29	158.01	112.25
2040	50.85	39.29	158.01	112.25
2041	50.85	39.29	158.01	112.25
2042	50.85	39.29	158.01	112.25
2043	50.85	39.29	158.01	112.25
2044	50.85	39.29	158.01	112.25
2045	50.85	39.29	158.01	112.25

Πίνακας 60: Χρηματικές εκροές από τη ναύλωση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2024-2045 (r=10%)

r = 15% - OPEX (M USD)				
Έτος	[1]	[2]	[3]	[4]
2024	0	0	0	0
2025	60.49	46.92	174.83	129.07
2026	60.49	46.92	174.83	129.07
2027	60.49	46.92	174.83	129.07
2028	60.49	46.92	174.83	129.07
2029	60.49	46.92	174.83	129.07
2030	60.49	46.92	174.83	129.07
2031	60.49	46.92	174.83	129.07
2032	60.49	46.92	174.83	129.07
2033	60.49	46.92	174.83	129.07
2034	60.49	46.92	174.83	129.07
2035	60.49	46.92	174.83	129.07
2036	60.49	46.92	174.83	129.07
2037	60.49	46.92	174.83	129.07
2038	60.49	46.92	174.83	129.07
2039	60.49	46.92	174.83	129.07
2040	60.49	46.92	174.83	129.07
2041	60.49	46.92	174.83	129.07
2042	60.49	46.92	174.83	129.07
2043	60.49	46.92	174.83	129.07
2044	60.49	46.92	174.83	129.07
2045	60.49	46.92	174.83	129.07

Πίνακας 61: Χρηματικές εκροές από τη ναύλωση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2024-2045 (r=15%)

Χρησιμοποιώντας το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας προσδιορίζονται οι ελάχιστες ταμειακές εισροές προκειμένου να είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη επένδυση, δηλαδή να ισχύει NPV=0. Τα ετήσια έσοδα που υπολογίζονται αφορούν το χρονικό διάστημα 2025-2045 κατά το οποίο, θα είναι ενεργό το πλοίο και θα αποφέρει κέρδη στους ναυλωτές. Αναλυτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παρακάτω:

Ελάχιστες ετήσιες εισροές (M USD)				
	[1]	[2]	[3]	[4]
r = 5%	42.66452011	32.82226189	143.7333281	97.97333606
r = 10%	50.84588097	39.29204098	158.0079201	112.247928
r = 15%	60.48632726	46.9156575	174.8282803	129.0682883

Πίνακας 62: Ελάχιστες χρηματικές εισροές από τη ναύλωση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης για το χρονικό διάστημα 2025-2045

Έπειτα από τον υπολογισμό των ελαχίστων ταμειακών εισροών από τη ναύλωση του πλοίου δύναται να προσδιοριστεί και το πραγματικό κόστος μεταφοράς πράσινης μεθανόλης που αναμένεται να χρεώσει η εταιρεία – ναυλωτής προκειμένου, η συγκεκριμένη επένδυση να αποφέρει κέρδη. Ωστόσο, είναι εμφανές ότι η χρήση πράσινης μεθανόλης από τους τέσσερις διαφορετικούς τρόπους παραγωγής και πηγές ενέργειας που αναλύονται στην παρούσα μελέτη εφικτότητας οι μεταξύ τους διαφορές είναι αρκετά υψηλές. Συγκεκριμένα, η χρήση πράσινης μεθανόλης με δέσμευση κατευθείαν από τον ατμοσφαιρικό αέρα (DAC) που αποτελεί, την βέλτιστη από οικολογικής σκοπιάς έχει και πολύ υψηλότερο κόστος. Αρκετά υψηλό κόστος χρήσης έχει και η ‘‘e-μεθανόλη’’ που παράγεται με συμβατικούς τρόπους δέσμευσης άνθρακα και υδρογόνο από ανανεώσιμες πηγές. Αντίθετα, σε λογικά εύρη κυμαίνεται η τιμή της βιομεθανόλης, με βέλτιστη επιλογή πρώτης ύλης να αποτελεί η βιομάζα.

Συμπεράσματα

Αποτελεί κοινή πεποίθηση πλέον ότι για το ζήτημα της κλιματικής κρίσης θα πρέπει να παρθούν τολμηρές αποφάσεις και οι τομές που θα γίνουν οφείλουν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο ως προς την άμβλυνση του συγκεκριμένου φαινομένου με τη συνεισφορά όλων των κλάδων, βιομηχανιών, κρατών και ηπείρων του πλανήτη. Η ραγδαία μεταβολή της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας από το 1850 (Διάγραμμα 1) κι έπειτα, μία εποχή που η ανθρώπινη παραγωγικότητα και δραστηριότητα γνώρισαν μία πρωτοφανή αύξηση και σηματοδοτήθηκε μία νέα εποχή στην οποία, βελτιώθηκε καθοριστικά το βιοτικό επίπεδο του μέσου πολίτη, ήλθε με κόστος την υποβάθμιση του περιβάλλοντος και την αλλοίωση της κλιματικής ισορροπίας.

Από τις προσπάθειες άμβλυνσης του εν λόγω φαινομένου δε θα μπορούσε να εξαιρεθεί κι ο τομέας της ναυτιλίας ο οποίος, αν και αποτελεί τον πιο βιώσιμο τρόπο μεταφοράς αγαθών (Εικόνα 3) συνεισφέρει καθοριστικά στη διόγκωση του συγκεκριμένου προβλήματος. Το νομοθετικό πλαίσιο που έχει τεθεί σε ισχύ από τον ΙΜΟ καθώς και τα δραστικά μέτρα που έχει λάβει η Ευρωπαϊκή Ένωση για την καταπολέμηση του εν λόγω φαινομένου και την αποφασιστική μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, προβλέπεται πως θα αποδώσουν καρπούς (Πίνακας 1). Επιπλέον, οι επενδυτές που δραστηριοποιούνται στο χώρο στρέφονται με ολοένα και πιο γρήγορους ρυθμούς σε πλοία που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα πρόωσης (Εικόνα 7), (Εικόνα 8) ενώ, αρχίζουν και υιοθετούνται πλέον κι αντισυμβατικές λύσεις (Εικόνα 5), (Εικόνα 6) που στόχο έχουν την εξοικονόμηση της απαιτούμενης ενέργειας για την πρόωση και λειτουργία των πλοίων.

Η μεθανόλη είναι από τις χημικές ουσίες που έχουν λάβει ιδιαίτερη προσοχή ως μία από τις πιθανές εναλλακτικές λύσεις που θα μπορέσουν να οδηγήσουν στην αντικατάσταση των υπαρχόντων καυσίμων στις βιομηχανίες των χερσαίων και θαλασσίων μεταφορών. Η συγκεκριμένη χημική ένωση μπορεί να παραχθεί με διαφορετικούς τρόπους και βάσει του ενεργειακού αποτυπώματος που αποδίδουν οι συγκεκριμένες μέθοδοι παραγωγής, μπορούν να οριστούν χρωματικοί κώδικες (Εικόνα 10) από τους οποίους, προσδιορίζεται η βιωσιμότητα αυτών.

Τα οφέλη που υπόσχεται η μεθανόλη ως εναλλακτικό καύσιμο στα ήδη υπάρχοντα, από κοινού με την αύξηση της ζήτησης που παρατηρείται σε χημικές ουσίες που παράγονται με βάση αυτή ως πρώτη ύλη, φαίνεται ότι έχει οδηγήσει σε σταθερή ανάπτυξη της αγοράς της (Διάγραμμα 2) η οποία, αναμένεται να συνεχιστεί και στα επόμενα έτη με αυξαντα ρυθμό (Διάγραμμα 2). Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η γεωγραφική περιοχή Ασίας – Ειρηνικού Ωκεανού που αποτελεί και το κέντρο του θαλασσιού εμπορίου καθώς ταυτόχρονα, στο συγκεκριμένο μέρος του πλανήτη προβλέπεται και η ταχύτερη ανάπτυξη της αγοράς μεθανόλης στα επόμενα έτη (Διάγραμμα 4).

Αναφορικά με τις μεθόδους παραγωγής και τις πρώτες ύλες με τις οποίες, δύναται να συντεθεί η μεθανόλη, το ενδιαφέρον είναι στραμμένο στις αιεφόρες λύσεις και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Από πρώτες ύλες όπως η βιομάζα, αστικά και γεωργικά λύματα παράγεται βιομεθανόλη κι από την δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου προερχόμενου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συντίθεται η e-μεθανόλη οι οποίες από κοινού, αποτελούν την πράσινη μεθανόλη. Καθώς γίνεται περαιτέρω έρευνα σχετικά με τις μεθόδους παραγωγής και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσής τους, οι επενδυτές έχουν στραμμένο το βλέμμα στις εξελίξεις ενώ, ταυτόχρονα αναπτύσσονται συνεχώς νέες μονάδες σύνθεσης και παραγωγής πράσινης μεθανόλης. Με τις εκτιμήσεις που γίνονται στην παρούσα χρονική στιγμή προβλέπεται μία θεαματική ανάπτυξη της συγκεκριμένης αγοράς (Διάγραμμα 7) η οποία εφόσον συντελεστεί, πιθανότατα η πράσινη μεθανόλη θα αποτελέσει το καύσιμο του μέλλοντος τόσο στη ναυτιλία όσο και σε άλλους τομείς. Προς το παρόν το μεγαλύτερο μερίδιο κατέχει η παραλλαγή της βιομεθανόλης (Διάγραμμα 8) η οποία, όπως παρουσιάζεται κι από τη μελέτη εφικτότητας που διεξάγεται, με βάση τα δεδομένα της τεχνολογίας

και της τεχνολογίας που υπάρχει σήμερα σχετικά με τις μεθόδους παραγωγής της, είναι η πλέον οικονομικά συμφέρουσα (Πίνακας 10), (Πίνακας 12), (Πίνακας 27), (Πίνακας 28).

Ο ναυτιλιακός τομέας καθότι αποτελεί ένας πολύ ανταγωνιστικός κλάδος, ήδη μεγάλες εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε αυτόν, αναλαμβάνουν το ρίσκο κι επενδύουν υψηλά κεφάλαια για την απόκτηση πλοίων που θα λειτουργούν με προωστήριους κινητήρες διπλού καυσίμου όπως, αποτυπώνεται και στο Διάγραμμα 13. Είναι αμφίβολο ωστόσο, το ποια καύσιμα θα επικρατήσουν ως εναλλακτικές επιλογές του βαρέως πετρελαίου που κυριαρχεί σήμερα ενώ, θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη όλα τα οικονομικά δεδομένα και οι τεχνικές προδιαγραφές από τα οποία, συνοδεύεται η χρήση τους και να τεθεί μία βάση στη σύγκριση αυτών (Πίνακας 3).

Η χρήση κινητήρων διπλού καυσίμου μεθανόλης - diesel δεν περιορίζεται στην προωστήρια εγκατάσταση αποκλειστικά (Εικόνα 26) αλλά, έχουν αναπτυχθεί και ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη που λειτουργούν με τη συγκεκριμένη αλληλουχία καυσίμων (Εικόνα 27). Η χρήση αυτής επάνω στα πλοία ωστόσο, εκτός από οφέλη εμφανίζει και κάποια μειονεκτήματα για τα οποία, θα πρέπει να υπάρξει ειδική πρόβλεψη προκειμένου να μη γίνει ο παραμικρός συμβιβασμός στην ασφάλεια. Οι ειδικές σχεδιάσεις που απαιτείται να γίνουν όπως, καθορίζονται κι από κανονισμούς των νηογνομώνων, έχουν ως αποτέλεσμα την επιβάρυνση του προϋπολογισμού για την απόκτηση και την λειτουργία ενός πλοίου που λειτουργεί με μεθανόλη ως καύσιμο. Αυτό το επιπλέον κόστος πρέπει να ληφθεί υπόψη σε οποιαδήποτε οικονομική μελέτη που διεξάγεται σχετικά με την προοπτική χρήσης της ως ναυτιλιακό καύσιμο.

Δεδομένου ότι η μεθανόλη αποτελεί μία ασφαλή εναλλακτική λύση για χρήση σε θαλάσσια περιβάλλοντα (Πίνακας 4), το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης του κύκλου ζωής της από την παραγωγή, τη μεταφορά και τελικά, την καύση της. Η πράσινη μεθανόλη αποτελεί ένα εκ των καθαρότερων προτεινόμενων καυσίμων στη ναυτιλία (Διάγραμμα 14) που έχει ουδέτερο αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα όταν παράγεται με τη δέσμευση αυτού, σε μία διαδικασία που απαιτεί υψηλά ποσά ενέργειας ενώ, αρνητικό αποτύπωμα αποδίδεται όταν η δέσμευση άνθρακα γίνεται απευθείας από την ατμόσφαιρα. Παράλληλα, θεωρώντας ως δεδομένα κάποια βασικά στοιχεία για το υπό μελέτη πλοίο όπως, το βάρος καθαρού φορτίου (DWT), το βάρος κενού σκάφους (Lightship), την μέγιστη συνεχή ισχύ (MCR) και τις στροφές (rpm) της έλικας σε αυτή την ισχύ βάσει ενός υπαρκτού πλοίου, υπολογίζονται από το πρόγραμμα CEAS της MAN Energy Solutions η κατανάλωση καυσίμου και οι αποδιδόμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Πίνακες 6 – 9), (Διάγραμμα 15) για τον δεδομένο κινητήρα που επιλέγεται.

Καθώς, μείζονος σημασίας είναι η μείωση όλων των βλαβερών προς την ατμόσφαιρα αερίων, ακόμη και με τη χρήση μεθανόλης που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, οι εκπομπές αυτών ελαχιστοποιούνται δραστικά (Πίνακας 5) ενώ, με τη χρήση της τεχνολογίας ανακυκλοφορίας των καυσαερίων (EGR) πραγματοποιείται και περαιτέρω μείωση (Διάγραμμα 16) χωρίς να υπάρχει αισθητά μεγάλη επιβάρυνση στην κατανάλωση καυσίμου σε υψηλά φορτία (Διάγραμμα 17).

Στο τελικό στάδιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε η μελέτη εφικτότητας για τη χρήση πράσινης μεθανόλης ως ναυτιλιακό καύσιμο με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής της. Ειδικότερα, μελετήθηκαν η λειτουργία μονάδας που συνθέτει και παράγει πράσινη μεθανόλη, η ναυπήγηση και διαχείριση δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης από ναυτιλιακή εταιρεία που χρησιμοποιεί αυτή ως καύσιμο πρόωσης και τέλος, η ναύλωση του συγκεκριμένου πλοίου από τρίτη εταιρεία για εμπορική χρήση.

Αρχικά, εξετάστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια για τη λειτουργία μονάδων παραγωγής και σύνθεσης. Στο πρώτο σενάριο που λαμβάνεται η παρασκευή βιομεθανόλης πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πρώτες ύλες όπως, βιομάζα και αστικά λύματα, με τη μέθοδο σύνθεσης να βασίζεται στα πρότυπα αυτής που περιγράφεται στο εδάφιο 3.1.1. Ύστερα, στο δεύτερο σενάριο θεωρείται μονάδα παραγωγής e-μεθανόλης

εξετάζοντας δύο διαφορετικές περιπτώσεις δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, με βάση τη μέθοδο σύνθεσης που αναλύεται στο εδάφιο 3.1.2.

Έπειτα, στο δεύτερο μέρος της μελέτης εξετάζεται η λειτουργία δεξαμενοπλοίου μεταφοράς μεθανόλης λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ιδιαιτερότητες που υπεισέρχονται οι οποίες, αναλύονται διεξοδικά στα εδάφια 4.3 έως 4.6. Τέλος, γίνεται εκτίμηση του κόστους ναύλωσης του συγκεκριμένου πλοίου του οποίου, ο ετήσιος ναύλος ισούται με τις ετήσια εισροές της ναυτιλιακής εταιρείας που κατέχει και διαχειρίζεται αυτό συν τα κόστη των καυσίμων όπως, αυτά καθορίζονται από το πρώτο μέρος της μελέτης και τη διαδικασία παραγωγής τους.

Για να πραγματοποιηθεί η οικονομική αξιολόγηση των επενδύσεων που περιγράφονται στη μελέτη εφικτότητας χρειάστηκε να ληφθούν υπόψη συγκεκριμένα κριτήρια με τη βοήθεια των οποίων, είναι δυνατή η κατάληξη σε ένα συμπέρασμα και μία βέλτιστη επιλογή. Επιπλέον, ελήφθησαν σε όλες τις περιπτώσεις επιτόκια αναγωγής, 5, 10, 15 %.

Μελετώντας τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου του σταδίου παραγωγής βιομεθανόλης, από τις τελικές τιμές που προκύπτουν για τον IRR ισχύει ότι είναι μεγαλύτερος για επιτόκιο αναγωγής ίσο με 15% και μικρότερος για αντίστοιχο, 5% (Πίνακας 25), (Πίνακας 26). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι με αύξηση του επιτοκίου αναγωγής αναμένεται να προκύψει και άνοδος στον IRR. Επιπλέον ισχύει, ότι οι μεγαλύτερες απόλυτες διαφορές μεταξύ των δύο μεγεθών παρατηρούνται για αυξανόμενες τιμές επιτοκίων αναγωγής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την τιμή της NPV είναι τα αντίθετα. Καθώς, σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές της NPV είναι θετικές (Πίνακας 25), (Πίνακας 26) τότε, αναμένεται η επένδυση να παρουσιάσει κερδοφορία για το εύρος των επιτοκίων αναγωγής που λαμβάνονται και για τις δύο επιλογές πρώτων υλών. Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνεται ότι με την επιλογή αστικών λυμάτων (MSW) (Πίνακας 25) το κέρδος της εταιρείας θα είναι μεγαλύτερο ωστόσο, αυτές οι τιμές λαμβάνονται καθώς και στις δύο περιπτώσεις θεωρείται η ίδια προσαύξηση (15%) στα πραγματικά κέρδη λόγω χρέωσης επί των ελαχίστων απαιτούμενων. Δε θα ήταν λοιπόν ορθό να θεωρηθεί ότι με την επένδυση προς τη συγκεκριμένη πρώτη ύλη θα είχαμε μέγιστο κέρδος. Συνεπώς, η ανωτέρω ανάλυση γίνεται προκειμένου να αποτυπωθεί μία τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων της NPV στο αντίστοιχο εύρος επιτοκίων αναγωγής καθεμίας εκ των δύο επιλογών.

Στο δεύτερο σενάριο του σταδίου παραγωγής e-μεθανόλης, οι τιμές των αποτελεσμάτων για τα κριτήρια οικονομικής αξιολόγησης IRR κι NPV ακολουθούν το ίδιο μοτίβο με το πρώτο σενάριο ενώ και σε αυτή την περίπτωση, η τιμή της NPV για την κάθε μέθοδο παραγωγής παρουσιάζεται προς σύγκριση στο εύρος των επιτοκίων αναγωγής που λαμβάνονται.

Κατά το στάδιο μεταφοράς και κατανάλωσης, πραγματοποιείται η μελέτη εφικτότητας για την περίπτωση ναυπήγησης, διαχείρισης και λειτουργίας δεξαμενοπλοίου επιφορτισμένου με τη μεταφορά πράσινης μεθανόλης. Η συγκεκριμένη μελέτη γίνεται τόσο από την πλευρά της ναυτιλιακής εταιρείας, όσο και από αυτή της εταιρείας που ναυλώνει το πλοίο. Προκειμένου να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σταδίου της μελέτης εφικτότητας για το υπό μελέτη πλοίο που θα ναυπηγηθεί για να επιτελέσει το συγκεκριμένο ρόλο, θεωρούνται βασικά μεγέθη όπως, το βάρος κενού φορτίου (Lightship), το καθαρό βάρος (Deadweight), η μέγιστη συνεχής ισχύς (MCR) και οι στροφές (rpm) της έλικας στο σημείο αυτό. Σημειώνεται ότι τα μεγέθη αυτά είναι τα ίδια με αυτά της προηγούμενης θέρησης που έγινε για τον προσδιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Από τα αποτελέσματα της μελέτης εξεταζόμενης από την πλευρά της ναυτιλιακής εταιρείας, φαίνεται ότι ο IRR είναι μεγαλύτερος για επιτόκιο αναγωγής ίσο με 15% και μικρότερος αντίστοιχα, για 5% (Πίνακας 52). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι με αύξηση του επιτοκίου αναγωγής αναμένεται να προκύψει και άνοδος στην τιμή του IRR. Επιπρόσθετα, ισχύει ότι οι μεγαλύτερες απόλυτες διαφορές μεταξύ των δύο

μεγεθών παρατηρούνται για αυξανόμενες τιμές επιτοκίων αναγωγής στο εύρος που λαμβάνονται. Τα αντίθετα αποτελέσματα έχουν οι τιμές της NPV. Καθώς, σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές της NPV είναι θετικές (Πίνακας 52), αναμένεται η επένδυση να παρουσιάσει κερδοφορία για το εύρος των επιτοκίων αναγωγής που λαμβάνονται.

Εξετάζοντας τη μελέτη από την πλευρά της εταιρείας – ναυλωτή, από τα αποτελέσματα για την κατανάλωση που προκύπτουν από το CEAS της MAN Energy Solutions (Πίνακας 54), δεδομένου του κόστους της μεθανόλης (Πίνακας 56), του πιλοτικού καυσίμου (Πίνακας 55) κι έχοντας θεωρήσει μία τυπική κατανάλωση για τις ηλεκτρογεννήτριες ενός MR Tanker, λαμβάνεται το συνολικό κόστος καυσίμων. Αθροίζοντας αυτό με το κόστος ναύλωσης όπως, αυτό υπολογίστηκε από τα αποτελέσματα της μελέτης από την πλευρά της ναυτιλιακής εταιρείας, δύναται να προσδιοριστούν οι ελάχιστες απαιτούμενες ετήσιες εισροές για την εταιρεία – ναυλωτή προκειμένου η επένδυση να μην αποφέρει ζημίες. Είναι εμφανές ότι η χρήση πράσινης μεθανόλης από τις τέσσερις πρώτες ύλες και μεθόδους παραγωγής παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις στις ετήσιες εκροές που θα προκαλέσει στην εταιρεία που θα ναυλώσει το πλοίο. Συνεπώς, η επιλογή της βιομεθανόλης που παράγεται από βιομάζα με τη μέθοδο παραγωγής που περιγράφεται από το εδάφιο 3.1.1 είναι η προφανής επιλογή λόγω της μεγάλης διαφοράς κόστους που θα προσφέρει έναντι των τριών άλλων επιλογών. Σημειώνεται ωστόσο, ότι οι διαφορές που προκύπτουν οφείλονται στο γεγονός ότι έχει ληφθεί η ίδια ποικιλία μεθανόλης, που αποτελεί στις τέσσερις περιπτώσεις φορτίο και καύσιμο ταυτόχρονα. Οι διαφορές στο κόστος ναύλωσης (Πίνακας 57) των τεσσάρων ποικιλιών είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με το κόστος χρήσης τους ως ναυτιλιακό καύσιμο (Πίνακας 56). Παρόλα αυτά, εάν θεωρούσαμε ίδιο φορτίο και στις τέσσερις περιπτώσεις που λαμβάνονται, με τη διαφοροποίηση στις τέσσερις ποικιλίες πράσινης μεθανόλης να γίνεται αποκλειστικά και μόνο για το καύσιμο πρόωσης, τα αποτελέσματα θα ήταν επίσης ανάλογα, με τη βιομεθανόλη παραγόμενη από βιομάζα να αποτελεί ακόμη την οικονομικότερη λύση.

Για την πραγματοποίηση της ανωτέρω μελέτης εφικτότητας έγιναν και κάποιες θεωρήσεις χάριν απλοποίησης του προβλήματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι επενδύσεις τέτοιου βεληνεκούσ σπανίως πραγματοποιούνται από ίδια κεφάλαια και ένα μεγάλο ποσοστό του αρχικού κεφαλαίου καλύπτεται μέσω δανεισμού. Επιπλέον, καθώς οι φορολογικοί συντελεστές σε κάθε χώρα είναι διαφορετικοί θεωρήθηκε ότι για το πρώτο στάδιο της μελέτης εφικτότητας που αφορά την παραγωγή πράσινης μεθανόλης, ο φόρος αυτός είναι μηδενικός ούτως ώστε, η σύγκριση στην οικονομική αξιολόγηση να μη βασιστεί στο φορολογικό σύστημα που διέπει την κάθε χώρα.

Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, η έρευνα σχετικά με την παραγωγή μεθανόλης από βιώσιμες και οικολογικές μεθόδους συνεχίζεται αδιάκοπα. Συνεπώς, στην παρούσα χρονική στιγμή δεν είναι ακόμη ξεκάθαρο το τοπίο ώστε, να αποτυπωθεί με σιγουριά και ακρίβεια η αναμενόμενη ανάπτυξη της αγοράς πράσινης μεθανόλης. Για την αποφυγή λανθασμένων εκτιμήσεων και λόγω αδυναμίας εύρεσης αξιόπιστων δεδομένων αναφορικά με τη ζήτηση που θα προκύψει για αυτή σε μελλοντικές περιόδους, προτιμήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία να ληφθεί μία παραδοχή σχετικά με τα πραγματικά κέρδη που θα προκύψουν από τη διενέργεια των εν λόγω επενδύσεων που αναλύονται.

Συνοψίζοντας, η μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία στόχο είχε τη διενέργεια όσο το δυνατόν λιγότερων εκτιμήσεων ώστε, το αποτέλεσμα αυτής να είναι κατά το δυνατόν περισσότερο ρεαλιστικό. Ωστόσο, σε μία πραγματική τεχνοοικονομική ανάλυση που θα παρουσιάζονται και θα συγκρίνονται δεδομένα για επενδύσεις ανάλογου βεληνεκούσ, οι παραδοχές θα πρέπει να είναι κατά το εφικτό λιγότερο απλοϊκές σε σύγκριση με μία φοιτητική εργασία όπως, η συγκεκριμένη. Τα δεδομένα της αγοράς πρέπει να μελετηθούν διεξοδικά και σε πραγματικό χρόνο για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος.

Πηγές - Βιβλιογραφία

- Abbas, A., Qadeer, K., Al-Hinai, A., Tarar, M. H., Qyyum, M. A., Al-Muhtaseb, A., . . . Dickson, R. (2022, September 15). Process development and policy implications for large scale deployment of solar-driven electrolysis-based renewable methanol production. *Green Chemistry*, σσ. 7630-7643. Ανάκτηση από <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/gc/d2gc01993k>
- Above-Ground Fuel Systems*. (2011, August 13). Ανάκτηση από Methanol Peoduction: <https://abovegroundfuelstoragetanks.com/2011/08/13/methanol-production/>
- ABS. (χ.χ.). Ανάκτηση από FuelEU Maritime: <https://ww2.eagle.org/en/rules-and-resources/regulatory-updates/fuel-eu-maritime.html>
- ABS. (χ.χ.). Ανάκτηση από Methanol Value Chain: <https://ww2.eagle.org/en/Products-and-Services/sustainability/methanol-value-chain.html>
- Allied Market Research*. (2022, June). Ανάκτηση από Methanol Market by Feedstock (Coal, Natural Gas, Others), by End-use Industry (Automotive, Construction, Electronics, Appliances, Paints and Coatings, Insulation, Pharmaceutical, Packaging, Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-: <https://www.alliedmarketresearch.com/methanol-market-A16496>
- Aziz, M., & Sun, Z. (2021, October 25). Comparative thermodynamic and techno-economic assessment of green methanol production from biomass through direct chemical looping processes. *Journal of Cleaner Production*. doi:https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621032133?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=86120fa8ea97ee7f
- Bos, M., Kersten, S., & Brilman, D. (2020, April 15). Wind power to methanol: Renewable methanol production using electricity, electrolysis of water and CO₂ air capture. *Applied Energy*, σ. 114672.
- British Geological Survey*. (χ.χ.). Ανάκτηση από The greenhouse effect: <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/climate-change/how-does-the-greenhouse-effect-work/>
- Bunker Ports News Worldwide*. (2022, November 28). Ανάκτηση από Methanol as an alternative fuel for container vessels: <https://www.bunkerportsnews.com/News.aspx?ElementId=dc2a0390-1c00-44fd-8c5e-5caf250ee21f>
- Business Research Insights*. (2024, March 4). Ανάκτηση από Green Market Size: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/green-methanol-market-104559>
- Carr, H. (2022, December 22). *RBN Energy* . Ανάκτηση από Don't It Make My Gray Methanol Blue? - Blue Hydrogen, Blue Ammonia, and Now Blue Methanol: <https://rbnenergy.com/dont-it-make-my-grey-methanol-blue-blue-hydrogen-blue-ammonia-and-now-blue-methanol>
- Chen, J. (2020, December 14). *Investopedia*. Ανάκτηση από Economic Life: Definition, Determining Factors, Vs. Depreciation: <https://www.investopedia.com/terms/e/economic-life.asp>
- Chen, J. (2024, April 20). *Investopedia*. Ανάκτηση από Profitability Index (PI): Definition, Components, and Formula: <https://www.investopedia.com/terms/p/profitability.asp>

- ClassNK.* (χ.χ.). Ανάκτηση από FAQs on the FuelEU Maritime (1st Edition) :
https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/authentication/eumrv/fueleumaritime_faq_e.pdf
- Corporate Finance Institute.* (χ.χ.). Ανάκτηση από Net Present Value (NPV):
<https://corporatefinanceinstitute.com/resources/valuation/net-present-value-npv/>
- Deign, J. (2020, June 29). *Greentech Media.* Ανάκτηση από So, What Exactly Is Green Hydrogen?:
<https://www.greentechmedia.com/articles/read/green-hydrogen-explained>
- Demming, A. (2023, May 15). *Climate Feedback.* Ανάκτηση από Temperatures on Earth are increasing and the rise is drastically outpacing previous natural changes in the planet’s climate:
<https://climatefeedback.org/claimreview/temperatures-on-earth-are-increasing-and-the-rise-is-dramatically-outpacing-previous-natural-changes-in-the-planets-climate/>
- DNV.* (2023). Ανάκτηση από IMO GHG strategy: <https://www.dnv.com/maritime/hub/decarbonize-shipping/key-drivers/regulations/imo-regulations/ghg-vision.html#:~:text=The%20IMO%E2%80%99s%20initial%20GHG%20strategy%20has%20three%20interlinked,shipping%20by%20at%20least%2050%20percent%20by%202050.>
- DNV.* (2023, April 20). Ανάκτηση από Methanol as fuel heads for the mainstream in shipping:
<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Methanol-as-fuel-heads-for-the-mainstream-in-shipping/>
- DNV.* (2023). Ανάκτηση από EU ETS – Emissions Trading System:
<https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eu-emissions-trading-system/index.html>
- Drewry.* (2022). Ship Operating Costs Annual Review and Forecast 2022/23.
- EIN Presswire.* (2018, October 22). Ανάκτηση από MethaShip Project: Renewable Methanol is ‘fuel with a future’: <https://www.einpresswire.com/article/465799813/methaship-project-renewable-methanol-is-fuel-with-a-future>
- Euronav.* (2017). Ανάκτηση από The Basics of the Tanker Shipping Market:
<https://www.euronav.com/media/65361/special-report-2017-eng.pdf>
- European Commission.* (2023). Ανάκτηση από FAQ – Maritime transport in EU Emissions Trading System (ETS): https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets_en
- Fernando, J. (2024, March 14). *Investopedia.* Ανάκτηση από Internal Rate of Return (IRR): Formula and Examples: <https://www.investopedia.com/terms/i/irr.asp>
- Forsyth, A. (2022, January 25). *Longspur Research.* Ανάκτηση από METHANOL AND SHIPPING:
<https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2022/01/Methanol-and-Shipping-Longspur-Research-25-Jan-2022.pdf>
- Forsyth, A. (2023, March 21). *Longspur Research.* Ανάκτηση από METHANOL GAINS MOMENTUM:
<https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2023/07/Methanol-and-shipping-210323.pdf>

- Global Information*. (2023, January 23). Ανάκτηση από Methanol Market - Growth, Trends, and Forecast (2023 - 2028): <https://www.giiresearch.com/report/moi1197581-methanol-market-growth-trends-covid-impact.html>
- Go Shipping*. (2024, May 9). Ανάκτηση από Demolition Market: <https://www.go-shipping.net/demolition-market>
- Gorton, D. (2023, December 22). *Investopedia*. Ανάκτηση από Taxes Definition: Types, Who Pays, and Why: <https://www.investopedia.com/terms/t/taxes.asp>
- Grimmer, R. (2017, September 13). *Stillwater Associates*. Ανάκτηση από IMO 2020 Part 1: The evolution of the marine sulfur regulation: <https://stillwaterassociates.com/imo-2020-part-1-marine-fuel-sulfur-content/>
- Harari, Y. N. (2015). *Sapiens, A Brief History of Humankind*. New York: HarperCollins.
- Hellenic Shipping News*. (2022, July 26). Ανάκτηση από Ships that ‘scrub’ emissions earn twice as much as those that don’t: <https://www.hellenicshippingnews.com/ships-that-scrub-emissions-earn-twice-as-much-as-those-that-dont/>
- Herzog, H. (2023, January 20). *Climate Portal*. Ανάκτηση από Carbon Capture: <https://climate.mit.edu/explainers/carbon-capture>
- Iberdrola*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Green hydrogen: an alternative that reduces emissions and cares for our planet: <https://www.iberdrola.com/sustainability/green-hydrogen>
- IMO*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
- International Chamber of Shipping*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Environmental Performance: Comparison of CO2 Emissions by Different Modes of Transport: <https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/environmental-performance-environmental-performance/>
- IRENA*. (2018, September). Ανάκτηση από Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Sep/IRENA_Hydrogen_from_renewable_power_2018.pdf?rev=817ffa3e16dd4aebb89098bdf69be6a8
- IRENA*. (2021). Ανάκτηση από Innovation Outlook : Renewable Methanol: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf?rev=ca7ec52e824041e8b20407ab2e6c7341
- Isalos.net*. (2016, April 25). Ανάκτηση από Ένας οδηγός για τις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECAs – Emission Control Areas): <https://www.isalos.net/2016/04/enas-odigos-gia-tis-emission-control-areas-ecas/>
- Jahan, K., Mahmood, D., & Fahim, M. (2015, January - March). Effects of methanol in blood pressure and heart rate in the rat. *Journal of pharmacy & bioallied sciences*, σσ. 60-64. Ανάκτηση από <https://doi.org/10.4103/0975-7406.148747>

- Jolly, W. L. (2024, February 22). *Encyclopedia Britannica*. Ανάκτηση από hydrogen: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>
- Kagan, J. (2024, February 28). *Investopedia*. Ανάκτηση από What Is a Loan, How Does It Work, Types, and Tips on Getting One: <https://www.investopedia.com/terms/l/loan.asp>
- Kihlberg, H. (χ.χ.). *Perstorp*. Ανάκτηση από Project Air: transforming the chemical industry : https://www.perstorp.com/en/about/sustainability/enable/project_air
- Maersk*. (2023, December 7). Ανάκτηση από Maersk to deploy first large methanol-enabled vessel on Asia - Europe trade lane: <https://www.maersk.com/news/articles/2023/12/07/maersk-to-deploy-first-large-methanol-enabled-vessel-on-asia-europe-trade-lane>
- MAN Energy Solutions*. (χ.χ.). Ανάκτηση από CEAS engine calculations: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations>
- MAN Energy Solutions*. (2023). Ανάκτηση από The case for two-stroke ammonia engines: <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>
- MAN Energy Solutions*. (2023, November). Ανάκτηση από The Methanol-fuelled MAN B&W LGIM Engine: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/5510-0172_online-1.pdf?sfvrsn=212d3731_30
- Mandra, J. (2024, January 3). *Offshore Energy*. Ανάκτηση από Clarksons: 45% of ships ordered in 2023 embrace alternative fuels, with LNG still in the lead: <https://www.offshore-energy.biz/clarksons-45-of-ships-ordered-in-2023-embrace-alternative-fuels-with-lng-still-in-the-lead/>
- Marine Insight*. (2021, January 24). Ανάκτηση από How Air Lubrication System for Ships Works?: <https://www.marineinsight.com/green-shipping/how-air-lubrication-system-for-ships-work/>
- Marine Link*. (2022, April 27). Ανάκτηση από First China-built Dual-fuel Methanol Powered Tanker Starts Sea Trials: <https://www.marinelink.com/news/first-chinabuilt-dualfuel-methanol-496095>
- Marine Service Noord*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Two concepts for methanol fuel systems: <https://marine-service-noord.com/en/products/alternative-fuels-and-technologies/methanol/two-concepts-for-methanol-fuel-systems/>
- Maritime Informed*. (χ.χ.). Ανάκτηση από MAN Energy Solutions MAN B&W ME-LGIM Dual-Fuel Two-Stroke Engine: <https://www.maritimeinformed.com/man-energy-solutions-man-b-w-me-lgim-prime-mover-technical-details.html>
- Maximize Market Research*. (2023, June). Ανάκτηση από Methanol Market: Global Industry Analysis and Forecast (2023-2029): <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/methanol-market/126817/>
- Methanol Institute*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Applications: <https://www.methanol.org/applications/>
- Methanol Institute*. (2023, May). Ανάκτηση από Marine Methanol: Future-Proof Shipping Fuel: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2023/05/Marine_Methanol_Report_Methanol_Institute_May_2023.pdf

MMSA (Methanol Market services Asia). (2023). *Methanol Institute*. Ανάκτηση από Methanol Price and Supply/Demand: <https://www.methanol.org/methanol-price-supply-demand/>

National Renewable Energy Laboratory. (χ.χ.). Ανάκτηση από Simple Levelized Cost of Energy (LCOE) Calculator Documentation: <https://www.nrel.gov/analysis/tech-lcoe-documentation.html>

Natural Resources Wales. (2024, February 14). Ανάκτηση από Emissions trading in the UK: <https://naturalresources.wales/permits-and-permissions/carbon-emissions/the-uk-emission-trading-scheme-uk-ets/?lang=en>

NYK Line. (2021, May 13). Ανάκτηση από Methanol Dual-Fuel Chemical Tanker Takaroa Sun Conducts World's First Barge-to-Ship Methanol Bunkering: https://www.nyk.com/english/news/2021/20210513_01.html

Offshore Energy. (2024, January 19). Ανάκτηση από China debuts its first methanol bunkering vessel: <https://www.offshore-energy.biz/china-debuts-its-first-methanol-bunkering-vessel/>

Openclipart. (2015, November 16). Ανάκτηση από https://openclipart.org/detail/232389/famous-and-infamous-molecules-16#google_vignette

Petruzzello, M. (2023, October 6). *Britannica*. Ανάκτηση από methanol chemical compound: <https://www.britannica.com/science/methanol>

Research Dive. (2022, May). Ανάκτηση από Global Methanol Market Analysis: <https://www.researchdive.com/8500/methanol-market>

Research Dive. (2023, April). Ανάκτηση από Global Green Methanol Market Analysis: <https://www.researchdive.com/8659/green-methanol-market>

SADC Mining & Construction News. (2023, June 8). Ανάκτηση από Thyssenkrupp Uhde has the technology know-how to produce large quantities of green methanol, a safe and efficient green energy and hydrogen carrier.: <https://miningconstruction-sadc.com/thyssenkrupp-uhde-has-the-technology-know-how-to-produce-large-quantities-of-green-methanol-a-safe-and-efficient-green-energy-and-hydrogen-carrier/>

Safety4Sea. (2023, August 22). Ανάκτηση από East Port Said port completes its first methanol bunkering: <https://safety4sea.com/east-port-said-port-completes-its-first-methanol-bunkering/>

Schuler, M. (2024, May 24). *gCaptain*. Ανάκτηση από Proman Stena Bulk Launches Last of Six Methanol-Fueled Tankers: <https://gcaptain.com/proman-stena-bulk-launches-last-of-six-methanol-fueled-tankers/>

Scott, M., & Lindsey, R. (2023, November 22). *Climate.gov*. Ανάκτηση από What's the hottest Earth's ever been?: <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/whats-hottest-earths-ever-been>

Serin, E. (2023, March 13). *London School of Economics*. Ανάκτηση από What is carbon capture, usage and storage (CCUS) and what role can it play in tackling climate change?: <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/explainers/what-is-carbon-capture-and-storage-and-what-role-can-it-play-in-tackling-climate-change/>

Ship & Bunker. (χ.χ.). Ανάκτηση από World Bunker Prices: <https://shipandbunker.com/prices>

- Ship Technology*. (2019, November 21). Ανάκτηση από Guangzhou Shipyard to build methanol carriers for Proman Stena Bulk: <https://www.ship-technology.com/news/guangzhou-shipyard-methanol-carriers/>
- Sidenvall Jegou, I., Laffineur, L., Spiegelenberg, F., & Leitão, A. (2023, September 22). *UNCTAD*. Ανάκτηση από Net-zero by 2050: Achieving shipping decarbonization through industry momentum and the new ambition at IMO: <https://unctad.org/news/transport-newsletter-article-no-108-net-zero-by-2050>
- Technetics Group*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Hydrogen Production: The Challenges and Practical Applications: <https://technetics.com/hydrogen-production-the-challenges-and-practical-applications/>
- Technip Energies*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Carbon Capture, Utilization and Storage Services: <https://www.ten.com/en/carbon-capture-utilization-and-storage-services>
- Tennent, H. (2022, September 21). *Port of Seattle*. Ανάκτηση από Maritime Alternative Fuels 101: <https://www.portseattle.org/blog/maritime-alternative-fuels-101>
- The Chemical Company*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Methanol: <https://thechemco.com/chemical/methanol/>
- The Insight Partners*. (2022, February). Ανάκτηση από Methanol Market Report - Analysis, Global Size and Outlook : <https://www.theinsightpartners.com/reports/methanol-market>
- The Maritime Executive* . (2022, October 11). Ανάκτηση από Containerships with Sails and Fuel Cells Receive ABS Design Approval : <https://maritime-executive.com/article/containerships-with-sails-and-fuel-cells-receive-abs-design-approval>
- Tuovila, A. (2021, April 18). *Investopedia*. Ανάκτηση από Net Present Value (NPV) Rule: Definition, Use, and Example: <https://www.investopedia.com/terms/n/npv-rule.asp>
- Tuovila, A. (2023, October 31). *Investopedia*. Ανάκτηση από Depreciation: Definition and Types, With Calculation Examples: <https://www.investopedia.com/terms/d/depreciation.asp>
- Twin, A. (2023, July 12). *Investopedia*. Ανάκτηση από Capital Recovery: Definition, Analysis, and Uses: <https://www.investopedia.com/terms/c/capital-recovery.asp>
- UNFCCC*. (1992). Ανάκτηση από UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- University of Michigan*. (2023, August). Ανάκτηση από Climate Change: Science and Impacts Factsheet: https://css.umich.edu/sites/default/files/2023-10/Climate%20Science_CSS05-19_0.pdf
- Wall Street Prep*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Profitability Index (PI) | Formula + Calculator: <https://www.wallstreetprep.com/knowledge/profitability-index/>
- Wärtsilä*. (χ.χ.). Ανάκτηση από The Wärtsilä 32 methanol engine: A new route to maritime decarbonisation: <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/wartsila-32-methanol-engine>
- Wärtsilä*. (2023, February 20). Ανάκτηση από Methanol as marine fuel – is it the solution you are looking for?: <https://www.wartsila.com/insights/article/methanol-fuel-for-thought-in-our-deep-dive-q-a>

- Wind Rose Network*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Maritime Sector:
<https://www.windrosenetwork.com/Maritime-Sector>
- WinGD*. (2019, May 20). Ανάκτηση από 2020 IMO global 0.50 percent:
https://www.wingd.com/en/documents/technical-information-notes/wingd_tin011_imo-2020-operation-guideline/
- Βαλαβανίδης, Θ., & Ευσταθίου, Κ. (2010, Νοέμβριος). *ΕΚΠΑ - Τμήμα Χημείας*. Ανάκτηση από Η χημική ένωση του μήνα: http://195.134.76.37/chemicals/chem_methanol.htm
- IMO*. (2020, December 7). Ανάκτηση από INTERIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS USING METHYL/ETHYL ALCOHOL AS FUEL: <https://www.register-iri.com/wp-content/uploads/MSC.1-Circ.1621.pdf>
- Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας*. (χ.χ.). Ανάκτηση από Κλιματική Αλλαγή:
<https://www.mirc.ntua.gr/natural-disasters-metsovo/climate-change>
- Πετρόπουλος, Ι. (2017). *Διπλωματική Εργασία: "Εμπόριο Ρύπων: Το Αμερικανικό Σύστημα Cap and Trade"*. Θεσσαλονίκη.
- Σχινάς, Ο., & Λυρίδης, Δ. (2002). *Σημειώσεις Λογιστικής και Τεχνικής Ανάλυσης*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ψαρούτης, Χ. (2005). *ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ Ι*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- 無國界醫生. (2020, April 28). *Medecins Sans Frontieres*. Ανάκτηση από Proper use of alcohol-based disinfectant products to avoid potential methanol poisoning: <https://msf.hk/en/content/proper-use-alcohol-based-disinfectant-products-avoid-potential-methanol-poisoning>