



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ
ΜΗΔΕΝΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ
ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΑΙΑ**

**ADVANTAGES AND CHALLENGES OF USING ZERO CARBON
FOOTPRINT FUELS IN SHIPPING**

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΔΕΜΕΝΟΠΟΥΛΟΥ

A.M.: 18393053

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΛΙΒΑΝΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Πλεονεκτήματα και Προκλήσεις χρήσης καυσίμων μηδενικού αποτυπώματος διοξειδίου του άνθρακα στη Ναυτιλία

Συγγραφέας

Κωνσταντίνα Δεμενοπούλου (Α.Μ.: 18393053)

Επιβλέπων

Γεώργιος Λιβανός,

<...> Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

27/05/2024

Εξεταστική Επιτροπή

κ. Γεώργιος Λιβανός,

Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

κ. Αντώνιος Χατζηαποστόλου,

Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

κ. Σωτηρία Δημητρέλλου,

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Κωνσταντίνα Δεμενοπούλου του Νικολάου Ευγενίου, με αριθμό μητρώου 18393053 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Η Δηλούσα

Κωνσταντίνα Δεμενοπούλου



Ευχαριστίες

Κυρίως και πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεώργιο Λιβανό για την καθοδήγησή και την βοήθειά του σε όλα τα στάδια έρευνας της εν λόγω Διπλωματικής εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την περάτωση αυτής. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κ. Ισίδωρο Ιακωβίδη, κ.Κωνσταντίνο Πολίτη και κ.Γεώργιο Βουρλιωτάκη για τις χρήσιμες συμβουλές τους. Επίσης, αμέριστη ήταν η στήριξη όλων των κοντινών μου προσώπων, φίλων, συμφοιτητριών και συγγενών και για τον λόγο αυτό ευχαριστώ τον καθένα ξεχωριστά.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην οικογένειά μου, που όλα τα μέλη της έδειξαν κατανόηση και υπομονή καθ' όλη τη διάρκεια ενασχολήσεως μου με το συγκεκριμένο θέμα της Διπλωματικής έρευνας. Συγκεκριμένα, τόσο ο πατέρας μου όσο και η μητέρα μου στάθηκαν αρωγοί και συμπαραστάτες από την αρχή ως το τέλος αυτής της ερευνητικής διαδικασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά κοινή παραδοχή η ναυτιλιακή βιομηχανία κατέχει σημαντικό ρόλο τόσο στην κλιματική αλλαγή όσο και στις παγκόσμιες εκπομπές ρύπων. Ως εκ τούτου, ο ναυτιλιακός κλάδος δέχεται πιέσεις για την μετάβαση σε πιο βιώσιμες πρακτικές όπως είναι η χρήση καυσίμων με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα για την μείωση των εκπομπών επιβλαβών αερίων στην ατμόσφαιρα. Στα καύσιμα αυτά συγκαταλέγονται το υδρογόνο, η αμμωνία, η μεθανόλη και τα βιοκαύσιμα. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτών των καυσίμων περιλαμβάνουν σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συμμόρφωση με τις κανονιστικές απαιτήσεις και βελτίωση της κοινωνικής εικόνας των επιχειρήσεων. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης αρκετές προκλήσεις που συνδέονται με τη χρήση καυσίμων μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα, όπως το υψηλό κόστος παραγωγής και υποδομής, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, οι σημαντικές επενδύσεις και τα τεχνικά εμπόδια που περιλαμβάνουν διάφορες αλλαγές στους κανονισμούς και στις αλυσίδες εφοδιασμού. Παρ' όλα αυτά, η χρήση εναλλακτικών καυσίμων καθίσταται κρίσιμη για την βιωσιμότητα της ναυτιλιακής βιομηχανίας και για την επίτευξη των παγκόσμιων στόχων σχετικά με την μείωση των επιβλαβών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η εν λόγω διπλωματική εργασία πραγματεύεται τα πλεονεκτήματα και τις προκλήσεις της εφαρμογής αυτών των καινοτόμων τεχνολογιών εστιάζοντας κυρίως στην αμμωνία, μεθανόλη και στο υδρογόνο και εξετάζει τα τρέχοντα επίπεδα ετοιμότητάς τους και την αναμενόμενη εξέλιξή τους τα επόμενα χρόνια.

Λέξεις κλειδιά: Ναυτιλία, εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καύσιμα με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα, υδρογόνο, αμμωνία, μεθανόλη, βιωσιμότητα, εναλλακτικά καύσιμα, πλεονεκτήματα, προκλήσεις.

ABSTRACT

It is widely acknowledged that the shipping industry has a significant role to play in both climate change and global emissions. Therefore, the shipping industry is under pressure over the transition to more sustainable practices such as the use of zero carbon footprint fuels to reduce emissions of harmful gases into the atmosphere. These fuels include hydrogen, ammonia, methanol and biofuels. The benefits of using these fuels involve significant reductions in greenhouse gas emissions, compliance with regulatory requirements and improved public image of businesses. However, there are also several challenges associated with the use of zero carbon footprint fuels, such as high production and infrastructure costs, low energy density, significant investment and technical barriers including various changes in infrastructure, regulations and supply chains. Nevertheless, the use of alternative fuels is becoming critical for the sustainability of the shipping industry and for achieving global targets to reduce harmful greenhouse gas emissions. This dissertation reviews the advantages and challenges of implementing these innovative technologies with emphasis on ammonia, methanol and hydrogen and examines their current levels of readiness and their expected evolution in the coming years.

Key words: Maritime, greenhouse gas emissions, maritime, zero carbon footprint fuels, hydrogen, ammonia, methanol, sustainability, alternative fuels, advantages, challenges.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
1 Περιβαλλοντικό Πρόβλημα απεξάρτησης της ναυτιλίας από τον άνθρακα	16
1.1 Κανονιστικό πλαίσιο Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού	17
1.2 Κανονιστικό Πλαίσιο Ενεργειακής Αποδοτικότητας	18
1.2.1 EEDI – Energy Efficiency Design Index	20
1.2.2 EEXI – Energy Efficiency Existing Ship	23
1.2.3 SEEMP – Ship Energy Efficiency Monitoring Plan	27
1.2.4 CII – Carbon Intensity Indicator	30
1.3 Κανονιστικό πλαίσιο Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU)	37
1.3.1 Στόχοι Ευρωπαϊκής Ένωσης	37
1.3.2 EU Emissions Trading System (ETS)	38
1.4 Προτεινόμενες Λύσεις Προβλήματος	39
2 Εναλλακτικά Καύσιμα	41
2.1 Μεθανόλη	43
2.1.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	43
2.1.2 Μέθοδοι Παραγωγής Μεθανόλης	48
2.1.3 Μέσα αποθήκευσης CH ₃ OH	57
2.1.4 Τεχνολογία Μηχανών με Μεθανόλη	58
2.1.5 Υφιστάμενα Πλοία με Μεθανόλη ως καύσιμο	60
3 Αμμωνία	62
3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	62
3.2 Μέθοδοι Παραγωγής Αμμωνίας	65
3.3 Μέσα αποθήκευσης NH ₃	70

3.4	Τεχνολογία Μηχανών με Αμμωνία.....	73
4	Υδρογόνο	76
4.1	Γενικά Χαρακτηριστικά.....	76
4.2	Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου	77
4.3	Μέσα Αποθήκευσης H ₂	79
4.4	Τεχνολογία Μηχανών με Υδρογόνο	80
5	Σύγκριση Καυσίμων CH ₃ OH, NH ₃ & H ₂	82
6	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	86
6.1	Χαρακτηριστικά πλοίου, μηχανών και προπέλας.....	86
6.2	Δεδομένα Έρευνας.....	87
6.3	Ανάλυση Δεδομένων	90
6.4	Υπολογισμός λειτουργικού δείκτη CII - Συμπεράσματα	94
6.4.1	Παραδοχές Έρευνας.....	96
6.5	Υπολογισμός Δασμών EU – ETS	97
6.5.1	Υποθέσεις Υπολογισμού ETS.....	97
6.5.2	Υπολογισμός Κόστους Καυσίμου – Συμπεράσματα	98
7	Σχήματα	101
8	Πίνακες	102
9	Βιβλιογραφία	103

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάθε εποχή χαρακτηρίζεται από τους ανθρώπους που η κοινωνία περιλαμβάνει και εξελίσσεται με βάση τα κοινωνικά, οικονομικά και περιβαλλοντολογικά στοιχεία που την διακατέχουν. Το ίδιο ισχύει και για τον 21^ο αιώνα, την εποχή της αφθονίας των υλικών αγαθών, της ευμάρειας και της προόδου που παρ' όλα τα επιτεύγματα που έχει «κερδίσει» συνεχίζει να αντιμετωπίζει προβλήματα. Οι προκλήσεις και τα ζητήματα που αναφύονται σήμερα, στην εποχή της τεχνολογίας, είναι παγκόσμιας εμβέλειας και συνήθως είναι εκείνα που οφείλονται στην παραγωγή τροφίμων, στην εκβιομηχάνιση, στη μόλυνση του περιβάλλοντος, στη χρησιμότητα των φυσικών πόρων, στην αλλαγή της ανθρώπινης εργασίας και στις σχέσεις του πλούσιου Βορρά με τις αναπτυσσόμενες χώρες.

Στην σύγχρονη κοινωνική πραγματικότητα παρατηρείται μεταξύ άλλων το φαινόμενο του υπερκαταναλωτισμού που επιφέρει την ανατροπή της οικολογικής ισορροπίας και τελικά τη καταστροφή του περιβάλλοντος. Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος γίνεται από διάφορους φορείς της πολιτείας οι οποίοι στην προσπάθειά τους να ικανοποιήσουν την ανθρώπινη ύπαρξη καταστρέφουν το φυσικό οικοσύστημα που περιβάλλει ουσιαστικά τον άνθρωπο. Σημαντικό αντίκτυπο σε αυτή την παγκόσμια οικολογική καταστροφή η οποία εντείνεται όλο και περισσότερο τις τελευταίες δεκαετίες φέρει και η ναυτιλιακή βιομηχανία.

Η ναυτιλία ως διεθνής οργανισμός που συμβάλλει ενεργά στην παγκόσμια εμπορική δραστηριότητα κατέχει αναμφισβήτητα κυρίαρχο ρόλο στην μεταφορά της πλειονότητας των εμπορευμάτων με ασφαλή και αποτελεσματικό τρόπο. Είναι φανερό πως το εμπόριο παγκοσμίως καταγράφει αυξανόμενη τάση γεγονός που καθορίζει και την εμφάνιση μεγαλύτερου στόλου στις θαλάσσιες δραστηριότητες. Ως εκ τούτου, οι καταναλώσεις πηγών ενέργειας αυξάνονται και έτσι οι ρύποι από τις εκπομπές επιβλαβών αερίων στην ατμόσφαιρα που όλο και ένα μεγιστοποιούνται, επιβαρύνουν την ατμοσφαιρική και θαλάσσια ρύπανση και εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου ιδιαίτερα με την παρουσία διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Αναμφίβολα, λοιπόν, αυτή η ραγδαία εξέλιξη στην επιβάρυνση του οικοσυστήματος ενέχει πολλούς κινδύνους για όλη την ανθρωπότητα και έτσι κρίνεται άμεση η αντιμετώπισή της. Ειδικότερα προκειμένου να περιοριστεί το εν λόγω πρόβλημα

αρμόδιοι οργανισμοί περιβάλλοντος και ανάπτυξης έχουν προτείνει έρευνες και μελέτες που είτε εφαρμόζονται ήδη είτε πρόκειται να τεθούν σε ισχύ. Σε αυτούς τους οργανισμούς συγκαταλέγεται και ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) ο οποίος ως εξειδικευμένος φορέας των Ηνωμένων Εθνών φέρει ευθύνη για την δημιουργία και την εφαρμογή παγκόσμιων κανονισμών σχετικά με την προστασία, την αποδοτικότητα και την ασφάλεια του περιβάλλοντος των πλοίων. Σκοπός όλων αυτών των κανονιστικών πλαισίων είναι η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών από τους άμεσα ενδιαφερόμενους οργανισμούς έτσι ώστε να συμβάλλουν ενεργά στην μείωση της υποβάθμισης του περιβάλλοντος, της κλιματικής αλλαγής και της απώλειας της βιοποικιλότητας. [1]

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι περιβαλλοντικές προκλήσεις, αναμένεται ότι θα χρειαστούν τροποποιήσεις σε τουλάχιστον 70% των υφιστάμενων ναυτιλιακών καυσίμων για τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς αυτούς του IMO. Με την υιοθέτηση ενός συνδυασμού ενεργειακά αποδοτικών πρακτικών και τη μετάβαση σε πηγές ενέργειας χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα, φαίνεται να υπάρχει μια πολλά υποσχόμενη ευκαιρία να επιτευχθούν εξαιρετικά χαμηλές, αν όχι μηδενικές, εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλιακή βιομηχανία. Συγκεκριμένα, διάφορες τεχνικές και λειτουργικές λύσεις για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG)¹ στη ναυτιλία περιλαμβάνουν συστήματα ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων, βελτιωμένο σχεδιασμό και απόδοση της γάστρας του πλοίου, εγκατάσταση ή μετασκευή ενεργειακά αποδοτικών κινητήρων, μείωση της ταχύτητας και καλύτερη δρομολόγηση και προγραμματισμό.

Οι τεχνολογίες που βασίζονται σε κινητήρες ντίζελ υφίστανται βελτιώσεις, όπως η ενσωμάτωση για παράδειγμα με τη χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG)² σε κινητήρες αερίου ή διπλού καυσίμου. Συγκεκριμένα έρευνες έχουν δείξει πως το ΥΦΑ μπορεί να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές NO_x οξειδίων του αζώτου, SO_x οξειδίων του θείου και άλλων σωματιδίων, και έτσι η εξοικονόμηση αερίων του θερμοκηπίου να περιοριστεί σε 21% κατ' ανώτατο όριο. Επιπλέον, η δέσμευση άνθρακα μετά την καύση μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ από τον ναυτιλιακό τομέα

¹ Greenhouse Gas emissions (GHG)

² Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (ΥΦΑ)

βραχυπρόθεσμα, λειτουργώντας ως μεταβατική λύση μέχρι να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν τεχνολογίες μηδενικών εκπομπών .

Τα πιο μείζονος σημασίας εναλλακτικά καύσιμα που ερευνώνται στην επικαιρότητα από πολλούς οργανισμούς και για τα οποία γίνεται αναφορά στην εν λόγω διπλωματική εργασία είναι η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο. Κάθε ένα από αυτά τα καύσιμα μηδενικού αποτυπώματος διοξειδίου του άνθρακα περιλαμβάνουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα, χαρακτηριστικά τα οποία οφείλουν να διερευνηθούν και να μελετηθούν σε βάθος προτού εφαρμοστούν σε μεγάλο εύρος πλοίων του παγκόσμιου στόλου.

Πιο αναλυτικά, η εν λόγω διπλωματική εργασία αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο επισημαίνει το παγκόσμιο πρόβλημα της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος και παρουσιάζει τα μέτρα που έχει θεσπίσει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός καθώς και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προκειμένου να μειωθούν τα ρυπογόνα αέρια στην ατμόσφαιρα. Εν συνεχεία, αφού παρατεθούν ορισμένες προτεινόμενες λύσεις για την ελάττωση του ποσοστού διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον, γίνεται μια εισαγωγή στο δεύτερο κεφάλαιο όπου αναλύονται σε βάθος τα εναλλακτικά καύσιμα, η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο. Συγκεκριμένα, η ανάλυση για το εκάστοτε καύσιμο γίνεται τόσο στο τρίτο όσο και στο τέταρτο κεφάλαιο με την περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών του, των μεθόδων παραγωγής και αποθήκευσής του και τέλος τις διαθέσιμες τεχνολογίες μηχανών που υπάρχουν.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται μια μελέτη περίπτωσης (case study) ως το υπολογιστικό κομμάτι της διπλωματικής. Πιο συγκεκριμένα, διερευνάται το ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα, με βάση τον δείκτη CII, που εκπέμπει ένα δεξαμενόπλοιο έχοντας συμβατική μηχανή που καταναλώνει πετρέλαιο και αντίστοιχα υπολογίζεται ο δείκτης CII για το εν λόγω πλοίο με μηχανή που καταναλώνει κυρίως μεθανόλη. Με αυτόν τον τρόπο η μελέτη περίπτωσης καταλήγει σε μια σύγκριση των δύο δεικτών και τελικά προσεγγίζει μια βέλτιστη, πιο αποδοτική και λιγότερο επιβλαβή επιλογή καυσίμου για το συγκεκριμένο τύπο πλοίου.

1 Περιβαλλοντικό Πρόβλημα απεξάρτησης της ναυτιλίας από τον άνθρακα

Κατά κοινή ομολογία, με την πάροδο των χρόνων το παγκόσμιο εμπόριο αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς και θα συνεχίσει να αναπτύσσεται καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται και ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται. Η ναυτιλία είναι ένας κρίσιμος παράγοντας του διεθνούς εμπορίου, καθώς το 80% της παγκόσμιας διακίνησης αγαθών πραγματοποιείται μέσω θαλάσσης, μετρούμενο σε τόνους ναυτικών μιλίων (tnm), όπως αναφέρθηκε το 2021 στο Συνέδριο των Ηνωμένων Εθνών με θέμα «το εμπόριο και την Ανάπτυξη» [2]. Το υπόλοιπο 28% πραγματοποιείται με χερσαία μεταφορικά μέσα, όπως τρένα και φορτηγά, ή με εναέρια μέσα, όπως εμπορικά αεροπλάνα. Είναι σαφές ότι η ναυτιλία διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη διασφάλιση της διαθεσιμότητας τροφίμων, καυσίμων και νερού παγκοσμίως και στην πρόληψη της φτώχειας.

Ωστόσο, παρά τα πολλά οφέλη που προσφέρει η ναυτιλία, έχει επίδραση εξίσου σημαντική και στην εμφάνιση περιβαλλοντικών προβλημάτων. Ο παγκόσμιος στόλος της ναυτιλίας περιλαμβάνει περίπου 100.000 πλοία, τα οποία σχεδόν όλα κινούνται με ορυκτά καύσιμα, όπως το βαρύ μαζούτ (H.F.O.), το ναυτιλιακό ντίζελ (M.D.O.) και το ναυτιλιακό πετρέλαιο κίνησης (M.G.O.) [3]. Μελέτες δείχνουν ότι η λειτουργία αυτών των πλοίων έχει ως αποτέλεσμα την ετήσια κατανάλωση βαρέως μαζούτ της τάξης των 339 Mt, που ευθύνονται για την παραγωγή 1.076 Mt αερίων και εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το έτος 2018 εκτιμήθηκε ότι τα εν λόγω αέρια που παράγονται από την καύση ορυκτών καυσίμων στα πλοία αντιστοιχούν στο 2,9% των παγκόσμιων αερίων του θερμοκηπίου GHG [4]. Οι αρνητικές επιπτώσεις αυτών των αερίων στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία είναι σημαντικές, όπως η κακή ποιότητα του αέρα, ο σχηματισμός νεφών που συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή και ο πρόωρος θάνατος περίπου 400.000 ανθρώπων κάθε χρόνο. [Μελέτες [5] [6]]

Είναι σαφές λοιπόν ότι πρέπει να αναληφθεί δράση για τη μείωση αυτών των προβλημάτων προτού επιδεινωθούν και γίνουν μη αναστρέψιμα. Εδώ και αρκετά χρόνια, οι αρμόδιοι φορείς προσπαθούν να βρουν τρόπους για τη μείωση των ρύπων που παράγονται από τη ναυτιλία, αλλά μέχρι σήμερα δεν έχει υπάρξει κανένα ουσιαστικό αποτέλεσμα. Ως εκ τούτου, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός - IMO

έχει θέσει στόχους για την παγκόσμια ναυτιλία με σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη λειτουργία των πλοίων. Ακόμη, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ακολουθεί το παράδειγμα του IMO, θεσπίζοντας νέους κανονισμούς για τη λειτουργία των πλοίων τα επόμενα χρόνια με την εφαρμογή μέτρων .

1.1 Κανονιστικό πλαίσιο Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) αποτελεί έναν κομβικό θεσμό στον τομέα της ναυσιπλοΐας, καθώς επιδιώκει την ομαλή και ασφαλή λειτουργία της ναυτιλίας μέσω της συνεργασίας μεταξύ των 175 χωρών μελών του. Ως οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών, κύριος στόχος του IMO είναι η προώθηση της διεθνούς συνεργασίας για τον έλεγχο και τη ρύθμιση των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ιδρύθηκε το 1948 στη Γενεύη ως Διακυβερνητικός Ναυτιλιακός Συμβουλευτικός Οργανισμός (IMCO³) και το 1982 μετονομάστηκε σε Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), ενώ σήμερα έχει την έδρα του στο Λονδίνο. Η δομή του Οργανισμού περιλαμβάνει μια Συνέλευση, ένα Συμβούλιο, πέντε κύριες επιτροπές και διάφορες υποεπιτροπές που υποστηρίζουν τις εργασίες των τεχνικών επιτροπών.

Στις κύριες επιτροπές του IMO περιλαμβάνονται: η Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος - Marine Environment Protection Committee (MEPC), η Επιτροπή Ναυτικής Ασφάλειας - Maritime Safety Committee (MSC), η Νομική Επιτροπή - Legal Committee, η Επιτροπή Τεχνικής Συνεργασίας - Steering Committee και η Υποεπιτροπή του IMO για τη μεταφορά φορτίων και εμπορευματοκιβωτίων (CCC) - Sub-Committee on Carriage of Cargoes and Containers. Οι επιτροπές αυτές ασχολούνται με ζητήματα που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος, την ασφάλεια των πλοίων και των θαλάσσιων μεταφορών, τη νομική ρύθμιση των ναυτιλιακών ζητημάτων, την τεχνική συνεργασία και τη διευκόλυνση της ναυσιπλοΐας και των εμπορικών συναλλαγών.

Προκειμένου να επιτύχει αυτούς τους στόχους, ο IMO εργάζεται συνεχώς για την ενημέρωση και την επέκταση των κανονιστικών πλαισίων που αφορούν τη ναυτιλία, προωθώντας την έρευνα, την ανάπτυξη και την εφαρμογή νέων τεχνολογιών και

³ Intergovernmental Maritime Consultative Organization (IMCO)

πρακτικών που συμβάλλουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, τη μείωση των εκπομπών και την προστασία του περιβάλλοντος. Η συνεργασία του IMO με άλλους διεθνείς οργανισμούς, κυβερνήσεις και τη ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί καίριο παράγοντα για την επίτευξη αυτών των στόχων και την προώθηση της βιωσιμότητας και της αειφορίας στον τομέα της ναυσιπλοΐας.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στην εξασφάλιση της ασφάλειας και της προστασίας της διεθνούς ναυτιλίας, ενώ παράλληλα επιδιώκει τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται από αυτήν. Έχοντας αναγνωρίσει την ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από τα πλοία, ο IMO έχει θέσει φιλόδοξους στόχους και έχει εισάγει αυστηρότερους κανονισμούς για τους φορείς εκμετάλλευσης και τους πλοιοκτήτες στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

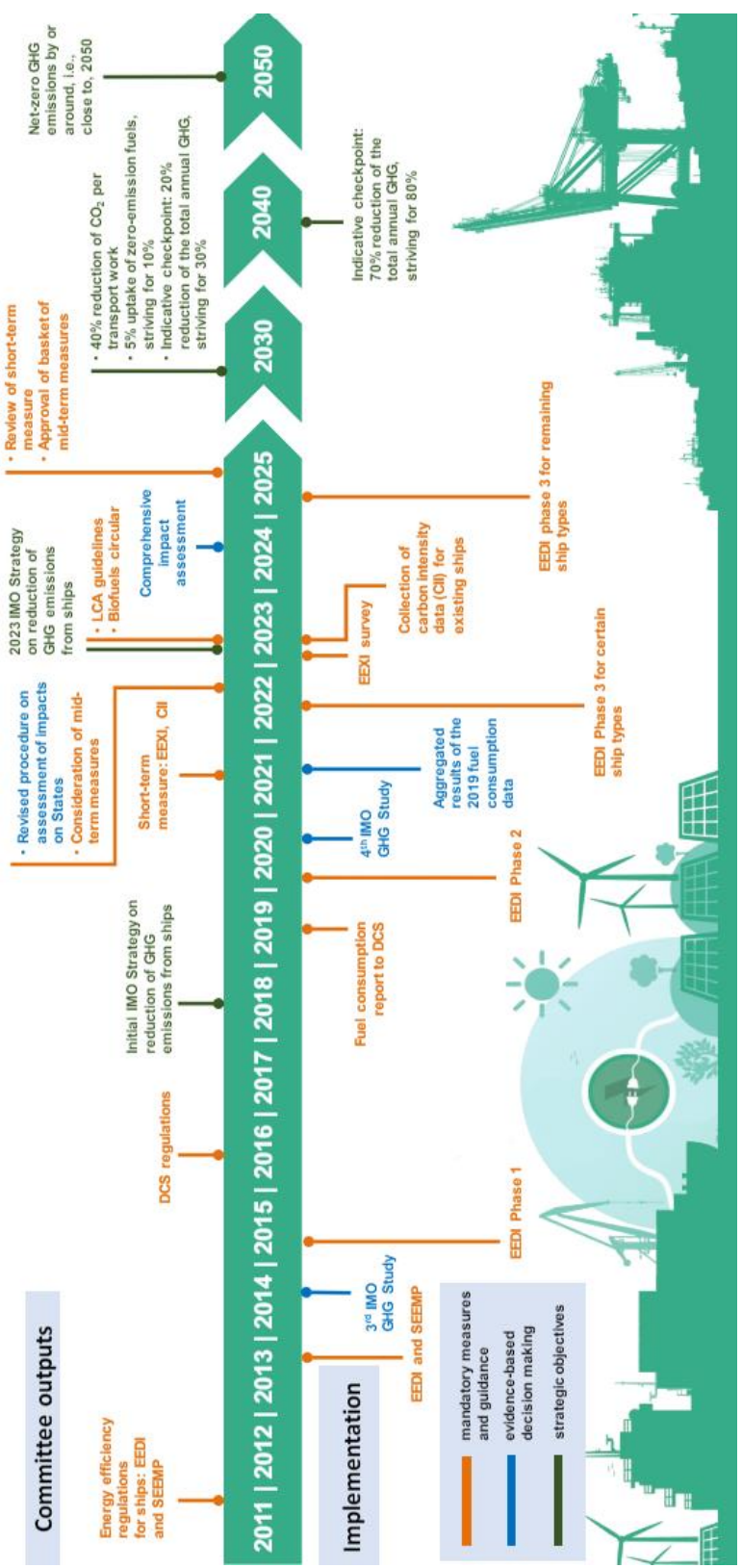
Μεταξύ των κυριότερων στόχων του IMO που απεικονίζονται και παρακάτω στο σχήμα 1.1 περιλαμβάνονται η μείωση των εκπομπών CO₂ που προέρχονται από τη ναυτιλία κατά 40% έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008, καθώς και η ελάττωση των συνολικών εκπομπών GHG κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050. Αυτοί οι στόχοι είναι συνυφασμένοι με τη Συμφωνία του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή, η οποία στοχεύει στον περιορισμό της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας σε επίπεδα πολύ κάτω των 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα [4].

1.2 Κανονιστικό Πλαίσιο Ενεργειακής Αποδοτικότητας

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, ο IMO κατά την συνεδρίαση της MEPC, ή αλλιώς Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος, ενέκρινε ένα νέο κεφάλαιο στη διεθνή σύμβαση MARPOL για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία το 2011. Το κεφάλαιο αυτό αποσκοπούσε στην ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων με τον καθορισμό προτύπων επιδόσεων που θα μειώσουν τελικά τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων από τα ορυκτά καύσιμα κατά τη διαδικασία της καύσης. Παρακάτω αναλύονται οι δείκτες ενεργειακής απόδοσης που ισχύουν με βάση τους κανονισμούς που θεσπίστηκαν για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Addressing climate change

Over a decade of regulatory action to cut GHG emissions from shipping



Σχήμα 1.1.1 Δράσεις του IMO και μέτρα μείωσης εκπομπών (GHG) και CO₂ (Πηγή: IMO)

1.2.1 EEDI – Energy Efficiency Design Index

Σύμφωνα με τη διεθνή συνθήκη του Πρωτοκόλλου του Κιότο, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός εφάρμοσε τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης για τα πλοία ως αρχική νομικά δεσμευτική πολιτική. Αυτός θεσπίστηκε από την επιτροπή για τη διαφύλαξη του θαλάσσιου περιβάλλοντος το 2011 και συμπεριλήφθηκε στο παράρτημα VI της σύμβασης MARPOL. Ο κανονισμός EEDI αφορά τα πλοία που ζυγίζουν 400 τόνους ολικής χωρητικότητας και άνω και δραστηριοποιούνται σε διεθνή ταξίδια, εξαιρουμένων των πλωτών μέσων όπως οι πλατφόρμες, τα γεωτρύπανα και τα μη μηχανικά κινούμενα σκάφη, όπως οι φορτηγίδες. Η μαθηματική φόρμουλα υπολογισμού που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση του δείκτη EEDI παρουσιάζεται παρακάτω.

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^*) + \left(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPPI} P_{PPI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AE_{eff(i)}} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}^{**} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_i \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m}$$

Εξίσωση 1. Υπολογισμός EEDI (πηγή: MARPOL Annex VI)

Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης σχεδιασμού (EEDI) είναι ένα κρίσιμο τεχνικό μέτρο που αποσκοπεί στην ενθάρρυνση της χρήσης πιο ενεργειακά αποδοτικού εξοπλισμού και κινητήρων, ιδίως για τα νεότευκτα πλοία. Καθορίζει ένα ελάχιστο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης ανά μονάδα χωρητικότητας, όπως το τονομίλι, με βάση τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου. Έπειτα από τον Ιανουαρίου του 2013, όπου υπήρξε μια διετής εισαγωγική φάση για την εφαρμογή του δείκτη EEDI, τα νεότευκτα πλοία ήταν απαραίτητο να πληρούν το εν λόγω όριο αναφοράς για τον αντίστοιχο τύπο πλοίου ως προς την σχεδιάσή του. Το όριο αυτό ενισχύεται σταδιακά σε αυστηρότερο πλαίσιο κάθε πέντε χρόνια, ώστε να υπάρχει συνεχή καινοτομία και τεχνική πρόοδο σε όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του καυσίμου ενός πλοίου, από τη φάση του σχεδιασμού του και έπειτα. Αυτό καταδεικνύει τη δυνατότητα του EEDI να ενθαρρύνει τη συνεχή βελτίωση και ανάπτυξη στη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Ο Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Σχεδιασμού (EEDI) είναι ένας μηχανισμός βασισμένος στις επιδόσεις του πλοίου ο οποίος δεν επιβάλλει τη χρήση συγκεκριμένων τεχνολογιών στο σχεδιασμό των πλοίων, δίνοντας στην ναυτιλιακή βιομηχανία την ελευθερία επιλογής στη δράση της. Με άλλα λόγια, οι σχεδιαστές και οι κατασκευαστές πλοίων έχουν την ελευθερία να χρησιμοποιούν τις πιο οικονομικά αποδοτικές λύσεις για την τήρηση των κανονισμών, αρκεί να πληρούν το απαιτούμενο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης EEDI προσδιορίζει έναν ακριβή αριθμό για ένα συγκεκριμένο σχεδιασμό πλοίου, ο οποίος υπολογίζεται σε γραμμάρια διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανά μίλι που διένυσε το πλοίο έχοντας φορτίο. Να επισημανθεί επίσης πως με μικρό δείκτη EEDI συνεπάγεται υψηλότερη ενεργειακή απόδοση στο σχεδιασμό του πλοίου. Ο εν λόγω δείκτης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας έναν τύπο που βασίζεται στις τεχνικές παραμέτρους σχεδιασμού ενός συγκεκριμένου πλοίου.

$$EEDI = \frac{\text{Επιπτώσεις στο περιβάλλον}}{\text{Κοινωνικό όφελος}} = \frac{\text{Εκπομπές CO}_2}{\text{Μεταφορικό έργο}} = \frac{\text{Power} * \text{SFC} * \text{CF}}{\text{Deadweight} * \text{speed}}$$

Σχήμα 1.2.1 Τρόπος έκφρασης του δείκτη EEDI, ο λόγος περιβαλλοντικού κόστους προς το κοινωνικό όφελος

Έπειτα από το πέρας της αρχικής - μηδενικής φάσης εφαρμογής του EEDI το έτος 2013, τέθηκε σε ισχύ το 2015 η πρώτη φάση μείωσης των εκπομπών CO₂ για τους αντίστοιχους τύπους πλοίων κατά 10%. Το ποσοστό μείωσης του δείκτη επαναπροσδιορίζεται κάθε πέντε χρόνια όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ώστε να συμβαδίζει με τις εξελίξεις στην αποδοτικότητα και τα μέτρα μείωσης. Τα ποσοστά μείωσης έχουν καθοριστεί μέχρι το 2025 (πίνακας 1) , οπότε οι εκάστοτε τύποι πλοίων θα πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές CO₂ κατά 30% με βάση μια γραμμή αναφοράς που αντιπροσωπεύει τη μέση αποδοτικότητα των πλοίων που κατασκευάστηκαν μεταξύ 2000 και 2010. Ο δείκτης EEDI προορίζεται για τα μεγαλύτερα και πιο ενεργοβόρα τμήματα του παγκόσμιου εμπορικού στόλου και καλύπτει τις εκπομπές από νέα πλοία διαφόρων κατηγοριών, συμπεριλαμβανομένων των δεξαμενόπλοιων, των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου, των πλοίων μεταφοράς

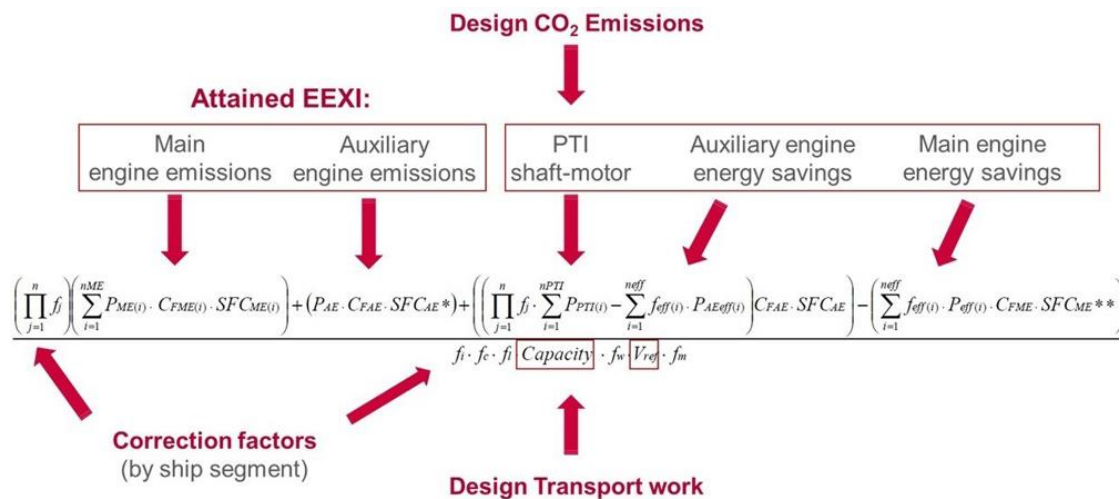
αερίου, των πλοίων γενικού φορτίου, των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, των πλοίων μεταφοράς φορτίου ψύξης και των συνδυασμένων πλοίων. Το 2014 εγκρίθηκαν από την MEPC τροποποιήσεις των κανονισμών του EEDI, με τις οποίες επεκτάθηκε το πεδίο εφαρμογής του EEDI ώστε να συμπεριλάβει τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, τα φορτηγά πλοία Ro-Ro (μεταφορείς οχημάτων), τα επιβατηγά πλοία Ro-Ro και τα επιβατηγά κρουαζιερόπλοια που χρησιμοποιούν μη συμβατική πρόωση. Ως αποτέλεσμα αυτού, περίπου το 85% των εκπομπών CO₂ από τη διεθνή ναυτιλία περιλαμβάνεται πλέον στο διεθνές ρυθμιστικό καθεστώς. [7]

Πίνακας 1. Συντελεστές μείωσης για απαιτούμενο EEDI (πηγή: ABS)

Ship Type	Size	Reduction Factor
Bulk Carrier	200,000 DWT and above	15
	20,000 and above but less than 200,000 DWT	20
	10,000 and above but less than 20,000 DWT	0-20*
Gas Carrier	15,000 DWT and above	30
	10,000 and above but less than 15,000 DWT	20
	2,000 and above but less than 15,000 DWT	0-20*
Tanker	200,000 DWT and above	15
	20,000 and above but less than 200,000 DWT	20
	4,000 and above but less than 20,000 DWT	0-20*
Containership	200,000 DWT and above	50
	120,000 and above but less than 200,000 DWT	45
	80,000 and above but less than 120,000 DWT	35
	40,000 and above but less than 80,000 DWT	30
	15,000 and above but less than 40,000 DWT	20
	10,000 and above but less than 15,000 DWT	0-20*
General Cargo Ship	15,000 DWT and above	30
	3,000 and above but less than 15,000 DWT	0-30*
Refrigerated Cargo Carrier	5,000 DWT and above	15
	3,000 and above but less than 5,000 DWT	0-15*
Combination Carrier	20,000 DWT and above	20
	4,000 and above but less than 20,000 DWT	0-20*
LNG Carrier	10,000 and above	30
Ro-ro Vehicle Carrier	10,000 and above	15
Ro-ro Cargo Ship	2,000 and above	5
	1,000 and above but less than 2,000 DWT	0-5*
Ro-ro Passenger Ship	1,000 DWT and above	5
	250 and above but less than 1,000 DWT	0-5*
Cruise Passenger Ship with Non-conventional Propulsion	85,000 GT and above	30
	25,000 GT and above but less than 85,000 GT	0-30*

1.2.2 EEXI – Energy Efficiency Existing Ship

Ο δείκτης EEXI ουσιαστικά αποτελεί την εξέλιξη του προαναφερθέντος δείκτη EEDI και αφορά τα υπάρχοντα πλοία με ολική χωρητικότητα 400 GT και άνω. Συγκεκριμένα, ο IMO εισήγαγε τον Δείκτη Ενεργειακής Απόδοσης Υφιστάμενων Πλοίων (EEXI) κατά την συνεδρίασή του το 2021 (MEPC75) για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος ως μέτρο για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία, λαμβάνοντας υπόψη αποκλειστικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Ο εν λόγω δείκτης EEXI εκφράζει το ποσό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα προς την μεταφορική ικανότητα του πλοίου ανά ταξίδι και για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται ως κύρια μαθηματική φόρμουλα ο ακόλουθος τύπος.



Σχήμα 1.2.2 Περιγραφή δείκτη EEXI (πηγή: Bureau Veritas)

Ο επιτευχθείς δείκτης EEXI, αυτός δηλαδή που υπολογίζεται για κάθε πλοίο, συγκρίνεται με την απαιτούμενη τιμή EEXI και σε περίπτωση που ο δείκτης είναι μικρότερος της απαιτούμενης τιμής τότε δεν απαιτείται κάποια αλλαγή επί του πλοίου. Σε διαφορετική περίπτωση πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες βελτιστοποιήσεις που αφορούν την ενεργειακή απόδοση του πλοίου ώσπου να ισχύει η συνθήκη που παρουσιάζεται παρακάτω.

Συγκεκριμένα σύμφωνα με την παράγραφο 4 του κανονισμού “IMO Guidelines for Calculation of Reference Lines for use with the Energy Efficiency Design Index (EEDI)”, ως γραμμή αναφοράς ορίζεται μια καμπύλη που αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή του δείκτη προσαρμοσμένη σε ένα εύρος τιμών EEXI για καθορισμένο τύπο πλοίων. Ο ακόλουθος τύπος προσεγγίζει την τιμή της γραμμής αναφοράς ανάλογα τα χαρακτηριστικά του κάθε πλοίου.

$$Attained EEXI \leq Required EEXI = \left(1 - \frac{x}{100}\right) EEXI \text{ Γραμμή αναφοράς}$$

Όπου η γραμμή αναφοράς προσδιορίζεται από : $EEDI = a * b^{(-c)}$

Η παράμετρος b εκφράζει την χωρητικότητα του εκάστου πλοίου είτε μέσω του DWT είτε με το GT και οι συντελεστές a και c δίνονται ως τιμές στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2 Παράμετροι υπολογισμού EEDI (Πηγή: IR)

ΤΥΠΟΣ ΠΛΟΙΟΥ	a	b	c
Bulk Carrier	961.79	DWT	0.477
Gas Carrier	1120.0	DWT	0.456
Tanker	1218.80	DWT	0.488
Container ship	174.22	DWT	0.201
General Cargo ship	107.48	DWT	0.216
Refrigerated cargo carrier	227.01	DWT	0.244
Combination carrier	1219.00	DWT	0.488
Ro-ro cargo ship	$(DWT/GT)^{(-0.7)}$ * 780.36 Όπου $DWT/GT < 0.3$ 1812.63 όπου $DWT/GT \geq 0.3$	DWT	0.471
Ro-ro cargo ship	1405.15	DWT	0.498
Ro-ro passenger ship	752.16	DWT	0.381
LNG carrier	2253.7	DWT	0.474
Cruise passenger ship having non-conventional propulsion	170.84	GT	0.214

Η αναγκαία τιμή EEXI, καθορίζεται από μια οριακή γραμμή αναφοράς “baseline” και διάφορους συντελεστές μείωσης που φαίνονται στον πίνακα παρακάτω. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την επίτευξη συμμόρφωσης με τον EEXI, και σε αυτούς περιλαμβάνεται η χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Ωστόσο, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι τα κριτήρια για τον υπολογισμό των τιμών EEXI είναι ειδικά σχεδιασμένα για ορισμένους τύπους καυσίμων, όπως το ντίζελ/πετρέλαιο κίνησης, το LFO, το HFO, το LPG, το LNG, η μεθανόλη και η αιθανόλη.

Πίνακας 3. Δείκτες εκπομπών καυσίμου(πηγή: IMO)

Τύπος Καυσίμου	Συντελεστής εκπομπών (gCO ₂ / gFuel)
Diesel/Gas Oil	3,206
LFO	3,151
HFO	3,114
LPG	3,000 (Propane)
LNG	3,030 (Butane)
Methanol	1,375

Λαμβάνοντας υπόψη τις τελευταίες έρευνες και τις πρώτες εκτιμήσεις των επιπτώσεων αυτών των κανονισμών, η εφαρμογή των μέτρων EEDI/EEXI δεν είναι πιθανό να επιταχύνει αρχικά την υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων σε μεγάλη κλίμακα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι άλλα μέτρα, όπως ο περιορισμός της ισχύος του κινητήρα (EPL) ή ο περιορισμός της ισχύος του άξονα (ShaPoLi), δύνανται να είναι πιο εύκολο να εφαρμοστούν για τα υπάρχοντα σκάφη.

Πίνακας 4. Παράμετροι εξίσωσης EEDI – EEXI

Παράμετροι	Ορισμοί
C_F	διαστατικός συντελεστής μετατροπής μεταξύ της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO ₂
V_{ref}	Ταχύτητα πλοίου σε ναυτικά μίλια ανά ώρα (kn/h)
Capacity / χωρητικότητα	Υπολογίζεται σε συνάρτηση με το νεκρό βάρος DWT, όπως αναφέρεται στο MEPC 245(66) "2014 Guidelines on the calculation of the Attained EEDI for new ships".
P_{ME}	75% του MCR της κύριας μηχανής σε kW
P_{AE}	Ισχύς Ηλεκτρογεννήτριας (Βοηθητική Μηχανή)
P_{PTI}	75% της ονομαστικής κατανάλωσης ισχύος του κινητήρα άξονα
P_{eff}	Παραγωγή καινοτόμου μηχανικής ενεργειακά αποδοτικής τεχνολογίας για πρόωση στο 75% της ισχύος της κύριας μηχανής
P_{AEff}	Μείωση της ηλεκτρικής ισχύος χάρη στην καινοτόμο τεχνολογία εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας
SFC	Πιστοποιημένη ειδική κατανάλωση καυσίμου σε g/kWh
f_j	Συντελεστής διόρθωσης για να ληφθούν υπόψη τα ειδικά στοιχεία σχεδιασμού του πλοίου. (π.χ. για πλοία κατηγορίας πάγου, δεξαμενόπλοια)
f_w	Μη διαστατικός συντελεστής που δείχνει τη μείωση της ταχύτητας σε αντιπροσωπευτικές θαλάσσιες συνθήκες ύψους κύματος, συχνότητας κύματος και ταχύτητας ανέμου
f_i	Συντελεστής χωρητικότητας για κάθε τεχνικό/ρυθμιστικό περιορισμό της χωρητικότητας
f_c	Συντελεστής διόρθωσης κυβικής χωρητικότητας (για χημικά δεξαμενόπλοια και πλοία μεταφοράς αερίου)
f_l	Συντελεστής για πλοία γενικού φορτίου εξοπλισμένο με γερανούς και άλλο φορτίο που σχετίζεται με τον εξοπλισμό για να αντισταθμίσει την απώλεια του νεκρού βάρους του πλοίου
f_{eff}	Συντελεστής διαθεσιμότητας καινοτόμων τεχνολογιών ενεργειακής απόδοσης

1.2.3 SEEMP – Ship Energy Efficiency Monitoring Plan

Ένα άλλο μέτρο που εισήγαγε ο IMO είναι το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίων (SEEMP), το οποίο είναι ένα εργαλείο διαχείρισης που έχει σχεδιαστεί για να βοηθήσει τους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση των πλοίων τους. Το SEEMP απαιτεί από τους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν ένα σχέδιο παρακολούθησης και βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων τους, το οποίο δύναται να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Σκοπός των κατευθυντήριων γραμμών για την ανάπτυξη ενός σχεδίου διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης πλοίου είναι να συνδράμουν στη δημιουργία του σχεδίου διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης πλοίου (SEEMP), το οποίο απαιτείται από τον κανονισμό 26 του παραρτήματος VI της MARPOL. Το κανονιστικό πλαίσιο του SEEMP έχει τρεις κύριους στόχους:

- i. Την ενθάρρυνση των εταιρειών να εφαρμόζουν μέτρα που βελτιώνουν την ενεργειακή απόδοση και την ένταση άνθρακα των πλοίων τους και τις πρακτικές διαχείρισης της ναυτιλίας.
- ii. Την παροχή ενός πλαισίου για τα πλοία για τη συλλογή των δεδομένων που απαιτούνται για τη συμμόρφωση με τον κανονισμό 27.1 του παραρτήματος VI της MARPOL και την περιγραφή των διαδικασιών για την αναφορά των δεδομένων στην Αρχή του πλοίου ή σε κάποιον εξουσιοδοτημένο οργανισμό.
- iii. Την παροχή μιας μεθοδολογίας για τον υπολογισμό του ετήσιου λειτουργικού δείκτη έντασης άνθρακα (CII) που απαιτείται από τον κανονισμό 28.1 του παραρτήματος VI της MARPOL και περιγραφή των διαδικασιών για την αναφορά των δεδομένων στη διοίκηση του πλοίου ή στον εξουσιοδοτημένο οργανισμό.

Πιο αναλυτικά, προκειμένου να υπάρξει συμμόρφωση με τον κανονισμό 26.1 του παραρτήματος VI της MARPOL, τα πλοία με ολική χωρητικότητα 400 και άνω που υπάγονται στο κεφάλαιο 4 πρέπει να διαθέτουν σχέδιο διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης πλοίου (SEEMP), το οποίο να είναι ειδικό για το εκάστοτε πλοίο. Το μέρος I του SEEMP αποσκοπεί στη δημιουργία ενός πλαισίου για τις εταιρείες και τα πλοία για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση της έντασης άνθρακα της λειτουργίας ενός πλοίου. Το εν λόγω μέρος το κεφαλαίου αυτού του SEEMP θα

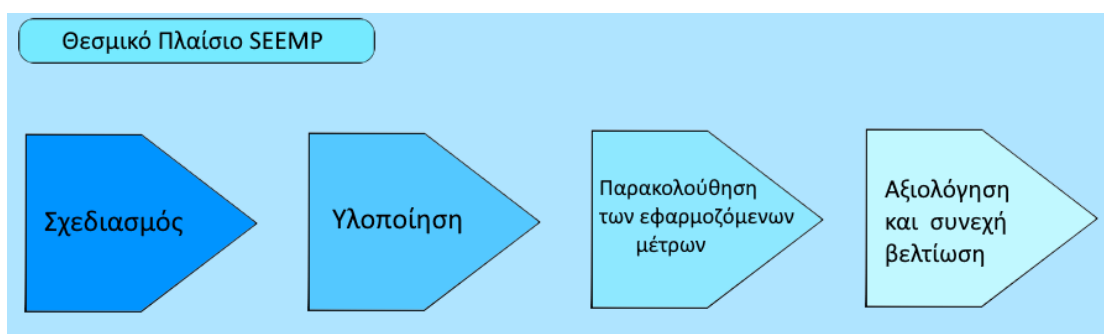
πρέπει να συνδέεται με τη συνολική πολιτική ενεργειακής διαχείρισης της εταιρείας που κατέχει, λειτουργεί ή διαχειρίζεται το πλοίο, λαμβάνοντας υπόψη την ποικιλομορφία των ναυτιλιακών εταιρειών και τις ποικίλες συνθήκες λειτουργίας των πλοίων. Πολλές εταιρείες διαθέτουν ήδη ένα σύστημα διαχείρισης περιβάλλοντος EMS⁴ κατά ISO 14001, το οποίο περιλαμβάνει διαδικασίες για τον προσδιορισμό των βέλτιστων μέτρων για συγκεκριμένα πλοία και τον καθορισμό στόχων για τη μέτρηση των σχετικών παραμέτρων, μαζί με χαρακτηριστικά ελέγχου και ανατροφοδότησης. Κατά συνέπεια, η παρακολούθηση της επιχειρησιακής περιβαλλοντικής απόδοσης θα πρέπει να ενσωματωθεί σε ευρύτερα συστήματα διαχείρισης της εταιρείας.

Επιπροσθέτως, αρκετές εταιρείες διαθέτουν σήμερα σύστημα διαχείρισης της ασφάλειας και σε αυτές τις περιπτώσεις, το μέρος I του SEEMP μπορεί να συμπεριληφθεί στο σύστημα διαχείρισης της ασφάλειας του πλοίου. Σκοπός της συγκεκριμένης ενότητας είναι να προσφέρει καθοδήγηση για την ανάπτυξη του μέρους I του SEEMP, το οποίο θα πρέπει να προσαρμόζεται στα χαρακτηριστικά και τις ανάγκες των επιμέρους εταιρειών και πλοίων. Η σκοπιμότητα του πρώτου σκέλους του SEEMP είναι να λειτουργήσει ως εργαλείο διαχείρισης για τις εταιρείες ώστε να διαχειρίζονται τις τρέχουσες περιβαλλοντικές επιδόσεις των πλοίων τους, και συνιστάται η καθιέρωση διαδικασιών για την εφαρμογή του σχεδίου με ελάχιστο διοικητικό φόρτο επί του πλοίου. Ακόμη, αυτό το κομμάτι του SEEMP θα πρέπει να δημιουργείται ως σχέδιο για κάθε πλοίο από την εταιρεία και να στοχεύει στην ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης ενός πλοίου και στη μείωση της έντασης άνθρακα μέσω τεσσάρων φάσεων: σχεδιασμός, εφαρμογή, παρακολούθηση, αξιολόγηση του ίδιου και βελτίωση. Τα στοιχεία αυτά είναι ουσιώδη στον συνεχή κύκλο της βελτίωσης της διαχείρισης της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου και της μείωσης της έντασης του διοξειδίου του άνθρακα, και ενδέχεται μερικά από αυτά να τροποποιούνται σε κάθε επανάληψη του κύκλου, ενώ άλλα να παραμένουν σταθερά.

Η σημαντική συνεισφορά του SEEMP σχετίζεται ακόμη με την ιεράρχηση της ασφάλειας η οποία αναμφισβήτητα είναι πάντοτε ζωτικής σημασίας. Το είδος του εμπορίου στο οποίο εμπλέκεται ένα πλοίο μπορεί να επηρεάσει τη σκοπιμότητα των μέτρων ενεργειακής απόδοσης και μείωσης της έντασης του άνθρακα που εξετάζονται. Για παράδειγμα, τα πλοία που εκτελούν υπηρεσίες στη θάλασσα, όπως η

⁴ Environmental Management System (EMS)

τοποθέτηση σωλήνων, οι σεισμικές έρευνες, τα πλοία OSV⁵ και τα βυθοκόρατα (πλοία που καθαρίζουν τον βυθό), ενδέχεται να επιλέξουν διαφορετικές μεθόδους για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε σύγκριση με τα συμβατικά φορτηγά πλοία. Η μοναδική φύση των λειτουργιών τους και η επίδραση των καιρικών συνθηκών, των παλιρροιών και των ρευμάτων, μαζί με την ανάγκη διασφάλισης ασφαλών λειτουργιών, ενδέχεται να απαιτούν προσαρμογές στις συνήθεις διαδικασίες για τη διατήρηση της αποδοτικότητας τους. Η διάρκεια του ταξιδιού και η ανάγκη αποφυγής περιοχών υψηλού κινδύνου μπορεί επίσης να είναι κρίσιμοι παράγοντες, μαζί με τις εκτιμήσεις για την ασφάλεια που αφορούν ειδικά το εμπόριο.



Σχήμα 1.2.3 Διαδικασία συνεχούς βελτίωσης σύμφωνα με το SEEMP

Σύμφωνα με τον κανονισμό 26.2 του παραρτήματος VI της MARPOL, τα πλοία ολικής χωρητικότητας 5.000 κόρων και άνω πρέπει να περιλαμβάνουν στο SEEMP τους λεπτομερή περιγραφή για την μεθοδολογία συλλογής των δεδομένων που απαιτούνται από τον κανονισμό 27.1 και των διαδικασιών αναφοράς τους στην Αρχή του πλοίου. Το Σχέδιο συλλογής δεδομένων για την κατανάλωση καυσίμου πλοίου ή Σχέδιο συλλογής δεδομένων, που περιλαμβάνεται στο μέρος II του SEEMP, καθορίζει αυτές τις μεθόδους και τις διαδικασίες. Οι παρούσες κατευθυντήριες γραμμές παρέχουν συστάσεις σχετικά με τη δημιουργία μιας μεθόδου ειδικά για το πλοίο για τη συλλογή, τη συγκέντρωση και την αναφορά δεδομένων του πλοίου, συμπεριλαμβανομένης της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου πετρελαίου, της διανύομενης απόστασης, των ωρών πλεύσης και άλλων δεδομένων που απαιτούνται από τον κανονισμό 27. Η διοίκηση πρέπει να διασφαλίζει ότι το SEEMP κάθε πλοίου συμμορφώνεται με τον κανονισμό 26.2 πριν από τη συλλογή δεδομένων, σύμφωνα με τον κανονισμό 5.4.5 του παραρτήματος VI της MARPOL.

⁵ Offshore Support Vessels (OSV) - Πλοία Υποστήριξης Ανοικτής Θαλάσσης

1.2.4 CII – Carbon Intensity Indicator

Σε αντίθεση με τους δείκτες EEXI και EEDI που ως κύριοι παράμετροι προσδιορισμού τους είναι τα τεχνικά στοιχεία ενός πλοίου κατά την κατασκευή και την σχεδίασή του, ο δείκτης CII ουσιαστικά εκφράζει τον τρόπο που λειτουργούν τα χαρακτηριστικά αυτά ως συνιστώσες της ενεργειακής αποδοτικότητας. Συγκεκριμένα, ο Δείκτης Έντασης Άνθρακα (CII) ως λειτουργικός δείκτης μετρά την αποδοτικότητα ενός πλοίου στη μεταφορά επιβατών ή εμπορευμάτων, η οποία υποδεικνύεται από την ποσότητα CO₂ σε γραμμάρια που εκπέμπεται ανά ναυτικό μίλι και μεταφορική ικανότητα φορτίου (gCO₂/t-nm). Ο επιτυγχανόμενος δείκτης CII μπορεί να περιγραφεί με τον ακόλουθο τρόπο:

$$CII = \frac{\text{Ετήσια κατανάλωση καυσίμου} \cdot \text{συντελεστής εκπομπών CO}_2}{\text{Χωρητικότητα} \cdot \text{Ετήσια διανυόμενη απόσταση}}$$

Σχήμα 1.2.4 Περιγραφή δείκτη CII

Ο αριθμητής της εξίσωσης αντιπροσωπεύει τις ετήσιες εκπομπές CO₂ σε τόνους, ενώ ο παρονομαστής παρουσιάζει την ετήσια μεταφορική ικανότητα σε τόνους πολλαπλασιασμένη με τα ναυτικά μίλια.

Χρησιμοποιώντας την τιμή του δείκτη CII, το πλοίο λαμβάνει μια ετήσια βαθμολογία που κυμαίνεται από A έως E. Το έτος 2030, οι απαιτήσεις βαθμολογίας θα γίνουν πιο αυστηρές όπως αναφέρει ο οργανισμός DNV στην έρευνα του εν έτει 2022. Εάν ένα πλοίο λάβει βαθμολογία D για τρία συνεχόμενα έτη ή βαθμολογία E για ένα έτος, πρέπει να δημιουργηθεί και να εγκριθεί σχέδιο διορθωτικών ενεργειών ως μέρος του σχεδίου διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης πλοίου (SEEMP).

Σύμφωνα με τους κανόνες που εγκρίθηκαν από τον IMO στις 10 Ιουνίου 2022, ο τύπος υπολογισμού του επιτευχθέντος ετήσιου λειτουργικού δείκτη έντασης άνθρακα (CII_{πλοίο}) είναι :

$$CII_{\text{ship}} = \frac{\sum_j CF_j \cdot (FC_j - (FC_{\text{voyage},j} + TF_j + (0.75 - 0.03 \cdot y_j) \cdot (FC_{\text{electrical}} + FC_{\text{boiler}} + FC_{\text{others},j})))}{f_i \cdot f_m \cdot f_c \cdot f_{VSE} \cdot \text{Capacity} \cdot (D_t - D_x)}$$

Εξίσωση 2 Δείκτης Έντασης Άνθρακα

Οι παράμετροι που εμπεριέχονται στην παραπάνω formula του δείκτη CII για κάθε πλοίο χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες : τους κύριους παράγοντες, τους παράγοντες που αφορούν συγκεκριμένους πλόες και τους διορθωτικούς συντελεστές EEXI και EEDI.

Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την υπολογιζόμενη τιμή CII του πλοίου, πριν από την ενσωμάτωση των εξαιρούμενων ταξιδιών και των διορθωτικών παραγόντων, αποτελούνται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- **CF_j** αντιπροσωπεύει τον συντελεστή μετατροπής που συσχετίζει την κατανάλωση καυσίμου με τις εκπομπές CO₂ για τον συγκεκριμένο τύπο καυσίμου *j*. Αυτοί οι συντελεστές μετατροπής καθορίζονται για κάθε τύπο καυσίμου και αναφέρονται στον ακόλουθο πίνακα⁶.

- **Capacity** αντιπροσωπεύει το «νεκρό βάρος» , τη χωρητικότητα δηλαδή (DWT) για τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, τα πλοία μεταφοράς αερίου, τα δεξαμενόπλοια, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου, τα πλοία ψυγεία, τα πλοία μεταφοράς συνδυασμένων φορτίων και τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου. Ακόμη ενδέχεται να αντιπροσωπεύει τη συνολική χωρητικότητα (GT) για τα φορτηγά πλοία Ro-Ro (μεταφορείς οχημάτων), τα φορτηγά, τα επιβατηγά - οχηματαγωγά πλοία και τα κρουαζιερόπλοια.

⁶ Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του 2018 σχετικά με τη μέθοδο υπολογισμού του επιτευχθέντος δείκτη EEDI για τα νέα πλοία (ψήφισμα MEPC.308(73) όπως τροποποιήθηκε με τα ψηφίσματα MEPC.322(74) και MEPC.332(76)).

- FC_j αναφέρεται στη συνολική ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται σε γραμμάρια για τον συγκεκριμένο τύπο καυσίμου j κατά τη διάρκεια ενός έτους, όπως αναφέρεται στο Σύστημα Συλλογής Δεδομένων (DCS) του IMO.

Πίνακας 5 Παράγοντας C_F για κάθε τύπο καυσίμου

Τύπος Καυσίμου (j)		C_F (t-CO ₂ / t-Fuel)
Diesel/Gas Oil		3.206
Light Fuel Oil (LFO)		3.151
Heavy Fuel Oil (HFO)		3.114
Liquefied Petroleum Gas (LPG)	Propane	3.000
	Butane	3.030
Liquefied Natural Gas (LNG)		2.750
Methanol		1.375
Ethanol		1.913

- D_t αναπαριστά τη συνολική απόσταση που διανύθηκε σε ναυτικά μίλια, όπως καταγράφεται στο Σύστημα Συλλογής Δεδομένων (DCS) του IMO.

Παράμετροι σχετικά με εξαιρούμενα ταξίδια

Από τον υπολογισμό του ετήσιου επιτευχθέντος CII μπορούν να εξαιρεθούν ορισμένα ταξίδια υπό συγκεκριμένες συνθήκες, οι οποίες περιγράφονται στις παραγράφους 4.1, έως και 4.5 των κατευθυντήριων γραμμών CII (G5). Στις περιπτώσεις που ένα ταξίδι εξαιρείται, το πλοίο εξακολουθεί να υποχρεούται να αναφέρει τη συνολική κατανάλωση καυσίμου για κάθε τύπο καυσίμου, τις συνολικές ώρες πλεύσης και τη συνολική απόσταση που διανύθηκε στην αρμόδια αρχή. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον τύπο για τον υπολογισμό του επιτευχθέντος CII όσον αφορά τα εξαιρούμενα ταξίδια είναι οι εξής:

- $FC_{voyage,j}$ αντιπροσωπεύει τη μάζα καυσίμου σε γραμμάρια για τον συγκεκριμένο τύπο καυσίμου j , η οποία μπορεί να εξαιρεθεί από τον υπολογισμό του επιτευχθέντος CII. Η παραπάνω εξαίρεση ισχύει σε περιπτώσεις όπου μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο η ασφαλής ναυσιπλοΐα του πλοίου ή όταν το πλοίο πλέει σε συνθήκες πάγου.

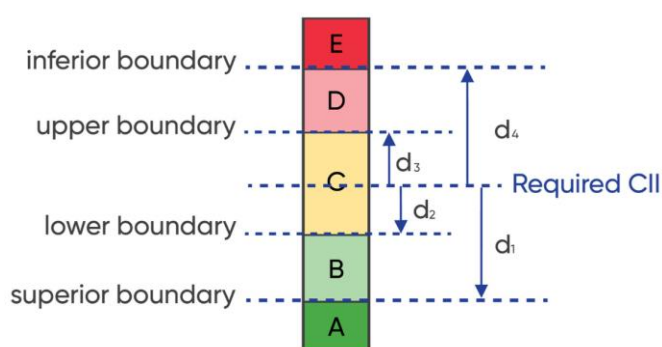
Η ετήσια βαθμολογία του δείκτη κυμαίνεται από Α έως Ε και τα κατώτατα όρια βαθμολογίας θα γίνονται όλο και πιο αυστηρά μέχρι το 2030, καθώς ο δείκτης αυτός εφαρμόζεται σε πλοία που εκτελούν διεθνής πλόες και έχουν ολική χωρητικότητα άνω των 5.000 τόνων. Ειδικότερα, ο CII αφορά τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, τα πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου, τα δεξαμενόπλοια, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου, τα πλοία ψυγεία, τα συνδυασμένα πλοία μεταφοράς, τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου, τα φορτηγά πλοία Ro-Ro (μεταφορείς οχημάτων), τα επιβατηγά πλοία και τα επιβατηγά κρουαζιερόπλοια. με χωρητικότητα άνω των 5.000 GT. Η βαθμολογία CII καθορίζεται ετησίως με βάση τα αναφερόμενα δεδομένα από το DCS του IMO, και εάν ένα πλοίο λάβει βαθμολογία D για τρία συνεχόμενα έτη ή βαθμολογία E για ένα έτος, πρέπει να εκπονηθεί και να εγκριθεί σχέδιο διορθωτικής δράσης ως μέρος του SEEMP.

Ο δείκτης Έντασης Άνθρακα τέθηκε σε ισχύ από τον Ιανουάριο του 2023 και όπως αναφέρθηκε παραπάνω βασίζεται στο σύστημα συλλογής δεδομένων για τα καύσιμα (Data Collection System – DCS) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού που θεσπίστηκε σαν εργαλείο διαχείρισης κατά την συνέλευση MEPC70 όπου για την ολική χωρητικότητα πλοίων που αναφέρθηκε προηγουμένως λαμβάνει χώρα η συλλογή και η αναφορά του ποσοστού κατανάλωσης πετρελαίου για κάθε έτος. Πιο αναλυτικά, κάποια από τα δεδομένα που καθίστανται απαραίτητα για τις Αρχές της σημαίας σχετίζονται με :

- τον δείκτη EEDI
- τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου
- τις ώρες πλεύσης
- την κατανάλωση καυσίμου ανάλογα το είδος του σε μετρικούς τόνους
- και την διανοιχθείσα απόσταση

Εν συνεχεία, με βάση το σύστημα DCS υπολογίζεται η επιτευχθείσα τιμή του δείκτη CII. Με την εφαρμογή συντελεστών που αφορούν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στα δεδομένα αναφοράς του DCS προκύπτουν οι γνωστές «well to wake» εκπομπές οι οποίες αφορούν την ολοκληρωτική διαδικασία παραγωγής CO₂ από το κοίτασμα πετρελαίου ή οποιουδήποτε καυσίμου μέχρι ωστόσο το καύσιμο φτάσει

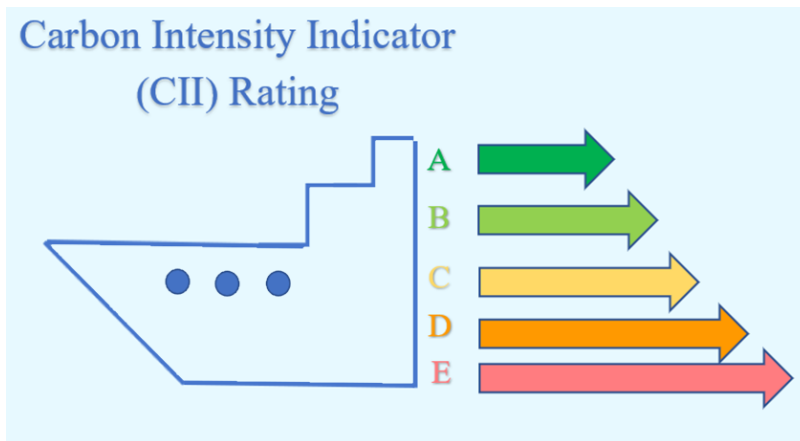
στον τελικό του «σκοπό» και ουσιαστικά χρησιμοποιηθεί στην έλικα του πλοίου όπου γίνεται η παραγωγή έργου και το πλοίο παράγει ώση. Η χρονολογία όπου αποτέλεσε σημείο αναφοράς για την υιοθέτηση του δείκτη CII ήταν το 2019 καθώς εκείνο το έτος είχε την δυνατότητα από το DCS να χρησιμοποιηθούν εξακριβωμένα δεδομένα που αναφέρονται στον IMO, σε διαφορετική περίπτωση τα στοιχεία AIS⁷ θα έπρεπε να καθορίζουν την γραμμή αξιολόγησης. Έρευνες δείχνουν ότι μέχρι το 2026 θα έχουν οριστεί οι δείκτες μείωσης για κάθε χρόνο από τον IMO (πίνακας 4). Οι εν λόγω συντελεστές για το 2027 και έπειτα θα υπολογιστούν με βάση τις έρευνες αναθεώρησης για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την ανάλυση αυτών.



Σχήμα 1.2.5 Βαθμίδες ορίων σύμφωνα με τον απαιτούμενο δείκτη CII (πηγή : IMO)

Με βάση τις κατευθυντήριες γραμμές που διεξήγαγε ο IMO μέσω της MEPC.354(78) η χαρακτηριστική βαθμολογία της έντασης του άνθρακα CII που αφορά ένα συγκεκριμένο πλοίο σε μια δεδομένη ετήσια περίοδο ορίζεται σε επίπεδα A, B, C, D ή E. Τα βαθμονομημένα αυτά επίπεδα ουσιαστικά υποδεικνύουν την σημαντική υπεροχή, μικρή υπεροχή, μέτρια ή δευτερεύουσα ένταση ή ακόμα και κατώτερη επίδοση ανά βαθμίδα αντίστοιχα. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, απαραίτητη καθίσταται η εκπόνηση σχεδίου διορθωτικής ενέργειας για την επίτευξη της απαιτούμενης ετήσιας τιμής του λειτουργικού δείκτη CII όταν το εν λόγω πλοίο βαθμολογηθεί με D για τρία συνεχόμενα έτη είτε με E για ένα έτος.

⁷ Automatic Identification System (AIS) - Σύστημα Αυτόματης Αναγνώρισης

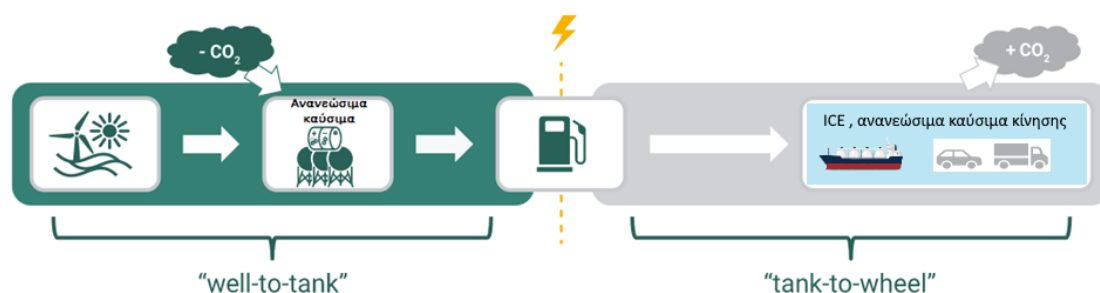


Σχήμα 1.2.6 Διαβάθμιση δείκτη Έντασης Άνθρακα

Προκειμένου να μειωθεί το ποσοστό κατανάλωσης καυσίμων και οι τιμές CII απαιτείται η βαθμονόμηση του δείκτη έντασης άνθρακα και ταυτόχρονα κρίνεται απαραίτητη η μείωση της ταχύτητας από διάφορους φορείς εκμετάλλευσης όπου βέβαια είναι εφικτό προκειμένου να μειωθεί τελικά η κατανάλωση καυσίμου. Πιο αναλυτικά, η χρήση βιοκαυσίμων που έχουν βάση τους τον άνθρακα αλλά και τα ηλεκτροκαύσιμα (e-fuels – όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια από ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή τους) δεν θα προσέφεραν κάποια βελτίωση την συγκεκριμένη περίοδο για την βαθμολογία ενός σκάφους καθώς ο δείκτης CII βασίζεται στην προσέγγιση well to wake.[7] Προκειμένου να εξεταστεί το εν λόγω θέμα ο IMO ασχολείται με μελέτες που αφορούν τον κύκλο ζωής, life - cycle και την ανάλυση των καυσίμων και διερευνά τις επιπτώσεις που θα προκύψουν μετά την χρήση συστημάτων CCS – Carbon Capture & Storage.[8]

Σε παγκόσμια κλίμακα, οι κανονισμοί στον ναυτιλιακό κλάδο ακολουθούν τη μεθοδολογία tank-to-wake (TtW). Ωστόσο, είναι ζωτικής σημασίας να υιοθετηθεί μια προσέγγιση well-to-wake (WtW) κατά την αξιολόγηση της βιωσιμότητας ενός καυσίμου, καθώς διάφοροι παράγοντες και παράμετροι μπορούν να επηρεάσουν την κατάταξή του ως εναλλακτικό καύσιμο, δηλαδή με χαμηλό ποσοστό εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.[7] Για παράδειγμα, ένα καύσιμο που παράγεται με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά απαιτεί μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες συνολικές εκπομπές σε σύγκριση με ένα καύσιμο που παράγεται και καταναλώνεται τοπικά. Προκειμένου να επιτευχθεί η απαλλαγή από τις εκπομπές CO₂ από ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού των καυσίμων, ο ναυτιλιακός κλάδος πρέπει να συνεργαστεί εκτενώς με τους

ενδιαφερόμενους φορείς, από τους προμηθευτές ενέργειας και χημικών προϊόντων έως τις Αρχές και τους χρηματοδότες.[7]



Σχήμα 1.2.7 Εκπομπές CO₂ - «Well to Wake» προσέγγιση

Αναμφισβήτητα, η εφαρμογή του δείκτη CII θα μπορούσε να μεταβάλλει την μέση διάρκεια ζωής ενός πλοίου καθώς αρκετά μέρη ενός πλοίου θα μπορούσαν να αποσταλούν, νωρίτερα από την αρχική προγραμματισμένη χρονική περίοδο, στα ναυπηγεία αποβλήτων ή αλλιώς scrap yards. Για τον σκοπό αυτό οι πλοιοκτήτες οφείλουν να αναλύσουν τους επιμέρους στόλους τους και να λάβουν περιοριστικά μέτρα ώστε να επιφέρουν όσο το δυνατόν πιο οικονομικά βέλτιστο και αποδοτικό αποτέλεσμα τόσο στο περιβάλλον όσο και στην εκάστοτε εταιρεία.[7]

Πίνακας 6. Συντελεστής μείωσης Z για το CII σύμφωνα με τη γραμμή αναφοράς 2019 (πηγή: IMO MEPC.338 (76))

Έτος	Δείκτης Μείωσης με βάση την γραμμή αναφοράς του 2019
2023	5%
2024	7%
2025	9%
2026	11%
2027	-
2028	-
2029	-
2030	-

1.3 Κανονιστικό πλαίσιο Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU)

Εκτός από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) ο οποίος, όπως έγινε κατανοητό με βάση τις προηγούμενες αναφορές βρίσκεται διαρκώς σε στάδιο έρευνας και προώθησης βέλτιστων μέτρων για την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) με την σειρά της έχει εφαρμόσει περαιτέρω απαιτήσεις για τον ναυτιλιακό κλάδο προκειμένου να μειωθούν ακόμα περισσότερο οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.[4]

1.3.1 Στόχοι Ευρωπαϊκής Ένωσης

Προκειμένου να υλοποιηθούν οι φιλόδοξοι περιβαλλοντικοί στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το έτος 2030 δημοσιεύτηκε στις 14 Ιουλίου του 2021 ένας ρυθμιστικός κανονισμός ‘Fit for 55 regulatory’ που αποσκοπούσε στην προσέγγιση ποσοστού 55 % καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το συγκεκριμένο έτος συγκριτικά με τα ποσοστά του 1990.[4] Το εγχείρημα αυτό αποτελεί μέρος ενός ακόμα μεγαλύτερου στόχου της Πράσινης Ευρωπαϊκής Συμφωνίας, να αποτελέσει η Ευρώπη την πρώτη ήπειρο που θα έχει ανεξαρτητοποιηθεί από τον άνθρακα. Όσο αναφορά τον κανονισμό ‘Fit for 55 regulatory’ ακόμα βρίσκεται υπό μελέτη και πολλές τροποποιήσεις είναι πιθανές να εφαρμοστούν σε αυτό το κανονιστικό πλαίσιο προκειμένου να έπειτα από την έναρξη ισχύος της να επιφέρει όσο το δυνατόν καλύτερα και κοντά στον στόχο της ΕΕ αποτελέσματα. [4]

Συγκεκριμένα, οι ενέργειες που αφορούν την ναυτιλιακή βιομηχανία και σχετίζονται με τα μέτρα του κανονιστικού πλαισίου ‘Fit for 55 regulatory’ είναι τα παρακάτω:

-Σύστημα διαπραγμάτευσης των εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης - EU Emissions Trading System (ETS)

-Τα πρώτα «Μέτρα που Βασίζονται στην Αγορά» MBM για τη ναυτιλιακή βιομηχανία - the first MBM – « Market Based Measures » for the shipping industry

-Κανονισμός Υποδομών Εναλλακτικών Καυσίμων - Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR)

-Κανονισμός για την φορολόγηση της ενέργειας - Energy Taxation Directive (ETD)

1.3.2 EU Emissions Trading System (ETS)

Το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ) είναι ένα σύστημα που επιβάλλει ένα όριο στην ποσότητα των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται από επιχειρήσεις, ενεργοβόρες βιομηχανίες, αεροπορικές εταιρείες και διάφορους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, γίνεται φανερό πως εφαρμόζεται η αρχή "ο ρυπαίνων πληρώνει", καθώς οι επιχειρήσεις πρέπει να αγοράσουν ή να λάβουν δικαιώματα εκπομπής CO₂ που ονομάζονται "Άδειες Εκπομπής της Ευρωπαϊκής Ένωσης" - European Union Allowances (EUA) για να καλύψουν το ποσό των εκπομπών τους. Το όριο αυτό μειώνεται κάθε χρόνο, με στόχο τη μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου. [8] Η συμμόρφωση με τις προδιαγραφές του συστήματος είναι υποχρεωτική και οι επιχειρήσεις πρέπει να παραδίδουν αρκετά δικαιώματα εκπομπής για να καλύψουν τις εκπομπές τους κάθε χρόνο. Το σύστημα βρίσκεται στην τέταρτη του φάση, με στόχο τη σταδιακή μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου στην Ευρώπη.[4]

Το πλάνο δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα κατά 55% μέχρι το 2030 ή αλλιώς η πρόταση μέτρων "Fit for 55" επιβεβαίωσε το σχέδιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης να συμπεριλάβει τις «ναυτιλιακές» εκπομπές στο σύστημα ΣΕΔΕ καθώς προώθησε την προσθήκη περισσότερων δικαιωμάτων για τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου στην ευρωπαϊκή αγορά. Το σύστημα αυτό θα βασίζεται σε δεδομένα κατανάλωσης καυσίμων από το σύστημα MRV (Monitoring, Reporting, Verification) της ΕΕ.[8] Παρόλο που το Συμβούλιο και το Κοινοβούλιο της ΕΕ εξέφρασαν τις θέσεις τους σχετικά με την πρόταση τον Ιούνιο του 2022, δεν έχει επιτευχθεί ακόμη συναίνεση και οι διαπραγματεύσεις συνεχίστηκαν ώσπου επιτεύχθηκε ο στόχος της συμφωνίας τον Σεπτέμβριο του 2022. Μέχρι τότε, θεωρούταν δύσκολο να προβλεφθούν τα ακριβή όρια του ΣΕΔΕ (EU ETS) της ΕΕ για τη ναυτιλία. Στην παρούσα χρονική περίοδο διεξάγονται επίσης συζητήσεις για θέματα όπως το όριο μεγέθους πλοίου (400 GT ή 5000 GT), η περίοδος σταδιακής εισαγωγής και τα ταξίδια εκτός ΕΕ. Η επιβολή του συστήματος EU ETS στη ναυτιλία αναμένεται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην εν λόγω βιομηχανία, καθώς θα υπάρξουν επιπρόσθετοι δαπανηροί περιορισμοί στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, η συμμετοχή της ναυτιλίας στο σύστημα EU ETS θα συμβάλει στην επίτευξη των στόχων της ΕΕ για τη μείωση των εκπομπών και την προστασία του κλίματος.[7]

1.4 Προτεινόμενες Λύσεις Προβλήματος

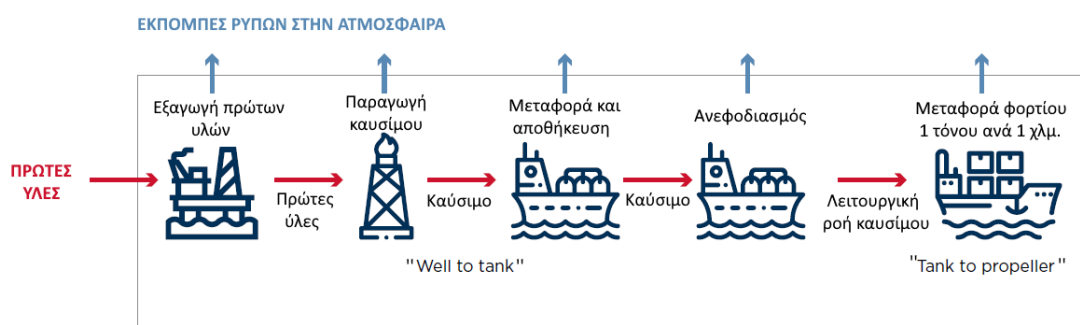
Έχουν προταθεί και δοκιμαστεί διάφορες λύσεις για την επίτευξη των στόχων του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι πιο επιτυχημένες προσεγγίσεις στο παρελθόν ήταν μηχανολογικές λύσεις, όπως η χρήση της τεχνολογίας περιορισμού της ενεργειακής ισχύος (EPL) για τη μείωση του φορτίου και της ταχύτητας του κινητήρα ενός πλοίου, με αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών σύμφωνα με τον δείκτη EEXI. Επιπλέον, τα scrubbers και το CCS είναι άλλα παραδείγματα μηχανολογικών προσαρμογών στα πλοία που δεσμεύουν τα οξείδια του θείου και το διοξείδιο του άνθρακα από τα καυσαέρια, αντίστοιχα.

Πέραν των μηχανικών τροποποιήσεων, η βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής της γάστρας ενός πλοίου μπορεί επίσης να συμβάλει στη μείωση της αντίστασης και της κατανάλωσης ενέργειας για την επίτευξη των επιθυμητών ταχυτήτων. Ενώ τα μέτρα αυτά μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τη ναυτιλία, δεν επαρκούν για την επίτευξη των στόχων του IMO για το 2030 και το 2050. Ως εκ τούτου, η μόνη λύση που απομένει είναι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων που παράγουν λιγότερα ή καθόλου επιβλαβή αέρια θερμοκηπίου (Green House Gasses – GHG) σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα. Παραδείγματα τέτοιων καυσίμων είναι η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο. Ενώ τα καύσιμα αυτά προσφέρουν σημαντικά οφέλη προς την κατεύθυνση της απαλλαγής της ναυτιλίας από τις ανθρακούχες εκπομπές, συνοδεύονται επίσης από προκλήσεις και μειονεκτήματα που απαιτούν προσεκτική μελέτη πριν από την ευρεία υιοθέτησή τους.

2 Εναλλακτικά Καύσιμα

Αναμφίβολα, καθώς οι ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή και την επιδείνωση του περιβάλλοντος συνεχίζουν και αυξάνονται, η ναυτιλιακή βιομηχανία διερευνά όλο και περισσότερο τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων για την τροφοδοσία των πλοίων. Η επιλογή ωστόσο του καταλληλότερου καυσίμου από ένα εύρος επιλογών δεν είναι μια απλή διαδικασία. Περιλαμβάνει προσεκτική εξέταση διαφόρων παραγόντων, όπως η **διαθεσιμότητα του καυσίμου**, η **υποδομή παραγωγής**, το **κόστος**, η **ενεργειακή πυκνότητα**, η **τεχνολογική ωριμότητα** και οι **περιβαλλοντικές επιπτώσεις**. Στην παρούσα ενότητα αναλύονται η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο ως τύποι εναλλακτικών καυσίμων και εξετάζονται τα μειονεκτήματα και τα οφέλη του καθενός από αυτά τόσο στη ναυτιλία όσο γενικά και στο περιβάλλον.

Για την ακριβή αξιολόγηση των πραγματικών κλιματικών επιπτώσεων ενός καυσίμου, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) που σχετίζονται με ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης ή της παραγωγής, της διανομής και της χρήσης του επί του πλοίου. Αυτές οι εκπομπές, γνωστές και ως εκπομπές well-to-wake (WtW), παρέχουν μια ολοκληρωμένη κατανόηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του καυσίμου.[2] Στο σχήμα που επακολουθεί φαίνεται καθαρά η πορεία του κύκλου ζωής ενός καυσίμου και οι ρύποι που η κάθε στάδιο περιλαμβάνει.[2]



Σχήμα2. Ανάλυση του κύκλου ζωής των ναυτιλιακών καυσίμων με την προσέγγιση "Well to Wake" (πηγή: ABS)

2.1 Μεθανόλη

2.1.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Η μεθανόλη είναι ένα άχρωμο, πτητικό και εύφλεκτο υγρό το οποίο διακρίνεται από την υψηλότερη αναλογία υδρογόνου προς άνθρακα συγκριτικά με τα άλλα υγρά καύσιμα σε τυπικές περιβαλλοντικές συνθήκες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μια σειρά από εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Παλαιότερα είχε το όνομα «ξύλόπνευμα» ή “wood alcohol” ή ξυλική αλκοόλη, επειδή παραγόταν κυρίως ως παραπροϊόν της ξηρής απόσταξης ή αλλιώς πυρόλυσης του ξύλου. Πλέον, η μεθανόλη παράγεται βιομηχανικά από μονοξειδίο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Αυτή η χημική ένωση αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, επειδή έχει χαμηλότερη ένταση άνθρακα και παράγει λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ρύπων. Όταν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως η βιομάζα ή βιομεθάνιο, μπορεί επίσης να θεωρηθεί καύσιμο μηδενικής περιεκτικότητας σε άνθρακα, καθώς η εκπομπή βιογενικού διοξειδίου του άνθρακα δεν αυξάνει το ανθρακικό αποτύπωμα.[9]

Η μεθανόλη, που αναφέρεται επίσης ως CH_3OH ή και MeOH , εντοπίζεται ακόμη στα φρούτα, τα λαχανικά, τα τρόφιμα που έχουν υποστεί ζύμωση, τα ποτά, την ατμόσφαιρα, ακόμη και στο διάστημα. Κατέχει σημαντικό ρόλο ως μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις βασικές χημικές ουσίες, μαζί με το αιθυλένιο, το προπυλένιο και την αμμωνία, και χρησιμεύει ως ουσία για την παραγωγή διαφόρων χημικών προϊόντων, συμπεριλαμβανομένης της φορμαλδεΐδης, του οξικού οξέος και των πλαστικών. Η χημική ουσία της μεθανόλης, χρησιμοποιείται στην ανάμειξη βενζίνης, όπου έχει χρησιμοποιηθεί ως οξυγονούχο πρόσθετο καύσιμο για την αντιμετώπιση της κρουστικής καύσης “anti-knock fuel” και ως ενισχυτικό οκτανίου. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στην παραγωγή βιοντίζελ όσο και σε διμεθυλαιθέρα (DME). [10]

Η μεθανόλη λόγω της υψηλής αναλογίας υδρογόνου προς άνθρακα σε σχέση με τα υπόλοιπα υγρά καύσιμα σε τυπικές περιβαλλοντικές συνθήκες, μπορεί να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο ως φορέας ενέργειας και να χρησιμεύσει ως εναλλακτικό καύσιμο για τη ναυτιλία. Ακόμη, χαρακτηρίζεται ως καύσιμο χαμηλού ιξώδους, όπως

είναι και η αμμωνία, γεγονός που συνεπάγεται δύο χαρακτηριστικά γνωρίσματα καυσίμου. Συγκεκριμένα, διαθέτει χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη, που αντιστοιχεί περίπου στο 40% της θερμογόνου δύναμης του ντίζελ. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται περισσότερη ποσότητα μεθανόλης για την παραγωγή της ίδιας ισχύος για παρόμοιο «προφίλ» κινητήρα που χρησιμοποιεί συμβατικό ναυτιλιακό καύσιμο Diesel. Επιπλέον, λόγω της ανεπαρκούς αναφλεξιμότητας που η μεθανόλη εμφανίζει, καθίσταται αναγκαία η χρήση πιλοτικού καυσίμου ντίζελ για τη διασφάλιση της εύρυθμης και αποδοτικής λειτουργίας του κινητήρα.

Ένα από τα πλεονεκτήματά της είναι η βιοδιασπασιμότητά της και η υδατοδιαλυτότητά της, που της επιτρέπει να αποθηκεύεται ως υγρό σε κανονικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Ωστόσο, όταν προέρχεται από ορυκτές πηγές, η μεθανόλη μπορεί να μην παρέχει σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂ σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα πετρελαίου. Παρ' όλα αυτά, έχει τη δυνατότητα να παραχθεί επιτυχώς ως βιοκαύσιμο ή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και υδρογόνο χαμηλού άνθρακα ως «ηλεκτρονικό» καύσιμο.

Η μεθανόλη ωστόσο παρουσιάζει επίσης προκλήσεις, όπως το σχετικά χαμηλό ενεργειακό της περιεχόμενο “low energy content”, το χαμηλό σημείο ανάφλεξης και την τοξικότητα που φέρει ισχύοντες περιορισμούς όσον αφορά την εισπνοή, την επαφή και την περίπτωση παρατεταμένης έκθεσης του ανθρώπινου οργανισμού. [2] Η χημική ουσία της μεθανόλης, επιπλέον, ενέχει πιθανούς κινδύνους λόγω της ευφλεκτότητας της και απαιτεί προληπτικά μέτρα για την ασφάλεια.

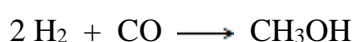
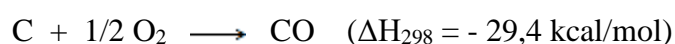
Όσον αφορά τις εφαρμογές καυσίμων, η μεθανόλη κατέχει πολλαπλούς ρόλους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάφλεξη στροβίλων καύσης ταχείας εκκίνησης, να χρησιμεύσει ως υποκατάστατο ή μείγμα με βενζίνη για την κίνηση οχημάτων, να υποστεί μετατροπή σε βενζίνη με τη διαδικασία μετατροπής μεθανόλης σε βενζίνη (MTG) της “ExxonMobil” ή να μετατραπεί σε διμεθυλαιθέρα (DME) για την τροφοδοσία κινητήρων ντίζελ. Η πιο σημαντική χρήση για τη ναυτιλία είναι ό,τι η Μεθανόλη μπορεί να καταναλωθεί από ειδικά τροποποιημένες δίχρονες και τετράχρονες ναυτικές μηχανές.

Η πλειονότητα της παραγωγής μεθανόλης βασίζεται στο αέριο σύνθεσης ή αλλιώς syngas ως κύρια πηγή. Περίπου το 55-65% της παγκόσμιας παραγωγής μεθανόλης προέρχεται από πρώτη ύλη φυσικού αερίου, ενώ περίπου το 30-35% προέρχεται από

άνθρακα και το υπόλοιπο μέρος χρησιμοποιεί αέριο οπτανθρακοποίησης και άλλες πρώτες ύλες όπως αναφέρθηκε στο 35^ο Παγκόσμιο Συνέδριο Μεθανόλης του Βερολίνου εν έτει 2017. Ακόμη σημαντική ήταν η καταγραφή το 2021, της συνολικής παγκόσμιας παραγωγής μεθανόλης που έφτασε τους 107 εκατομμύρια μετρικούς τόνους.[9]

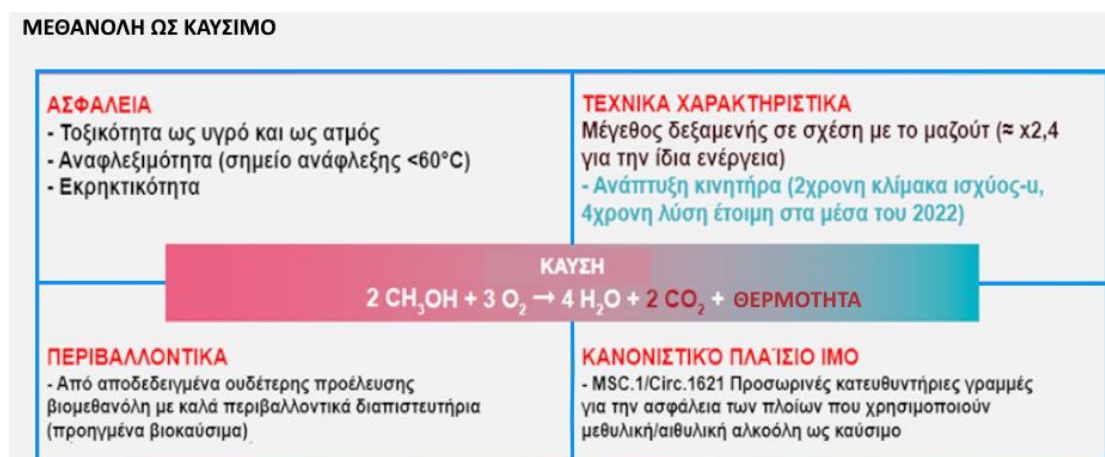
Όσον αφορά τη χημεία που εμπλέκεται στη σύνθεση της μεθανόλης, η μετατροπή του υδρογόνου (H₂) και του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) από το αέριο σύνθεσης που προέρχεται από άνθρακα σε μεθανόλη μπορεί να επιτευχθεί με παραδοσιακές μεθόδους αέριας φάσης ή με τη χρήση μιας διεργασίας μεθανόλης υγρής φάσης, η οποία αναπτύχθηκε από την «Air Products and Chemicals». Οι κύριες αντιδράσεις παραγωγής της μεθανόλης είναι εξώθερμες λόγω της αρνητικής ενθαλπίας και αυτό δηλώνει πως εκλύεται θερμότητα προς το περιβάλλον κατά την σύνθεση της CH₃OH.

Οι αντιδράσεις που έχουν σημασία για την σχηματοποίηση της CH₃OH είναι οι εξής:



Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της, η μεθανόλη παρουσιάζει κάποιες ιδιαιτερότητες. Πρώτον, σημειώνεται ότι η μεθανόλη έχει χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη (L.H.V.) 19,9 MJ/kg σε σύγκριση με την L.H.V του ντίζελ 42,6 MJ/kg. Εφόσον η χρήση μεθανόλης απαιτεί διπλάσια ποσότητα καυσίμου ή συχνότερο ανεφοδιασμό, αυτή η διαφορά αντανακλάται στη χωρητικότητα της δεξαμενής. Η μεθανόλη ακόμη έχει χαμηλό αριθμό κετανίου, συγκεκριμένα 5, η οποία χαρακτηρίζει την ποιότητα της ως καύσιμο. Αυτό σημαίνει ότι το καύσιμο δεν μπορεί να αναφλεγεί αυτόματα από μόνο του επομένως ο κινητήρας πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να χρησιμοποιεί και «βοηθητικό» καύσιμο. Με Αριθμό Οκτανίων Έρευνας (R.O.N.) 109 και Αριθμό Οκτανίων Κινητήρα (M.O.N.) 89, η μεθανόλη θεωρείται καύσιμο υψηλού οκτανίου. Ακόμη, ως αποτέλεσμα της υψηλού λόγου συμπίεσης, παρουσιάζει υψηλή αντικρουστική ικανότητα καθώς και καλύτερη απόδοση του κινητήρα ενεργειακής απόδοσης [11][12].

Το όριο ευφλεκτότητας της μεθανόλης είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που πρέπει να αναφερθεί. Είναι πολύ πιθανό να συμβεί έκρηξη εάν κατά την εξάτμιση του καυσίμου υπάρχει σπινθήρας όταν οι ατμοί του φτάσουν σε μια ορισμένη συγκέντρωση με τον αέρα. Η ζώνη ευφλεκτότητας για τη μεθανόλη βρέθηκε ότι είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του ντίζελ και κυμαίνεται από 6,7 έως 36% κατ' όγκο σε σχέση με τον αέρα. Επειδή το μείγμα αερίων θεωρείται "απαχύ" για τιμές κάτω από το κατώτερο όριο, δεν υπάρχει κίνδυνος έκρηξης, ενώ το μείγμα θεωρείται "πλούσιο" για τιμές πάνω από το ανώτερο όριο ευφλεκτότητας. Το μπλε-διαφανές χρώμα της φλόγας της μεθανόλης είναι μια ιδιαιτερότητα που δεν την κάνει εύκολα διακριτή. Για την κατάσβεση της πυρκαγιάς χρησιμοποιείται ένας πυροσβεστήρας αφρού "αντί αλκοόλης", επειδή μπορεί να μειώσει τη συγκέντρωση μεθανόλης και την παραγωγή ατμού [13].



Σχήμα 2.1.1 Κύρια Χαρακτηριστικά μεθανόλης (πηγή: BV)

Η απουσία θείου στην χημική σύσταση της μεθανόλης βοηθά σημαντικά στη συμμόρφωση με το περιβαλλοντικό κανονιστικό πλαίσιο που επικρατεί. Επιπλέον, δεδομένου ότι η δημιουργία διοξειδίου του θείου απαγορεύεται επειδή θεωρείται ότι είναι διαβρωτικό για τα μηχανήματα, δεν εμφανίζεται τέτοιο φαινόμενο κατά την καύση της μεθανόλης. Οι αλκοόλες, παρ' όλα αυτά, γενικά διαβρώνουν ορισμένα υλικά, όπως είναι ο χαλκός, το μαγνήσιο και το αλουμίνιο. Η χρήση συμπληρωματικών υλικών, όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας ή άλλα ψευδάργυρα και επινικελωμένα μέταλλα, είναι επομένως απαραίτητη. Τέλος, έχει εντοπιστεί ότι η μεθανόλη έχει χαμηλό κινηματικό ιξώδες. Το χαμηλό κινηματικό ιξώδες μπορεί να επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο ψεκάζεται το καύσιμο καθώς και να μειώσει τη λιπαντικότητα στις αντλίες ψεκασμού. [14]

Πίνακας 7. Κύρια Χαρακτηριστικά μεθανόλης (Harmsen, et al., 2020)¹, (Maritime Knowledge Center, 2018)², (Zannis, et al., 2018)³

Ιδιότητες Μεθανόλης	Τιμή
Χημικός Τύπος	CH ₃ OH
Πυκνότητα σ 15 ^o C (kg/m ³) / (t/m ³)	790 / 0.798
Χαμηλότερη τιμή θέρμανσης (MJ/kg)	19.9
Στοιχειομετρική A.F.R.	6.50
Όρια ευφλεκτότητας (vol. % στον αέρα)	6.7-36
Κινηματικό ιξώδες στους 25 °C (mPa*s)	0.59
Σημείο Βρασμού (°C)	65
Σημείο Flash (°C)	11
Αυτόματη Ανάφλεξη (°C)	455
Αριθμός Κετανίου	5
Οκτάνια (R.O.N./M.O.N.)	109/89
Υδατοδιαλυτότητα	Πλήρης
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη LHV - (MJ/kg)	20.1

Πλεονεκτήματα χρήσης μεθανόλης ως καύσιμο ναυτιλιακών κινητήρων:

- Διατηρείται σε υγρή κατάσταση υπό κανονικές περιβαλλοντικές συνθήκες, καθιστώντας την μεθανόλη κατάλληλη ως καύσιμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υπάρχουσες υποδομές.
- Η χρήση κυρίως της πράσινης μεθανόλης μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου όπως του CO₂.
- Είναι εύκολα διαχειρίσιμη, παρουσιάζοντας σταθερότητα με απεριόριστη διάρκεια ζωής.
- Προέρχεται από καθιερωμένες διαδικασίες παραγωγής μεγάλης κλίμακας.
- Ευνοείται από την προηγμένη υποδομή ανεφοδιασμού, η οποία δύναται να συγκριθεί με τα εναλλακτικά καύσιμα.
- Έχει λάβει κανονιστική έγκριση σύμφωνα με τον κώδικα IGF, από τον Νοέμβριο του 2020, και από τις κατευθυντήριες γραμμές κλάσης και δεξαμενισμού.
- Διαθέτει υδατοδιαλυτότητα και υφίσταται εύκολα βιοαποικοδόμηση.
- Παρουσιάζει μοριακή δομή που οδηγεί σε καύση σχεδόν χωρίς αιθάλη.

- Προσφέρει υψηλό αριθμό οκτανίων (RON 109), που εξασφαλίζει αυξημένη απόδοση.
- Διαθέτει υψηλή ταχύτητα φλόγας, μειώνοντας έτσι φαινόμενα κρουστικής καύσης.
- Διατηρεί χαμηλή θερμοκρασία φλόγας, με αποτέλεσμα μειωμένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) κατά την καύση.

Προκλήσεις που παρουσιάζει η χρήση της μεθανόλης σε ναυτικές μηχανές:

- Ο ανταγωνισμός για ανανεώσιμους πόρους με άλλες βιομηχανίες μπορεί να δημιουργήσει ελλείψεις, περιορίζοντας τη διαθεσιμότητα αυτού του καυσίμου.
- Η τοξικότητα αποτελεί σοβαρό κίνδυνο σε περίπτωση κατανάλωσης.
- Ιδιαίτερα εύφλεκτη ουσία που χαρακτηρίζεται από φλόγα που δεν έχει λάμψη.
- Τα συστήματα ασφαλείας που απαιτεί η χρήση της μεθανόλης είναι πιο περίπλοκα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα.
- Το χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο και η ογκομετρική θερμογόνος δύναμη απαιτούν 2,25 φορές μεγαλύτερη μάζα για ισοδύναμη ενέργεια.
- Το χαμηλό ιξώδες μπορεί να επηρεάσει τον σχεδιασμό του συστήματος έγχυσης, προκαλώντας διαρροές και προβλήματα λίπανσης.
- Οι διαβρωτικές τάσεις παρουσιάζουν προκλήσεις στη στεγανοποίηση και την αντιμετώπιση πιθανών διαρροών.
- Η μειωμένη αναφλεξιμότητα οδηγεί σε καθυστέρηση ανάφλεξης και πιθανό σχηματισμό εκρηκτικών μειγμάτων.
- Η ικανότητα απορρόφησης υγρασίας από την ατμόσφαιρα προσθέτει άλλο ένα επίπεδο πολυπλοκότητας.

2.1.2 Μέθοδοι Παραγωγής Μεθανόλης

Η μεθανόλη, ως εναλλακτικό καύσιμο για τη ναυτιλία, προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναγνωρίσει κανείς ότι δεν υπάρχει μια ενιαία πηγή ή διαδικασία παραγωγής μεθανόλης. Αυτό οδηγεί σε διαφορές στη βιωσιμότητα της μεθανόλης ως καύσιμο, όταν λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την πηγή μέχρι την καύση (well-to-wake). Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναπτυχθούν τα διαφορετικά είδη μεθανόλης, οι πηγές και οι διαδικασίες παραγωγής τους, καθώς και

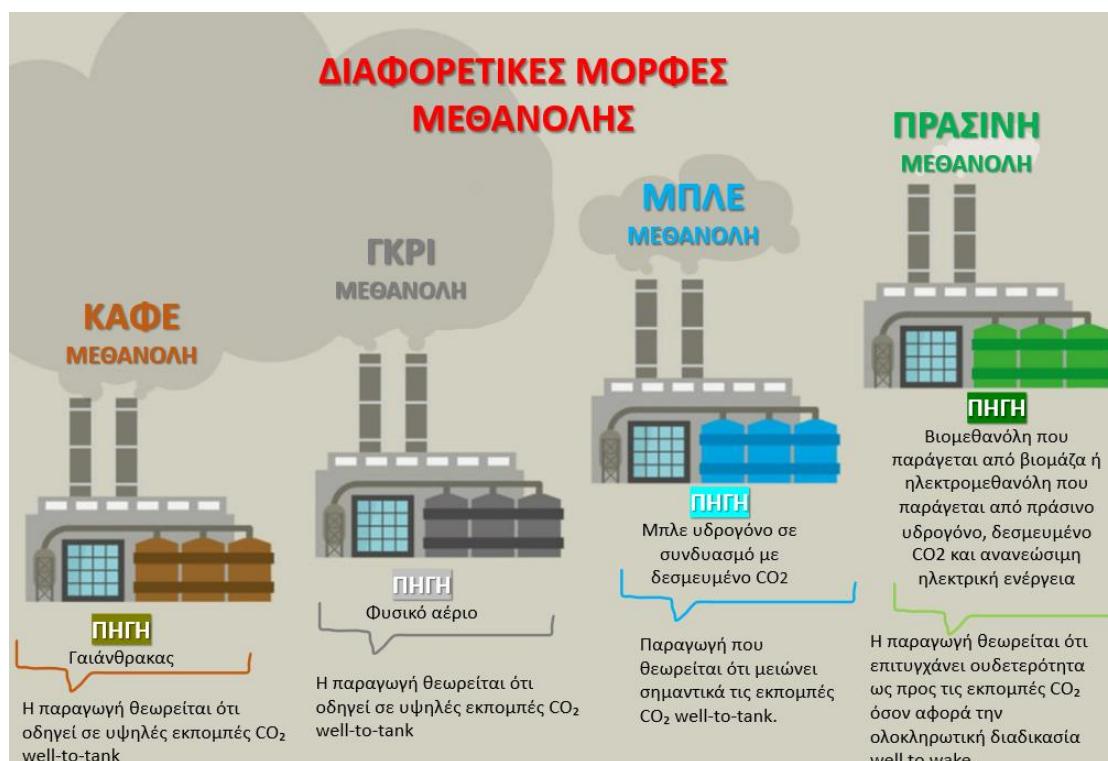
οι επιπτώσεις που έχουν στη βιωσιμότητα της χρήσης της ως καύσιμο στη ναυτιλία. Αυτή η ανάλυση θα βοηθήσει στην κατανόηση των προκλήσεων και των ευκαιριών που παρουσιάζονται από τη χρήση της μεθανόλης ως εναλλακτικό καύσιμο, καθώς και των παραγόντων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την προώθηση της βιώσιμης εφαρμογής της στον ναυτιλιακό κλάδο.

Η διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής μεθανόλης περιλαμβάνει συνήθως τρία βασικά στάδια:

- Το αέριο σύνθεσης: επίσης γνωστό ως syngas, είναι ένα μείγμα που αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογόνο (H₂). Το αέριο αυτό χρησιμεύει ως προπαρασκευαστικό αέριο για τη σύνθεση της μεθανόλης. Η παραγωγή αερίου σύνθεσης συχνά περιλαμβάνει διεργασίες όπως η αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό ή η αεριοποίηση άνθρακα ή βιομάζας.
- Σύνθεση της μεθανόλης: Μόλις ληφθεί το αέριο σύνθεσης, υποβάλλεται σε καταλυτική αντίδραση για την παραγωγή μεθανόλης. Η αντίδραση αυτή λαμβάνει χώρα συνήθως υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, που διευκολύνονται από έναν καταλύτη. Ο πιο κοινός καταλύτης που χρησιμοποιείται στη βιομηχανική σύνθεση μεθανόλης είναι ένα μείγμα χαλκού, οξειδίου του ψευδαργύρου και αλουμινίου.
- Επεξεργασία ακατέργαστης μεθανόλης: Μετά τη σύνθεση της μεθανόλης, η ακατέργαστη μεθανόλη που παράγεται μπορεί να περιέχει προσμίξεις και υποπροϊόντα. Ως εκ τούτου, υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία για τον καθαρισμό και τη διύλιση ώστε να πληρεί τα εμπορικά πρότυπα. Η επεξεργασία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει απόσταξη, καθαρισμό μέσω διαφόρων χημικών διεργασιών και απομάκρυνση ακαθαρσιών όπως νερό και θειούχες ενώσεις.

Κάθε βήμα στη διαδικασία βιομηχανικής παραγωγής μεθανόλης παίζει καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση τόσο της ποιότητας όσο και της αποδοτικότητας του τελικού προϊόντος. Η αποτελεσματικότητα και η βιωσιμότητα αυτών των βημάτων μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως η χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη, η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας.

Σύμφωνα με τα δεδομένα του Παγκόσμιου Ινστιτούτου Μεθανόλης, η μεθανόλη παράγεται κυρίως μέσω τεσσάρων βασικών διαδικασιών οι οποίες φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2.1.2 .2 Διαφορετικές μορφές Μεθανόλης (πηγή : BV)

Ειδικότερα, η μεθανόλη μπορεί να ταξινομηθεί ως υψηλής ή χαμηλής έντασης άνθρακα ανάλογα με τον τύπο της πρώτης ύλης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της και τις σχετικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνονται. Η μεθανόλη που παράγεται από άνθρακα και φυσικό αέριο χωρίς δέσμευση άνθρακα ή εισροή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές θεωρείται γενικά ότι έχει υψηλή ένταση άνθρακα και αναφέρεται ως καφέ και γκρι μεθανόλη.

Καφέ μεθανόλη - Αεριοποίηση του άνθρακα : Σε αυτή τη διαδικασία, ο άνθρακας αντιδρά με ατμό και οξυγόνο υπό υψηλή θερμοκρασία και πίεση, παράγοντας ένα συνθετικό αέριο που περιέχει υδρογόνο (H₂) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Το συνθετικό αέριο στη συνέχεια αντιδρά με έναν καταλύτη για να παραχθεί η μεθανόλη (CH₃OH). Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής πράσινης μεθανόλης από ανανεώσιμες πηγές, όπως η βιομάζα ή ακόμη και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Ωστόσο, η παραγωγή πράσινης μεθανόλης ακόμη αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής παραγωγής αυτού του καυσίμου.

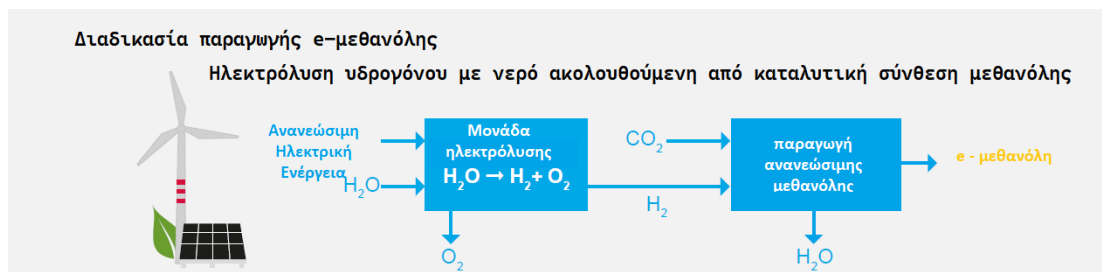
Γκρι μεθανόλη - Αναμόρφωση φυσικού αερίου : Σε αυτή τη διαδικασία, το φυσικό αέριο (μεθάνιο, CH_4) αντιδρά με ατμό (H_2O) υπό υψηλή θερμοκρασία και πίεση, παράγοντας συνθετικό αέριο που περιέχει υδρογόνο (H_2) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Στη συνέχεια, το συνθετικό αέριο αντιδρά με έναν καταλύτη για να παραχθεί η μεθανόλη (CH_3OH).

Το αέριο σύνθεσης, που αναφέρεται επίσης ως " syngas", είναι το κύριο συστατικό των σύγχρονων βιομηχανικών μεθόδων παραγωγής μεθανόλης. Το Syngas είναι ένα μείγμα που αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (H_2) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO), με μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στις περισσότερες περιπτώσεις.

Από την άλλη πλευρά, η παραγωγή μεθανόλης που χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε διάφορες μορφές, ορυκτά καύσιμα με δέσμευση άνθρακα ή συνδυασμό και των δύο, θεωρείται ότι έχει χαμηλότερη ένταση άνθρακα. Αυτός ο τύπος μεθανόλης είναι γνωστός ως μεθανόλη χαμηλού άνθρακα, ή αλλιώς αναφέρεται ως μπλε και πράσινη μεθανόλη. Να σημειωθεί επίσης πως η μεθανόλη μπορεί να κατηγοριοποιηθεί είτε ως ανανεώσιμη είτε ως μη ανανεώσιμη. Για να ταξινομηθεί ως ανανεώσιμη, όλες οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή μεθανόλης πρέπει να προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές, όπως η βιομάζα, η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική και άλλες.

Πράσινη μεθανόλη : Η πράσινη μεθανόλη παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως βιομάζα, βιοαέριο ή ακόμη και από διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ή βιομηχανικές εκπομπές. Η παραγωγή πράσινης μεθανόλης έχει χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τη γκρι και τη μπλε μεθανόλη.

Μπλε μεθανόλη : Η μπλε μεθανόλη παράγεται από φυσικό αέριο ή άλλες ορυκτές πηγές υδρογόνου με τη χρήση τεχνολογιών συλλογής και αποθήκευσης άνθρακα (Carbon Capture and Storage - CCS). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής, το CO₂ που παράγεται απομακρύνεται και αποθηκεύεται, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου.



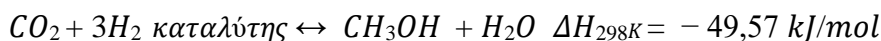
Σχήμα 2.1.2 Διαδικασία παραγωγής e-μεθανόλης (BV)

Στάδια Διαδικασίας Παραγωγής

Ένας πρώτος τρόπος για την παραγωγή της μεθανόλης είναι και η αξιοποίηση του φυσικού αερίου ως πηγή άνθρακα. Τα συγκεκριμένα στάδια και βήματα αυτής της διαδικασίας είναι ο καθαρισμός της τροφοδοσίας, η παραγωγή του syngas, η παραγωγή της μεθανόλης και τέλος ο καθαρισμός της μεθανόλης. Ο καθαρισμός του φυσικού αερίου είναι ένα βήμα που πρέπει να ολοκληρωθεί πριν ξεκινήσει η παραγωγή του αερίου σύνθεσης/syngas. Προκειμένου να αποφευχθεί η δηλητηρίαση και, κατά συνέπεια, η απενεργοποίηση των καταλυτών που θα αναφερθούν στα επόμενα στάδια, είναι κρίσιμο να αφαιρεθεί το θείο (S) από το μείγμα. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία γνωστή ως υδρογονοαποθείωση. Με λίγα λόγια, η προσθήκη υδρογόνου προκαλεί τη διάλυση του δεσμού μεταξύ άνθρακα και θείου, κάτι που διακρίνει αυτή τη διαδικασία. Όταν κατά τη διάρκεια αυτής της προσθήκης υπάρχει μολυβδαίνιο κοβαλτίου (CoMo) ή μολυβδαίνιο νικελίου (NiMo), παράγεται υδρόθειο (H₂S) και στη συνέχεια απορροφάται από το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO).

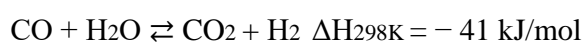
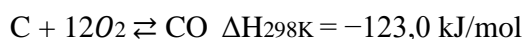
Στη συνέχεια, το αέριο σύνθεσης παράγεται μετά τον καθαρισμό του φυσικού αερίου. Η αναμόρφωση με ατμό, η μερική οξείδωση, η αυτοθερμική αναμόρφωση, η ξηρή αναμόρφωση και η συνδυασμένη αναμόρφωση είναι οι διαδικασίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του.

Το επόμενο στάδιο είναι το στάδιο σύνθεσης της μεθανόλης. Τα ακόλουθα περιγράφουν τον τρόπο δημιουργίας μεθανόλης από αέριο σύνθεσης παρουσία ενός καταλύτη με βάση τον χαλκό. Ως αποτέλεσμα, όταν το υδρογόνο αντιδρά με μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα σε πιέσεις μεταξύ 50 και 100 bar και θερμοκρασίες μεταξύ 200°C και 300°C, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

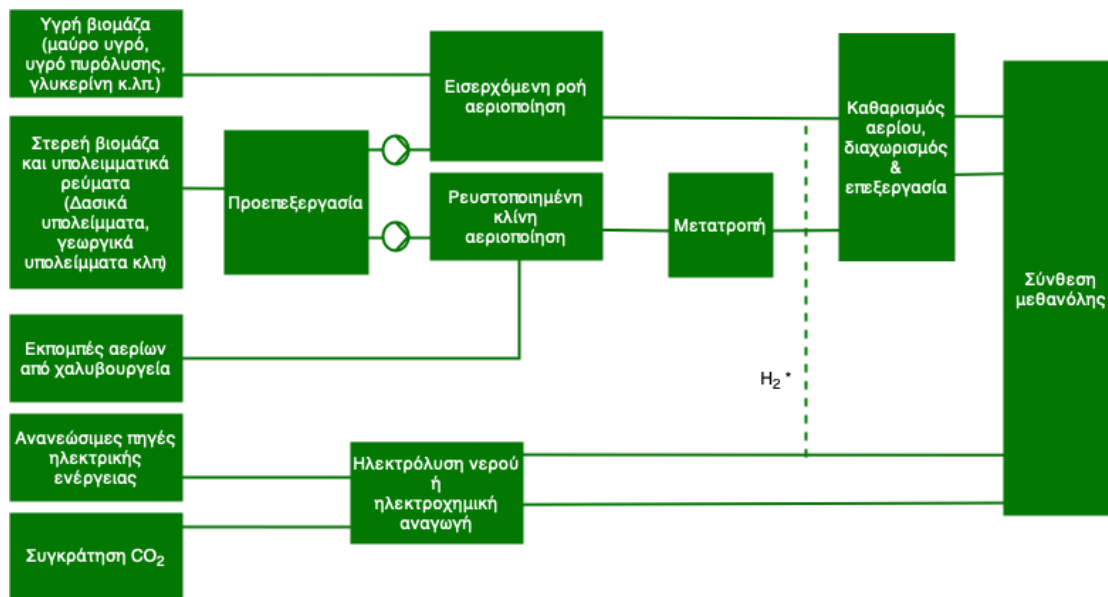


Μια επιπλέον διαδικασία για την παραγωγή της μεθανόλης είναι η παραγωγή μέσω του γαιάνθρακα. Αυτού του είδους η παραγωγή πραγματοποιείται κυρίως σε χώρες με μεγάλες πηγές γαιάνθρακα όπως για παράδειγμα η Κίνα. Σε αυτήν την διαδικασία για την παραγωγή του γαιάνθρακα παρατηρούνται τα στάδια της αεροποίησης, ο καθαρισμός του syngas, και τέλος η σύνθεση και ο καθαρισμός της μεθανόλης.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα δύο τελευταία στάδια είναι τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μεθανόλης από φυσικό αέριο για αυτόν τον λόγο θα αναλυθούν μόνο τα δυο πρώτα στάδια. Ο άνθρακας μετατρέπεται σε αέρια προϊόντα στον αεριοποιητή κατά το πρώτο στάδιο και οι ακόλουθες αντιδράσεις συμβαίνουν κατά την αεριοποίηση του άνθρακα για την παραγωγή αερίου σύνθεσης:



Υπάρχουν ποικίλες διαδρομές παραγωγής όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο βιώσιμες πρώτες ύλες για τη μετατροπή σε συνθετικό αέριο ώστε να παραχθεί μεθανόλη, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα [Σχήμα 2.1.2.3].



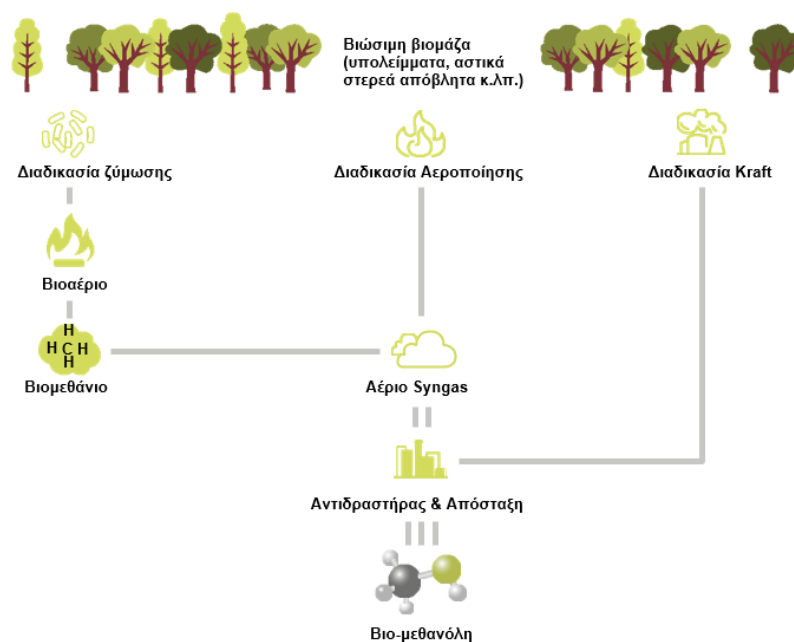
Σχήμα 2.1.2.3 Μέθοδοι παραγωγής μεθανόλης με περιβαλλοντικά βιώσιμο τρόπο. Σημειώνεται ότι δεν παρουσιάζονται ρητά όλα τα στάδια της διαδικασίας. Ο αντιδραστήρας μετατροπής αερίου νερού μπορεί να αντικατασταθεί από υδρογόνο (H_2) σε διεργασίες αεριοποίησης. (πηγή :[15])

Η διαδικασία αεριοποίησης είναι μια θερμοχημική μετατροπή που λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες 800 - 1350oC και πιέσεις 20 – 40bar και απαιτεί μόνο μια μικρή ποσότητα οξυγόνου. Συγκεκριμένα απαιτεί λιγότερο από το 30% της στοιχειομετρικής ποσότητας που απαιτείται για την καύση. Τα μέταλλα μεταπτώσεως έχουν χρησιμοποιηθεί ως μια ποικιλία καταλυτών, αλλά τα πιο δημοφιλή είναι οι καταλύτες αλκαλικών γαιών (Ca) και αλκαλικών αλάτων (K, Na).

Ανάλογα με του είδος του γαιάνθρακα (π.χ. λιγνίτης, υποπισσούχος άνθρακας) έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια διάφορες διαδικασίες και τεχνολογίες για την αεριοποίηση του γαιάνθρακα. Έτσι λοιπόν φαίνεται από την βιβλιογραφία πως το «syngas» που προκύπτει από την αεριοποίηση του γαιάνθρακα θα πρέπει να υποστεί την αντίδραση Water Gas Shift (WGS) καθώς έχει περιορισμένο υδρογόνο.

Η μεθανόλη είναι δυνατόν επίσης να παραχθεί και από βιομάζα. Με αυτόν τον τρόπο η παραγωγή του καυσίμου μέσα από διαδικασίες που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον είναι δυνατόν να αποτελέσει το θεσμικό θεμέλιο για την χρήση εναλλακτικών καυσίμων σε πολλούς κλάδους και κυρίως στην ναυτιλία. Ως βιομάζα ορίζεται εκείνη η ύλη που έχει είτε άμεση είτε έμμεση οργανική προέλευση. Μερικές πηγές βιομάζας είναι τα προϊόντα εκείνα που προέρχονται από την δασοκομία, τις υδατοκαλλιέργειες, την γεωργία, την κτηνοτροφία αλλά και τα διάφορα αστικά απόβλητα.

Ένα χαρακτηριστικό πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ο ουδέτερος κύκλος που έχει ο άνθρακας. Κατά την διάρκεια της καύσης παράγεται διοξείδιο του άνθρακα που είναι το ίδιο που καταναλώνεται και κατά την διάρκεια της φωτοσύνθεσης. Αυτή η διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα να μην επιβαρύνεται η ατμόσφαιρα. Η παραγωγή της μεθανόλης βασίστηκε πρωταρχικά στην χρήση της βιομάζας, έπειτα σε διαδικασίες επεξεργασίας αυτής, της αεροποίησης της και τέλος της διαδικασίας του καθαρισμού.



Σχήμα 2.1.3 Διαδικασία Παραγωγής Βιομεθανόλης (πηγή : BV)

Επιπλέον οι μεθανόλη μπορεί να παραχθεί και από εναλλακτικές τεχνολογίες, όπως είναι η υδρογόνωση του διοξειδίου του άνθρακα και η άμεση οξείδωση του μεθανίου γιατί έχουν τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά οφέλη. Πιο αναλυτικά, η «τεχνική» της υδρογόνωσης του CO_2 για την παραγωγή της μεθανόλης επιδιώκει να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε μεγάλο ποσοστό και παράλληλα να συμβάλλει ιδιαίτερα στην μείωση των αερίων του θερμοκηπίου.[16] Με άλλα λόγια μια λύση που ενδέχεται να βοηθήσει δραστικά στο πρόβλημα των αερίων του θερμοκηπίου είναι η χρήση του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται με την καύση σε βιομηχανικές μονάδες και προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή μεθανόλης είναι σημαντικό να δεσμευτεί κατά την παραγωγή του..

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι αυτή η προσέγγιση της υδρογόνωσης του CO_2 χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 20ου αιώνα και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σήμερα, αν και λιγότερο συχνά. Η περιορισμένη χρήση του υδρογόνου οφείλεται στο

γεγονός ότι παράγεται με χρήση μη ανανεώσιμων πόρων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά περιβαλλοντικά φορτία. Από την άλλη, η ηλεκτρόλυση νερού είναι μια λύση φιλική προς το περιβάλλον, αλλά ο εξοπλισμός είναι αρκετά κοστοβόρος για βιομηχανικές κλίμακες όπως αναφέρουν διάφορες έρευνες [16].

Μια επιπλέον εναλλακτική τεχνολογία για την παραγωγή της μεθανόλης είναι και η απευθείας οξείδωση του μεθανίου. Δεδομένου ότι το μεθάνιο μετατρέπεται απευθείας σε μεθανόλη χωρίς να περάσει το ενδιάμεσο στάδιο της παραγωγής αερίου σύνθεσης, η οξείδωση μεθανίου χαρακτηρίζεται από σημαντικά οικονομικά πλεονεκτήματα για τη βιομηχανική μονάδα. Με την εξάλειψη αυτού του βήματος, το αρχικό κόστος της εγκατάστασης μειώνεται και ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος που σχετίζεται με τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις της διαδικασίας για την παραγωγή αερίου σύνθεσης. Το πρόβλημα με την οξείδωση έχει να κάνει με το αποτέλεσμα της αντίδρασης αφού η οξείδωση δεν σταματά στη μεθανόλη. Αντίθετα, συνεχίζει έως ότου τα προβλεπόμενα προϊόντα είναι εντελώς αδρανή, οπότε παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Υπάρχουν επιτυχείς διεργασίες για άμεση οξείδωση σε μεθανόλη, αλλά δεν είναι άμεσα υλοποιήσιμες και συμφέρουσες για μια βιομηχανική μονάδα [16]

Σύμφωνα με διάφορες πρόσφατες έρευνες αναγνωρίζεται πως το κόστος της μονάδας παραγωγής μεθανόλης από γαιάνθρακα είναι μικρότερο συγκριτικά με το κόστος των άλλων μεθόδων. Παρόλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές πώλησης και το κόστος εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα η πιο συμφέρουσα μέθοδος παραγωγής της μεθανόλης είναι από φυσικό αέριο. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα επηρεάζουν σημαντικά την μονάδα παραγωγής μεθανόλης από γαιάνθρακα και από βιομάζα ενώ είναι ελάχιστες στην μονάδα παραγωγής από φυσικό αέριο. Ακόμη, χωρίς μεγάλη επιβάρυνση προς το περιβάλλον είναι επικερδέστερη η μέθοδος με την τροφοδοσία φυσικού αερίου στην παραγωγή της μεθανόλης.[Μελέτες[17][18]

2.1.3 Μέσα αποθήκευσης CH₃OH

Η μεθανόλη είναι εύκολα διαχειρίσιμη όσον αφορά την αποθήκευσή της συγκριτικά με άλλα καύσιμα που μελετώνται για μελλοντική χρήση. Για να αποθηκευτεί η μεθανόλη σε υγρή μορφή δεν απαιτείται σύστημα ειδικών κρυογενικών δεξαμενών ή πίεσης. Άρα οποιοδήποτε σχήμα δεξαμενής είναι κατάλληλο. Ωστόσο, η ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα της μεθανόλης είναι 2,5 φορές μικρότερη από αυτή του πετρελαίου diesel και άρα προκειμένου να ληφθεί το ίδιο ενεργειακό ποσό με το πετρέλαιο ο χώρος αποθήκευσης των δεξαμενών θα πρέπει να αυξηθεί 2,5 φορές. Από την πλευρά της ασφάλειας απαραίτητο είναι το διπλό τοίχωμα στις δεξαμενές και τις σωληνώσεις ώστε να μην υπάρχουν διαφυγές μεθανόλης.

Για τα πλοία, ο ανεφοδιασμός της μεθανόλης είναι γρήγορος και ασφαλής. Σε ατμοσφαιρική πίεση, η μεθανόλη είναι υγρή, επομένως μπορεί να αποθηκευτεί παρόμοια με τα άλλα καύσιμα. Επομένως, η αποθήκευση μεθανόλης απαιτεί μικρότερου μεγέθους υποδομές όσο αφορά τις διαστάσεις, ειδικά σε σύγκριση με εναλλακτικές λύσεις όπως το LNG ή το υδρογόνο [19]. Σήμερα, η μεθανόλη είναι ήδη προσβάσιμη σε περισσότερα από 100 σημαντικά λιμάνια. Μια γρήγορη βιοαποικοδόμηση είναι επίσης δυνατή μέσω αυτού του τρόπου αποθήκευσης.[20]

Οι χώροι αποθήκευσης μεθανόλης πρέπει να περικλείονται με κατάλληλο υλικό, να αερίζονται για να αποτρέπεται η συσσώρευση ατμών και να αποστραγγίζονται σε ασφαλή περιοχή μακριά από την περιοχή αποθήκευσης. Σε χώρους αποθήκευσης πρέπει να τοποθετούνται συναγερμοί ατμού και θερμότητας. Οι τυπικοί ανιχνευτές καπνού και οι ανιχνευτές φλόγας φωτεινού τύπου είναι απίθανο να ανιχνεύσουν την καύση επειδή η μεθανόλη καίγεται με μια διαφανή, μη φωτεινή μπλε φλόγα .[20]

Οι ανιχνευτές καπνού και οι ανιχνευτές φωτεινής φλόγας μπορούν να αντικατασταθούν με ανιχνευτές μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του άνθρακα. Οι τεχνικές ανίχνευσης υπέρυθρων χρησιμοποιούνται από τους πρώτους ανταποκριτές για την αναγνώριση της καύσης. Συνιστάται η εγκατάσταση και η ειδοποίηση αυτού του είδους ανιχνευτή για να γίνεται παρακολούθηση στους χώρους αποθήκευσης μεθανόλης [20].

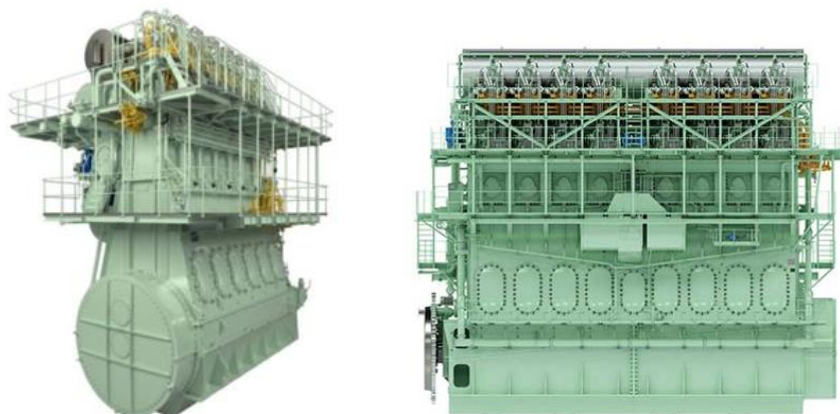
Οι κύριες οδηγίες για την ασφάλεια της χρήσης και της αποθήκευσης της μεθανόλης βρίσκονται και στον IGF Code ο οποίος περιλαμβάνει αρχές και κανόνες για την

ρύθμιση , την εγκατάσταση, τον έλεγχο και την παρακολούθηση της μηχανολογικής εγκατάστασης, του εξοπλισμού και των συστημάτων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο την μεθανόλη.

2.1.4 Τεχνολογία Μηχανών με Μεθανόλη

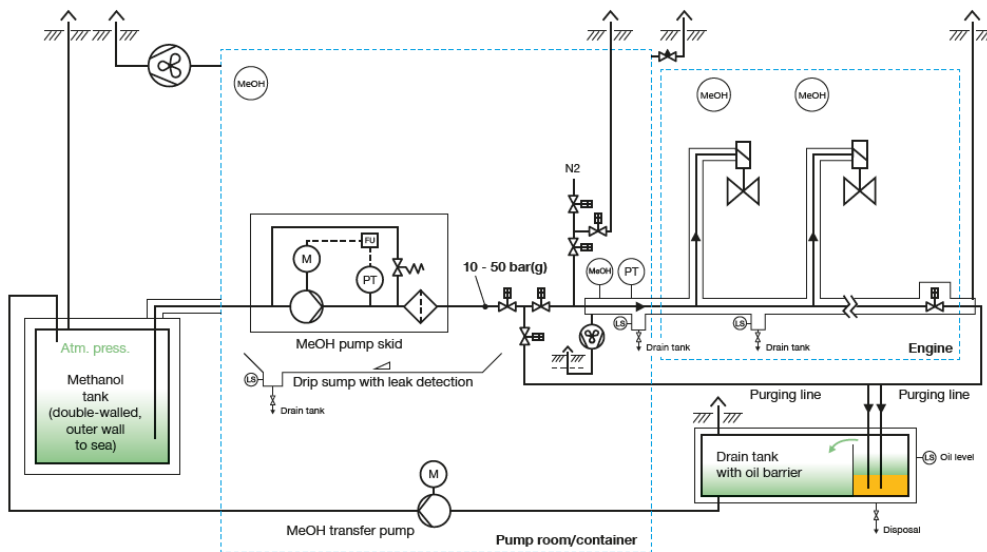
Δίχρονος κινητήρας μεθανόλης - Two stroke Methanol engine

Η εταιρεία “ MAN Energy Solutions ” έχει αναπτύξει ένα δίχρονο κινητήρα ο οποίος είναι διπλού καυσίμου και λειτουργεί με μεθανόλη καθώς και με συμβατικό καύσιμο diesel (ME-LGIM). Ο κινητήρας είναι βασισμένος στην αποδεδειγμένη σειρά της εταιρείας η οποία είναι η σειρά ME με περισσότερες από 8.500 μηχανές εν λειτουργία και οι οποίες δουλεύουν σύμφωνα με την αρχή του Diesel ως καύσιμο . Είναι χαρακτηριστικό ότι όταν οι εν λόγω μηχανές λειτουργούν με μεθανόλη τότε μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές αερίων CO₂ , NO_x και SO_x.



Εικόνα 1 Κινητήρας διπλού καυσίμου MAN B&W ME-LGIM με μεθανόλη (πηγή: Methanol in Shipping[10])

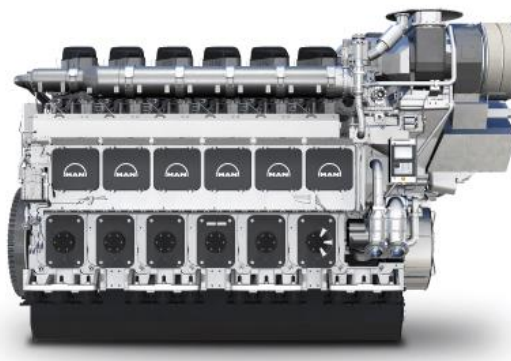
Οι λειτουργίες εναλλαγής μεταξύ μεθανόλης και άλλων καυσίμων είναι απρόσκοπτες. Σε δοκιμές, η απόδοση του κινητήρα όταν τροφοδοτείται από μεθανόλη βρέθηκε να είναι συγκρίσιμη ή ελαφρώς ανώτερη από αυτή των παραδοσιακών κινητήρων που λειτουργούν με HFO – Heavy Fuel Oil. Ο κινητήρας ME-LGIM της “MAN” ουσιαστικά αποτελεί «την απάντηση» της ναυτιλιακής βιομηχανίας να λειτουργεί κινητήρες που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα.



Εικόνα 2. Τεχνολογία Μηχανών MAN (πηγή: Methanol in Shipping[10])

Τετράχρονος κινητήρας μεθανόλης - Four stroke engine Methanol engine

Απαιτούνται διαφορετικές τεχνολογίες για την έγχυση και την καύση μεγάλων τετράχρονων κινητήρων λόγω των διαφόρων μελλοντικών τύπων καυσίμων, όπως η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο, και οι απαιτήσεις της αγοράς όσον αφορά τη διαθεσιμότητα καυσίμου, τις τιμές και τους κανονισμούς. Η εταιρεία MAN Energy Solution αναπτύσσει τους τετράχρονους κινητήρες μεθανόλης με αρθρωτό - βήμα προς βήμα τρόπο όπως είναι και το μοντέλο MAN 49/60DF. Αυτή η μέθοδος προϋποθέτει ότι οι κινητήρες μπορούν ήδη να λειτουργούν με βιοκαύσιμα (όπως βιοντίζελ και βίο-LNG) και άλλες λύσεις ανάμειξης (όπως 25% πρόσμειξη H₂ σε λειτουργία αερίου με LNG).[10]



Εικόνα 3 Τετράχρονος κινητήρας MAN με methanol - retrofit (πηγή: MAN)

Η τεχνολογία ψεκασμού καυσίμου (PFI) θα επιτρέψει σύντομα στους κινητήρες να λειτουργούν με μεθανόλη ως κύριο καύσιμο σύμφωνα με την ανάλυση της εταιρείας MAN. Στους κατάλληλους τρόπους λειτουργίας του κινητήρα, αυτή η τεχνολογία PFI επιτρέπει ένα σταθερό εύρος λειτουργίας με υψηλό μερίδιο μεθανόλης. Αυτή η απλή και αξιόπιστη τεχνολογία ψεκασμού θα επιτρέψει τη λειτουργία του κινητήρα εντελώς ουδέτερη από άνθρακα όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με βιοντίζελ. Ο τετράχρονος κινητήρας της MAN στοχεύει να τεθεί σε λειτουργία με μεθανόλη το 2024, τόσο για πρόσφατα κατασκευασμένους κινητήρες ντίζελ όσο και για κινητήρες διπλού καυσίμου, χάρη στην ιδέα ετοιμότητας MAN PFI. Τέλος, είναι χαρακτηριστικό ότι η MAN Energy Solutions δουλεύει έντονα προς επιπλέον τεχνολογίες όπως είναι η τεχνολογία υψηλής πίεσης και άμεσης έγχυσης (HP-DI). Με αυτήν την τεχνολογία η πλήρης δύναμη εξόδου της μεθανόλης είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με την υψηλότερη απόδοση σε ολόκληρο τον κινητήρα και τον τρόπο λειτουργίας του.

2.1.5 Υφιστάμενα Πλοία με Μεθανόλη ως καύσιμο

Αρκετά πλέον είναι τα πλοία που καίνε μεθανόλη ως κύριο καύσιμο και φαίνεται ολοένα να αυξάνεται η ζήτησή τους από τις πλοιοκτήτριες εταιρείες. Πιο αναλυτικά, το 2016, η "Waterfront Shipping", θυγατρική εταιρεία της "Methanex", εγκαινίασε το πρωτοπόρο χημικό δεξαμενόπλοιο διπλού καυσίμου μεθανόλης 50.000-DWT με την ονομασία Cajun Sun.



Εικόνα 4. Χημικό δεξαμενόπλοιο "Cajun Sun" (πηγή: Waterfront)

Επί του παρόντος, η WFS διαχειρίζεται έναν στόλο που αποτελείται από 18 πλοία διπλού καυσίμου μεθανόλης, συγκεντρώνοντας πάνω από 140.000 ώρες λειτουργίας.

Τον Φεβρουάριο του 2023, το Cajun Sun, πλοίο διπλού καυσίμου ναυλωμένο από τη «MOL» και διαχειριζόμενο από την «WFS», πραγματοποίησε το πρώτο ταξίδι με καύσιμο την βιομεθανόλη. Η στρατηγική αυτή περιελάμβανε την ανάμειξη βιομεθανόλης πιστοποιημένης από το ISCC⁸, η οποία εμφανίζει αρνητικό ποσοστό έντασης διοξειδίου του άνθρακα, με καύσιμο την μεθανόλη που παράγεται από φυσικό αέριο. Με την ανάμειξη αυτή επιτεύχθηκαν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για το 18ήμερο υπερατλαντικό ταξίδι με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής του. Αυτή η πρωτοποριακή λύση καυσίμου, που παράγεται στις πιστοποιημένες κατά ISCC εγκαταστάσεις στο Geismar, προσφέρει στις ναυτιλιακές εταιρείες την ευκαιρία να επιτύχουν άμεσα καθαρές μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, υποστηρίζοντας τη μετάβαση της ναυτιλιακής βιομηχανίας προς ένα μέλλον με χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Ακόμη, μέχρι τον Δεκέμβριο του 2022, η «Proman Stena Bulk» είχε παραλάβει το τέταρτο δεξαμενόπλοιο με κινητήρα μεθανόλης και την παρούσα χρονική στιγμή έχει δύο επιπλέον πλοία μεθανόλης υπό κατασκευή.



Εικόνα 5. Proman Stena Bulk 2022 (πηγή: Methanol Institute)

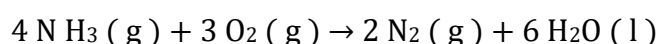
⁸ ISCC : Πιστοποίηση International Sustainability and Carbon Certification

3 Αμμωνία

3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Η απεξάρτηση του κλάδου της ναυτιλίας από τις επιβλαβείς εκπομπές CO₂ στο περιβάλλον και η μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα καθιστά μια ακόμα πιθανή λύση, και την αμμωνία ως ενδεχόμενο ναυτιλιακό καύσιμο που θα μπορούσε να αποτελέσει παράγοντα μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Στο πλαίσιο ακόμη μιας αναπτυσσόμενης οικονομίας που ερευνά όλο και περισσότερο την ένταξη του υδρογόνου ως καύσιμο στον ναυτιλιακό τομέα, η αμμωνία παρουσιάζει επίσης αρκετό ενδιαφέρον ως μια μορφή με την οποία μπορεί να μεταφερθεί εύκολα υδρογόνο σε μεγάλες ποσότητες και σε μεγάλες αποστάσεις [21].

Η αμμωνία συγκεκριμένα είναι μια ανόργανη δυαδική χημική ένωση που αποτελείται από ένα άτομο αζώτου με τρεις δεσμούς υδρογόνου και ένα ζεύγος ελεύθερων ηλεκτρονίων. Σύμφωνα με τον περιοδικό πίνακα ο μοριακός τύπος της είναι NH₃ και συναντάται ως άχρωμο αλκαλικό αέριο με έντονη μυρωδιά, χαρακτηριστικό που την καθιστά εύκολα ανιχνεύσιμη [22]. Χαρακτηριστικό γνώρισμά της είναι πως ο χημικός τύπος της αμμωνίας δεν περιέχει άνθρακα και επομένως όταν καίγεται πλήρως, παράγει τελικά φιλικά προϊόντα για την ατμόσφαιρα όπως είναι το νερό και το αβλαβές στοιχείο του αζώτου.



Σε αέρια μορφή η αμμωνία διαλύεται εύκολα στην ατμόσφαιρα, διότι έχει μικρότερη πυκνότητα από τον αέρα. Ακόμα, το σημείο ψύξης της αμμωνίας βρίσκεται γύρω στους 77°C και για αυτό το λόγο η αμμωνία είναι ιδανική για καύσιμο σε ακραία χαμηλές θερμοκρασίες. Από την άλλη μεριά η υγρή αμμωνία έχει υψηλή διηλεκτρική σταθερά και το μόριο της (NH₃) έχει παρόμοια δομή με αυτό του νερού για αυτό το λόγο και διαλύεται εύκολα στο νερό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να εμποδίζει την πρόκληση πυρκαγιάς ή έκρηξης σε περίπτωση διαρροής. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία επίσης, η πίεση της αμμωνίας φτάνει στα 8.57 bar στους 20°C και παράλληλα φέρει υδρογόνο με περιεκτικότητα 17.6% κατά μάζα, ενώ σε υγρή μορφή περιέχει 48% κατ' όγκο περισσότερο υδρογόνο από ότι το ίδιο στοιχείο του υδρογόνου σε υγρή μορφή.[23]

Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά της αμμωνίας (ABS, 2020)

Χαρακτηριστικά Αμμωνίας	Αξία
Χημικός τύπος	NH ₃
Ενεργειακή πυκνότητα (MJ/L)	12.7
Πυκνότητα υγρού (kg/m ³)	600
Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (MJ/kg)	188
Θερμότητα εξάτμισης (kJ/kg)	1371
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (°C)	651
Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης (mJ)	680
Θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας σε 1 bar (°C)	1800
Σημείο βρασμού σε 1 bar (°C)	-33.6
Κρίσιμη θερμοκρασία (°C)	132.25
Κρίσιμη πίεση (bar)	113
Εύρος εύφλεκτων σε ξηρό αέρα (%)	15.15 με 27.35
Αριθμός κετανίου	0
Αριθμός οκτανίου	περίπου 130

Η αμμωνία πρόκειται για ένα βασικό χημικό προϊόν που αποτελεί αντικείμενο του παγκόσμιου εμπορίου και μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή λιπασμάτων. Ωστόσο, δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως ναυτιλιακό καύσιμο και για αυτό είναι απαραίτητη η πολύπλευρη έρευνα όσον αναφορά την τοξικότητά της διότι εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ευρέως στη ναυτιλιακή βιομηχανία, οφείλει η χρήση της να είναι ασφαλής τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το θαλάσσιο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, για να αποτελέσει μια «καλή» επιλογή για την απανθρακοποίηση του ναυτιλιακού τομέα, η καύση της αμμωνίας θα πρέπει να παρουσιάζει ελάχιστους ή ακόμα και μηδενικούς ρύπους και παράλληλα η χρήση της να μειώνει το ποσοστό πρόκλησης ενδεχόμενων περιβαλλοντικών κινδύνων [21].

Χαρακτηριστικό γνώρισμα της αμμωνίας που βρίσκεται σε υγρή μορφή είναι πως η ενεργειακή της πυκνότητα συγκριτικά με αυτή του υγρού υδρογόνου είναι υψηλότερη. Ακόμη, η υγρή μορφή της αμμωνίας διευκολύνει τόσο την αποθήκευσή της επί του πλοίου όσο και την μεταφορά της με αυτό. Πιο αναλυτικά, οι απαιτήσεις της αποθήκευσης του προπανίου ομοιάζουν με εκείνες που χρίζει και η αποθήκευση της αμμωνίας σε υγρή μορφή, υπό πίεση σε 10 bar και σε θερμοκρασία 25°C ή σε θερμοκρασία 33,4 °C και σε ατμοσφαιρική πίεση.[24]

3.2 Μέθοδοι Παραγωγής Αμμωνίας

Τεκμήριο στην παρούσα έρευνα αποτελεί το γεγονός ότι το Γεωλογικό Ινστιτούτο των Ηνωμένων Πολιτειών δημοσιεύει ότι περίπου 150 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι αμμωνίας παρήχθησαν παγκοσμίως το έτος 2019. Η αμμωνία, το έτος 2019, προβλεπόταν να κοστίζει 230 δολάρια ΗΠΑ ανά τόνο κατά μέσο όρο. Έρευνες επίσης, το έτος εκείνο προδήλωναν πως κατά την διάρκεια των επόμενων 4 ετών, θα σημειωνόταν μια συνολική αύξηση 4% στην παγκόσμια παραγωγική δυναμικότητα της αμμωνίας. Η αμμωνία ως στοιχείο δεν περιέχει άνθρακα και η διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι επίσης ουδέτερη ως προς τον άνθρακα. Μπορεί να παραχθεί από ορυκτά καύσιμα όπως το υδρογόνο χρησιμοποιώντας «πράσινες» τεχνικές όπως η δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που και οι δύο ως μέθοδοι μπορεί να επηρεάσουν την ανταγωνιστική τιμή της σαν ναυτιλιακό καύσιμο.[25]

Επιπροσθέτως, η παραγωγή της αμμωνίας είναι εφικτή με διαδικασίες όπου χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες χωρίς τη χρήση άνθρακα. Συγκεκριμένα, η παραγωγή της ενδέχεται να επιτευχθεί είτε με ορυκτά καύσιμα και «πράσινες μεθόδους» είτε με ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Στην πρώτη περίπτωση η παραγωγή γίνεται από υδρογονάνθρακες, που χρησιμοποιούνται και στην παραγωγή υδρογόνου, ενώ για το άζωτο που απαιτείται, γίνεται υγροποίηση του αέρα. Η χρήση ανανεώσιμης ενέργειας για την παραγωγή αμμωνίας κυρίως προέρχεται από την παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού και έτσι επακολουθείται η σύνθεση της αμμωνίας. Ο δεύτερος αυτός τρόπος χειρίζεται τόσο στην παραγωγή όσο και στην χρήση της αμμωνίας, τεχνολογίες χωρίς την ύπαρξη άνθρακα. [25]

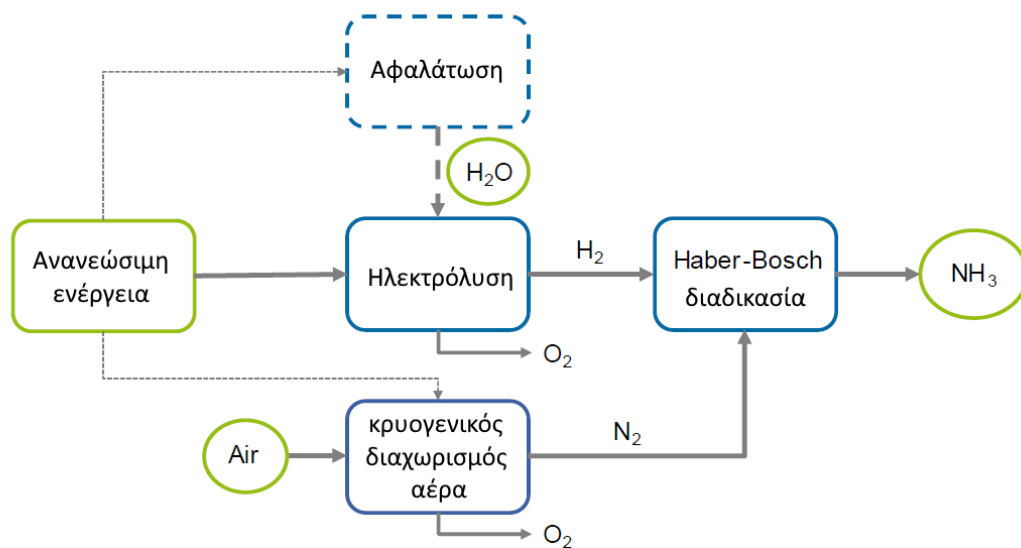
Η τοποθεσία των μονάδων παραγωγής της αμμωνίας καθορίζεται κυρίως από την διαθεσιμότητα των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση. Πιο αναλυτικά, όπως είναι γνωστό το φυσικό αέριο βρίσκεται σε αφθονία ως πηγή ενέργειας τόσο στη Ρωσία, στη Μέση Ανατολή όσο και στην Βόρεια Αφρική πράγμα το οποίο επαληθεύει και την ύπαρξη πολλών μονάδων παραγωγής αμμωνίας με βάση το φυσικό αέριο. Σημαντικό στοιχείο, επίσης, καθίσταται πως λόγω της παραγωγής σχιστολιθικού φυσικού αερίου στις ΗΠΑ. Σε αντίθεση έρχεται η Ινδία η οποία είναι μια χώρα με σπάνιους πόρους φυσικού αερίου αλλά ταυτόχρονα με πολλές μονάδες

παραγωγής αμμωνίας, οι οποίες βασίζονται στην εισαγωγή υγροποιημένου φυσικού αερίου για να γίνουν αυτάρκεις στην προμήθεια λιπασμάτων.

Η αμμωνία αποτελείται από άζωτο και υδρογόνο και σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι αέριο, άχρωμο αλλά με χαρακτηριστική, έντονη οσμή. Υγροποιείται σε υψηλές πιέσεις και η θερμογόνος δύναμή της είναι παρόμοια με της μεθανόλης. Η ενεργειακή της πυκνότητα είναι μικρότερη από των ορυκτών καυσίμων και έχει φάσμα ευφλεκτότητας στον ξηρό αέρα 15.15 μέχρι περίπου 27.35, μικρότερο σε τιμή σε σχέση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα που μελετώνται. Ακόμη, είναι τοξική για τον άνθρωπο, συγκεκριμένα για τα μάτια, τους πνεύμονες και το δέρμα, ενώ η απευθείας επαφή σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπορεί να επιφέρει τον θάνατο. Είναι πολύ εκρηκτική ουσία και επειδή αντιδρά εύκολα με πολλά συχνά χρησιμοποιούμενα βιομηχανικά υλικά, όπως ο χαλκός, ο ψευδάργυρος σε περιβάλλον με υγρασία, αποφεύγεται η χρήση της σε τέτοιου είδους βιομηχανικούς χώρους. Επιπρόσθετα, η αμμωνία αντιδρά, με οξέα, αλογόνα και οξειδωτικούς παράγοντες, στοιχεία που επηρεάζουν την αλκαλικότητα.

Η παραγωγή της αμμωνίας ως καύσιμο περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους, καθεμία από τις οποίες έχει ξεχωριστές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τεχνολογικές εκτιμήσεις και κατηγοριοποιείται συνήθως σε τρεις ομάδες με βάση τον χρωματισμό. Οι διαδικασίες αυτές παραγωγής παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα βιωσιμότητας και ποσοστό αποτυπώματος άνθρακα και έτσι μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Πράσινη αμμωνία : Χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τη σύνθεση της NH_3 , όπως υδρογόνο που προέρχεται από ηλεκτρόλυση νερού και άζωτο που προέρχεται από τον αέρα του περιβάλλοντος, προσφέροντας μια πορεία προς την ουδετερότητα ως προς τον άνθρακα.



Εικόνα 6 Διεργασία παραγωγής Πράσινης Αμμωνίας (πηγή: Ammonia as marine fuel [21])

- Μπλε αμμωνία : επιδεικνύει μια μεταβατική προσέγγιση με τη δέσμευση και αποθήκευση των εκπομπών CO₂ με τη χρήση τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (CCS).
- Γκρίζα αμμωνία : Παράγεται με συμβατικές μεθόδους, που συνήθως βασίζονται σε πρώτες ύλες ορυκτών καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο, χωρίς την εφαρμογή μέτρων CCS, με αποτέλεσμα σημαντικές εκπομπές CO₂ και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Αδιαμφισβήτητα, η κατανόηση και η αξιολόγηση αυτών των διαφορετικών μεθόδων παραγωγής NH₃ είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη όλο και περισσότερο βιώσιμων πρακτικών σχετικά με την παραγωγή αμμωνίας και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών συνεπειών που σχετίζονται με τη σύνθεσή της ως καύσιμο.

Συμπερασματικά, η πράσινη αμμωνία προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη διέξοδο για βιώσιμη παραγωγή αυτού του καυσίμου, όμως η μπλε αμμωνία επιδεικνύει μια μεταβατική προσέγγιση με τη δέσμευση και αποθήκευση των εκπομπών CO₂. Ακόμη, η παραγωγή γκρίζας αμμωνίας, χωρίς την εφαρμογή τεχνολογίας CCS, συμβάλλει στις εκπομπές CO₂, και έτσι την καθιστά λιγότερο φιλική προς το περιβάλλον σε σύγκριση με τις αντίστοιχες πράσινες και μπλε μεθόδους. Καθώς συνεχίζονται οι προσπάθειες για τον μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η υιοθέτηση περισσότερο οικολογικών μεθόδων παραγωγής, όπως η πράσινη και η μπλε αμμωνία, καθίσταται όλο και πιο επιτακτική για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος

των μεθόδων παραγωγής της NH_3 . Αναμφισβήτητα λοιπόν, η μετάβαση στην αμμωνία ως πηγή καυσίμου στον ναυτιλιακό κλάδο φέρει τόσο πλεονεκτήματα όσο και προκλήσεις που πρέπει να εξεταστούν ενδελεχώς για την ασφαλή ένταξη της NH_3 ως επιλογή καυσίμου.

Πλεονεκτήματα χρήσης αμμωνίας ως καύσιμο ναυτικών μηχανών :

- Μετατρέπεται εύκολα σε υδρογόνο και άζωτο
- Μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί ως υγρό καύσιμο μέσω πλοίου σε συγκεκριμένη τιμή πίεσης και θερμοκρασίας
- Θεωρείται ήδη ως χημική ουσία ένα καθιερωμένο εμπορικό προϊόν
- Δεν περιέχει άνθρακα, άρα η καύση της είναι χωρίς εκπομπές CO_2 ή αιθάλη
- Διαθέτει χαμηλό κίνδυνο αναφλεξιμότητας – 15,15% έως 27,35% στον αέρα
- Μπορεί να παραχθεί από ηλεκτρική ενέργεια ή αλλιώς από ανανεώσιμη

Προκλήσεις χρήσης αμμωνίας ως καύσιμο ναυτικών μηχανών :

- Κίνδυνοι τοξικότητας για την ανθρώπινη υγεία και τη θαλάσσια ζωή
- Διάβρωση των υποδομών και των εξαρτημάτων του κινητήρα εσωτερικής καύσης
- Απαίτηση σημαντικών επενδύσεων για την ανάπτυξη υποδομών
- Χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα (με ενεργειακή πυκνότητα περίπου 3 kWh ανά λίτρο (κάπου μεταξύ υδρογόνου και ΥΦΑ ως προς τον όγκο αποθήκευσης ενέργειας)) σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα
- Εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) και άλλων επιβλαβών ρύπων
- Εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή της αμμωνίας
- Εξειδικευμένες απαιτήσεις χειρισμού και αποθήκευσης

- Υψηλό κόστος παραγωγής, λόγω του υψηλού κόστους κεφαλαίου που σχετίζεται με την αλυσίδα εφοδιασμού της αμμωνίας

Οι προκλήσεις θα ήταν εύλογο να αντιμετωπιστούν για να εξασφαλιστεί η όσον το δυνατόν ασφαλέστερη και πιο βιώσιμη υιοθέτηση της αμμωνίας ως ναυτιλιακό καύσιμο. Για τον λόγο αυτό η συγκεκριμένη έρευνα εξετάζει πιθανές προτεινόμενες διεξόδους τόσο για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της χρήσης αμμωνίας ως καύσιμο αλλά και για τα άλλα δύο καύσιμα που αναλύονται ενδελεχώς στο παρόν εκπόνημα, τόσο για την μεθανόλη όσο και για το υδρογόνο.

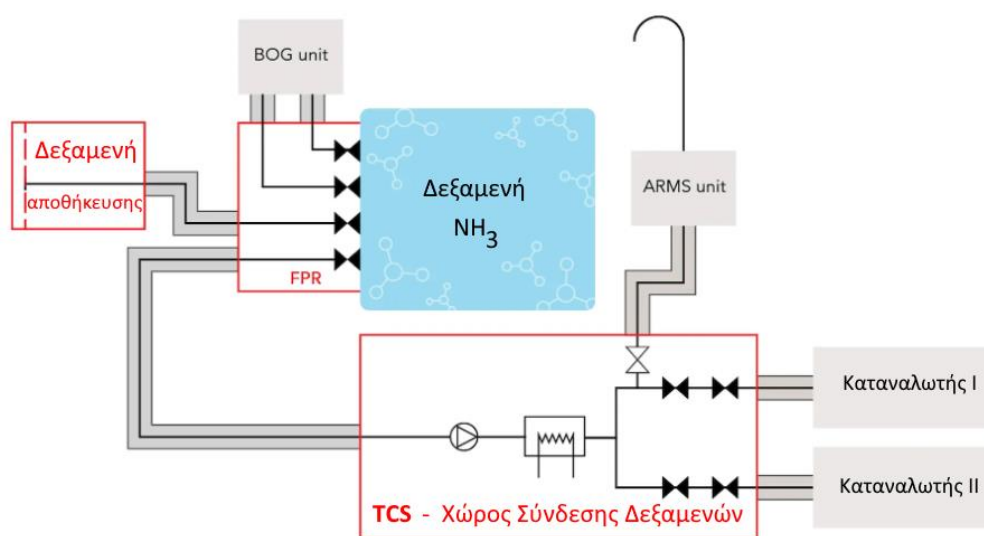
Σύμφωνα με τον Vries (2019), η ανίχνευση και ο μετριασμός των πιθανών κινδύνων που σχετίζονται με την αμμωνία, όπως διαρροές, πυρκαγιές ή συγκρούσεις πλοίων, είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφάλειας στα πλοία. Για την πρόληψη διαρροών υγρής ή ακόμα και αέριας αμμωνίας σε κρίσιμους χώρους, όπως τα αμπάρια φορτίου, τα μηχανοστάσια και οι χώροι όπου στεγάζονται οι συμπιεστές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες «στρατηγικές» πρόληψης. Μερικές από αυτές περιλαμβάνουν την εφαρμογή συστημάτων ανίχνευσης ροής αμμωνίας για να ειδοποιούν τα μέλη του πληρώματος και να τους επιτρέπουν να κλείνουν αμέσως τις βαλβίδες για να περιορίσουν τις επιπτώσεις των διαρροών.

Πιο συγκεκριμένα, η τοποθέτηση των σωληνώσεων σε ξεχωριστούς κορμούς ενδέχεται να ελαχιστοποιήσει την πιθανότητα και τις συνέπειες ενδεχόμενης διαρροής. Τα επαρκή συστήματα εξαερισμού μπορούν επίσης να συμβάλουν στη μείωση των επιπτώσεων τυχόν διαρροών αμμωνίας. Είναι αξιοσημείωτο επίσης, πως ο πλεονασμός στις γραμμές τροφοδοσίας διασφαλίζει τη συνεχή λειτουργία και μειώνει τον κίνδυνο πιθανών κινδύνων. Επιπλέον, μέτρα όπως η εγκατάσταση πομπών πίεσης και συστημάτων αυτόματου κλεισίματος βαλβίδων μπορούν να βοηθήσουν στην ανίχνευση και στην απομόνωση ανωμαλιών πίεσης και θερμοκρασίας, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο κινδύνου πυρκαγιάς. Επιπλέον, τα συστήματα εκτόνωσης πίεσης που εγκαθίστανται στις δεξαμενές αποθήκευσης μπορούν να μετριάσουν τη συσσώρευση πίεσης πριν από τις βαλβίδες, ενισχύοντας περαιτέρω τα μέτρα ασφαλείας στα πλοία.

3.3 Μέσα αποθήκευσης NH₃

Ως προς τον αποθηκευτικό χώρο αξίζει να αναφερθεί ότι η αμμωνία απαιτεί 2.4 φορές περισσότερο όγκο από το Heavy Fuel Oil (HFO) για την εξασφάλιση ίδιου ποσού ενέργειας καυσίμου. Σημαντική είναι, ακόμα, η τήρηση των ελάχιστων αποστάσεων των δεξαμενών αποθήκευσης του εν λόγω καυσίμου απ' την γάστρα του πλοίου, καθώς και των υπόλοιπων μέτρων ασφαλείας κατά την αποθήκευση της αμμωνίας.[25] Επιπροσθέτως, η επιλογή της δεξαμενής του καυσίμου θα πρέπει να γίνεται εξαρτώμενη από τη συμβατότητα με πιθανούς σταθμούς ανεφοδιασμού και αναφορικά με την κατάλληλη θερμοκρασία και την πίεση.

Διάταξη Συστήματος Καυσίμου



Εικόνα 7. Τυπική διάταξη συστήματος καυσίμου NH₃ [BOG unit⁹, FPR¹⁰, ARMS unit¹¹] (πηγή : DNV)

Οι χώροι σύνδεσης δεξαμενών - TCS¹² είναι αναπόσπαστα στοιχεία των πρωτοκόλλων ασφαλείας στη ναυτιλία, σχεδιασμένα για να διασφαλίζουν τη συγκράτηση και να ελαχιστοποιούν τους κινδύνους που σχετίζονται με τις συνδέσεις δεξαμενών. Εντός κλειστών χώρων, όλες οι συνδέσεις δεξαμενών πρέπει να στεγάζονται σε ένα καθορισμένο TCS για τον ασφαλή περιορισμό των διαρροών.

⁹ BOG unit – Boil-Off Unit (Μονάδα βρασμού αερίου)

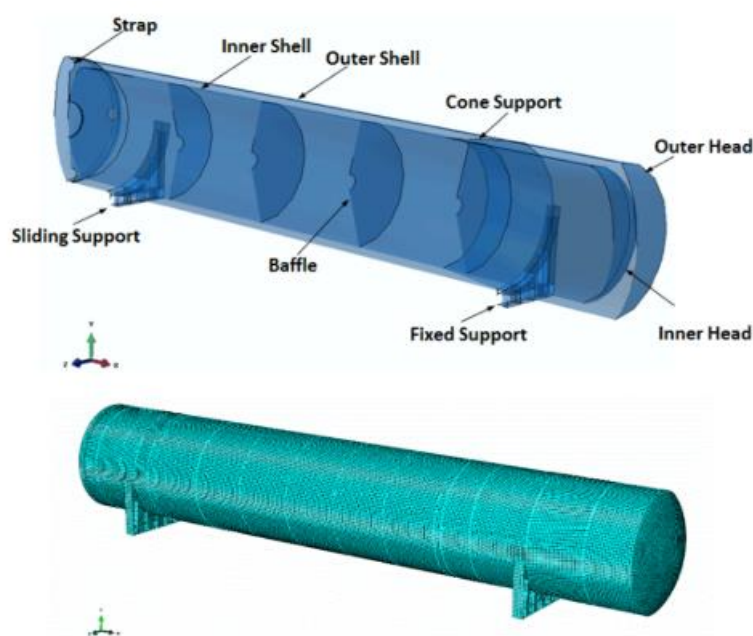
¹⁰ FPR – Fuel Preparation Room (Θάλαμος προετοιμασίας καυσίμου)

¹¹ ARMS unit - Ammonia Release Mitigation system (Σύστημα ελέγχου εκλυόμενης αμμωνίας)

¹² TCS – Tank Connection Spaces

Ωστόσο, σε ανοικτά καταστρώματα, μπορούν να μελετηθούν εναλλακτικές λύσεις εάν οι τοξικές ζώνες κρίνονται αποδεκτές και η προστασία των βαλβίδων και του εξοπλισμού δεν είναι απαραίτητη. Η προσέγγιση στα TCS πρέπει να είναι ανεξάρτητη από το ανοικτό κατάστρωμα ή να διευθετείται μέσω μιας θυρίδας αέρος, ενώ η εγκατάσταση μιας υδάτινης μεμβράνης στα σημεία πρόσβασης προσθέτει ένα επιπλέον επίπεδο ασφάλειας, ιδίως σε περιοχές που θεωρούνται επικίνδυνη ζώνη 1. Αυτοί οι αυστηροί κανονισμοί υπογραμμίζουν τη δέσμευση της ναυτιλιακής βιομηχανίας για τη διατήρηση των προτύπων ασφαλείας και τον μετριασμό των κινδύνων που συνδέονται με την ομαλή λειτουργία των πλοίων.

Η ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα της αμμωνίας είναι μεγαλύτερη από αυτή του υγροποιημένου υδρογόνου και βρίσκεται πλησιέστερα στα επίπεδα της μεθανόλης. Αυτό το χαρακτηριστικό της αμμωνίας επιτρέπει μικρότερο όγκο δεξαμενών για την αποθήκευσή της επί του πλοίου, όσον αφορά την κάλυψη σταθερών ενεργειακών αναγκών. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του καυσίμου της αμμωνίας επιτρέπουν επίσης τη χρήση δεξαμενών Type C ή πρισματικών δεξαμενών και έτσι ελάττωση της δαπάνης ενέργειας για επανυγροποίηση της αποθηκευμένης αμμωνίας συγκριτικά με τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου και του LNG.[25]



Εικόνα 8. Δεξαμενές αποθήκευσης NH_3 τύπου C με μόνωση υπό κενό (πηγή : ABS)

Η πιο οικονομική μέθοδος για την αποθήκευση αμμωνίας σε ποντοπόρα πλοία που δραστηριοποιούνται σε περιορισμένες διαδρομές και με περιορισμένη ισχύ φαίνεται να είναι μια δεξαμενή υπό πίεση τύπου C. Η δεξαμενή αυτή είναι ικανή να αποθηκεύει NH_3 σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, εξαλείφοντας την ανάγκη για σύστημα επανασυμπιέσης. [26] Είναι χαρακτηριστικό πως σε θερμοκρασία $-33.6\text{ }^\circ\text{C}$ και πίεση 1 bar, η αμμωνία μετατρέπεται σε υγρή μορφή. Η διατήρησή της σε αυτήν την θερμοκρασία αποδεικνύεται οικονομικότερη σε βιομηχανική κλίμακα σε σχέση με τη χρήση της υψηλής πίεσης προκειμένου να παραμείνει σταθερή κοντά στους $-33.6\text{ }^\circ\text{C}$. [25] Πιο αναλυτικά, η αποθήκευσή της υπό πίεση σε δεξαμενές τύπου C (περίπου 18 bar) στο πλοίο δεν απαιτεί επιπλέον εξοπλισμό έπειτα για την επανυγροποίησή της. Επιπλέον, η δεξαμενή τύπου C μπορεί να εγκατασταθεί με ευκολία στο κατάστρωμα και να ενσωματωθεί άψογα στο συνολικό σχεδιασμό ενός εμπορικού πλοίου. Η αναμενόμενη μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής τύπου C είναι 2000 m^3 . Ακόμα, άλλη εναλλακτική για την αποθήκευση της αμμωνίας επάνω στο πλοίο είναι να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή σε θερμοκρασία περίπου $20\text{ }^\circ\text{C}$ και πίεση 8.6 bar. Έτσι καθίσταται εφικτή η απευθείας χρήση της ως υγρό καύσιμο από τις ναυτικές μηχανές. [27]

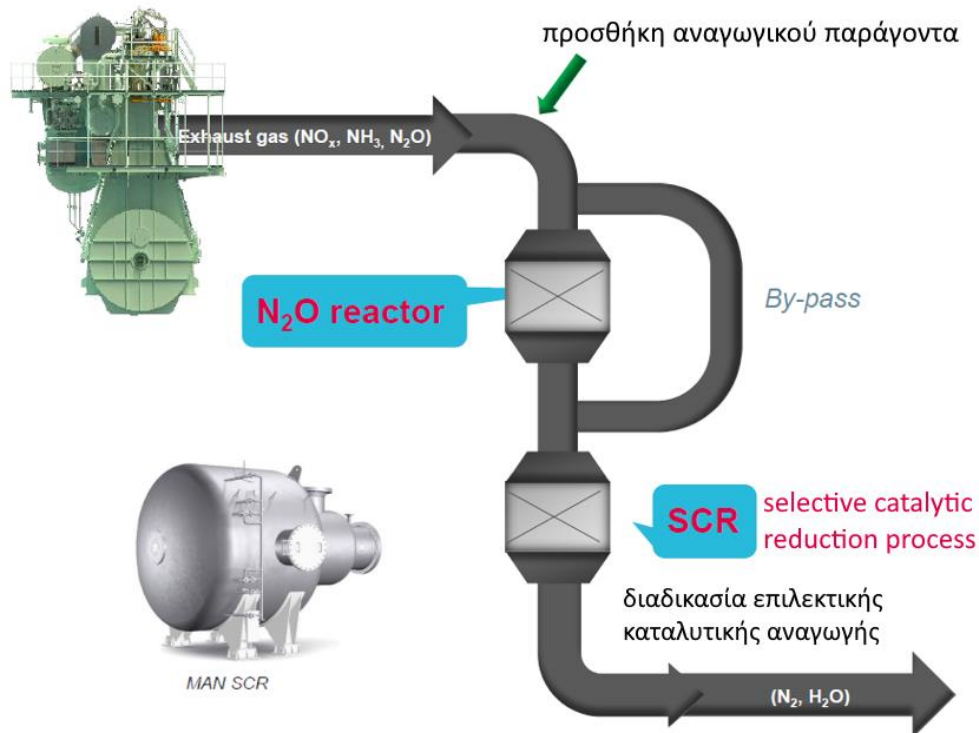
3.4 Τεχνολογία Μηχανών με Αμμωνία

Πολλές τεχνολογίες λαμβάνονται υπόψιν για την μείωση των εκπομπών του άνθρακα στον τομέα της ναυτιλίας όπως και πολλά καύσιμα έχουν προταθεί ως εναλλακτικά διότι έχουν την δυνατότητα να μειώσουν αποτελεσματικά τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Μεταξύ αυτών είναι και η αμμωνία (NH_3) που από τον χημικό της τύπο φαίνεται πως είναι εγγενώς ελεύθερη από το στοιχείο του άνθρακα. Έρευνες δείχνουν πως έχει αναγνωρισθεί ως ένα καύσιμο μηδενικού άνθρακα το οποίο έχει εισέλθει στην παγκόσμια αγορά με σχετικά γρήγορους ρυθμούς και το οποίο μπορεί να προσφέρει στην ναυτιλία μηδενικές tank-to-wake εκπομπές ανεξάρτητα από την μέθοδο παραγωγής της.

Πιο συγκεκριμένα, όταν η αμμωνία καίγεται πλήρως ως καύσιμο, τα τελικά προϊόντα που προκύπτουν είναι αβλαβές άζωτο και νερό. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι απαραίτητη η τυπική διάταξη της τεχνολογία επεξεργασίας των καυσαερίων – SCR¹³. Μέσω αυτής της εξελιγμένης διάταξης SCR, που στηρίζεται στον καταλύτη SCR, ουσιαστικά ελέγχονται οι επιβλαβείς εκπομπές και μειώνονται τα οξείδια του αζώτου (NO_x) που θα έβγαιναν στην ατμόσφαιρα από τα καυσαέρια των πλοίων σε σχεδόν αμελητέα επίπεδα. Το σύστημα αυτό ενσωματώνει πολλαπλά στοιχεία στο ευρύτερο πλαίσιο ελέγχου των εκπομπών και μπορεί να διαφέρει ως προς τη διαμόρφωση και τη διάταξη ανάλογα με τον κατασκευαστή.

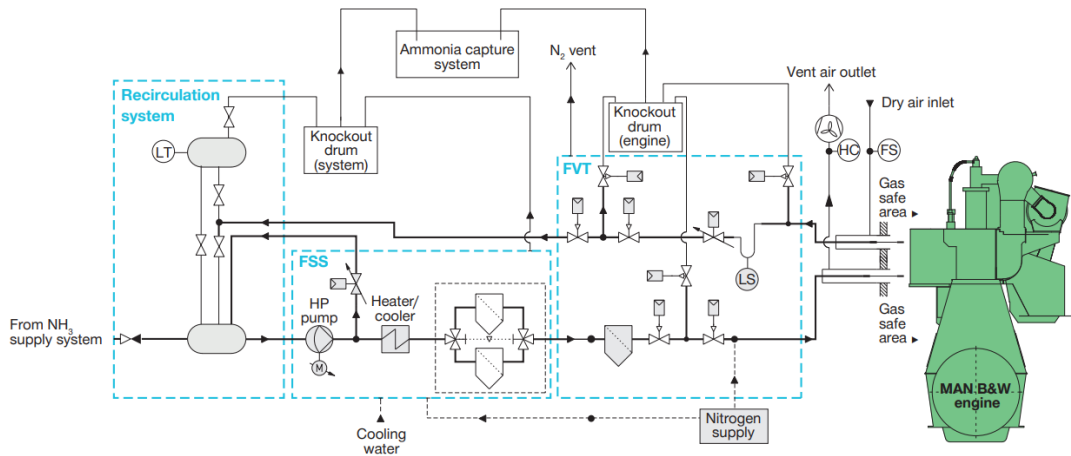
Πιο αναλυτικά, ο καταλύτης SCR προωθεί την αντίδραση του αναγωγικού παράγοντα NH_3 με οξείδια του αζώτου σε καυσαέρια κάτω από συγκεκριμένη θερμοκρασία, δημιουργώντας έτσι και N_2 , με αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών NO_x . Αυτή η διαδικασία αποδεικνύεται ιδιαίτερος αποτελεσματική για την απομάκρυνση των εν λόγω εκπομπών και χρησιμοποιείται ευρέως σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και σε άλλες βιομηχανικές διεργασίες, όπως η καύση άνθρακα, χάλυβα, τσιμέντο και γυαλιού. Κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, ο αναγωγικός παράγοντας προστίθεται στα καυσαέρια και αναρροφάται από τον καταλύτη, με αποτέλεσμα να παράγονται διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα.[28]

¹³ SCR - Selective Catalytic Reduction (Επιλεκτική Καταλυτική Αναγωγή)



Εικόνα 9. Διαδικασία Επιλεκτικής Καταλυτικής Αναγωγής - SCR (πηγή : MAN)

Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι παρά την τοξικότητα της NH_3 και την αυστηρή νομοθεσία γύρω από αυτήν (IGF Code), οι μηχανές που λειτουργούν με βάση αυτήν έχουν ήδη αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό εδώ και μερικά χρόνια, ενώ στη τρέχουσα εποχή αναπτύσσονται παρόμοιοι κινητήρες που χρησιμοποιούν τεχνολογίες μηχανών διπλού καυσίμου (Dual Fuel / DF) όπου προστίθενται κι η αμμωνία. Η εξέλιξη των ναυτικών μηχανών αμμωνίας της εταιρείας MAN διπλού καυσίμου παρουσιάζει ενθαρρυντική πρόοδο με αξιόλογα αποτελέσματα. Οι απαιτήσεις πιλοτικού καυσίμου αναμένεται να κυμανθούν από 5%-10% για τους δίχρονους κινητήρες και 20%-30% για τους τετράχρονους κινητήρες. Το κύριο εμπόδιο έγκειται στην αντιμετώπιση των προτύπων ασφαλείας, των επιχειρησιακών πρωτοκόλλων, των διαδικασιών συντήρησης και της εκπαίδευσης των πληρωμάτων, ώστε να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη ενσωμάτωση και λειτουργία του ολικού συστήματος του κινητήρα.[28]



Σχήμα 3.4.1 Τυπική Διάταξη ΜΕ διπλού καυσίμου NH₃ (Πηγή : MAN)

Στο παραπάνω σχηματικό διάγραμμα παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη του συστήματος καυσίμου αναφορικά με την μηχανή διπλού καυσίμου που έχει παραχθεί πρόσφατα από την εταιρεία M.A.N. που χρησιμοποιεί αμμωνία.[28] Πιο αναλυτικά, όπως είναι φυσικό λόγω της φυσικής σύστασης της αμμωνίας και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της το σύστημα καυσίμου και καύσης NH₃ είναι πιο σύνθετο από ότι της μεθανόλης.[23] Όπως φαίνεται στη διαγραμματική απεικόνιση παραπάνω, το συγκεκριμένο σύστημα καυσίμου περιλαμβάνει και μια διάταξη που αποθηκεύει αμμωνία – Ammonia Capture System.

4 Υδρογόνο

4.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Το υδρογόνο είναι αέριο ή συναντάται και σε υγρή φάση όταν χρειάζονται μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, όπου ένα δοχείο χύδην αποθήκευσης κρυογενικού αερίου στις εγκαταστάσεις επί του πλοίου προσφέρει την πιο αποδοτική και βολική λύση. Χαρακτηριστικό γνώρισμα του H_2 είναι πως έχει ένα από τα χαμηλότερα σημεία τήξης και βρασμού όλων των στοιχείων εκτός από το ήλιο. Για την παραγωγή υγρού υδρογόνου, το καύσιμο πρέπει να αποθηκευτεί σε θερμοκρασίες κάτω των $-253^\circ C$ ($-423,4^\circ F$), γεγονός που μπορεί να απαιτήσει υψηλή εισροή ενέργειας. Σε αυτή τη θερμοκρασία, άλλα κοινά αέρια ή ενώσεις μπορούν να υγροποιηθούν ή να στερεοποιηθούν σε επαφή και έτσι πρέπει να απομονώνονται από το υγροποιημένο ή κρυογενικό υδρογόνο. Αν και μη τοξικό, σε υψηλές συγκεντρώσεις το H_2 μπορεί να δράσει ως ασφυξιογόνο όταν εκτοπίζει το διαθέσιμο οξυγόνο της ατμόσφαιρας.[29]

Το υδρογόνο, αποτελεί το ελαφρύτερο και απλούστερο στοιχείο, με ατομικό αριθμό ένα και μοριακό βάρος περίπου δύο σε αριθμό. Επιπλέον, το υδρογόνο έχει υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους, καθιστώντας το ένα αποδοτικό ναυτιλιακό καύσιμο. Ουσιαστικά, όταν καίγεται ή χρησιμοποιείται μέσω των κυψελών καυσίμου, απελευθερώνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητά του H_2 ως καύσιμο επιτρέπει επίσης την επίτευξη μεγαλύτερων αποστάσεων λειτουργίας ενός πλοίου και ταχύτερους χρόνους ανεφοδιασμού σε σύγκριση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα που διερευνώνται .[29]

Μια άλλη αξιοσημείωτη ιδιότητα του υδρογόνου είναι η ικανότητά του να δρα ως εξαιρετικός αναγωγικός παράγοντας. Με άλλα λόγια, αντιδρά εύκολα με άλλα στοιχεία και ενώσεις, καθιστώντας το πολύτιμο σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες, όπως η μεταλλουργία, η διύλιση πετρελαίου και η παραγωγή χημικών προϊόντων. Η αντιδραστικότητα και η ευελιξία του υδρογόνου το καθιστούν ακόμη κρίσιμο συστατικό στη σύνθεση πολλών σημαντικών χημικών ουσιών και υλικών.[29]

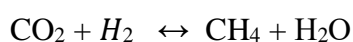
4.2 Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου

Όπως γίνεται αντιληπτό, η παραγωγή υδρογόνου στη ναυτιλία έχει τεράστιες δυνατότητες ως βιώσιμη και χαμηλών εκπομπών εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Τα πλοία εσωτερικής ναυσιπλοΐας και τα πλοία μικρών αποστάσεων είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούν υδρογόνο επί του σκάφους. Συγκεκριμένα, στη ναυτιλία, το υδρογόνο εκπέμπει στο περιβάλλον μόνο υδρατμούς, και έτσι καθίσταται μια καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον επιλογή.

Το υδρογόνο αποτελεί μια ακόμα πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στα μελλοντικά ενεργειακά συστήματα που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Το στοιχείο του υδρογόνου μπορεί να παραχθεί από διάφορους πόρους, όπως ο άνεμος, η ηλιακή, το φυσικό αέριο, η γεωθερμία και η βιομάζα. [30]

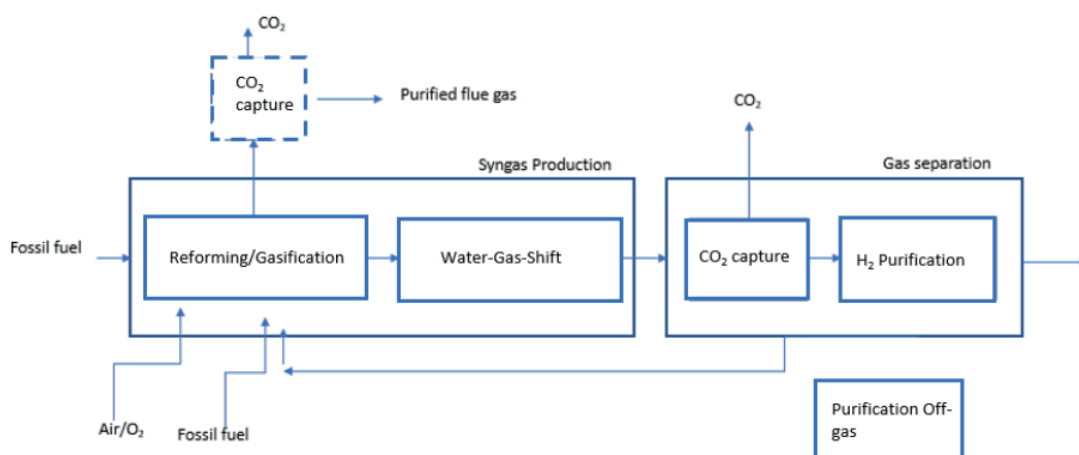
Μάλιστα, οι εκπομπές αερίων από την παραγωγή υδρογόνου αποτελούν την πλειονότητα των ρύπων του Well-to-wake (WTW). Συγκεκριμένα, υπάρχουν τέσσερις τύποι υδρογόνου όσον αφορά τις εκπομπές που εκλύονται κατά την παραγωγή:

- Το *καφέ υδρογόνο* που παράγεται από την επεξεργασία του άνθρακα
- Το *γκρίζο υδρογόνο* που παράγεται από την επεξεργασία ορυκτών καυσίμων ή φυσικού αερίου[29]
- Το *μπλε υδρογόνο* που παράγεται από την επεξεργασία ορυκτών καυσίμων συνοδευόμενο και από τεχνολογίες διαχείρισης των εκπομπών, όπως συγκεκριμένα οι μέθοδοι δέσμευσης, αξιοποίησης και αποθήκευσης άνθρακα (CCUS)
- Το *πράσινο υδρογόνο* που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνήθως μέσω ηλεκτρόλυσης με χρήση νερού. Ακόμα, οι πηγές ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να περιλαμβάνουν ηλιακή ή αιολική ενέργεια για την παραγωγή υδρογόνου με καθαρό μηδενικό άνθρακα.[30]



Εξίσωση διαδικασίας μεθανοποίησης με CO₂

Περισσότερο από το 95 % της σημερινής παραγωγής υδρογόνου προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, έχοντας ως κύρια πηγή ενέργειας πετρέλαιο, άνθρακα ή φυσικό αέριο. Η παραγωγή υδρογόνου μέσω φυσικού αερίου είναι η πιο διαδεδομένη και οικονομικά αποδοτική μέθοδος, καθώς είναι τόσο οικονομικά όσο και ενεργειακά αποδοτική. [29] Οι περισσότερες ερευνητικές πηγές, όπως η IRENA (2018), η IEA (2015) και το Hydrogen Council (2018), αναφέρουν ότι περίπου το 48-50% της παραγωγής υδρογόνου προέρχεται από την αναμόρφωση φυσικού αερίου, αν και η εταιρεία Shell (2017) υποστηρίζει ότι το ποσοστό αυτό θα μπορούσε να φτάσει έως και το 60% ετησίως. Από την άλλη μεριά στην παραγωγή μεγάλης κλίμακας, η απαιτούμενη ενεργειακή ποσότητα από το φυσικό αέριο κυμαίνεται συνήθως από 22 έως 28 kWh ανά χιλιόγραμμο υδρογόνου, σημειώνοντας ποσοστό απόδοσης περίπου 70-80 τοις εκατό. [29]



Σχήμα 4.2.1 Carbon Capture from Steam-Methane Reforming (πηγή: [29])

4.3 Μέσα Αποθήκευσης H₂

Το υδρογόνο μπορεί να διατηρηθεί υπό υψηλότερη πίεση ή ως υγρό σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες για την αύξηση της ογκομετρικής πυκνότητας ενέργειας. Έχει αποτελεσματικό ενεργειακό περιεχόμενο ανά βάρος (σχεδόν τριπλάσιο από εκείνο της βενζίνης), αλλά σε τυπικές θερμοκρασίες και πιέσεις, η ενεργειακή πυκνότητα ανά όγκο είναι σχετικά χαμηλή. Λόγω της εξαιρετικής ευφλεκτότητας, το υδρογόνο μπορεί να αναφλεγεί και να καεί με μικρή ενέργεια. Η καύση του υδρογόνου δεν απελευθερώνει θείο, διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) ή σωματιδιακούς ρύπους. Έτσι, υποστηρίζει τη βιώσιμη ανάπτυξη, ενώ οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρολύσεις νερού που γενικά διοχετεύονται στο δίκτυο φυσικού αερίου για να παρακάμψουν τα περιορισμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.[30]

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του υδρογόνου στον ναυτιλιακό κλάδο είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητά του, η οποία επιτρέπει μεγαλύτερη εμβέλεια λειτουργίας και ταχύτερο ανεφοδιασμό σε σύγκριση με τις μπαταρίες ή άλλα εναλλακτικά καύσιμα. Αυτό το καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό για ταξίδια μεγάλων αποστάσεων και μεγάλα πλοία, όπως τα κρουαζιερόπλοια και τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, όπου η ηλεκτρική πρόωση με μπαταρίες μπορεί να είναι περιορισμένη. [29]Επιπλέον, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί στα πλοία είτε σε υγρή είτε σε αέρια μορφή, παρέχοντας ευελιξία όσον αφορά το σχεδιασμό των πλοίων και τις απαιτήσεις υποδομής. Ωστόσο, προς το παρόν, οι κυψέλες καυσίμου προορίζονται κυρίως για την τροφοδοσία των βοηθητικών συστημάτων των μεγαλύτερων πλοίων, προσφέροντας μια λύση μηδενικών εκπομπών για πλοία που βρίσκονται σε αδράνεια στο λιμάνι ή χρησιμοποιούν βοηθητική ενέργεια. Γι' αυτό, η επόμενη σημαντική τεχνολογική ώθηση προβλέπεται με βάση την βιβλιογραφία και τις τρέχουσες έρευνες να επεκταθεί με τρόπο έτσι ώστε να τροφοδοτεί πλήρως την κύρια πρόωση των πλοίων.[29]

4.4 Τεχνολογία Μηχανών με Υδρογόνο

Πολλές εταιρείες και οργανισμοί έχουν αναπτύξει ναυτιλιακές μηχανές για καύση με υδρογόνο οι οποίες είναι κυρίως μηχανές εσωτερικής καύσης. Γενικά η επικρατούσα άποψη είναι ότι οι μεγαλύτερες προκλήσεις που σχετίζονται με το υδρογόνο είναι ο χαμηλός αριθμός μεθανίου, η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης αλλά και η υψηλή ταχύτητα της φλόγας. Επιπλέον τα καυσαέρια μετά την επεξεργασία τους προκαλούν εκπομπές NO_x οι οποίες είναι ίσες ή χαμηλότερες από τις εκπομπές των κινητήρων διπλού καυσίμου. Η εταιρεία M.A.N. αναφέρει ότι έχει δύο βασικές εκδόσεις κινητήρων για θαλάσσια χρήση με βάση το υδρογόνο και οι οποίες ερευνώνται διεξοδικά στις εγκαταστάσεις της.

Η πρώτη έκδοση της εταιρείας M.A.N. είναι ο κινητήρας χαμηλής πίεσης διπλού καυσίμου (DF) που χρησιμοποιείται σε ναυτιλιακές εφαρμογές επιπέδου - Stage I έχει περιορισμένο μερίδιο ενέργειας H_2 και χαμηλότερη ισχύ. Με το ντίζελ ή το LNG ως εφεδρική επιλογή που θα μπορούσε επίσης να είναι οικονομικά συμφέρουσα, εξασφαλίζει ευελιξία ενώ μειώνει τον κίνδυνο τροφοδοσίας καυσίμου H_2 και γενικότερα προβλημάτων του συστήματος. Ισχύει για συμβατικούς κινητήρες διπλού καυσίμου - DF και πληρεί τις απαιτήσεις Tier III χωρίς να εκπέμπει εκπομπές SO_x ή CO_2 κατά τη καύση του H_2 . Αυτό ήταν πιθανό εντός του έτους 2023 να μπει σε πλάνο υλοποίησης, ανάλογα με τη ζήτηση των καταναλωτών σύμφωνα με τα στοιχεία της εταιρείας M.A.N. .

Η δεύτερη προσέγγιση της εταιρείας M.A.N. είναι ένας κινητήρας Dual Fuel H_2 με ενδοκύλινδρο εισαγωγή καυσίμου και αναπτύχθηκε για τη ναυτική εφαρμογή Stage II με έμφαση στην απόδοση και την πλήρη ισχύ στη λειτουργία H_2 . Ο κινητήρας χρησιμοποιεί μόνο αρχικό καύσιμο, το οποίο μπορεί να προμηθευτεί κανείς από πράσινο, συνθετικό (Fischer-Tropsch) ντίζελ και είναι απολύτως ευέλικτο. Η εταιρεία M.A.N. αναφέρει ότι αυτό μπορεί να είναι προσβάσιμο το 2026, όταν η προσφορά για το εξάμηνο θα πρέπει να είναι πιο άμεσα διαθέσιμη, ανάλογα με τη ζήτηση της αγοράς.

Η M.A.N. σύγκρινε τις τεχνολογίες ICE με αεριοστρόβιλους και κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)/στερεού οξειδίου (SOFC) με ποικίλα κριτήρια και βρήκαν ότι τα ICE υδρογόνου αποτελούν μια ελκυστική εναλλακτική

λύση στις κυψέλες καυσίμου λόγω πλεονεκτημάτων όσον αφορά το κόστος, την πυκνότητα ισχύος, την ευελιξία καυσίμου και την αξιοπιστία.

Οι θαλάσσιοι κινητήρες υδρογόνου είναι ένας τύπος συστήματος πρόωσης που έχει σχεδιαστεί ειδικά για να χρησιμοποιεί υδρογόνο ως καύσιμο για πλοία. Αυτοί οι κινητήρες συνήθως εμπίπτουν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Μηχανές εσωτερικής καύσης (ICE): Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης υδρογόνου λειτουργούν παρόμοια με τους παραδοσιακούς κινητήρες εσωτερικής καύσης, αλλά είναι βελτιστοποιημένοι για την αποτελεσματική καύση καυσίμου υδρογόνου. Αυτοί οι κινητήρες λειτουργούν συνήθως σε έναν τετράχρονο κύκλο, που αποτελείται από διαδρομές εισαγωγής, συμπίεσης, ισχύος και εξάτμισης. Το υδρογόνο εγχέεται στον θάλαμο καύσης και αναφλέγεται, παράγοντας ισχύ που διοχετεύεται στην προπέλα του σκάφους. Οι συγκεκριμένες μηχανές ICE μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια σειρά τύπων σκαφών, από μικρά έως και μεγαλύτερα πλοία.
- Κυψέλες καυσίμου: Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι ένας άλλος τύπος θαλάσσιου κινητήρα υδρογόνου. Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν τη χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη μέσω του υδρογόνου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Το υδρογόνο παρέχεται στην πλευρά της ανόδου της κυψέλης καυσίμου και το οξυγόνο ή ο αέρας στην πλευρά της καθόδου. Μέσω της αντίδρασης, το υδρογόνο οξειδώνεται, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια που ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την κίνηση των ηλεκτροκινητήρων που κινούν το πλοίο. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου προσφέρουν υψηλή απόδοση, αθόρυβη λειτουργία και μηδενικές εκπομπές, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για πλοία με ανάγκη για «καθαρή» και αθόρυβη πρόωση.
- Τέλος, οι τουρμπίνες αερίου είναι μια επιπλέον πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για κινητήρες υδρογόνου ναυτιλίας λόγω της αποτελεσματικότητάς τους και της ικανότητάς τους να χειρίζονται διαφορετικούς τύπους καυσίμων. Οι στρόβιλοι υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστήματα πρόωσης σε πλοία, παρέχοντας μια φιλική προς το περιβάλλον και βιώσιμη

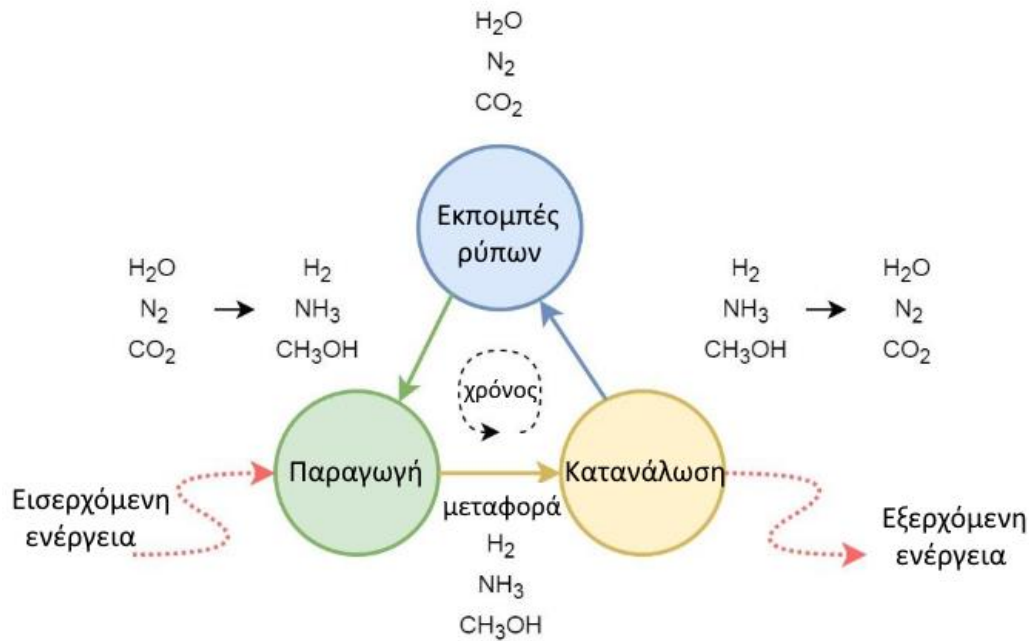
εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές μηχανές εσωτερικής καύσης, αφού προσφέρουν μηδενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά τη λειτουργία τους, καθώς η καύση υδρογόνου παράγει μόνο υδρατμούς. Αυτό το θετικό χαρακτηριστικό ευθυγραμμίζεται με τους στόχους της ναυτιλιακής βιομηχανίας για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές και συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των θαλάσσιων μεταφορών.

5 Σύγκριση Καυσίμων CH₃OH, NH₃ & H₂

Παρακάτω παρατίθενται τα κύρια οφέλη της χρήσης NH₃ ως ναυτιλιακό καύσιμο συγκριτικά με το H₂ που αναλύθηκε ενδελεχώς στην προηγούμενη ενότητα.

- Η αμμωνία έχει αναγνωριστεί ως μια εναλλακτική λύση καυσίμου στο χώρο της ναυτιλίας με χαμηλό κόστος, αφού είναι περίπου 10,6 - 30,2 φορές φθηνότερη από το κόστος του H₂ και διαθέτει ήδη πιο αναπτυγμένες υπάρχουσες υποδομές.
- Η ογκομετρική περιεκτικότητα της NH₃ σε υδρογόνο είναι σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη του ίδιου του H₂, εφόσον έρευνες δείχνουν πως έχει περίπου 1,7 φορές μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από το υγρό H₂.
- Οι τεχνολογίες μεταφοράς και αποθήκευσης της NH₃ υπάρχουν ήδη και είναι διαθέσιμες προς χρήση σε αρκετά σημεία παγκοσμίως. Αξιοσημείωτο είναι πως έρευνες παρουσιάζουν ετησίως, περισσότερους από 18 εκατ. τόνους NH₃ να διακινούνται διεθνώς [13].

Η αμμωνία έχει οξεία τοξικότητα και καθόλου έντονη οσμή οπότε δεν ανιχνεύεται εύκολα, ενώ τα μέτρα ασφαλείας είναι πολύ αυστηρά και εφαρμόζονται πάντα.



Σχήμα 4.4.1 Συνολική Απεικόνιση Καυσίμων

Αναφορικά με το εναλλακτικό καύσιμο της μεθανόλης είναι αξιοσημείωτα τα προτερήματά της συγκριτικά με τα άλλα δύο καύσιμα που αναλύονται στην συγκεκριμένη εργασία. Πιο αναλυτικά αναφέρονται ανά κατηγορία τα παρακάτω.[31]

Διαθεσιμότητα:

- Η μεθανόλη είναι ευρέως διαθέσιμη και εύκολη στην προμήθεια.
- Η παραγωγική ικανότητα αναμένεται να πενταπλασιαστεί έως το 2050, φθάνοντας τα 500 εκατομμύρια τόνους.
- Το 80% αυτής της δυναμικότητας θα είναι ηλεκτρονική μεθανόλη και βιομεθανόλη με ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα.

Εκπομπές:

- Σημαντική μείωση των ρύπων κατά τη μετάβαση από HFO και MGO σε μεθανόλη.
- Η μεθανόλη που χρησιμοποιείται στην Ναυτιλία εκπέμπει 99% λιγότερα SO_x, 95% λιγότερα PM και έως και 80% λιγότερα NO_x από το MGO.
- Η ηλεκτρομεθανόλη και η βιομεθανόλη παράγουν πολύ χαμηλότερες εκπομπές από τα κυρίαρχα ναυτιλιακά καύσιμα.[31]
- Δεν υπάρχουν ανησυχίες για την εκπομπή μεθανίου με τη ηλεκτρομεθανόλη και τη βιομεθανόλη.

Ευκολία διαχείρισης:

- Η μεθανόλη παραμένει υγρή σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος.
- Μπορεί να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί με την υπάρχουσα υποδομή μετά από απλές τροποποιήσεις.
- Χαμηλότερο κόστος υποδομής σε σύγκριση με καύσιμα που απαιτούν κρυογενικό εξοπλισμό.
- Έχουν εκδοθεί ήδη καλά αναπτυγμένες και κωδικοποιημένες οδηγίες ασφαλείας για τη μεθανόλη.[31]

Τοξικότητα:

- Πλήρως αναμίξιμη με το νερό και βιοδιασπώμενη.
- Ελάχιστες και προσωρινές επιπτώσεις στη θαλάσσια ζωή σε περίπτωση διαρροής, σε αντίθεση με άλλα καύσιμα που είναι ιδιαίτερα τοξικά.[19]

Αποδοτικότητα κόστους:

- Η μεθανόλη θεωρείται το πιο αποδοτικό καύσιμο στον χώρο της ναυτιλίας σε σχέση με το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας.
- Από την άλλη μεριά τα καύσιμα χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, συμπεριλαμβανομένης της μεθανόλης, είναι πιθανό να παραμείνουν ακριβότερα από τα ορυκτά καύσιμα.
- Η ευρεία υιοθέτηση ναυτιλιακών καυσίμων χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα απαιτεί παρεμβάσεις πολιτικής, όπως η επιβολή τιμής στον άνθρακα.[31]

Συμπερασματικά, τα εναλλακτικά καύσιμα όπως η αμμωνία, το υδρογόνο και η μεθανόλη υπόσχονται να χρησιμοποιηθούν ως βέλτιστα καύσιμα στον ναυτιλιακό κλάδο αφού εναρμονίζονται με την αρχή της βιωσιμότητας που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα 4.2.2 . Κατά κύριο λόγο, όπως γίνεται αντιληπτό η μεθανόλη είναι πιο άμεση λύσης όπως φανερώνουν και οι ιδιότητές της ως καύσιμο. Ακόμη, η χρήση της έχει ήδη δοκιμαστεί σε μερικά πλοία παγκοσμίως όπως αναφέρθηκε και στο 3^ο κεφάλαιο της εργασίας επομένως η αμμωνία και το υδρογόνο ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν μεταγενέστερα σε βάθος χρόνο, αφού γίνει η απαιτούμενη έρευνά τους.

Πίνακας 9 Χαρακτηριστικά καυσίμων

	μονάδα	ΜΕΘΑΝΟΛΗ	ΑΜΜΩΝΙΑ	ΥΔΡΟΓΟΝΟ
Σημείο Βρασμού	°C	65	-33	-253
Πυκνότητα	Kg/m ³	790	696	70.8
Χαμηλότερη Θέρμανση αξία	MJ/kg	19.9	22.5	120.2
Θερμοκρασία αυτόματης Ανάφλεξης	°C	450	630	585
Σημείο ανάφλεξης	°C	11	132	-
Ενεργειακή Πυκνότητα Υγρό	MJ/L	15.7	15.7	8.51

6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1 Χαρακτηριστικά πλοίου, μηχανών και προπέλας

Το υπολογιστικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας πραγματεύεται την προσέγγιση του **Δείκτη Έντασης Άνθρακα – CII** για ένα δεξαμενόπλοιο που μεταφέρει αργό πετρέλαιο και έχει μεταφορική του ικανότητα 318.990 DWT. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ο ενεργειακός δείκτης CII για 2 περιπτώσεις που διαφέρουν στη λειτουργία της μηχανολογικής εγκατάστασης ΜΕ η οποία περιλαμβάνει Κύρια Μηχανή διπλού καυσίμου με Μεθανόλη. Η πρώτη περίπτωση αφορά μια τη λειτουργία της μηχανής μόνο με την χρήση ναυτικού καυσίμου diesel – MDO και η δεύτερη αφορά τον υπολογισμό του δείκτη CII για το ίδιο προφίλ πλοίου στη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής όταν καίει μεθανόλη ως καύσιμο και ελάχιστο Diesel στην αρχή της καύσης.



Πίνακας 10. Βασικά Χαρακτηριστικά Δεξαμενόπλοιου

Βασικά Χαρακτηριστικά Πλοίου	Oil Tanker
Length overall – Ολικό Μήκος πλοίου	333.00 m
Length between perpendiculars – Μήκος μεταξύ καθέτων	327.00 m
Breadth, molded - Πλάτος	60.00 m
Depth, molded - Βύθισμα	30.40 m
Summer load line draft, molded – Μέγιστο Βύθισμα	22.60 m
Deadweight at summer load line draft -	318,990 t
Lightweight – Βάρος πλοίου	44,089 t

6.2 Δεδομένα Έρευνας

Όπως ήδη αναφέρθηκε και παραπάνω, αρχικά επιλέχθηκε ένα συγκεκριμένο προφίλ λειτουργίας ενός δεξαμενόπλοιου με μεταφορική ικανότητα 318.990 DWT και κύρια μηχανή να που φτάνει να έχει μέγιστη ισχύ MCR^{14} , $MCR_{ME} = 22,200$ KW και μέγιστες στροφές 64.0 rpm. Το συγκεκριμένο πλοίο έχει χτιστεί το έτος 2019 οπότε διαθέτει σύγχρονο εξοπλισμό και εκσυγχρονισμένα λειτουργικά συστήματα.

Σκοπός του συγκεκριμένου υπολογιστικού τμήματος είναι να υπολογιστεί ο δείκτης CII, επομένως για τον σκοπό αυτό λήφθηκαν ως δεδομένα ενός ολόκληρου έτους, για το δεξαμενόπλοιο, τα AIS DATA. Πιο αναλυτικά, τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν την ταχύτητα του πλοίου σε κόμβους και τις ώρες λειτουργίας σε κάθε ταχύτητα και ανά βύθισμα του πλοίου τόσο για ΕΜΦΟΡΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (laden condition) όσο και για ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ (ballast condition). Έτσι έχοντας αυτά σαν κύρια δεδομένα για την ερευνητική διαδικασία και με βάση το προφίλ λειτουργίας της κύριας μηχανής με μεθανόλη, εξετάζονται τα 2 mode λειτουργίας αυτής και στις δυο καταστάσεις φόρτωσης, έμφορτη και ερματισμού.

Στα δεδομένα επίσης της υπολογιστικής έρευνας εμπεριέχεται και η καμπύλη Ισχύος – Ταχύτητας (Speed – Power Curve) τόσο για την έμφορτη κατάσταση όσο και για την κατάσταση ερματισμού. Επομένως, με βάση αυτή την κυβική εξίσωση για κάθε mode της μηχανής, λαμβάνουμε ανά κόμβους του πλοίου την Ισχύ και επομένως το φορτίο - LOAD % της μηχανής διαιρώντας με την MCR και πολλαπλασιάζοντας επί 100.

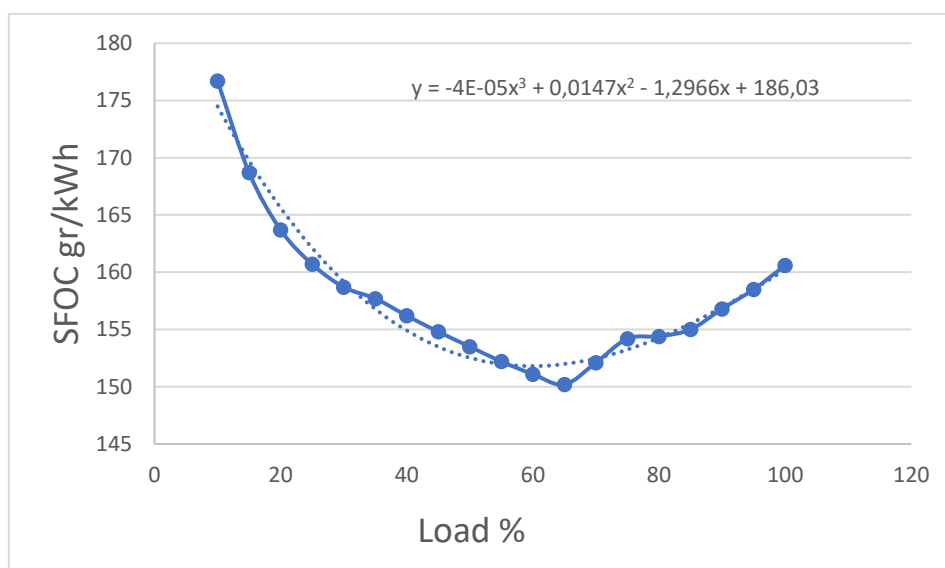
Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να αναφερθεί πως, προκειμένου να υπολογιστούν οι ετήσιοι τόνοι καυσίμου που καταναλώνονται και τελικά οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα απαραίτητοι καθίσταται και η άντληση δεδομένων από την εταιρεία MAN για την συγκεκριμένη μηχανή μεθανόλης που εξετάζεται. Πιο αναλυτικά, λαμβάνεται μια έκθεση αναφοράς που περιλαμβάνει διαγράμματα της μηχανής, τα στοιχεία της ισχύος, των στροφών και του φορτίου της, πάντα αναφορικά με το ίδιο μοντέλο κύριας μηχανής ME – LGIM (τύπος μοντέλου: 7G80ME-C10.5-LGIM LL-EPT).

¹⁴ MCR – Maximum Continuous Rating

Από τα δεδομένα της εταιρείας MAN για το προφίλ της συγκεκριμένης μηχανής με μεθανόλη, λαμβάνουμε μόνο τα στοιχεία που αφορούν τις ISO συνθήκες , δηλαδή συνθήκες περιβάλλοντος ISO με θερμοκρασία ατμοσφαιρικού αέρα 25 °C και ψυκτικού αέρα απορρόφησης 25 °C. Με βάση αυτά τα στοιχεία δημιουργούνται για κάθε λειτουργία της μηχανής διαγράμματα **Κατανάλωσης – Φορτίου μηχανής** ή αλλιώς **SFOC¹⁵ – Load %** , τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Πίνακας 11 Προδιαγραφές κινητήρα - λειτουργία μόνο πετρελαίου (πηγή : MAN)

TII HFO			
Engine type		7G80ME-C10.5-LGIM LL-EPT	
Input parameters			
SMCR power	kW	22200	
SMCR speed	r/min	64	
Turbocharger type		High eff.	
NOx emission compliance		Tier II	
Propeller type		Fixed pitch propeller	
Cooling system		Central	
Hydraulic power supply		Mechanical	
Hydraulic control system		Unified	



Διάγραμμα 1 Κατανάλωσης SFOC - Φορτίου Load % μηχανής

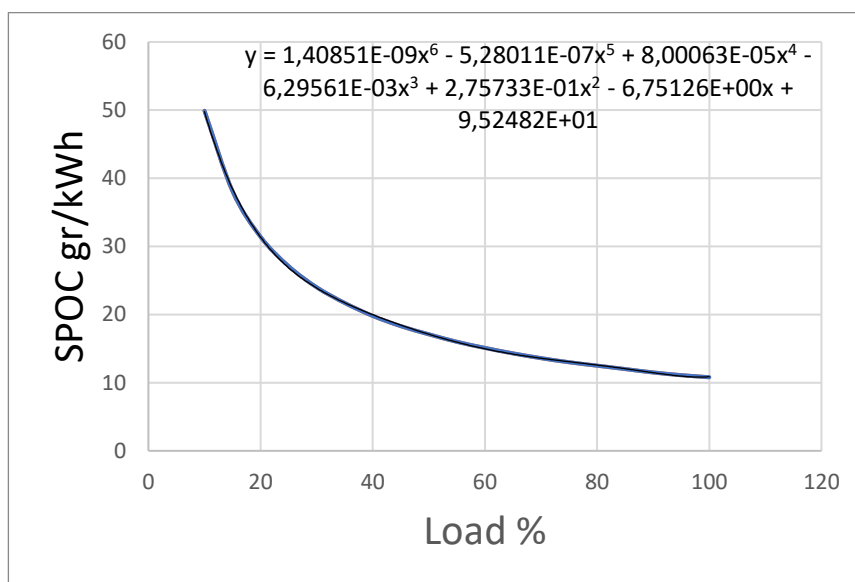
Στο διάγραμμα αυτό γίνεται κατανοητό πως η καμπύλη τρίτου βαθμού παριστάνει κατανάλωση της μηχανής ανά φορτίο αυτής.

¹⁵ SFOC – Specific Oil Consumption – Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου

Όπως είναι αντιληπτό, στην 2η περίπτωση όπου η μηχανή λειτουργεί μόνο με μεθανόλη ως καύσιμο και συγκεκριμένα **πράσινη μεθανόλη** αφού έχει κατώτερη θερμογόνο δύναμη **LCV¹⁶ 19,900 [kJ/kg]**, αξιοποιώντας τα δεδομένα κατάλληλα δημιουργούνται δύο διαγράμματα. Το πρώτο γράφημα αφορά το πιλοτικό καύσιμο Diesel με κατανάλωση **SPOC - Specific Pilot Oil Consumption¹⁷** και το δεύτερο διάγραμμα περιέχει την κατανάλωση **SGC – Specific Gas Consumption¹⁸** που αναφέρεται στο αέριο καύσιμο της μεθανόλης .

Πίνακας 12 Προδιαγραφές κινητήρα - λειτουργία με μεθανόλη και πιλοτικό καύσιμο (πηγή : MAN)

TII GI	
Engine type	7G80ME-C10.5-LGIM LL-EPT
Input parameters	
SMCR power	kW 22200
SMCR speed	r/min 64
Turbocharger type	High eff.
NOx emission compliance	Tier II
Propeller type	Fixed pitch propeller
Cooling system	Central
Hydraulic power supply	Mechanical
Hydraulic control system	Unified

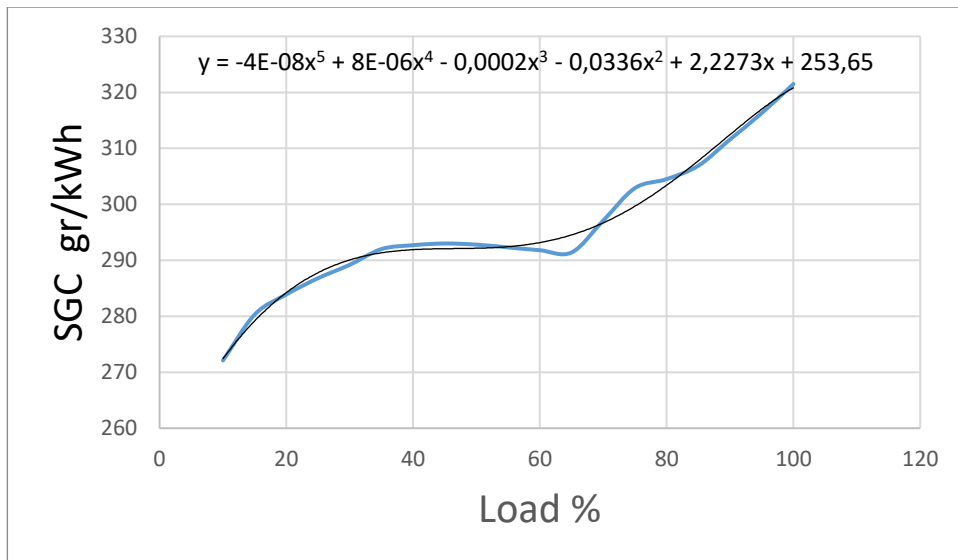


Διάγραμμα 2 Κατανάλωσης πιλοτικού καυσίμου SPOC - Φορτίου Load % μηχανής

¹⁶ LCV – Lower Calorific Value – Χαμηλή θερμογόνος δύναμη καυσίμου

¹⁷ SPOC: Specific Pilot Oil Consumption - Ειδική Κατανάλωση Πιλοτικού fuel (LCV: 42,700 kJ/kg)

¹⁸ SGC: Specific Gas Consumption – Ειδική Κατανάλωση Αερίου Καυσίμου (LCV: 19,900 kJ/kg)



Διάγραμμα 3 Κατανάλωσης αερίου μεθανόλης SGC - Φορτίου Load % μηχανής

6.3 Ανάλυση Δεδομένων

Έχοντας λοιπόν τις καπύλες των καταναλώσεων για τις δυο περιπτώσεις λειτουργίας της μηχανής αξιοποιούνται οι εξισώσεις των καμπυλών παρεμβολής και εντάσσονται με κατάλληλο τρόπο στο υπολογιστικό φύλλο ώστε ο «άγνωστος» παράγοντας να αντικατασταθεί με την «γνωστή» ταχύτητα από τα AIS data του πλοίου. Και έτσι τελικά υπολογίζεται η τιμή της ισχύος και το φορτίο % της μηχανής με αποτέλεσμα για κάθε ταχύτητα σε κόμβους που επιτεύχθηκε από το πλοίο μέσα στο έτος να υπάρχει η ισχύς που έπιασε η μηχανή.

Μαζί με τις ετήσιες τιμές των ταχυτήτων και των βυθισμάτων του πλοίου, από τα AIS DATA δόθηκαν επίσης οι ώρες λειτουργίας σε κάθε κόμβο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Με βάση λοιπόν τις ώρες λειτουργίας της μηχανής υπολογίστηκαν οι συνολικές μέρες που το πλοίο ταξίδευε ανα κόμβο μέσα στην χρονιά. Πιο αναλυτικά, οι ταχύτητες διακρίθηκαν ανάλογα τους κόμβους στις καταστάσεις που βρισκόταν το πλοίο και έτσι προέκυψαν πως όταν το πλοίο εκτελούσε ελιγμούς manoeuvring κοντά στο λιμάνι ή στο αγκυροβόλιο είχε από 1kn μέχρι 6 kn ενώ όταν ήταν αγκυροβολημένο ή στο λιμάνι προφανώς θεωρήθηκε πως είχε μηδεν κόμβους.

Εν συνεχεία, όπως φαίνεται και παρακάτω στον πίνακα που ακολουθεί βρίσκουμε τις KW hrs την ισχύ επί τις ώρες (Ενέργεια) που της αναλογούν ανά ταχύτητα. Ακόμη, με βάση τις εξισώσεις των καμπυλών από τα διαγράμματα των καταναλώσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω υπολογίζονται οι καταναλώσεις, SFOC, SPOC και SGC με βάση το φορτίο της μηχανής ή αλλιώς την τιμή της ισχύος τόσο για LADEN όσο και για BALLAST κατάσταση.

Πίνακας 13 Υπολογισμός καταναλώσεων - LADEN mode (υπολογιστικό φύλλο excel)

					only HFO	pilot diesel	+ methanol
speed (kn)	hrs	Power KW	Load %	Kw * h	SFOC-1	SPOC-2_pilot	SGC-2_gas
0	1248,4	0	0	0	186,0	95,2482	253,65
1	97,4	2032,8071	9,2	198012	175,4	52,24340602	271,1277776
2	55,5	3577,3271	16,1	198483	168,8	36,55873962	280,4752947
3	26,6	4721,6471	21,3	125436	164,7	30,02105589	285,361266
4	15,7	5552,0471	25,0	86940	162,2	26,8642856	287,9473519
5	85,6	6154,8071	27,7	526769	160,5	25,11275922	289,3834162
6	22,7	6616,2071	29,8	150294	159,4	23,98869089	290,2626106
7	19,9	7022,5271	31,6	139538	158,5	23,11595959	290,8971557
8	14,1	7460,0471	33,6	105259	157,5	22,27090164	291,4519795
9	41,8	8015,0471	36,1	335258	156,5	21,30577524	291,9936284
10	134,7	8773,8071	39,5	1182222	155,3	20,12420712	292,5093341
11	638,7	9822,6071	44,2	6273276	154,0	18,66926975	292,9738058
12	1730,1	11247,727	50,7	19459249	152,9	16,94471684	293,5960072
13	2641,3	13135,447	59,2	34694934	152,5	15,12279024	295,4200798
14	703,9	15572,047	70,1	10961039	153,6	13,57467523	301,2827881
15	104,5	18643,807	84,0	1947403	157,1	12,1695412	316,1074688
16	16,6	22437,007	101,1	373458	163,8	10,95765132	341,9724595
17	0,5	27037,927	121,8	13204	173,9	40,65715214	353,5163981

Πίνακας 14 Υπολογισμός καταναλώσεων - BALLAST mode (υπολογιστικό φύλλο excel)

					only MDO	pilot diesel	+ methanol
speed (kn)	hrs	Power KW	Load %	Kw * h	SFOC-1	SPOC-2_pilot	SGC-2_gas
0	1228,6	0	0	0	186,0	95,2482	253,65
1	57,5	4,3502	0,0	250	186,0	95,11601154	253,6936321
2	12,5	33,96747	0,2	425	185,8	94,22164529	253,9900043
3	16,8	113,0248	0,5	1894	185,4	91,88163929	254,7752295
4	12,5	265,2266	1,2	3306	184,5	87,56536348	256,262704
5	12,9	513,9907	2,3	6652	183,1	81,01937988	258,6244413
6	12,3	882,5264	4,0	10833	181,1	72,3910758	261,9626841
7	19,0	1393,878	6,3	26530	178,5	62,28989072	266,2725625
8	10,5	2070,957	9,3	21679	175,2	51,72207594	271,3990769
9	25,1	2936,556	13,2	73848	171,4	41,86214276	276,9988606
10	97,2	4013,37	18,1	390044	167,2	33,69156434	282,5300125
11	278,7	5324,006	24,0	1483910	162,8	27,63267719	287,310892
12	598,9	6890,99	31,0	4127265	158,8	23,38813987	290,7050833
13	497,6	8736,777	39,4	4347034	155,3	20,17896128	292,4888326
14	264,9	10883,76	49,0	2883265	153,1	17,35842833	293,406443
15	52,0	13354,26	60,2	694952	152,5	14,94861743	295,7592316
16	9,6	16170,56	72,8	155920	154,1	13,29343841	303,5061425
17	5,1	19354,87	87,2	99613	158,2	11,80341226	320,6239148

Έχοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου για κάθε λειτουργία της μηχανής και στις δύο καταστάσεις φόρτωσης του πλοίου, εντοπίζονται οι τόνοι καυσίμου που χρειάστηκαν για κάθε κόμβο που έπιασε το πλοίο μέσα στο έτος. Πιο αναλυτικά η μάζα καυσίμου σε τόνους υπολογίζεται έχοντας την ειδική κατανάλωση ανά καύσιμο, πολλαπλασιάζοντας την με τις κιλοβατώρες (Ενέργεια) (Kw * h) και κάνοντας την ανάλογη πράξη για την μετατροπή από γραμμάρια σε τόνους καυσίμου. Συμπερασματικά, με αυτήν την υπολογιστική διαδικασία προκύπτουν οι μάζες καυσίμου που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

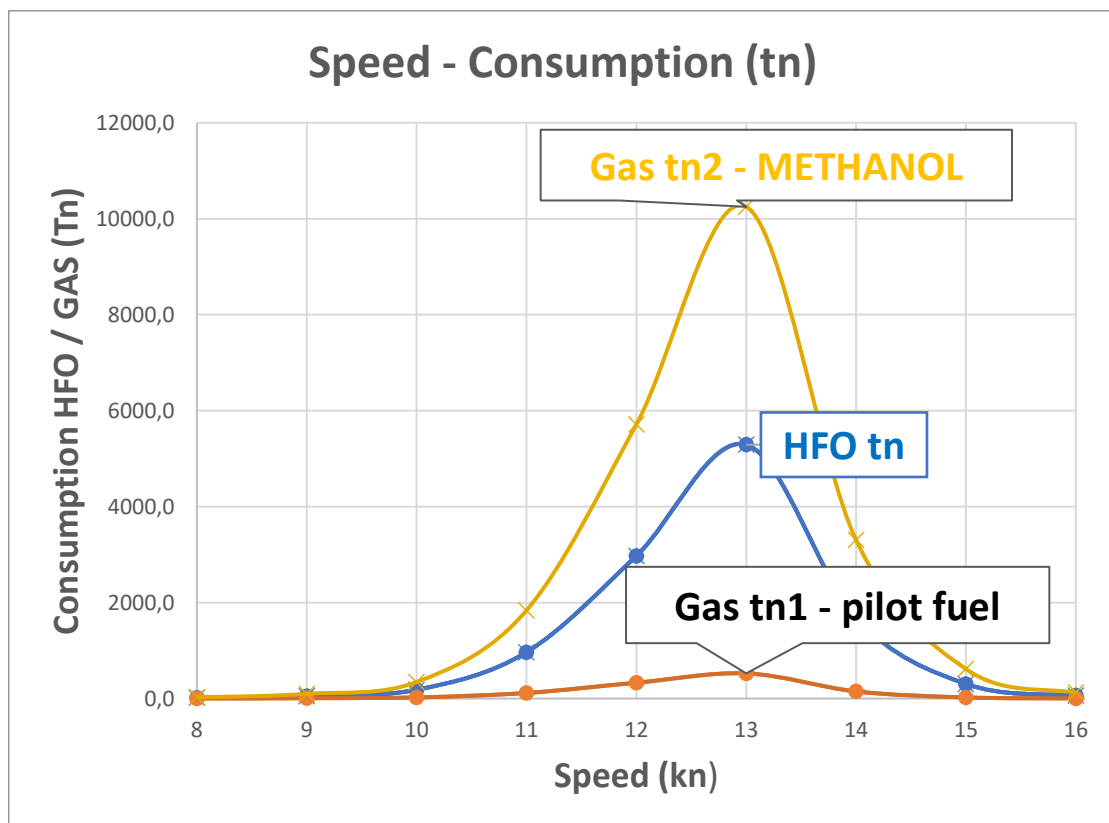
Πίνακας 15 Συγκεντρωτικό Πίνακας - Τόνος κάθε Καυσίμου - LADEN mode

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ				
speed	hrs	Gas tn 1		Gas tn 2
		consumption HFO (tn)	consumption GAS-DIESEL % (tn)	consumption GAS-METHANOL % (tn)
port	1248,4	0,0	0,0	0,0
manoevring	303,4	262,1	91,1	366,2
7	19,9	24,0	3,2	40,6
8	14,1	17,9	2,3	30,7
9	41,8	56,5	7,1	97,9
10	134,7	196,5	23,8	345,8
11	638,7	1027,1	117,1	1837,9
12	1730,1	3140,5	329,7	5713,2
13	2641,3	5543,7	524,7	10249,6
14	703,9	1751,1	148,8	3302,4
15	104,5	316,0	23,7	615,6
16	16,6	62,8	4,1	127,7
17	0,5	2,3	0,5	4,7
TOTAL	7600,6	12400,6	1276,3	22732,2

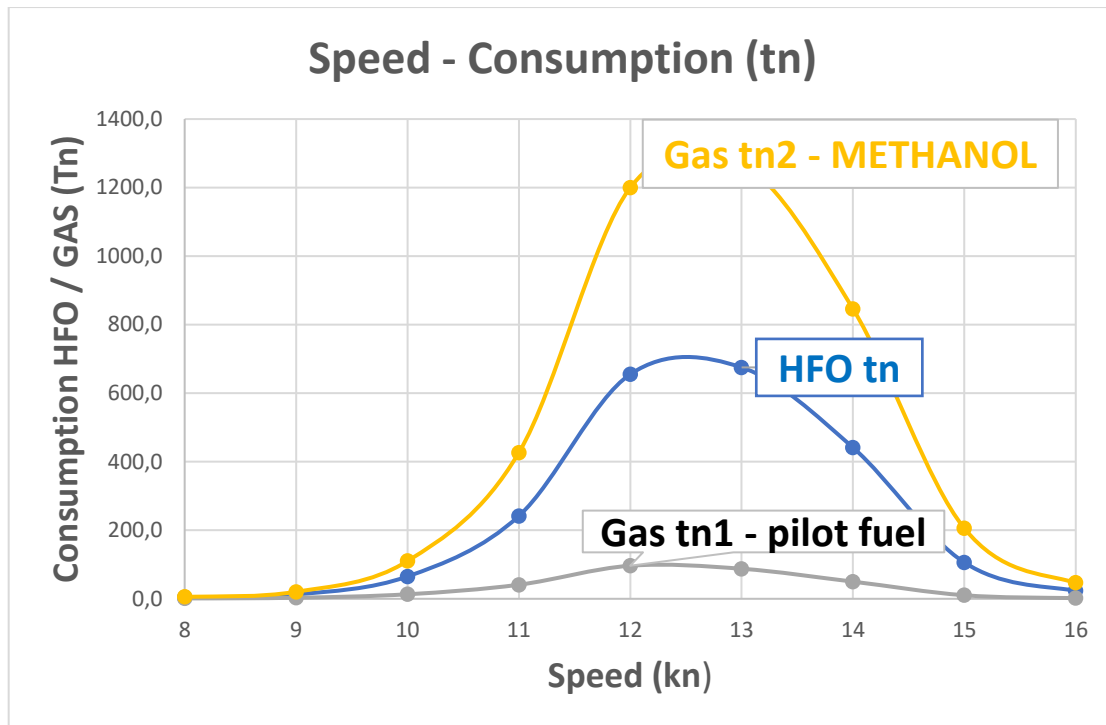
Πίνακας 16 Συγκεντρωτικό Πίνακας - Τόνος κάθε Καυσίμου - BALLAST mode

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ				
speed	hrs	consumption HFO (tn)	consumption GAS-DIESEL % (tn)	consumption GAS-METHANOL % (tn)
port	1228,6	0,0	0,0	0,0
manoevring	124,5	25,0	22,6	6,1
7	19,0	6,6	1,7	7,1
8	10,5	4,8	1,1	5,9
9	25,1	15,1	3,1	20,5
10	97,2	74,5	13,1	110,2
11	278,7	268,3	41,0	426,3
12	598,9	712,6	96,5	1199,8
13	497,6	722,9	87,7	1271,5
14	264,9	466,8	50,0	846,0
15	52,0	111,0	10,4	205,5
16	9,6	25,0	2,1	47,3
17	5,1	16,3	1,2	31,9
TOTAL	3250,6	2448,8	330,5	4178,0

Με γνώμονα τα παραπάνω συγκεντρωτικά πινακάκια δημιουργήθηκαν τα ακόλουθα γραφήματα τα οποία μορφοποιούν τους ετήσιους τόνους καυσίμου που απαιτούνται για κάθε λειτουργία της μηχανής και τύπο καυσίμου ανά ταχύτητα. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του πλοίου που επαληθεύεται με βάση τα ακόλουθα γραφήματα είναι πως οι περισσότερες ώρες λειτουργίας του πλοίου εντοπίζονται από 10 kn έως 15 kn κόμβους χαρακτηριστικό το οποίο αναφέρεται στα κύρια στοιχεία του πλοίου, πως η ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου είναι 14.32 kn. Επίσης, ένα ακόμη συμπέρασμα που αντλείται από τα ακόλουθα διαγράμματα είναι πως οι τόνοι μεθανόλης που απαιτούνται για την ίδια ταχύτητα πλοίου είναι σχεδόν διπλάσιοι από τους τόνους πετρελαίου που απαιτούνται στην πρώτη περίπτωση όπου η μηχανή λειτουργεί χωρίς εναλλακτικό καύσιμο.



Διάγραμμα 4 Τόνος κάθε Καυσίμου ανά ταχύτητα πλοίου – LADEN mode



Διάγραμμα 5 Τόνοι κάθε Καυσίμου ανά ταχύτητα πλοίου – BALLAST mode

Επιπλέον, μια αξιοσημείωτη παρατήρηση που είναι εύλογο να αναφερθεί συγκριτικά με τα 2 παραπάνω διαγράμματα είναι η κατανομή των καμπυλών ή αλλιώς οι «καμπάνες» των τόνων ανά ταχύτητα που παρουσιάζονται. Πιο αναλυτικά, στην έμφορτη κατάσταση οι τόνοι που απαιτούνται για να φτάσει για παράδειγμα την ταχύτητα 13 κόμβους είναι σχεδόν 8 φορές πάνω από ότι χρειάζεται η μηχανή στην κατάσταση ερματισμού. Αυτό φυσικά αιτιολογείται διότι το πλοίο στην έμφορτη κατάσταση έχει μεγαλύτερη αντίσταση και επομένως απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση για να αποκτήσει την ζητούμενη ταχύτητα κάθε φορά.

6.4 Υπολογισμός λειτουργικού δείκτη CII - Συμπεράσματα

Έχοντας ολοκληρώσει με τους εκάστοτε υπολογισμούς με την σειρά που αναφέρθηκαν παραπάνω υπάρχουν όλοι οι παράγοντες προκειμένου να υπολογιστεί ο δείκτης έντασης διοξειδίου του άνθρακα. Συγκεκριμένα, ο δείκτης CII, όπως έχει ήδη επισημανθεί στην θεωρία του εν λόγω πονήματος, δίνεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$CII = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{DWT \times nm} \text{ gCO}_2 / \text{dwt} \times \text{nmiles}$$

Επομένως, συνοψίζοντας για κάθε λειτουργία της μηχανής και για την εκάστοτε κατάσταση φόρτωσης δημιουργείται ο ακόλουθος πίνακας με τα απαιτούμενα δεδομένα για τον τελικό υπολογισμό του ενεργειακού δείκτη έντασης CO₂.

mode	speed (kn)	hrs	Days	nm	% hrs per kn	consumption HFO (tn)	consumption GAS-DIESEL % (tn)	consumption GAS-METHANOL % (tn)	
Laden	port	1248,407	52		11,5%	0	0	0	
	Manoevring	303,4197	13		2,8%	262,07	91,11	366,25	
	7	19,87	1	139,09	0,2%	24,02	3,23	40,59	
	8	14,10972	1	112,8778	0,1%	17,93	2,34	30,68	
	9	41,82861	2	376,4575	0,4%	56,48	7,14	97,89	
	10	134,7444	6	1347,444	1,2%	196,49	23,79	345,81	
	11	638,6569	27	7025,226	5,9%	1027,13	117,12	1837,91	
	12	1730,061	72	20760,73	15,9%	3140,53	329,73	5713,16	
	13	2641,321	110	34337,17	24,3%	5543,75	524,68	10249,58	
	14	703,8919	29	9854,487	6,5%	1751,11	148,79	3302,37	
	15	104,4531	4	1566,796	1,0%	315,99	23,70	615,59	
	16	16,64472	1	266,3156	0,2%	62,78	4,09	127,71	
	17	0,488333	0	8,301667	0,0%	2,34	0,54	4,67	
	Ballast	port	1228,606	51		11,3%	0	0	0
		Manoevring	124,4661	5		1,1%	25,01	22,59	6,06
		7	19,03333	1	133,2333	0,2%	6,56	1,65	7,06
		8	10,46806	0	83,74444	0,1%	4,80	1,12	5,88
9		25,14778	1	226,33	0,2%	15,06	3,09	20,46	
10		97,18611	4	971,8611	0,9%	74,51	13,14	110,20	
11		278,7206	12	3065,926	2,6%	268,35	41,00	426,34	
12		598,9364	25	7187,237	5,5%	712,60	96,53	1199,82	
13		497,5558	21	6468,226	4,6%	722,92	87,72	1271,46	
14		264,9144	11	3708,802	2,4%	466,76	50,05	845,97	
15		52,03972	2	780,5958	0,5%	110,98	10,39	205,54	
16		9,642222	0,40	154,2756	0,1%	24,95	2,07	47,32	
17		5,146667	0,21	87,49333	0,0%	16,25	1,18	31,94	
			10851,13	450	98662,62	99,6%	14849,38	1606,80	26910,25

Εν συνεχεία, αξιοποιώντας τις συνολικές ποσότητες των παραπάνω δεδομένων λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθοι υπολογισμοί προκειμένου να βρεθούν τα γραμμάρια διοξειδίου του άνθρακα και τελικά ο δείκτης που επιτυγχάνει το συγκεκριμένο πλοίο ανάλογα το καύσιμο που χρησιμοποιεί.

DIESEL FUEL MODE		
Total fuel	DWT	319000
	days in oper	450
	miles	98663
	MDO FUEL	14849 tonnes fuel
	Cf mdo	3,206
	emissions CO2	47607,1001 tonnes CO2
	CII	1,51 gCO ₂ /dwt-mile

METHANOL MODE			
Total fuel consumed	DWT	319000	
	days in oper	450	
	miles	98663	
	METHANOL	26910	tonnes fuel
	MDO (PILOT)	1607	tonnes fuel
	Cf methanol	1,375	
	Cf mdo	3,206	
	emissions CO2	42153,01249	tonnes CO2
	CII	1,34	gCO2/dwt-mile

Εν κατακλείδι, όπως είναι αναμενόμενο ο δείκτης CII – Carbon Intensity Indicator για την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το εναλλακτικό καύσιμο της μεθανόλης ο δείκτης είναι μικρότερος σε σύγκριση με το CII που υπολογίστηκε για την περίπτωση όπου γίνεται χρήση μόνο πετρελαίου. Συμπερασματικά, είναι πιο αποδοτική η χρήση εναλλακτικού καυσίμου μεθανόλης με βάση την εν λόγω έρευνα.

6.4.1 Παραδοχές Έρευνας

Για την συγκεκριμένη ερευνητική διαδικασία θεωρήθηκε αμελητέα η συνεισφορά καταναλωτών όπως οι γεννήτριες - ΑΕ και τα Boiler, εφόσον η κατανάλωση και το αποτύπωμά τους θα ήταν ίδια και στις δυο περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Κι αυτό γιατί δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς ακόμη γεννήτριες που καίνε μεθανόλη ως καύσιμο προκειμένου να δημοσιευτούν μοντέλα στην αγορά και άρα δεν υπήρχαν δεδομένα για την προσθήκη αυτών των καταναλωτών στην έρευνα.

6.5 Υπολογισμός Δασμών EU – ETS

Σχετικά με τους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς που αφορούν τον ναυτιλιακό κλάδο έγινε εκτενής αναφορά στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αναλυτικότερα, για τον εν λόγω επίκαιρο κανονισμό του EU ETS που τον Απρίλιο του έτους 2023, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ενέκρινε πως από την 1^η Ιανουαρίου του 2024 ανάλογα το ποσοστό των ταξιδιών του εκάστοτε πλοίου σε Ευρωπαϊκά λιμάνια και ανάλογα τους ρύπους CO₂ που εκπέμπει σε αυτά τα ταξίδια θα πληρώνει ένα συγκεκριμένο ποσό δασμού στην Ευρώπη. Ο ευρωπαϊκός αυτός κανονισμός με το περιοριστικό του μέτρο για τους Ευρωπαϊκούς λιμένες, καθίσταται τροχοπέδη του ναυτιλιακού κλάδου και όπως αναφέρει άρθρο στα ΝΑΥΤΙΚΑ ΧΡΟΝΙΚΑ, ενδέχεται να επαναπροσδιοριστούν οι διαδρομές – routes ώστε αρκετά πλοία να μην διέρχονται από Ευρωπαϊκά λιμάνια.

Αναφορικά με τα έσοδα της ΕΕ μέσω αυτού του κανονιστικού πλαισίου εκτιμώνται να υπερβούν, σύμφωνα με δεδομένα της Lloyd's List, τα €10 δισ. μέχρι το 2026. Πιο συγκεκριμένα, εκτιμήσεις δείχνουν πως τα έσοδα από τους δασμούς για τα δεξαμενόπλοια και τα πλοία μεταφοράς αερίων θα ανέλθουν περίπου στα €3.3 δισ. , παρόλα αυτά τα πλοία που επηρεάζονται περισσότερο από το ETS είναι όλα τα επιβατηγά και τα οχηματαγωγά σύμφωνα με όσα αναφέρουν οι Financial Times.

6.5.1 Υποθέσεις Υπολογισμού ETS

Προκειμένου να υπολογιστούν οι δασμοί που θα επιβάλλονταν για τα ταξίδια ενός έτους για το δεξαμενόπλοιο που ερευνάται, προσδιορίζεται ως ποσοστό επισκεψιμότητας στην Ευρώπη το 30% από όλα τα ταξίδια που εκτέλεσα μέσα στον χρόνο. Επομένως, όπως υπολογίστηκε και παραπάνω, όταν το πλοίο λειτουργεί με πετρέλαιο diesel οι τόνοι καυσίμου που χρησιμοποιούνται είναι 14.849 tn fuel δημιουργούν 47607,1 τόνους εκπομπών CO₂ . Από αυτούς του τόνους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, το 30 % αναφέρεται στην προσέγγιση EU λιμένων καθ' όλο το έτος, επομένως το ποσό των τόνων που αναλογούν στο ποσοστό 30 % είναι 14.282,13 tn CO₂ .

Με βάση τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό ο δασμός που επιβάλλεται ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα αυτή την περίοδο είναι περίπου στα 80 \$ /tn CO₂ . Έτσι προκύπτει πως οι 14.282,13 tn CO₂ κοστολογούνται στα 1.142.570,4 \$ για ένα έτος που το δεξαμενόπλοιο θα προσεγγίσει Ευρωπαϊκούς λιμένες.

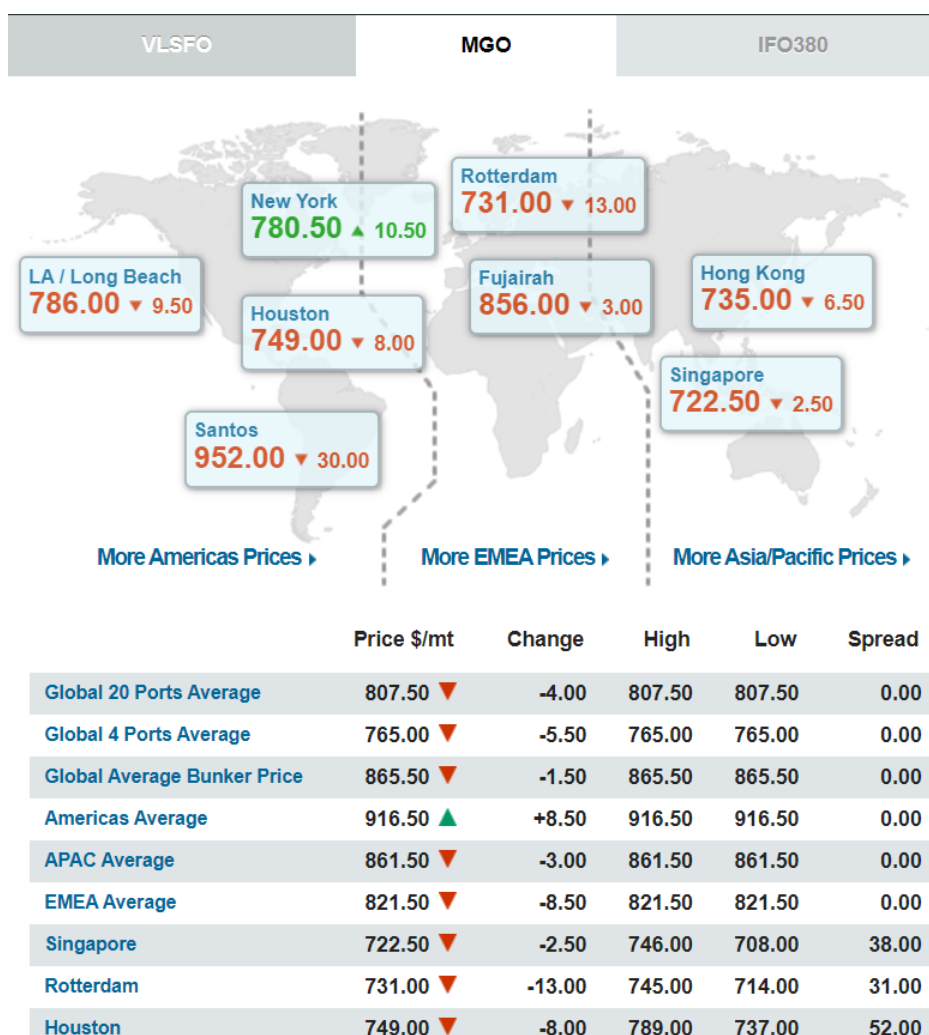
Αντίστοιχα γίνεται ο υπολογισμός των δασμών για την 2^η περίπτωση όπου η μηχανή χρησιμοποιεί ως καύσιμο την μεθανόλη. Πιο αναλυτικά, προκύπτει πως οι τόνοι μεθανόλης ανέρχονται στους 26.910 tn CH₃OH ενώ για το πιλοτικό καύσιμο είναι 1.607 tn fuel . Το ποσοστό ταξιδιών στην Ευρώπη παραμένει το ίδιο , στα 30 % , άρα προκύπτει πως οι 8.073 τόνοι μεθανόλης και 482,1 τόνοι πιλοτικού καυσίμου αντιστοιχούν στα Ευρωπαϊκά ταξίδια. Οι τόνοι διοξειδίου του άνθρακα που δημιουργούνται από το ολικό ποσό μάζας καυσίμου που καίγεται σε αυτή τη λειτουργία της μηχανής είναι συνολικά 42.153,01 tn CO₂ . Το 30 % αυτών των τόνων διοξειδίου του άνθρακα κοστολογούνται σε δασμούς σε 1.011.672,24 \$ για ένα έτος που το δεξαμενόπλοιο θα προσεγγίσει Ευρωπαϊκούς λιμένες.

6.5.2 Υπολογισμός Κόστους Καυσίμου – Συμπεράσματα

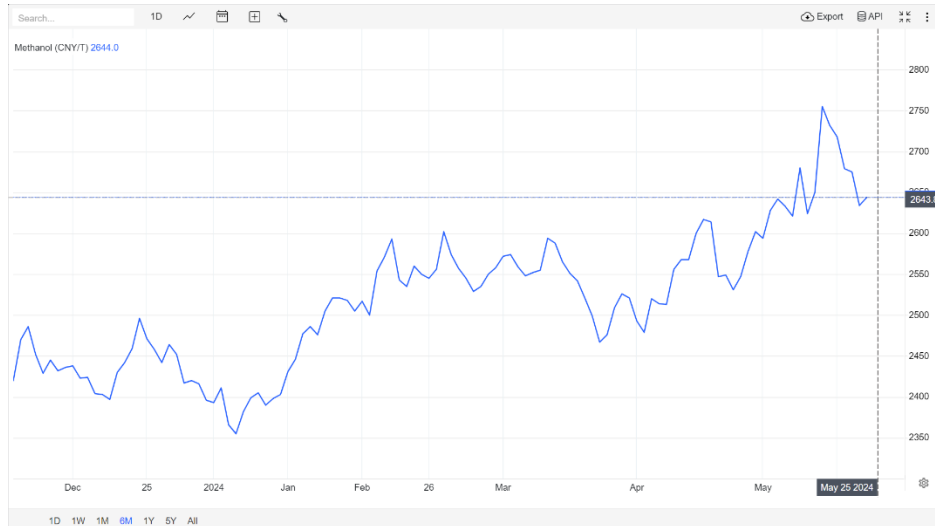
Για μια ολοκληρωμένη οικονομοτεχνική ανάλυση, είναι απαραίτητη η προσέγγιση του κόστους του εκάστοτε καυσίμου που χρησιμοποιείται σε κάθε μια λειτουργία της μηχανής υπό εξέταση. Πιο συγκεκριμένα με βάση τους ετήσιους τόνους που υπολογίστηκαν παραπάνω. ενδελεχώς, για την 1^η περίπτωση με το πετρέλαιο καταναλώθηκαν συνολικά 18.849 τόνοι. Με βάση την τιμή των 20 μεγαλύτερων λιμανιών παγκοσμίως, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.5.1 παρακάτω, η τιμή ανά τόνο του ναυτιλιακού πετρελαίου MDO είναι περίπου στα 807,5 \$/tn. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την τιμή υπολογίζεται το κόστος που απαιτείται για τους τόνους πετρελαίου σε χρονικό διάστημα ενός έτους να είναι στα 15.220.567,5 \$. Συμπεριλαμβάνοντας και τους δασμούς της EU για το ETS οι συνολικές δαπάνες, για την πρώτη περίπτωση όπου καταναλώνεται μόνο πετρέλαιο, σε ένα έτος κυμαίνονται στα 16.363.137,9 \$.

Αντίστοιχα, υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο και για την 2^η περίπτωση όπου η κύρια μηχανή του πλοίου καταναλώνει μεθανόλη. Αναλυτικότερα, οι τόνοι μεθανόλης που απαιτούνται με βάση την έρευνα που έγινε παραπάνω για ένα έτος είναι 26.910 tn και 1.607 τόνοι πιλοτικού καυσίμου. Για το πιλοτικό καύσιμο λοιπόν που η τιμή ανά τόνο είναι ίδια με τον προηγούμενο υπολογισμό είναι 1.297.652,5 \$, ενώ για την

μεθανόλη παρατηρούμε, με βάση την τιμή καυσίμου αυτήν την περίοδο – Μάιος 2024 – ότι κυμαίνεται περίπου στα 2.644 (CNY/T)κινέζικου νομίσματος ανά τόνο και με την μετατροπή σε δολάρια ανά τόνο προκύπτει στα 371,81 \$/tn . Επομένως με αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται πως το κόστος για την μεθανόλη είναι 10.005.407,1 \$. Εν κατακλείδι, για την 2^η περίπτωση το κόστος που απαιτείται για τους συνολικούς τόνους είναι στα 11.303.059,6 \$. Τέλος, εμπερικλείοντας και τους δασμούς για τους ευρωπαϊκούς λιμένες EU ETS οι συνολικές δαπάνες, για την περίπτωση κατανάλωσης μεθανόλης για ένα έτος είναι 12.314.713,84 \$.



Σχήμα 6.5.1 Τιμή Πετρελαίου MDO παγκοσμίως (πηγή : <https://shipandbunker/prices#MGO>)



Σχήμα 6.5.2 Τιμή μεθανόλης ανά τόνο καυσίμου (πηγή : <https://tradingeconomics.com/methanol>)

Συμπερασματικά γίνεται κατανοητό πως στην περίπτωση που χρησιμοποιείται εναλλακτικό καύσιμο μεθανόλης οι δασμοί της EU είναι λιγότεροι κατά 130.898,16 \$ εφόσον και οι εκπομπές τόνων CO₂ είναι λιγότεροι. Συγχρόνως, όπως αναλύθηκε παραπάνω το συνολικό κόστος της κατανάλωσης μεθανόλης, με βάση τις τιμές των καυσίμων συγκρίνοντας τις 2 περιπτώσεις λειτουργίας του κινητήρα, είναι πιο αποδοτική και οικονομική επιλογή.

7 Σχήματα

Σχήμα 1.2.1 Τρόπος έκφρασης του δείκτη EEDI, ο λόγος περιβαλλοντικού κόστους προς το κοινωνικό όφελος.....	21
Σχήμα 1.2.2 Περιγραφή δείκτη EEXI (πηγή: Bureau Veritas)	23
Σχήμα 1.2.3 Διαδικασία συνεχούς βελτίωσης σύμφωνα με το SEEMP.....	29
Σχήμα 1.2.4 Περιγραφή δείκτη CII.....	30
Σχήμα 1.2.5 Βαθμίδες ορίων σύμφωνα με τον απαιτούμενο δείκτη CII (πηγή : IMO).....	34
Σχήμα 1.2.6 Διαβάθμιση δείκτη Έντασης Άνθρακα	35
Σχήμα 1.2.7 Εκπομπές CO ₂ - «Well to Wake» προσέγγιση.....	36
Σχήμα 2.1.1 Κύρια Χαρακτηριστικά μεθανόλης (πηγή: BV)	46
Σχήμα 2.1.2 Διαδικασία παραγωγής e-μεθανόλης (BV).....	52
Σχήμα 2.1.3 Διαδικασία Παραγωγής Βιομεθανόλης (πηγή : BV)	55
Σχήμα 3.4.1 Τυπική Διάταξη ME διπλού καυσίμου NH ₃ (Πηγή : MAN)	75
Σχήμα 4.2.1 Carbon Capture from Steam-Methane Reforming (πηγή: [29])	78
Σχήμα 4.4.1 Συνολική Απεικόνιση Καυσίμων.....	83
Σχήμα 6.5.1 Τιμή Πετρελαίου MDO παγκοσμίως(πηγή: https://shipandbunker/prices#MGO).....	99
Σχήμα 6.5.2 Τιμή μεθανόλης ανά τόνο καυσίμου (πηγή : https://tradingeconomics.com/methanol).....	100

8 Πίνακες

<i>Πίνακας 1. Συντελεστές μείωσης για απαιτούμενο EEDI (πηγή: ABS).....</i>	<i>22</i>
<i>Πίνακας 2 Παράμετροι υπολογισμού EEDI (Πηγή: IR).....</i>	<i>24</i>
<i>Πίνακας 3. Δείκτες εκπομπών καυσίμου(πηγή: IMO).....</i>	<i>25</i>
<i>Πίνακας 4. Παράμετροι εξίσωσης EEDI – EEXI.....</i>	<i>26</i>
<i>Πίνακας 5 Παράγοντας CF για κάθε τύπο καυσίμου.....</i>	<i>32</i>
<i>Πίνακας 6. Συντελεστής μείωσης Z για το CII σύμφωνα με τη γραμμή αναφοράς 2019 (πηγή: IMO MEPC.338 (76)).....</i>	<i>36</i>
<i>Πίνακας 7. Κύρια Χαρακτηριστικά μεθανόλης (Harmsen, et al., 2020)1, (Maritime Knowledge Center, 2018)2, (Zannis, et al., 2018)3.....</i>	<i>47</i>
<i>Πίνακας 8 Χαρακτηριστικά της αμμωνίας (ABS, 2020).....</i>	<i>63</i>
<i>Πίνακας 9 Χαρακτηριστικά καυσίμων.....</i>	<i>85</i>
<i>Πίνακας 10. Βασικά Χαρακτηριστικά Δεξαμενόπλοιου.....</i>	<i>86</i>
<i>Πίνακας 11 Προδιαγραφές κινητήρα - λειτουργία μόνο πετρελαίου (πηγή : MAN)... </i>	<i>88</i>
<i>Πίνακας 12 Προδιαγραφές κινητήρα - λειτουργία με μεθανόλη και πιλοτικό καύσιμο (πηγή : MAN).....</i>	<i>89</i>
<i>Πίνακας 13 Υπολογισμός καταναλώσεων - LADEN mode (υπολογιστικό φύλλο excel).....</i>	<i>91</i>
<i>Πίνακας 14 Υπολογισμός καταναλώσεων – BALLAST mode (υπολογιστικό φύλλο excel).....</i>	<i>91</i>
<i>Πίνακας 15 Συγκεντρωτικό Πίνακας - Τόνοι κάθε Καυσίμου - LADEN mode.....</i>	<i>92</i>
<i>Πίνακας 16 Συγκεντρωτικό Πίνακας - Τόνοι κάθε Καυσίμου - BALLAST mode.....</i>	<i>92</i>

9 Βιβλιογραφία

[1] M. M. Elgohary, I. S. Seddiek, and A. M. Salem, “Overview of alternative fuels with emphasis on the potential of liquefied natural gas as future marine fuel,” <http://dx.doi.org/10.1177/1475090214522778>, vol. 229, no. 4, pp. 365–375, Feb. 2014, doi: 10.1177/1475090214522778.

[2] Bureau Veritas, “ALTERNATIVE FUELS OUTLOOK FOR SHIPPING | GREECE.” Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.bureauveritas.gr/newsroom/alternative-fuels-outlook-shipping>

[3] Jonas Sahl Hollænder, “Shipowners must order 4,000 green ships a year to decarbonize shipping in time — ShippingWatch.” Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: <https://shippingwatch.com/regulation/article13890242.ece>

[4] European Commission, “Reducing emissions from the shipping sector.” Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector_en#documentation

[5] European Federation for Transport and Environment AISBL, “Air pollution - Transport & Environment.” Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.transportenvironment.org/challenges/ships/ship-air-pollution/>

[6] M. Sofiev et al., “Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs,” *Nature Communications* 2018 9:1, vol. 9, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2018, doi: 10.1038/s41467-017-02774-9.

[7] IMO, “Improving the energy efficiency of ships.” Accessed: May 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx>

[8] U. Energy Information Administration, “International Energy Outlook 2019,” 2019, Accessed: Aug. 17, 2023. [Online]. Available: www.eia.gov/ieo

[9] M. Svanberg, J. Ellis, J. Lundgren, and I. Landälv, “Renewable methanol as a fuel for the shipping industry,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 1217–1228, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.06.058.

- [10] MAN, “Methanol in shipping Marine Four-Stroke”.
- [11] R. ; B. D. ; P. H. ; D. M. ; P. M. ; F. J. ; K. J. ; van der V. R. ; P. E. , van G. A. , (Laursen, “Update on Potential of Biofuels for Shipping,” 2022, Accessed: May 24, 2023. [Online]. Available: www.emsa.europa.eu
- [12] Nordic Green, “Advanced & Double Counting bio-methanol as blend component,” 2019, Accessed: May 24, 2023. [Online]. Available: <http://nordicgreen.eu/>
- [13] Experts in gas Detection, “Gas book Honeywell Analytics Experts in Gas Detection,” 2013, Accessed: May 25, 2023. [Online]. Available: www.honeywellanalytics.com
- [14] S. Verhelst, J. W. Turner, L. Sileghem, and J. Vancoillie, “Methanol as a fuel for internal combustion engines,” *Prog Energy Combust Sci*, vol. 70, pp. 43–88, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.pecs.2018.10.001.
- [15] J. Zhao, Q. Wei, S. Wang, and X. Ren, “Progress of ship exhaust gas control technology,” *Science of The Total Environment*, vol. 799, p. 149437, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.149437.
- [16] George A. Olah*, Alain Goeppert, and and G. K. Surya Prakash, “Chemical Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Dimethyl Ether: From Greenhouse Gas to Renewable, Environmentally Carbon Neutral Fuels and Synthetic Hydrocarbons.” Accessed: Aug. 17, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Different-routes-for-hydrogen-production-Olah-et-al-2009_fig1_354351098
- [17] D. Lim, B. Lee, H. Lee, M. Byun, and H. Lim, “Projected cost analysis of hybrid methanol production from tri-reforming of methane integrated with various water electrolysis systems: Technical and economic assessment,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, p. 111876, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2021.111876.
- [18] P. Yadav, D. Athanassiadis, D. M. M. Yacout, M. Tysklind, and V. K. K. Upadhyayula, “Environmental Impact and Environmental Cost Assessment of

Methanol Production from wood biomass,” *Environmental Pollution*, vol. 265, p. 114990, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2020.114990.

[19] J. J. Clary, “The Toxicology of Methanol,” *The Toxicology of Methanol*, pp. 1–287, Jan. 2013, doi: 10.1002/9781118353110.

[20] W. L. Peng et al., “Accelerating Biodiesel Catalytic Production by Confined Activation of Methanol over High-Concentration Ionic Liquid-Grafted UiO-66 Solid Superacids,” *ACS Catal*, vol. 10, no. 20, pp. 11848–11856, Oct. 2020, doi: 10.1021/ACSCATAL.0C03261/SUPPL_FILE/CS0C03261_SI_001.PDF.

[21] Dr. Martin Cames, Nora Wissner, and Jürgen Sutter, “Ammonia as a marine fuel Risks and perspectives,” 2021.

[22] H. Lesmana, Z. Zhang, X. Li, M. Zhu, W. Xu, and D. Zhang, “NH₃ as a transport fuel in internal combustion engines: A technical review,” *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, vol. 141, no. 7, Jul. 2019, doi: 10.1115/1.4042915/725857.

[23] H. Kobayashi, A. Hayakawa, K. D. K. A. Somarathne, and E. C. Okafor, “Science and technology of ammonia combustion,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 37, no. 1, pp. 109–133, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROCI.2018.09.029.

[24] K. Kim, G. Roh, W. Kim, and K. Chun, “A Preliminary Study on an Alternative Ship Propulsion System Fueled by Ammonia: Environmental and Economic Assessments,” *Journal of Marine Science and Engineering 2020*, Vol. 8, Page 183, vol. 8, no. 3, p. 183, Mar. 2020, doi: 10.3390/JMSE8030183.

[25] ABS, “Sustainability Whitepaper: Ammonia as Marine Fuel,” American Bureau of Shipping. Accessed: Nov. 18, 2023. [Online]. Available: <https://absinfo.eagle.org/acton/media/16130/sustainability-whitepaper-ammonia-as-marine-fuel>

[26] H. H. T. V. S. G. ALFA LAVAL, “Ammonfuel-an industrial view of ammonia as a marine fuel,” 2020. Accessed: Sep. 25, 2023. [Online]. Available: https://www.topsoe.com/hubfs/DOWNLOADS/DOWNLOADS%20-%20White%20papers/Ammonfuel%20Report%20Version%2009.9%20August%203_update.pdf

[27] ABS, “Strength Assessment of Independent Type C Tanks,” GUIDANCE NOTES ON STRENGTH ASSESSMENT OF INDEPENDENT TYPE C TANKS.

[28] DNV, “New ammonia chapter for technical and operational decision support,” Det Norske Veritas (DNV). Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/new-ammonia-chapter-for-technical-and-operational-decision-support/>

[29] NCE Maritime CleanTech, “Norwegian future value chains for liquid hydrogen,” Norwegian Centres of Expertise - NCE Maritime CleanTech, 2019, Accessed: Oct. 27, 2023. [Online]. Available: <https://maritimecleantech.no/wp-content/uploads/2016/11/Report-liquid-hydrogen.pdf>

[30] A. Akinpelu, M. S. Alam, M. Shafiullah, S. M. Rahman, and F. S. Al-Ismael, “Greenhouse Gas Emission Dynamics of Saudi Arabia: Potential of Hydrogen Fuel for Emission Footprint Reduction,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/SU15075639.

[31] J. D. Carlos Marquez, “MARINE METHANOL Future-Proof Shipping Fuel,” Methanol Institute (May 2023), *Methanol: Future-Proof Shipping Fuel*, May 2023.