



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Πολυκριτηριακή ανάλυση ναυτικών μηχανών εναλλακτικών καυσίμων

Χατζηδάκης Κωνσταντίνος

Επιβλέπων: Γεώργιος Δημόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Γεώργιο Δημόπουλο για την καθοδήγηση, την υπομονή του και για το χρόνο που αφιέρωσε. Χωρίς τη βοήθεια του δεν θα ήταν δυνατή η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους παρακάτω εκπροσώπους των ναυτιλιακών εταιρειών που αφιέρωσαν πολύτιμο χρόνο για να μας πουν την άποψή τους και να μας δώσουν πολύ σημαντικές πληροφορίες ώστε να βελτιωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

- Για την Latsco Marine Management (LMM) τους κυρίους Α. Γεώργαντζη (Chief Operating Officer) και Ι. Ζαχαριουδάκη (OTEM Manager)
- Για την Gaslog τους κυρίους Χ. Μαραγκούση (Innovation and Technology Manager) και Ε. Σιγάλα (Innovation and Technology Superitendent)
- Για την Thenamaris Ships Management τον κύριο Β. Λαμπρόπουλο (Chief Operating Officer) και την κυρία Β. Σουζάνη (New Building Supervisor Engineer)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία στόχος είναι να γίνει μια ανάλυση και σύγκριση μερικών μηχανών εναλλακτικών καυσίμων με μια συμβατική μηχανή καυσίμου VLSFO. Καταρχάς επιλέγονται συγκεκριμένες υπάρχουσες μηχανές για καύσιμα LNG, LPG και μεθανόλη. Λόγω του ότι δεν έχει κατασκευαστεί μηχανή αμμωνίας ακόμα αλλά βρίσκεται σε ερευνητικό επίπεδο δεν μπόρεσε να επιλεγεί συγκεκριμένη μηχανή αλλά βρέθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα μέσα από βιβλιογραφία και technical papers των κατασκευαστών. Στη συνέχεια τέθηκαν κριτήρια αξιολόγησης τα οποία ελέγχθηκαν από εξειδικευμένους ανθρώπους στο χώρο της ναυτιλίας όπου με βάση αυτά θα γίνει η σύγκριση των παραπάνω μηχανών. Μέσω συλλογής δεδομένων και μερικών υπολογισμών που ήταν αναγκαίοι τα κριτήρια αυτά αξιολογήθηκαν μέσω της μεθόδου πολυκριτηριακής αξιολόγησης ASPID. Για να δοθεί βάση στα σημαντικά κριτήρια αξιολόγησης τέθηκαν συντελεστές βάρους σε διάφορα σενάρια τα οποία προήλθαν είτε από αιτιολόγηση και λογικές παρατηρήσεις είτε από τους εκπροσώπους των ναυτιλιακών εταιρειών. Τέλος μέσω αυτών βαθμολογήθηκαν όλες οι μηχανές με βάση τα κριτήρια. Η αξιολόγηση έγινε καθαρά για τις μηχανές χωρίς να ληφθεί υπόψη το είδος ή οι λειτουργίες του πλοίου. Βασικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν μετά το πέρας της εργασίας ήταν ότι δεν υπάρχει καμία μηχανή η οποία να είναι καλύτερη από τις άλλες σε όλα τα κριτήρια αξιολόγησης καθώς κάθε μηχανή βαθμολογείτε καλύτερα σε συγκεκριμένα κριτήρια. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις θέσεις των εκπροσώπων των ναυτιλιακών εταιρειών οι οποίες είναι να δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στα οικονομικά δεδομένα, στην ωριμότητα της τεχνολογίας και στην ασφάλεια του καυσίμου φαίνεται ότι δεν είναι έτοιμες να δεχθούν μια λύση μηχανής εναλλακτικών καυσίμων. Αυτό το συμπέρασμα βγαίνει κατά την τελική βαθμολογία μηχανών.

Περιεχόμενα

Σχήματα	6
Πίνακες	8
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	11
1.1 Τεχνολογίες και απανθρακοποίηση	11
1.2 Περιγραφή βασικών τύπων κινητήρων εναλλακτικών καυσίμων	13
1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας	15
Κεφάλαιο 2. Μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης	17
2.1 Περιγραφή μεθόδου ASPID	17
Κεφάλαιο 3. Αξιολόγηση κύριων μηχανών	20
3.1 Κριτήρια αξιολόγησης	20
3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά	21
3.3 Οικονομικά δεδομένα	29
3.4 Περιβαντολογική Απόδοση	32
3.5 Ιδιαιτερότητες καυσίμων	35
3.6 Τεχνολογία	38
3.7 Σύνοψη κεφαλαίου 3	40
Κεφάλαιο 4. Βασικές ιδιότητες καυσίμων	41
4.1 Fuel Oil	41
4.2 LNG	42
4.3 LPG	43
4.4 Μεθανόλη	44
4.5 Αμμωνία	45
4.6 Δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων	46
Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα κριτηρίων-Σχολιασμός	51
5.1 Τεχνικά	51
5.1.1 Heat Rate-Βαθμός απόδοσης	51
5.1.2 Ισχύς Καυσαερίων-Παραγωγή Ατμού	54
5.1.3 Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου	57
5.1.4 Ισχύς επιπρόσθετων συστημάτων	60
5.2 Οικονομικά	62
5.2.1 Κόστος Κατανάλωσης καυσίμου	62
5.2.2 Κόστος δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμου	64

5.2.3 Κόστος μηχανής.....	65
5.2.4 Κόστος συντήρησης.....	66
5.3 Περιβαλλοντολογικά	68
5.3.1 Global Warming Potential – 100 years.....	68
5.3.2 Εκπομπές NO _x	70
5.3.2 Εκπομπές SO _x	71
5.4 Ιδιαιτερότητες καυσίμων	73
5.4.1 Ασφάλεια καυσίμου	73
5.4.2 Αξιοπιστία εφοδιαστικής αλυσίδας καυσίμου	78
5.4.3 Νομοθεσία.....	83
5.4.4 Ενεργειακή Πυκνότητα.....	85
5.4.5 Χρόνος κράτησης στη δεξαμενή	86
5.5 Τεχνολογία.....	88
5.5.1 Ωριμότητα τεχνολογίας	88
5.5.2 Πολυπλοκότητα Συστημάτων και ικανότητα πληρώματος	90
5.5.3 Ρίσκο αστοχίας	92
Κεφάλαιο 6. Πολυκριτηριακή Σύγκριση Συστημάτων	94
6.1 Υπολογισμός των δεικτών υποκριτηρίων	94
6.2 Υπολογισμός των δεικτών κριτηρίων.....	96
6.3 Υπολογισμός των δεικτών ομάδων κριτηρίων.....	102
6.4 Εξέταση διαφορετικών σεναρίων	106
Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα	116
Παράρτημα.....	118
Βιβλιογραφία	121

Σχήματα

- ΣΧΗΜΑ 1-1: Αύξηση DWT πλοίων τα επόμενα χρόνια [1]
- ΣΧΗΜΑ 1-2: Στόχοι IMO για εκπομπές διοξειδίων του άνθρακα [69]
- ΣΧΗΜΑ 1-3: Λειτουργία καύσης κύκλου Otto Dual fuel μηχανής
- ΣΧΗΜΑ 2-1: Βήματα προσδιορισμού του δείκτη απόδοσης για κάθε μηχανή
- ΣΧΗΜΑ 3-1: Ιεραρχία κριτηρίων αξιολόγησης
- ΣΧΗΜΑ 3-2: Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου σε συμβατική μηχανή
- ΣΧΗΜΑ 3-4: Διαχείριση BOG μέσω επανυγροποίησης ή διοχέτευσης στο Gas Combustion Unit(GCU)
- ΣΧΗΜΑ 3-5: Σύστημα διαχείρισης BOG μέσω διοχέτευσης στις ηλεκτρογεννήτριες στα 6 bar
- ΣΧΗΜΑ 3-6: Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου στις ME-LGIM μηχανές(μεθανόλη)
- ΣΧΗΜΑ 3-7: Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου στις ME-LGIP μηχανές(LPG)
- ΣΧΗΜΑ 3-8: Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου αμμωνίας
- ΣΧΗΜΑ 4-1: Διαδικασία παραγωγής πράσινης αμμωνίας
- ΣΧΗΜΑ 4-2: Διάγραμμα πίεσης και θερμοκρασίας διαφόρων υγροποιημένων αερίων
- ΣΧΗΜΑ 4-3: Integrated Tank
- ΣΧΗΜΑ 4-4: Type A tank
- ΣΧΗΜΑ 4-5: Moss Type tank
- ΣΧΗΜΑ 4-6: Type C tank
- ΣΧΗΜΑ 4-7: Type C tank σε κατάστρωμα πλοίου
- ΣΧΗΜΑ 5-1: Ποιοτική κατανομή Heat rate σε σχέση με το φορτίο της μηχανής
- ΣΧΗΜΑ 5-2: Heat Rate TIER II
- ΣΧΗΜΑ 5-3: Heat Rate TIER III
- ΣΧΗΜΑ 5-4: Ισχύς καυσαερίων-Παραγωγή ατμού TIER II
- ΣΧΗΜΑ 5-5: Ισχύς καυσαερίων-Παραγωγή ατμού TIER III
- ΣΧΗΜΑ 5-6: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου συναρτήσει της ισχύς πρόωσης

ΣΧΗΜΑ 5-7: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου(*gr/kWh*)

ΣΧΗΜΑ 5-8: Κόστος καυσίμων ανά μέρα

ΣΧΗΜΑ 5-9: Εκπομπές μεθανίου με βάση τον *E3 cycle*

ΣΧΗΜΑ 5-10: *Global Warming Potential – 100 years*

ΣΧΗΜΑ 5-11: Όρια αναφλεξιμότητας για κάθε καύσιμο

ΣΧΗΜΑ 5-12: Υποδομές εφοδιασμού LNG στον κόσμο([51])

ΣΧΗΜΑ 5-13: Τερματικοί σταθμοί LPG στην Ευρώπη([57])

ΣΧΗΜΑ 5-14: Αποθηκευτικοί χώροι μεθανόλης στον κόσμο ([51])

ΣΧΗΜΑ 5-15: Αποθηκευτικοί χώροι αμμωνίας στον κόσμο ([51])

ΣΧΗΜΑ 5-16: Συμβόλαιο της MAN για *Dual Fuel* μηχανές([66])

ΣΧΗΜΑ 6-1: *Spider diagrams* για κάθε ομάδα κριτηρίων

ΣΧΗΜΑ 6-2: *Sector plots* για κάθε μηχανή

ΣΧΗΜΑ 6-3: Τιμές δεικτών των μηχανών για κάθε σενάριο (1-4)

ΣΧΗΜΑ 6-4: Τιμές δεικτών των μηχανών για κάθε σενάριο (5-7)

ΣΧΗΜΑ Π-1: Σύγκριση *Heat rate* για μηχανές ME-GA και XDF

ΣΧΗΜΑ Π-2: Σύγκριση Ισχύς καυσαερίων και παραγωγής ατμού για μηχανές ME-GA και XDF

ΣΧΗΜΑ Π-3: Σύγκριση κατανάλωσης πιλοτικού καυσίμου για μηχανές ME-GA και XDF

Πίνακες

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: Επιλογή μηχανών

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: Περιεκτικότητα φυσικού αερίου

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1: Συντελεστές βάρους E3 cycle

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2: Θερμοδυναμικοί βαθμοί απόδοσης μηχανών (%)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3: Ισχύς καυσαερίων μηχανών (kW)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4: Παραγωγή Ατμού (kg/h)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-5: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου (gr/kWh)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-6: Αξιολόγηση Ισχύος επιπρόσθετων συστημάτων

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-7: Κατανάλωση κύριων μηχανών

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-8: Τιμές καυσίμων

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-9: Κόστος καυσίμων ανά μέρα

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-10: Κόστος κατασκευής δεξαμενών καυσίμου (USD/GJ)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-11: Κόστος μηχανής

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-12: Κόστος συντήρησης

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-13: Εκπομπές μεθανίου ανάλογα το φορτίο του κινητήρα

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-14: Global Warming Potential – 100 years

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-15: Αξιολόγηση εκπομπών NOX με βάση τις τεχνολογίες που απαιτούνται

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-16: Αξιολόγηση εκπομπών SOX με βάση την κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-17: Όρια αναφλεξιμότητας για κάθε καύσιμο

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-18: Αριθμός RF για όλα τα καύσιμα

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-19: Θερμοκρασία αυτανάφλεξης καυσίμων

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-20: Σημείο ανάφλεξης καυσίμων

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-21: Κρυογενικότητα καυσίμων

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-22: Τοξικότητα καυσίμων

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-23: Αξιολόγηση εφοδιαστικής αλυσίδας καυσίμων

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-24: Κανόνες νηογνωμόνων για εναλλακτικά καύσιμα

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-25: Αξιολόγηση Νομοθεσίας

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-26: Αξιολόγηση ενεργειακής πυκνότητας

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-27: Αξιολόγηση χρόνου κράτησης στη δεξαμενή

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-28: Αξιολόγηση ωριμότητας τεχνολογίας

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-29: Αξιολόγηση πολυπλοκότητας συστημάτων και ικανότητας πληρώματος

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-30: Αξιολόγηση ρίσκου αστοχίας

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1: Συντελεστές βαρύτητας υποκριτηρίων

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-2: Δείκτες υποκριτηρίων ασφάλειας καυσίμου

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-3: Δείκτες υποκριτηρίων αξιοπιστίας εφοδιαστικής αλυσίδας καυσίμου

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-4: Δείκτες υποκριτηρίων πολυπλοκότητας συστημάτων

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-5: Κατώτερο και ανώτερο όριο κριτηρίων

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-6: Υπολογισμός δεικτών τεχνικών χαρακτηριστικών

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-7: Υπολογισμός δεικτών οικονομικών δεδομένων

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-8: Υπολογισμός δεικτών περιβαλλοντολογικής απόδοσης

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-9: Υπολογισμός δεικτών ιδιαιτεροτήτων καυσίμων

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-10: Υπολογισμός δεικτών τεχνολογίας

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-11: Καθορισμός συντελεστών βάρους κριτηρίων

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-12: Τιμές δεικτών για κάθε ομάδα κριτηρίων

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-13: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 1

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-14: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 2

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-15: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 2

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-16: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 3

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-17: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 3

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-18: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 4

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-19: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 4

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-20: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 5

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-21: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 5

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-22: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 6

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-23: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 6

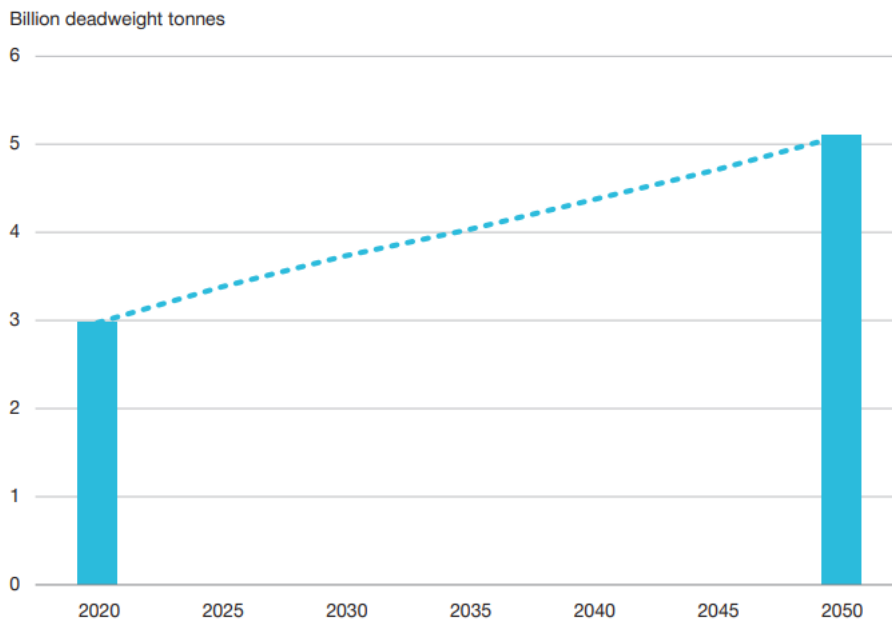
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-24: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 7

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-25: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 7

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Τεχνολογίες και απανθρακοποίηση

Η ναυτιλία είναι ο σημαντικότερος τομέας μεταφορών στο κόσμο καθώς αποτελεί πάνω από το 90% του διεθνούς εμπορίου. Τα τελευταία χρόνια η αυξημένη ζήτηση σε προϊόντα μεταφοράς έχει προκαλέσει αύξηση τόσο στο συνολικό μεταφερόμενο έργο των εμπορικών πλοίων (σχεδόν 3 δις εκατομμύρια DWT το 2020 [1]) όσο και στον αριθμό αυτών (74500 πλοία το 2021) [2]. Με βάση τα παραπάνω φαίνεται πως τα επόμενα χρόνια θα συνεχίσει να αυξάνεται το συνολικό DWT των εμπορικών πλοίων φτάνοντας έως το 5.1 δις εκατομμύρια DWT το 2050.

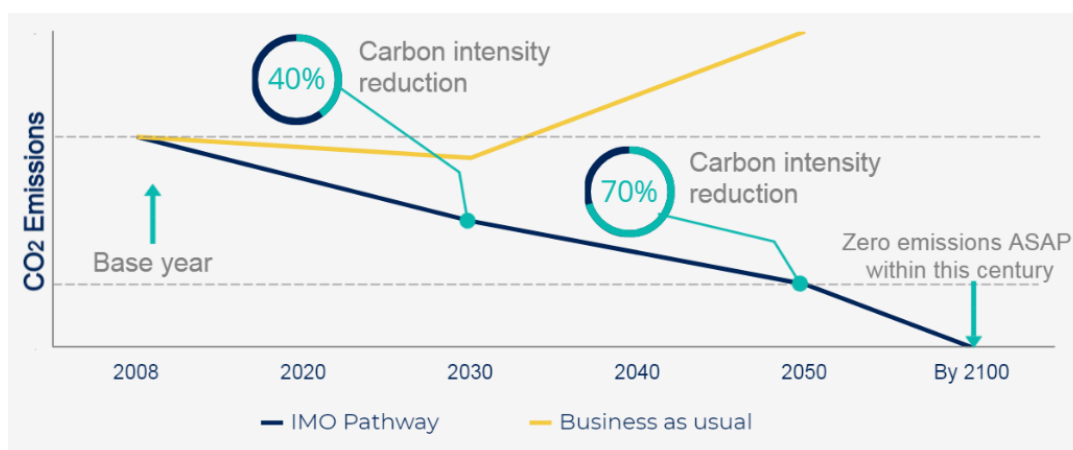


ΣΧΗΜΑ 1-1: Αύξηση DWT πλοίων τα επόμενα χρόνια [1]

Σε ένα τομέα τόσο μεγάλο εμπορικά όπως η ναυτιλία οι εκπομπές βλαβερών ουσιών στο περιβάλλον που παράγονται από τις μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν τα περισσότερα από αυτά πλοία είναι αρκετοί και θα πρέπει να μειωθούν. Πρέπει να επιλυθεί λοιπόν ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα παγκοσμίως όπου είναι η μείωση των ρύπων από τα πλοία συνολικά συνεχίζοντας όμως να αυξάνεται ο αριθμός αυτών. Ο International Maritime Organization (IMO) τα τελευταία χρόνια έχει θέσει πληθώρα κανονισμών ώστε να περιορισθούν οι εκπομπές αυτές. Βασικά μέτρα ήταν η δημιουργία περιοχών όπου θα ελέγχονται οι

εκπομπές οξειδίων του θείου και αζώτου στην ατμόσφαιρα (Emission Control Areas) και οι δείκτες EEDI, EEXI, CII για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον έχουν γίνει πολλές προσπάθειες στα πλοία για βελτιστοποίηση της απόδοσης τους με αποτέλεσμα να μειωθούν οι καταναλώσεις καυσίμου άρα και οι παραγόμενοι ρύποι. Κάποιες από αυτές τις προσπάθειες έχουν καθιερωθεί στο σχεδιασμό και κατασκευή των πλοίων με σημαντικά αποτελέσματα μείωσης των εκπομπών.

Το ερώτημα που τίθεται είναι εάν μπορούν τέτοιες προσπάθειες να μειώσουν σε πολύ σημαντικό βαθμό ή και να εκμηδενίσουν τις εκπομπές των πλοίων. Οι στόχοι του IMO αναφέρονται σε μείωση των εκπομπών CO₂ ανά μεταφορικό έργο ως μέσο όρο στη διεθνή ναυτιλία κατά 40% το 2030 και 70% το 2050 σε σχέση με τις εκπομπές του 2008 [3].



ΣΧΗΜΑ 1-2: Στόχοι IMO για εκπομπές διοξειδίων του άνθρακα [69]

Έτσι, θεωρείται ότι οι βελτιώσεις στην απόδοση των πλοίων θα έχουν βοηθητικό ρόλο στην συνεχή απανθρακοποίηση της ναυτιλίας. Ο “δρόμος” λοιπόν προς την απανθρακοποίηση θα γίνει με χρήση εναλλακτικών καυσίμων για τις μηχανές των πλοίων. Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων για την πρόωση των πλοίων δεν αλλάζει δραματικά τις βασικές αρχές λειτουργίας των εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης καθώς ήδη έχουν αναπτυχθεί οι κατάλληλες τεχνολογίες από τους κατασκευαστές για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

Οι τεχνολογίες εναλλακτικών καυσίμων οι οποίες βρίσκονται στο “επίκεντρο” τον τελευταίο καιρό παρουσιάζουν η κάθε μία θετικά και αρνητικά για τη χρησιμοποίησή τους. Η επιλογή της τεχνολογίας η οποία θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών δεν είναι τόσο απλή καθώς αποτελεί ένα πολυσύνθετο πρόβλημα. Για παράδειγμα, ο στόχος προς την απανθρακοποίηση δε θα πρέπει να

είναι το μοναδικό που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Άλλα βασικά κριτήρια είναι η οικονομική πλευρά αυτής της τεχνολογίας και η τεχνολογία αυτή να μην επιφέρει παράπλευρους κινδύνους για τους ανθρώπους που τη χρησιμοποιούν. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι είναι δύσκολη η επιλογή του καταλληλότερου καυσίμου ή της καταλληλότερης τεχνολογίας. Πιο πιθανό θεωρείται το σενάριο χρήσης ενός αριθμού διαφορετικών τεχνολογιών στο μέλλον.

1.2 Περιγραφή βασικών τύπων κινητήρων εναλλακτικών καυσίμων

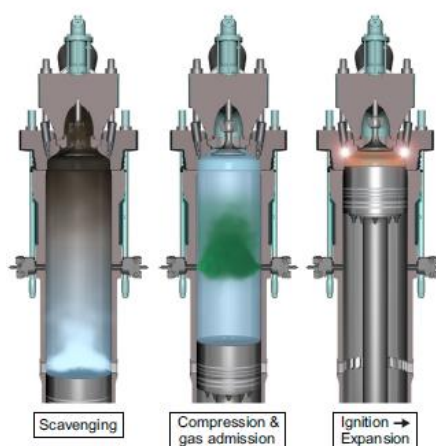
Ευρεία και σχεδόν αποκλειστική χρήση στα μεγάλα εμπορικά πλοία έχουν οι δίχρονες μηχανές πετρελαίου. Οι συγκεκριμένες μηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως επειδή επιτυγχάνουν μεγάλο θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης συνήθως άνω του 50%. Ως θερμική μηχανή, ο κινητήρας Diesel έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και πλεονεκτεί έναντι των κινητήρων Otto. Επιπλέον η συνήθης επιλογή είναι η χρήση δίχρονου και βραδύστροφου κινητήρα ώστε να συνδέεται απευθείας με την έλικα για βελτίωση του βαθμού απόδοσης.

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων που θα περιγραφεί και στη συνέχεια γίνεται με τις ίδιες βασικές αρχές που περιγράφηκαν παραπάνω. Οι κύριοι κατασκευαστές ναυτικών κινητήρων (MAN Energy Solutions, WinGD) έχουν κυκλοφορήσει κινητήρες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο φυσικό αέριο, αιθάνιο, LPG και μεθανόλη ενώ το 2024 αναμένεται η παραγωγή κινητήρα με αμμωνία από την MAN [4]. Όλες οι μηχανές είναι μηχανές διπλού καυσίμου δηλαδή χρησιμοποιούν ως καύσιμο και συμβατικό πετρέλαιο ενώ μπορούν να χρησιμοποιήσουν 3 διαφορετικές λειτουργίες [5].

- Dual fuel mode (Λειτουργία διπλού καυσίμου). Σε αυτήν την λειτουργία καταναλώνεται μια μεγάλη ποσότητα εναλλακτικού καυσίμου και μια μικρή ποσότητα πετρελαίου ως πιλοτικό καύσιμο για να ξεκινήσει η καύση.
- Συνδυασμός εναλλακτικού καυσίμου και συμβατικού. Εδώ χρησιμοποιείται μια μίξη πετρελαίου με το αντίστοιχο εναλλακτικό καύσιμο σε κάποια συγκεκριμένη αναλογία.
- Fuel oil mode (Λειτουργία μόνο με συμβατικό καύσιμο). Σε αυτήν τη λειτουργία χρησιμοποιείται μόνο συμβατικό καύσιμο και ουσιαστικά ο κινητήρας λειτουργεί σαν τον κλασικό κινητήρα πετρελαίου.

Το φυσικό αέριο εγχύεται στον κύλινδρο είτε ως αέριο υψηλής πίεσης είτε ως αέριο χαμηλής πίεσης. Στην πρώτη περίπτωση ακολουθείται ο κύκλος Diesel δηλαδή χρησιμοποιείται λίγο πριν φθάσει το έμβολο στο Άνω Νεκρό Σημείο (ANΣ) πιλοτικό

καύσιμο για την έναρξη της καύσης και εγχύεται σε υψηλή πίεση αέριο. Στην δεύτερη περίπτωση ακολουθείται ο κύκλος Otto, κατά την σάρωση αναμιγνύεται αέρας με το αέριο να διέρχεται μέσω των gas admission valves (βαλβίδων εισαγωγής αερίου) σε χαμηλή πίεση που βρίσκονται σχεδόν στη μέση του κυλίνδρου καθ' ύψος δημιουργώντας μια ομοιογένεια στο μίγμα και πάλι λίγο πριν το ΑΝΣ ψεκάζεται πιλοτικό καύσιμο. Η λειτουργία του κινητήρα με χαμηλή πίεση του αερίου απεικονίζεται παρακάτω [6].



ΣΧΗΜΑ 1-3: Λειτουργία καύσης κύκλου Otto Dual fuel μηχανής [6]

Για τα άλλα εναλλακτικά καύσιμα (LPG, μεθανόλη, αμμωνία) οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται αν και διατηρούν τις βασικές αρχές ίδιες δηλαδή χρήση πιλοτικού καυσίμου και κύκλος diesel έχουν ως σημαντική διαφορά ότι η έγχυση του εναλλακτικού καυσίμου γίνεται στην υγρή του φάση. Η τροφοδοσία του στη μηχανή γίνεται σε συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία ανάλογα το καύσιμο που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση όπως αναφέρεται και παρακάτω πιο λεπτομερώς. Και σε αυτές τις μηχανές υπάρχουν 3 διαφορετικές λειτουργίες όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Βέβαια, ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται υπάρχουν διάφορες ιδιαιτερότητες λόγω της διαφορετικής φύσης αυτών.

Αξίζει επιπλέον να σημειωθεί ότι λόγω της σύστασης μερικών καυσίμων (LNG, LPG, αμμωνία) πρέπει να ληφθεί στις μηχανές αυτές μεγάλη προσοχή στη σχεδίαση ώστε να περιορισθούν οι διαρροές. Αυτό συμβαίνει συνήθως κατασκευάζοντας τους σωλήνες που διέρχονται τα καύσιμα με διπλό τοίχωμα, τοποθετώντας ανιχνευτές αερίων ώστε σε περίπτωση διαρροής να υπάρχει μια ειδοποίηση αλλά και προσπαθώντας να απομονωθεί ένα μέρος του συστήματος τροφοδοσίας όπως θα περιγραφεί πιο λεπτομερώς στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Από το 2016 και μετά που τέθηκε ο κανονισμός από τον IMO για τον περιορισμό των εκπομπών NO_x στις Emission Control Areas ενσωματώθηκαν στις

ναυτικές μηχανές οι τεχνολογίες SCR (Selective Catalytic Reactor) και EGR (Exhaust Gas Recirculation) ώστε να επιτευχθεί το TIER III (κατηγορία 3 που δηλώνει τα επιτρεπτά όρια εκπομπών NO_x από το 2016) σε αυτές. Το SCR είναι ένας καταλύτης από τον οποίο διέρχονται τα καυσαέρια και ψεκάζονται με ουρία ώστε να δεσμευτούν σε αυτόν τα οξειδία του αζώτου. Στο σύστημα EGR ένα μέρος των καυσαερίων που παράγονται από την μηχανή διέρχεται μέσα στον κύλινδρο καύσης όπου λόγω της μεγαλύτερης ειδικής θερμοχωρητικότητας των καυσαερίων σε σχέση με τον αέρα παρατηρείται μείωση στην θερμοκρασία καυσαερίων με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγωγή οξειδίων του αζώτου. Σε όλες τις μηχανές είναι απαραίτητη η εισαγωγή μια από αυτές τις δύο τεχνολογίες εκτός από την μηχανή με καύσιμο φυσικό αέριο σε χαμηλή πίεση τροφοδοσίας η οποία ικανοποιεί το TIER III χωρίς κάποια τεχνολογία λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που παρατηρούνται στον κύλινδρο καύσης άρα και της χαμηλής παραγωγής NO_x. Βέβαια αυτό ίσχυε τα πρώτα χρόνια παραγωγής τους καθώς μετά έγινε απαραίτητη η χρήση EGR σε αυτές τις μηχανές λόγω της αυξημένης ποσότητας άκαυστου μεθανίου στα καυσαέρια (methane slip) [7]. Αυτό επιδρά αρνητικά στην υπερθέρμανση του πλανήτη και γι' αυτό το λόγο πρέπει να περιοριστεί. Μεγάλη ποσότητα υπάρχει μόνο στις χαμηλής πιέσεως μηχανές με φυσικό αέριο (Otto cycle) διότι παγιδεύεται άκαυστη ποσότητα μεθανίου κοντά στα πλευρικά τοιχώματα του κυλίνδρου όπου το μέτωπο της φλόγας δεν φτάνει μέχρι εκεί λόγω της αρκετά χαμηλής θερμοκρασίας των τοιχωμάτων.

Αν και στους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες υπάρχει διαθεσιμότητα διαφορετικών τύπων μηχανών και καυσίμων, στις ηλεκτρογεννήτριες δεν ισχύει κάτι τέτοιο. Οι πλέον διαθέσιμες ηλεκτρογεννήτριες εναλλακτικών καυσίμων είναι είτε με φυσικό αέριο είτε με μεθανόλη. Προκύπτει έτσι λοιπόν ότι αν και υπάρχουν αρκετές επιλογές για εναλλακτικά καύσιμα για την κύρια μηχανή πρόωσης κάποια από αυτά πρέπει να χρησιμοποιηθούν στο πλοίο μαζί με κάποια ποσότητα συμβατικού καυσίμου.

1.3 Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση μέσω διαφόρων κριτηρίων, ναυτικών μηχανών που χρησιμοποιούν τόσο συμβατικά καύσιμα όσο και εναλλακτικά. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να υπάρχει μια κοινή βασική αρχή για αυτές τις μηχανές. Έχουν επιλεγεί λοιπόν μηχανές μέτριας ισχύος MCR (Maximum Continuous Rating) (11000 kW). Αρχικά παρουσιάζεται η μέθοδος ASPID (Κεφάλαιο 2) όπου με βάση αυτή θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση των μηχανών μέσω βαθμολογίας. Στη συνέχεια έγινε ο καθορισμός των κριτηρίων αξιολόγησης αλλά και

των υπο-κριτηρίων αυτών (Κεφάλαιο 3). Με βάση αυτά τα κριτήρια έχουν συλλεγεί τα απαραίτητα δεδομένα τόσο από τους κατασκευαστές όσο και από τη διατιθέμενη βιβλιογραφία και μέσω υπολογισμών προέκυψαν τα αποτελέσματα των κριτηρίων που έχουν τεθεί για την αξιολόγηση (Κεφάλαιο 4,5). Τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί κατατάσσονται σε ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια. Στα ποσοτικά κριτήρια τα αποτελέσματα προκύπτουν μέσω αριθμητικών υπολογισμών ενώ τα ποιοτικά κριτήρια αξιολογούνται από ανθρώπους που δραστηριοποιούνται στο χώρο της ναυτιλίας. Αυτό συμβαίνει ώστε να υπάρχει η καλύτερη δυνατή αξιολόγηση αυτών των κριτηρίων τα οποία είναι από τη φύση τους υποκειμενικά. Επιπλέον το ίδιο συμβαίνει για την επιλογή των πιο σημαντικών κριτηρίων για αυτούς ώστε να προσαρμοστούν αντίστοιχα οι συντελεστές βαρύτητας αυτών των κριτηρίων. Έτσι προκύπτουν οι τελικοί δείκτες (Κεφάλαιο 6) μέσω των αποτελεσμάτων και των συντελεστών βαρύτητας. Οι συντελεστές βαρύτητας αν και επιλέγονται από εξειδικευμένους ανθρώπους της ναυτιλίας είναι ένα υποκειμενικό αντικείμενο και γι'αυτό εξετάζονται διαφορετικά σενάρια. Τέλος, παρουσιάζεται ένα τελικό συμπέρασμα για την αξιολόγηση που προκύπτει (Κεφάλαιο 7).

Κεφάλαιο 2. Μέθοδος πολυκριτηριακής αξιολόγησης

2.1 Περιγραφή μεθόδου ASPID

Για τον προσδιορισμό των δεικτών όπου με βάση αυτών θα γίνει η αξιολόγηση των μηχανών θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος ASPID [8, 9]. Τελικός στόχος είναι να προσδιοριστεί ο δείκτης απόδοσης για την κάθε μηχανή. Αυτό συμβαίνει με τα εξής βήματα.



ΣΧΗΜΑ 2-1: Βήματα προσδιορισμού του δείκτη απόδοσης για κάθε μηχανή

Η επιλογή και η ομαδοποίηση των δεικτών απόδοσης έγινε σε κατηγορίες οι οποίες να λαμβάνουν όσο είναι δυνατό όλο το εύρος αξιολόγησης κινητήρων με χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Τα κριτήρια αξιολόγησης είναι είτε ποιοτικά είτε ποσοτικά γι' αυτό σε κάθε περίπτωση ο προσδιορισμός τους γίνεται με διαφορετικό τρόπο.

Οι βασικές κατηγορίες που χωρίζονται τα κριτήρια παρουσιάζονται παρακάτω.

- Τεχνικά χαρακτηριστικά
- Οικονομικά δεδομένα
- Περιβαλλοντολογική απόδοση
- Ιδιαιτερότητες καυσίμων
- Τεχνολογία

Ανάλογα με το κριτήριο που εξετάζεται σε κάθε περίπτωση μπορεί όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη τόσο πιο θετική να είναι η επίδραση του αλλά μπορεί η επίδραση να γίνεται αρνητική σε κάποιο άλλο κριτήριο με αύξηση της τιμής του δείκτη. Αυτό λοιπόν θα πρέπει να ληφθεί υπόψη διότι παρουσιάζει έτσι μια δυσκολία στη συνάθροιση των δεικτών. Αυτή η δυσκολία λύνεται με την κανονικοποίηση μέσω των παρακάτω σχέσεων.

Για ένα δείκτη θετικής επίδρασης

$$\tilde{I}_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{αν } I_{ij} \leq a_{ij} \\ \frac{I_{ij}-a_{ij}}{b_{ij}-a_{ij}}, & \text{αν } a_{ij} < I_{ij} < b_{ij} \\ 1, & \text{αν } I_{ij} \geq b_{ij} \end{cases} \quad (2.1)$$

Για ένα δείκτη αρνητικής επίδρασης

$$\tilde{I}_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν } I_{ij} \leq a_{ij} \\ \frac{b_{ij}-I_{ij}}{b_{ij}-a_{ij}}, & \text{αν } a_{ij} < I_{ij} < b_{ij} \\ 0, & \text{αν } I_{ij} \geq b_{ij} \end{cases} \quad (2.2)$$

Όπου j ορίζει την ομάδα κριτηρίων ενώ το i κάποιο κριτήριο της κάθε ομάδας. Επίσης a_{ij} είναι το κατώτερο όριο ενώ b_{ij} το ανώτερο όριο.

Επιπλέον με την κανονικοποίηση προσφέρεται η δυνατότητα συνδυασμού κριτηρίων με διαφορετικές μονάδες μέτρησης καθώς πλέον όλοι οι δείκτες έχουν τιμές από 0 έως 1 ανεξάρτητα την κατηγορία τους.

Πλέον το επόμενο βήμα είναι να καθοριστούν συντελεστές βάρους τόσο για το κάθε κριτήριο όσο και για κάθε ομάδα κριτηρίων ώστε να προσδιοριστούν οι δείκτες απόδοσης για κάθε ομάδα αλλά και ο τελικός δείκτης απόδοσης των μηχανών.

Ο δείκτης απόδοσης κάθε ομάδας προσδιορίζεται ως εξής:

$$\tilde{I}_{sj} = \sum_i (w_{ij} \cdot \tilde{I}_{ij}) \quad (2.3)$$

όπου w_{ij} ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου i της ομάδας κριτηρίων j . Οι συντελεστές βάρους θα πρέπει να ικανοποιούν την παρακάτω σχέση.

$$\sum_i w_{ij} = 1, w_{ij} \geq 0 \quad (2.4)$$

Τέλος συνδυάζοντας του δείκτες \tilde{I}_{sj} για την κάθε ομάδα κατηγοριών προκύπτει ο συνολικός δείκτης απόδοσης.

$$I_{tot} = \sum_j (w_j \cdot \tilde{I}_{sj}) \quad (2.5)$$

Όπου w_j ο συντελεστής βαρύτητας για τον δείκτη της κάθε ομάδας κατηγοριών. Οι συντελεστές βάρους θα πρέπει να ικανοποιούν την παρακάτω σχέση.

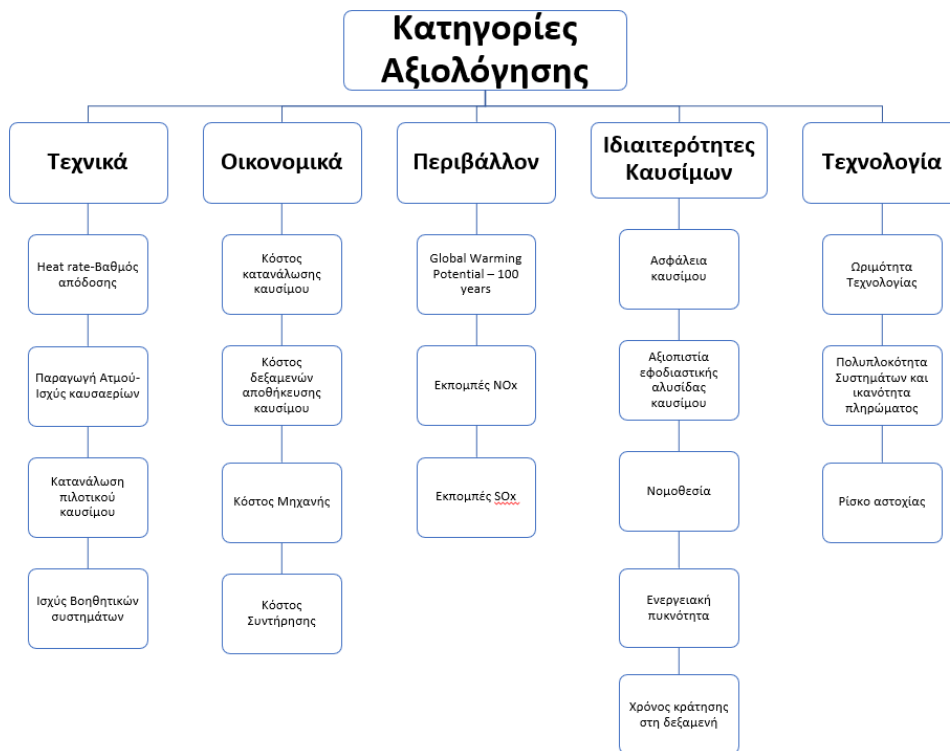
$$\sum_j w_j = 1, w_j \geq 0 \quad (2.6)$$

Αυτοί οι συντελεστές καθορίζουν τη σημαντικότητα των ομάδων κατηγοριών (τεχνικά, οικονομικά κ.λ.π) οι οποίοι καθορίζονται από εξειδικευμένους ανθρώπους της ναυτιλίας όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1.

Κεφάλαιο 3. Αξιολόγηση κύριων μηχανών

3.1 Κριτήρια αξιολόγησης

Τα κριτήρια αξιολόγησης πρέπει να επιλεγούν με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα ιδιοτήτων των μηχανών που εξετάζονται. Ενώ, πολλά από τα κριτήρια που θα τεθούν θα αποτελούνται από επιμέρους υποκριτήρια. Οι βασικές ομάδες αξιολόγησης (τεχνικά, οικονομικά, περιβάλλον, ιδιαιτερότητες καυσίμων, τεχνολογία) έχουν προέλθει τόσο με βάση την εκάστοτε βιβλιογραφία που υπάρχει διαθέσιμη όσο και βάση την άποψη ανθρώπων της ναυτιλίας όπως φαίνονται στο σχήμα 3-1 [10-12]. Σε αυτά τα κριτήρια εφαρμόζονται συντελεστές βαρύτητας ώστε το αποτέλεσμα στον τελικό δείκτη απόδοσης να είναι αξιόπιστο. Τέλος, οι συντελεστές βαρύτητας ορίζονται υποκειμενικά και για αυτό το λόγο εξετάζονται διαφορετικά σενάρια.



ΣΧΗΜΑ 3-1: Ιεραρχία κριτηρίων αξιολόγησης

Η αξιολόγηση θα γίνει για μηχανές που χρησιμοποιούν συμβατικό καύσιμο, LNG σε υψηλή πίεση, LNG σε χαμηλή πίεση, LPG, μεθανόλη, αμμωνία. Αυτό θα γίνει για μηχανές στα 11000 kW στο MCR όπου είναι μια συνηθισμένη επιλογή σε πλοία

και για λειτουργία εγχύσεως διπλού καυσίμου μέσω πιλοτικής έγχυσης. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μηχανές που θα επιλεγούν και ο κατασκευαστής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: Επιλογή μηχανών

Τύπος Μηχανής		Κατασκευαστής
Συμβατικό καύσιμο	8G50ME-C9.6-DI	MAN Energy Solutions
LNG σε υψηλή πίεση	8G50ME-C9.6-GI	MAN Energy Solutions
LNG σε χαμηλή πίεση	5G70ME-C10.5-GA	MAN Energy Solutions
	8X52DF-S2.0*	WinGD
LPG	8G50ME-C9.6-LGIP	MAN Energy Solutions
Μεθανόλη	8G50ME-C9.6-LGIM	MAN Energy Solutions
Αμμωνία	**	MAN Energy Solutions

*: Στην αξιολόγηση δε θα ληφθεί υπόψη η μηχανή της WinGD ώστε να προέρχονται όλες οι μηχανές από τον ίδιο κατασκευαστή για καλύτερη σύγκριση

** : Δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμα μηχανή με χρήση αμμωνίας διότι είναι σε ερευνητικό επίπεδο ακόμα από την MAN Energy Solutions

3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Με τα τεχνικά χαρακτηριστικά αξιολογούμε την απόδοση των κινητήρων σε θέματα κυρίως θερμοδυναμικής και κατανάλωσης καυσίμου. Τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί αποτελούν δεδομένα τόσο για Tier II όσο και για Tier III.

Στα τεχνικά χαρακτηριστικά θα εξεταστεί ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης των μηχανών ή αλλιώς το Heat rate όπου είναι αντιστρόφως ανάλογο του βαθμού απόδοσης και χρησιμοποιείται ως όρος στις dual fuel μηχανές όπου πραγματοποιείται κατανάλωση και πιλοτικού και εναλλακτικού καυσίμου. Το μέγεθος Heat rate δηλώνει την ενέργεια καυσίμου που καταναλώνεται στη μηχανή προκειμένου να παραχθεί 1 kWh ενέργεια πρόωσης.

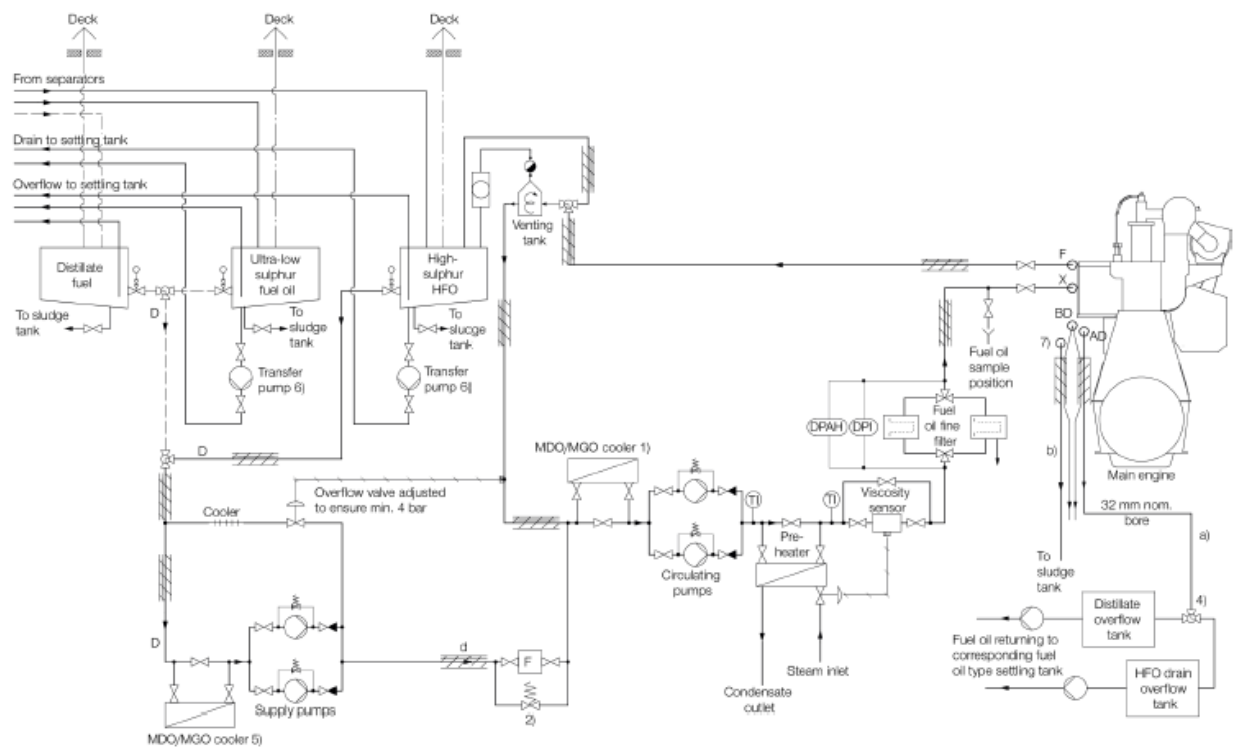
Επιπλέον θα εξεταστεί η ισχύς καυσαερίων που προκύπτει σε κάθε μηχανή. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές διατάξεις για την αξιοποίηση των καυσαερίων πριν αυτά εξέλθουν στην ατμόσφαιρα. Τα τελευταία χρόνια σε σχεδόν όλα τα πλοία ένα μέρος της ενέργειας των καυσαερίων τροφοδοτεί τον στροβιλο-υπερπληρωτή με σκοπό την αύξηση της παροχής αέρα καύσης στον κύλινδρο. Μια ακόμη συνήθης τακτική είναι να χρησιμοποιείται ενέργεια από τα καυσαέρια για τη

λειτουργία λέβητα (economizer) με στόχο την παραγωγή ατμού για διάφορες λειτουργίες του πλοίου. Η ενέργεια που παράγουν λοιπόν τα καυσάερια είναι ένας σημαντικός παράγοντας σύγκρισης των μηχανών.

Η κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου είναι μια σημαντική παράμετρος σύγκρισης καθώς είναι διαφορετική για κάθε είδος μηχανής. Σε όλες τις μηχανές που χρησιμοποιούνται εναλλακτικά καύσιμα χρησιμοποιείται πιλοτικό καύσιμο για έναρξη της καύσης και δημιουργία φλόγας για να καεί το βασικό καύσιμο που είναι χαμηλού σημείου ανάφλεξης.

Τέλος το πιο σημαντικό μέρος που αλλάζει σε κάθε μηχανή είναι το σύστημα τροφοδοσίας άρα και η ισχύς των επιπρόσθετων συστημάτων τα οποία είναι υπεύθυνα για την μεταφορά του καυσίμου από τη δεξαμενή στη μηχανή. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι βασικές διατάξεις των συστημάτων τροφοδοσίας καυσίμου για την κάθε μηχανή. Παρατηρείται ότι το σύστημα τροφοδοσίας στις μηχανές liquid injection (δηλαδή LPG, μεθανόλη, αμμωνία) είναι παρόμοιο όπως και το σύστημα στις gas injection (LNG υψηλής, χαμηλής πίεσης).

Στο συμβατικό σύστημα τροφοδοσίας το καύσιμο ξεκινάει από τη service tank (δεξαμενή υπηρεσίας) και οδηγείται σε μια ηλεκτρική supply pump (αντλία τροφοδοσίας) η οποία ανεβάζει την πίεση του καυσίμου στα 4 bar (χαμηλή πίεση ώστε να μην έχουμε αεριοποίηση στο venting box). Στη συνέχεια οδηγείται στην ηλεκτρική circulating pump (αντλία κυκλοφορίας) η οποία ανεβάζει την πίεση στα 10 bar. Τέλος πριν την εισαγωγή του καυσίμου στη μηχανή αυτό διέρχεται από ένα φίλτρο και έναν εναλλάκτη θερμότητας όπου καταλήγει στη μηχανή με μία πίεση 7-8 bar. Η έγχυση γίνεται μέσω του Hydraulic Cylinder Unit (HCU) το οποίο περιέχει τον actuator (επενεργητή) για την έγχυση του καυσίμου και το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής. Η διαδικασία αυτή φαίνεται σχεδιαγραμματικά στο σχήμα 3-2 [13].

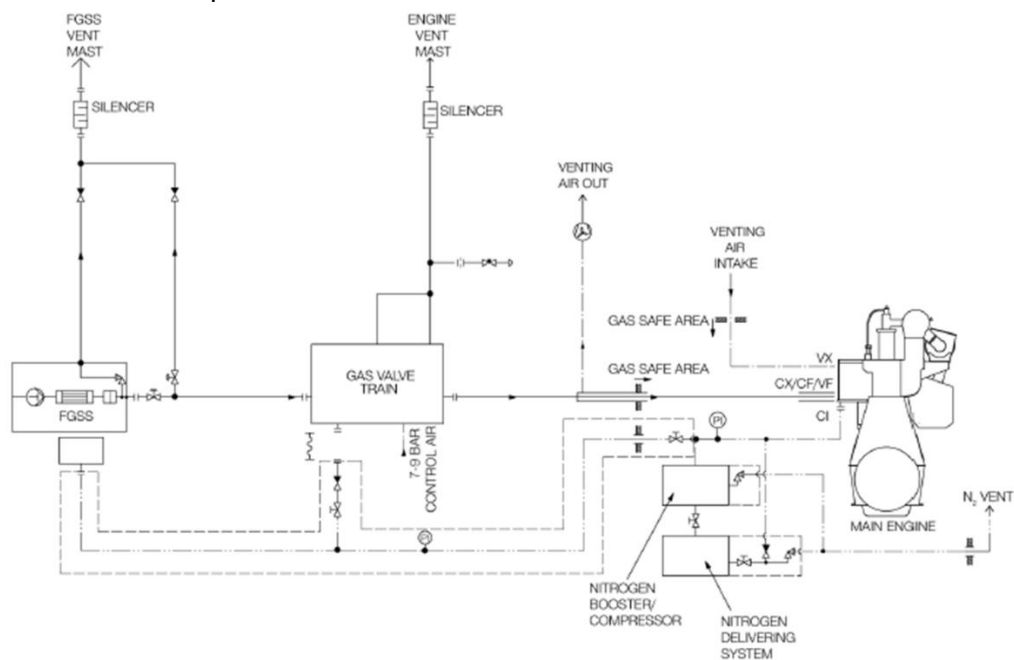


ΣΧΗΜΑ 3-2: Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου σε συμβατική μηχανή

Στις μηχανές έγχυσης καυσίμου σε αέρια μορφή το σύστημα κυκλοφορίας απαρτίζεται από 3 βασικά μέρη όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-3 [14].

- Fuel gas supply system (Σύστημα τροφοδοσίας αέριου καυσίμου) (FGSS) το οποίο είναι υπεύθυνο να οδηγήσει το καύσιμο από τη δεξαμενή αποθήκευσης στη GVT φτάνοντας το με μια υψηλή πίεση.
- Gas valve train (GVT) η οποία διαχωρίζει το FGSS από τη μηχανή κατά τη διάρκεια τερματισμού της μηχανής ώστε να προστατεύσει το πλοίο από τυχόν διαρροή του καυσίμου. Τοποθετείται συνήθως έξω από το μηχανοστάσιο ώστε να είναι προστατευμένη η διάταξη από το FGSS στο GVT σε περίπτωση φωτιάς αφού το μηχανοστάσιο είναι πιθανός χώρος έναρξης φωτιάς. Στο GVT γίνεται έλεγχος της ροής και της πίεσης του καυσίμου και περιέχονται βαλβίδες διαχωρισμού του FGSS με τη μηχανή.
- Βοηθητικά συστήματα για την ανίχνευση διαρροής και τον εξαερισμό.
 - Γίνεται ανίχνευση διαρροής καυσίμου στο εξωτερικό των σωληνώσεων.
 - Χρησιμοποιείται άζωτο για τον καθαρισμό του FGSS και των σωληνώσεων ανάμεσα στη GVT και τη μηχανή.

- Κατά τη διαδικασία εκκένωσης των σωληνώσεων από gas αντί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα υπάρχει ένα σύστημα που λαμβάνει το καύσιμο αυτό.



ΣΧΗΜΑ 3-3: Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου σε μηχανή Gas injection

Το σύστημα FGSS μπορεί να έχει αρκετές διαφορετικές διατάξεις ανάλογα τον τύπο του πλοίο και τον τρόπο αποθήκευσης τους καυσίμου. Μερικές βασικές διατάξεις παρουσιάζονται παρακάτω. Η πίεση τροφοδοσίας είναι 300 bar για τις υψηλής πίεσης μηχανές και 6-16 bar για τις χαμηλής πίεσης δεξαμενές

ΔΙΑΤΑΞΗ I

Χρησιμοποιείται συνήθως σε LNG carriers που υπάρχει μεγάλη ποσότητα boil-off-gas (δηλαδή LNG που έχει αεριοποιηθεί στο πάνω μέρος των δεξαμενών φορτίου) ώστε να είναι επαρκή για την τροφοδότηση της μηχανής. Αυτό το αέριο διέρχεται από ένα συμπιεστή ώστε να έχουμε μια συγκεκριμένη πίεση τροφοδοσίας.[Natural boil-off gas].

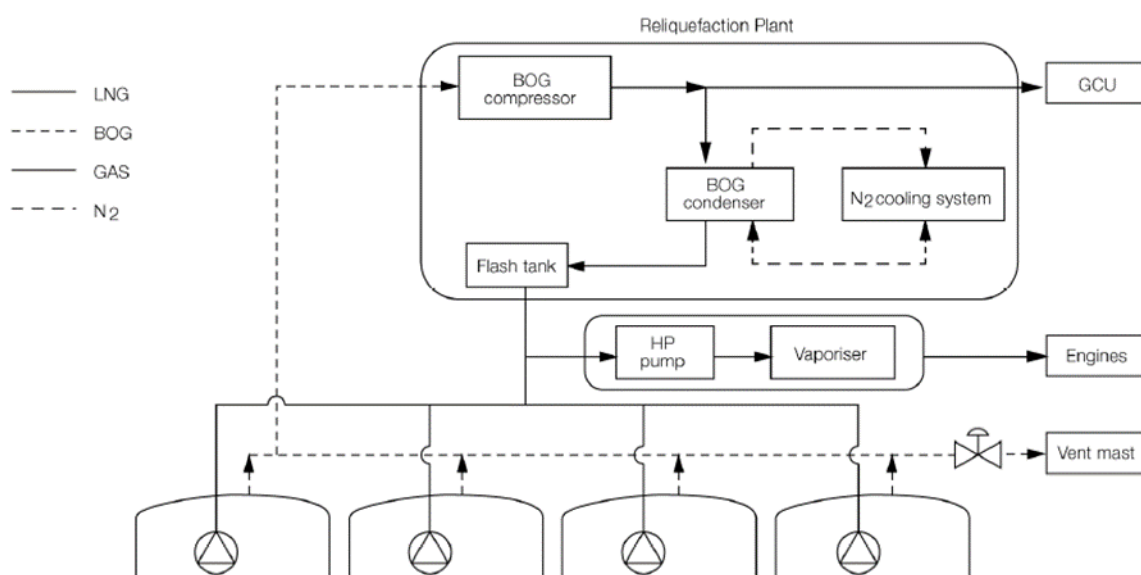
ΔΙΑΤΑΞΗ II

Από τις δεξαμενές LNG διέρχεται το υγρό στις κρυογενικές αντλίες και στη συνέχεια αεριοποιείται σε έναν vaporizer (ατμοποιητής) όπου κυκλοφορεί ένα μίγμα γλυκόλης/νερού πού θερμαίνει με κατάλληλο τρόπο το LNG το οποίο έχει πολύ μικρή θερμοκρασία ώστε να εισαχθεί στη μηχανή.[Forced boil-off gas].

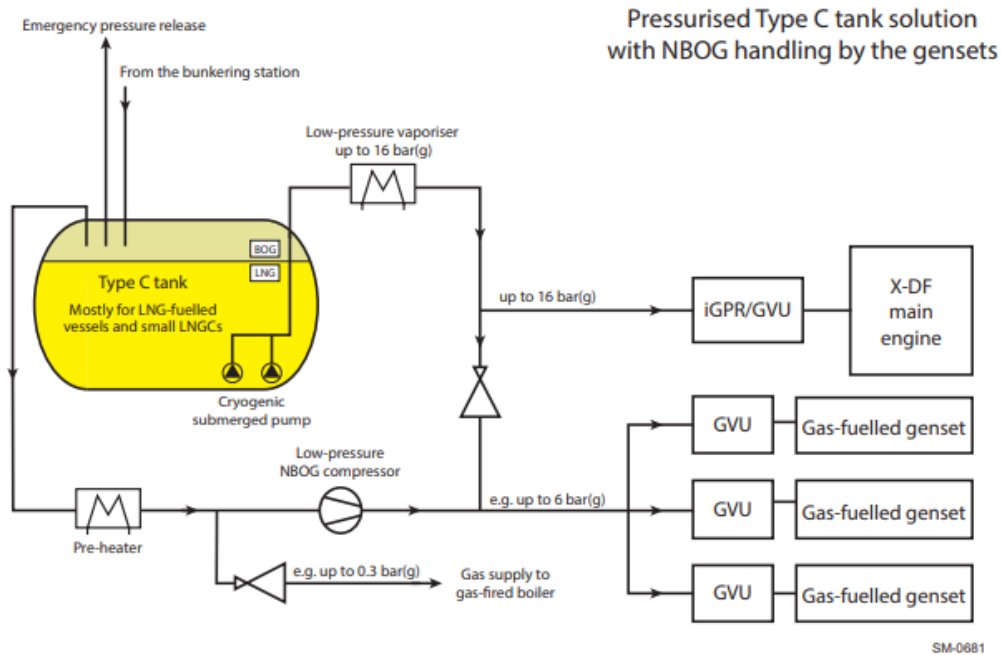
ΔΙΑΤΑΞΗ ΙΙΙ

Αυτή η διάταξη λειτουργεί σαν την πρώτη όμως έχουμε στις δεξαμενές συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) και όχι LNG. Το συμπιεσμένο φυσικό αέριο όμως καταλαμβάνει αρκετά περισσότερο όγκο σε σχέση με το LNG κάτι που το κάνει ασύμφορο.

Η πιο συνηθισμένη διάταξη είναι η δεύτερη όπου υπάρχουν δεξαμενές αποθήκευσης LNG. Βέβαια ακόμη και με αυτήν τη διάταξη παρατηρείται δημιουργία natural boil-off-gas. Για τη διαχείριση του BOG (boil-off gas) είτε θα χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα επανυγροποίησης το οποίο έχει θετικό οικονομικό αντίκτυπο όταν το πλοίο εκτελεί μικρές διαδρομές και η τιμή του LNG είναι μεγάλη (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1). Σε αυτήν την περίπτωση λόγω ασφάλειας υπάρχει ένα gas combustion unit στο οποίο οδηγείται το BOG σε περίπτωση που η πίεση στις δεξαμενές καυσίμου γίνει αρκετά υψηλή. Αλλιώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να τροφοδοτήσει τις ηλεκτρογεννήτριες μαζί με ένα μέρος από LNG κάτι που συμφέρει σε μεγάλα ταξίδια με το LNG να είναι σχετικά φθηνό (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2). Οι διατάξεις των δύο περιπτώσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 3-4, 3-5 [6,14].

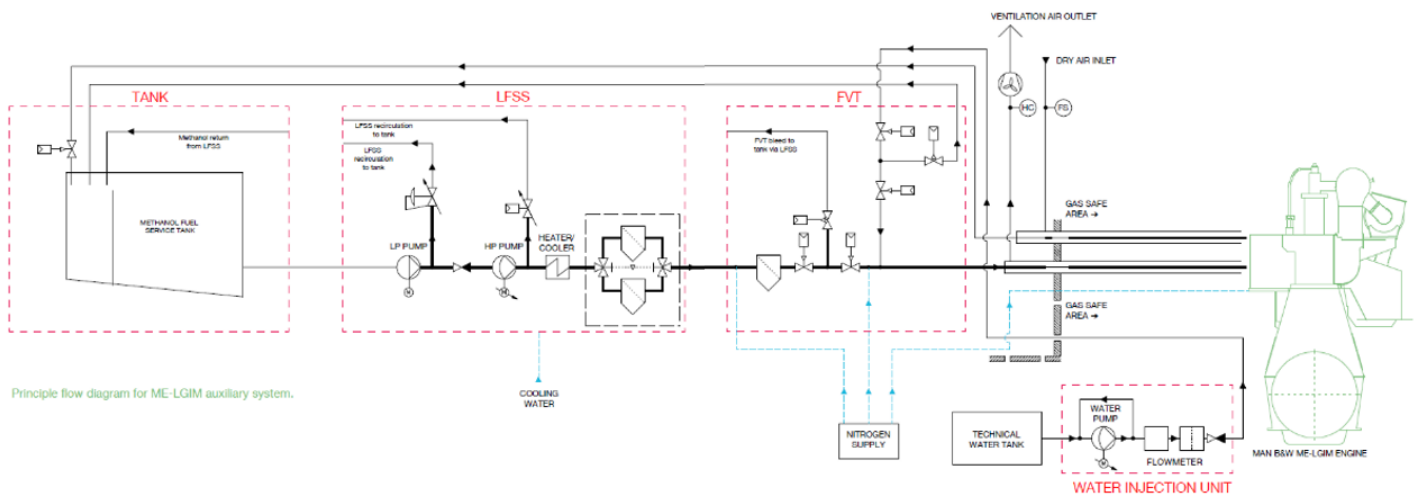


ΣΧΗΜΑ 3-4: Διαχείριση BOG μέσω επανυγροποίησης ή διοχέτευσης στο Gas Combustion Unit(GCU)



ΣΧΗΜΑ 3-5: Σύστημα διαχείρισης BOG μέσω διοχέτευσης στις ηλεκτρογεννήτριες στα 6 bar

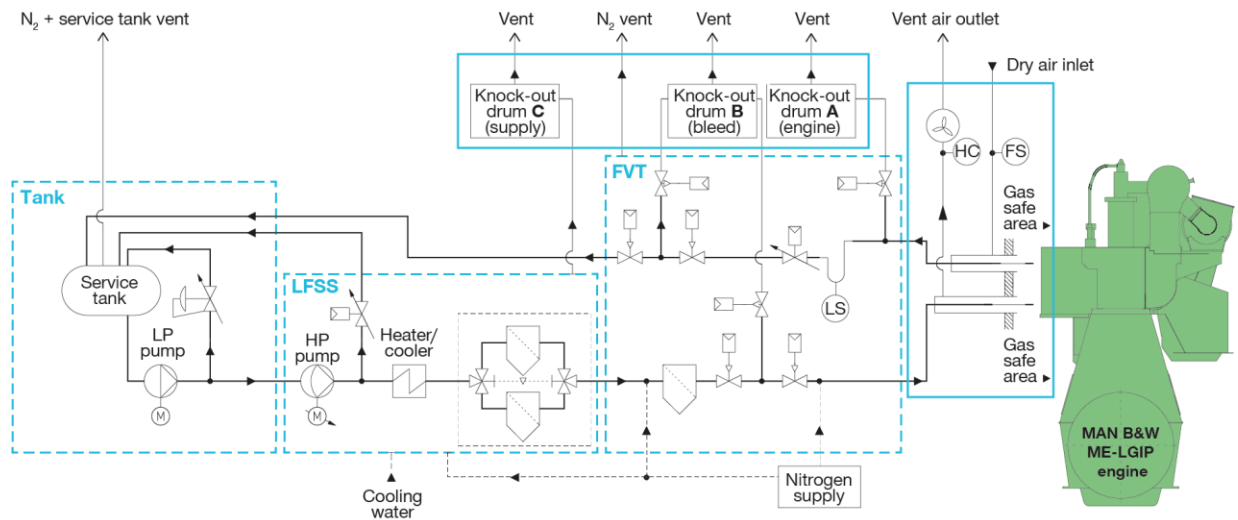
Οι μηχανές που χρησιμοποιούν ως καύσιμο μεθανόλη, LPG, αμμωνία έχουν κατάλληλα σχεδιασμένο σύστημα τροφοδοσίας ώστε το καύσιμο να βρίσκεται στην υγρή φάση. Και στα τρία καύσιμα οι βασικές αρχές του συστήματος είναι ίδιες με την σημαντική αλλαγή στην πίεση τροφοδοσίας όπου είναι 13 bar για τη μεθανόλη, 53 bar για το LPG και 80 bar για την αμμωνία. Το σύστημα τροφοδοσίας είναι σχεδιασμένο όπως ένα κλασικό fuel oil system. Το καύσιμο διέρχεται από μια χαμηλής πίεσης και μια υψηλής πίεσης αντλία. Το καύσιμο για να διαβεβαιωθεί ότι παραμένει ρευστό (χρήση LPG, αμμωνία) και στην κατάλληλη θερμοκρασία εισαγωγής στον κινητήρα περνάει από έναν heater/cooler για να αποκτήσει συγκεκριμένη θερμοκρασία. Μετά την επιστροφή του καυσίμου από τις σωληνώσεις στη service tank οι σωληνώσεις διοχετεύονται με inert gas (άζωτο) για τον καθαρισμό τους και λειτουργεί το σύστημα εξαερισμού (vent masts με knock-out drums) όπως και στις μηχανές με αέριο καύσιμο. Επίσης και σε αυτές τις μηχανές υπάρχει η Fuel valve train η οποία λειτουργεί και αυτή όπως στις μηχανές με αέριο καύσιμο.



ΣΧΗΜΑ 3-6: Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου στις ME-LGIM μηχανές(μεθανόλη)

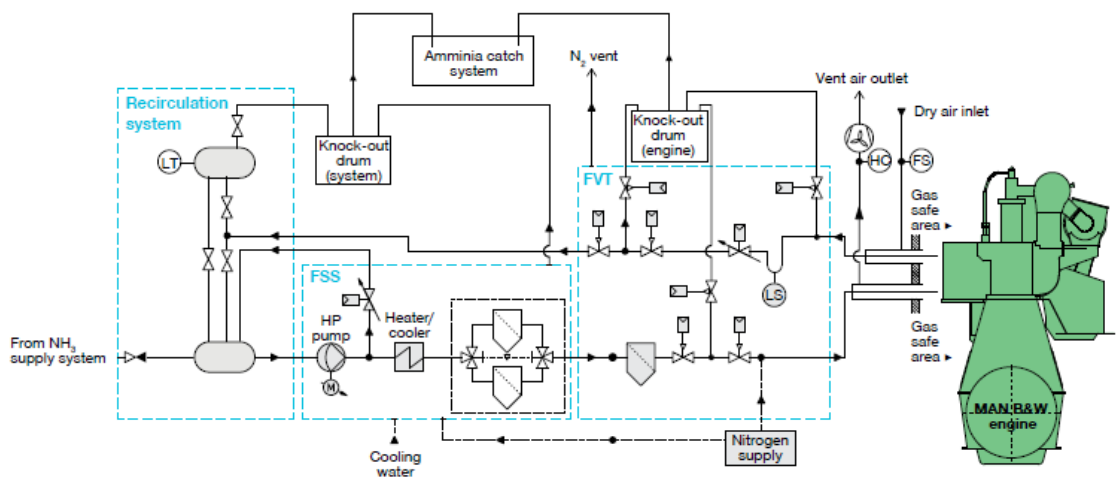
Το σύστημα όταν λειτουργεί με καύσιμο μεθανόλης (LGIM) χρησιμοποιείται διοχέτευση νερού στη μεθανόλη (LGIM-W) ώστε να μειώσει τη θερμοκρασία καύσης άρα και τα NO_x. Το μίγμα μεθανόλης νερού μεταφέρεται μέσω της Fuel valve train μέσα στη μηχανή. Έχει παρατηρηθεί ότι 25-40% του μίγματος νερό και 5% πιλοτικό καύσιμο οδηγεί σε συμμόρφωση με το Tier III χωρίς να χρειάζεται SCR ή EGR. Επιπλέον σύμφωνα με την MAN η δεξαμενή της μεθανόλης είναι χωρισμένη με μία φρακτή σε δύο μέρη, όπου η μισή είναι η supply tank (δεξαμενή τροφοδοσίας) και η άλλη η drain tank (δεξαμενή αποστράγγισης) στην οποία επιστρέφει η μεθανόλη που δε χρησιμοποιείται αλλά αναμιγμένη με sealing oil (λιπαντικό στεγανοποίησης) από το μπεκ έγχυσης καυσίμου το οποίο στραγγίζεται προς την slop tank [15].

Από την άλλη αυτό δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στις μηχανές που χρησιμοποιούν LPG ή αμμωνία καθώς βρίσκονται σε υγρή μορφή όταν βρίσκονται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια αναλυτικότερα. Στα σχήματα 3-7 και 3-8 παρουσιάζονται τα συστήματα τροφοδοσίας LPG και αμμωνίας [16],[17].



ΣΧΗΜΑ 3-7: Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου στις ME-LGIP μηχανές(LPG)

Οι βασικές διαφορές της αμμωνίας με τη τροφοδοσία του LPG είναι ο διαβρωτικός χαρακτήρας, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, η πίεση τροφοδοσίας (80 bar) και η τοξικότητα της αμμωνίας που δεν επιτρέπει τη διαφυγή της στην ατμόσφαιρα μέσω εξαέρωσης(vent). Το καύσιμο διέρχεται από μια αντλία υψηλής πίεσης και αποκτά την επιθυμητή θερμοκρασία μέσω του heater/cooler. Υπάρχει και το σύστημα ανακυκλοφορίας της αμμωνίας όπως φαίνεται παρακάτω[17].



ΣΧΗΜΑ 3-8: Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου αμμωνίας

3.3 Οικονομικά δεδομένα

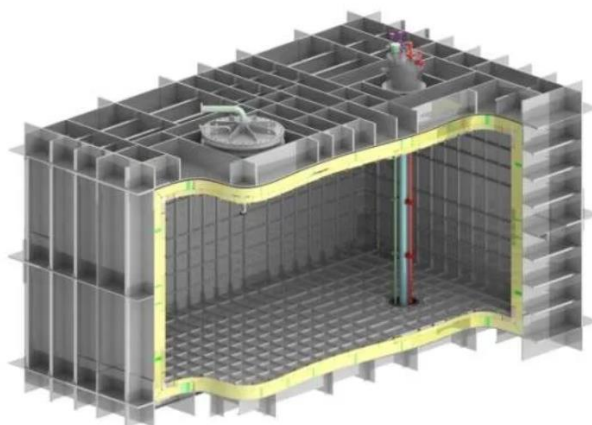
Όπως έχει ήδη αναφερθεί μια μελλοντική λύση για το “δρόμο” προς την απανθρακοποίηση είναι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Αυτό θα οδηγήσει σε συμμόρφωση με τους εκάστοτε κανονισμούς αλλά και σε βελτίωση του περιβάλλοντος μέσω της μείωσης βλαβερών εκπομπών. Οι τεχνολογίες όμως οι οποίες οδεύουν σε εφαρμογή είναι αναγκαίο να είναι οικονομικά βιώσιμες λύσεις. Κάποιες νέες τεχνολογίες ενδείκνυται να είναι πιο ακριβές σε θέματα εγκατάστασης ή και σε λειτουργικά έξοδα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες που είναι πλέον διαδεδομένες. Το ζητούμενο όμως είναι να μείνουν σε λογικά επίπεδα ώστε να μην είναι οικονομικά απαγορευτικές. Βέβαια, τα οικονομικά δεδομένα μεταβάλλονται συνεχώς και ειδικά τα τελευταία χρόνια όπου ο πλανήτης είναι σε μια ασταθή οικονομική κατάσταση. Γι’ αυτόν το λόγο οι εκτιμήσεις δεν είναι απόλυτα ακριβείς αλλά είναι χρήσιμο να γίνει μια οικονομική εκτίμηση και να αναφερθούν τυχόν προβλήματα της κάθε τεχνολογίας.

Ένα από τα πρώτα θέματα που πρέπει να συγκρίνουμε είναι η διαμόρφωση των τιμών καυσίμων καθώς είναι ένα έξοδο που αντιμετωπίζεται καθημερινά και καταλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος των λειτουργικών εξόδων ενός πλοίου. Στα καύσιμα υπάρχει πλέον μεγάλη αστάθεια τα τελευταία χρόνια και γενικά υψηλή τιμή τους τον τελευταίο καιρό. Επιπλέον μεγάλο ζήτημα προκύπτει για το ποσό που θα πρέπει να καταβάλλεται στο μέλλον για κάθε τόνο διοξειδίου του άνθρακα που εκλύεται στην ατμόσφαιρα. Αυτό το μέτρο θα ξεκινήσει να εφαρμόζεται τα επόμενα χρόνια χωρίς να υπάρξει κάποια σταθερή τιμή. Η τιμή ανά τόνο CO₂ φαίνεται να βρίσκεται σύμφωνα με τις φιλοδοξίες του IMO από USD 22/tCO₂ έως 95/tCO₂ σε χρονικό ορίζοντα 2023-2030 ενώ από το 2030-2050 φαίνεται να φθάνει έως USD 135/tCO₂ [18].

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι πλέον το ζήτημα της οικονομίας του καυσίμου γίνεται αρκετά σύνθετο για το μέλλον και θα ωφεληθούν τα καύσιμα τα οποία εκπέμπουν τη λιγότερη ποσότητα CO₂ στον πλανήτη. Άρα τα συμβατικά καύσιμα αν και είναι οικονομικότερα κατά κύριο λόγο αυτά τα χρόνια, στο μέλλον η τιμή τους θα αυξάνεται όπως θα αυξάνεται και το ποσό για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ενώ το αντίστροφο θα ισχύει για τα περισσότερα πράσινα καύσιμα τα οποία έρχονται στο προσκήνιο.

Πάνω σε ένα ακόμα ζήτημα όπου θα γίνει κάποια σύγκριση είναι το κόστος εγκατάστασης των δεξαμενών καυσίμου. Αυτό το κόστος είναι αρκετά σημαντικό για κάθε καύσιμο και εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες. Καταρχάς κάθε καύσιμο καταλαμβάνει διαφορετικό όγκο για ίδια ενέργεια. Άρα λοιπόν κάποιο εναλλακτικό καύσιμο χρειάζεται μεγαλύτερες δεξαμενές ώστε να πλέει με ασφάλεια το πλοίο και

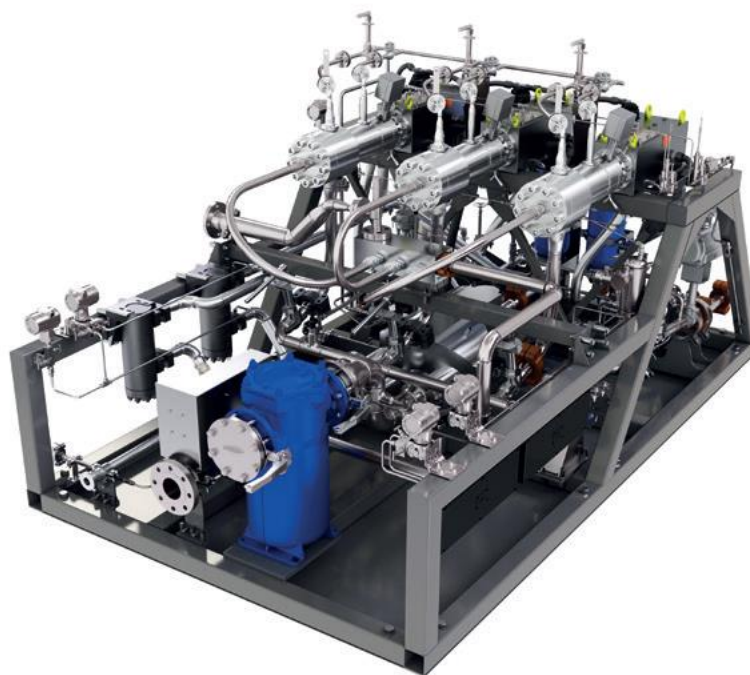
να μην υπάρξει έλλειψη καυσίμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την διαφορετική σχεδίαση και διάταξη των δεξαμενών καυσίμου αλλά και το κατ'εξοχήν μεγαλύτερο κόστος αυτών. Αυτή η παράμετρος θα αναλυθεί διεξοδικά στην ομάδα της τεχνολογίας και συγκεκριμένα στο κριτήριο της ενεργειακής πυκνότητας. Μια δεύτερη παράμετρος και η πιο σημαντική είναι το είδος της δεξαμενής με γνώμονα τις συνθήκες αποθήκευσης του καυσίμου. Για παράδειγμα σε καύσιμα όπως το LNG, LPG και η αμμωνία οι δεξαμενές καυσίμου πρέπει να είναι αρκετά καλά μονωμένες ώστε να διατηρούν μία χαμηλή θερμοκρασία ή υψηλή πίεση στα καύσιμα. Καταλήγουμε λοιπόν ότι ανάλογα το καύσιμο διαφοροποιείται η κατασκευή της δεξαμενής και έτσι αλλάζει και το κόστος τους. Στο σχήμα 3-9 φαίνεται η κατασκευή μια δεξαμενής LNG[19].



ΣΧΗΜΑ 3-9: Διάταξη δεξαμενής LNG

Ένα ακόμα σημαντικό οικονομικό ζήτημα είναι το κόστος της μηχανής το οποίο σε αντίθεση με το κόστος καυσίμου δεν αποτελεί ένα τίμημα που καλύπτει ο πλοιοκτήτης καθημερινά αλλά είναι ένα μεγάλο τίμημα που καλύπτεται μία φορά. Οι τιμές στις μηχανές αλλάζουν τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μια σταθερή τιμή κάτι το οποίο βέβαια εξαρτάται και από το ναυπηγείο που κατασκευάζει το πλοίο. Μέσα στο κόστος της μηχανής περιλαμβάνεται και το κόστος του συστήματος τροφοδοσίας του καυσίμου το οποίο είναι ένα σημαντικό ποσό. Σε κάθε είδος μηχανής το σύστημα τροφοδοσίας είναι διαφορετικό και πιο πολύπλοκο από ένα συμβατικό σύστημα τροφοδοσίας. Το πιο περίπλοκο και ακριβό σύστημα τροφοδοσίας σαν μια πρώτη εκτίμηση φαίνεται να είναι το σύστημα τροφοδοσίας της μηχανής με LNG καύσιμο υψηλής πίεσης. Το συγκεκριμένο σύστημα περιέχει ως βασικό εξοπλισμό αντλίες θετικής εκτοπίσεως οι οποίες μεταφέρουν το LNG από τη δεξαμενή στο FGSS, κρουγενικές αντλίες υψηλής πίεσης

οι οποίες αυξάνουν την πίεση του LNG στα 300 bar και σε συνδυασμό με έναν high pressure vaporizer (ατμοποιητή υψηλής πίεσης) εισάγεται το καύσιμο στη μηχανή(PVU: Pump Vaporizer Unit). Επιπλέον, περιέχει μια αντλία θετικής εκτοπίσεως και μία αντλία υψηλής πίεσης η οποία μεταφέρει το μίγμα γλυκόλης νερού στον vaporizer για την αεριοποίηση του LNG. Το μεγαλύτερο κόστος αυτού του συστήματος είναι το PVU και γι' αυτό το λόγο το σύστημα αυτό είναι αρκετά πιο ακριβό από τα άλλα συστήματα εναλλακτικών καυσίμων[5].



ΣΧΗΜΑ 3-10: Pump Vaporizer Unit(PVU)

Αν η μηχανή διαθέτει και σύστημα επανυγροποίησης του καυσίμου τότε το κόστος και η πολυπλοκότητα αυξάνεται αρκετά καθώς είναι αναγκαία η εγκατάσταση ενός συμπυκνωτή. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο εξοπλισμός για το σύστημα τροφοδοσίας μιας μηχανής εναλλακτικών καυσίμων και ειδικά LNG είναι ένα μεγάλο πρόσθετο κόστος.

Ένα τελευταίο και αρκετά σημαντικό οικονομικό δεδομένο που θα αξιολογηθεί είναι το κόστος συντήρησης των μηχανών. Αυτό το κριτήριο μαζί με το κόστος καυσίμου αποτελούν τα λειτουργικά έξοδα που χρειάζονται για τη μηχανή. Ένα τέτοιο νούμερο δεν γίνεται να είναι ακριβές διότι πάντα προκύπτουν ζητήματα και βλάβες στις μηχανές που δεν είναι προγραμματισμένες. Σε αυτό το κριτήριο θα συμπεριληφθούν ποιοτικά τα βασικά κόστη συντήρησης όπως τα απαραίτητα

ανταλλακτικά τα οποία πρέπει να υπάρχουν πάνω στο πλοίο, τις απαραίτητες συντηρήσεις που πρέπει να γίνονται από το πλήρωμα αλλά και τους απαραίτητους ελέγχους που συμβαίνουν από εξειδικευμένους service engineers των κατασκευαστών. Όπως προαναφέρθηκε αυτή η αξιολόγηση θα γίνει ποιοτικά σύμφωνα με σχετική βιβλιογραφία διότι είναι αδύνατο να είναι ποσοτικό αυτό το κριτήριο σε επίπεδο διπλωματικής εργασίας.

3.4 Περιβαλλοντολογική Απόδοση

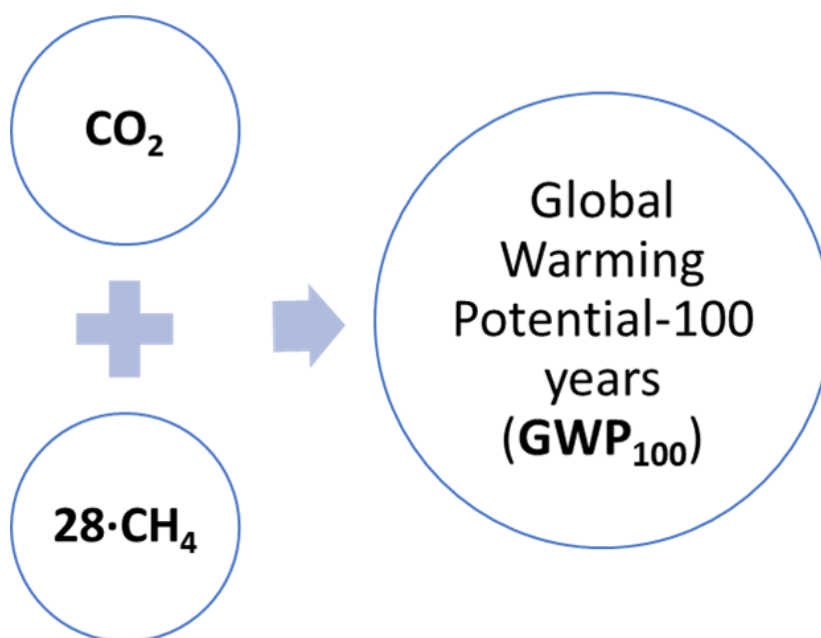
Το περιβάλλον είναι ο βασικότερος λόγος που πρέπει η ναυτιλία να οδηγηθεί στην απανθρακοποίηση. Οι βλαβερές ουσίες που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις για τα επόμενα χρόνια. Οι κανονισμοί του IMO έχουν επικεντρωθεί στην μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα καθώς θεωρείται ρύπος του θερμοκηπίου. Βέβαια εκπέμπονται και άλλων ειδών βλαβερές ουσίες οι οποίες προκαλούν στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία δυσάρεστες επιπτώσεις. Οι βασικές εκπομπές που εκπέμπονται από έναν ναυτικό κινητήρα και θα εξεταστούν είναι εκπομπές που επηρεάζουν την υπερθέρμανση του πλανήτη, τα οξείδια του αζώτου και τα οξείδια του θείου. Η ανάλυση και η σύγκριση των παραπάνω εκπομπών θα γίνει για την χρονική περίοδο κατά την καύση των καυσίμων στην κύρια μηχανή του πλοίου (tank-to-propeller) χωρίς να λάβουμε υπόψη τις εκπομπές που παράγονται κατά την παραγωγή και τη μεταφορά του καυσίμου (well-to-tank).

Οι βασικοί ρύποι που επηρεάζουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη και παρατηρούνται ως εκπομπές από τις μηχανές είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), άκαυστο μεθάνιο (CH_4), υποξείδιο του αζώτου (N_2O). Κάθε ένα από αυτά τα αέρια επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο το περιβάλλον. Συγκεκριμένα το άκαυστο μεθάνιο επηρεάζει το περιβάλλον σχετικά με την υπερθέρμανση του πλανήτη 28 φορές περισσότερο σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα σε βάθος 100 ετών. Για να γίνει λοιπόν η σύγκριση με σωστά και αξιόπιστα αποτελέσματα αυτό το γεγονός θα ληφθεί υπόψη μέσω του Global Warming Potential για 100 χρόνια (GWP-100). Αυτός ο όρος ουσιαστικά δηλώνει την θερμότητα που απορροφάται από οποιοδήποτε αέριο του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα ως πολλαπλάσιο της θερμότητας που απορροφάται από το CO_2 . Αρκετές ποσότητες αέριων του θερμοκηπίου που υπάρχουν στις μηχανές είναι το CO_2 , το άκαυστο μεθάνιο στις μηχανές που χρησιμοποιούν ως καύσιμο LNG που περιέχει πάνω από 90% ποσότητα μεθανίου και υποξείδιο του αζώτου που οι εκπομπές είναι πολύ λίγες εκτός από την μηχανή με καύσιμο αμμωνία. Το μεθάνιο που διαφεύγει άκαυστο από μηχανές LNG είναι ένα σοβαρό πρόβλημα που

αντιμετωπίζουν αυτές οι μηχανές καθώς είναι ένα αέριο που είναι πολύ βλαβερό για την ατμόσφαιρα. Στις μηχανές παρατηρείται methane slip δύο ειδών:

- Direct Slip (Απευθείας διαφυγή). Είναι το μεθάνιο που διαφεύγει από τον κύλινδρο πριν την καύση είτε από τις θυρίδες σάρωσης περνώντας περιμετρικά του εμβόλου και των ελατηρίων του είτε από την βαλβίδα εξαγωγής. Παρατηρείται αρκετή ποσότητα στις μηχανές LNG με κύκλο Otto
- Combustion Slip (Διαφυγή καύσης). Είναι το μεθάνιο που διαφεύγει ως ένα μέρος από το καύσιμο μετά την καύση που δεν έχει καεί. Αυτό γίνεται λόγω της μερικής καύσης του καυσίμου με τον αέρα. Παρατηρείται και στις δύο είδους μηχανές LNG(Otto και Diesel).

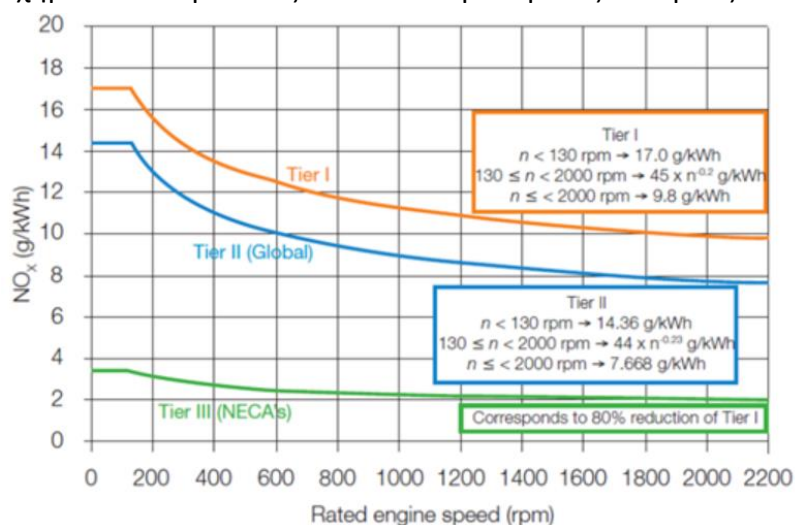
Έτσι λοιπόν η αξιολόγηση αυτού του κριτηρίου θα γίνει με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 3-11.



ΣΧΗΜΑ 3-11: Τρόπος υπολογισμού GWP-100

Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου επιδρούν αρνητικά στο περιβάλλον καθώς ευθύνονται για την όξινη βροχή, τη μειωμένη ορατότητα και στην καταστροφή της στρατόσφαιρας. Επιπλέον σημαντικές επιπτώσεις έχει στον άνθρωπο καθώς ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις προκαλεί αναπνευστικά προβλήματα. Μέσω του IMO διέπονται από κανονισμούς καθώς έχουν αναπτυχθεί Emission Control Areas στις οποίες τα οξείδια του αζώτου πρέπει να είναι μειωμένα ανάλογα με τις στροφές της

μηχανής (Tier III) αλλά και μειωμένα ανεξάρτητα την περιοχή πλεύσης του πλοίου(Tier II). Στο σχήμα 3-12 παρουσιάζονται οι επιτρεπόμενες εκπομπές NO_x [20].



ΣΧΗΜΑ 3-12: NO_x limits

Βέβαια όλες οι μηχανές ικανοποιούν το Tier II χωρίς κάποια πρόσθετη τεχνολογία ενώ σε όλες εκτός από τις LNG μηχανές με κύκλο Otto χρησιμοποιείται είτε SCR είτε EGR για την επίτευξη του Tier III. Κάποιες είναι αναγκαίο να χρησιμοποιούν ένα από τα δύο αυτά συστήματα γεγονός που είναι αρνητικό σε σχέση με μηχανές που έχουν και τις δύο επιλογές. Επιπλέον μόνο η μηχανή που χρησιμοποιεί μεθανόλη μπορεί να χρησιμοποιήσει σύστημα water injection για τη μείωση των εκπομπών NO_x. Άρα η αξιολόγηση θα γίνει με βάση τις δυνατότητες που μας δίνεται να επιλέξουμε τεχνολογία μείωσης NO_x.

Οι εκπομπές οξειδίων του θείου επιδρούν αρνητικά τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη υγεία καθώς προκαλούν όξινη βροχή που είναι επιβλαβής στο νερό και προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα. Ο IMO έχει θέσει κανονισμούς τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και σε συγκεκριμένες περιοχές του κόσμου. Συγκεκριμένα από το 2020 και μετά τα καύσιμα πρέπει να έχουν περιεκτικότητα σε θείο όση φαίνεται στον πίνακα 3-2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: Επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε θείο

Ημερομηνία εφαρμογής	Όριο περιεχομένου θείου στα καύσιμα(% m/m)	
	Εντός ECA (SECA)	Παγκόσμιο
2020	0.1 %	0.5%

Έτσι καθιερώθηκε η χρήση καυσίμου VLSFO(Very Low Sulphur Fuel Oil) με περιεκτικότητα σε θείο 0.5% όπου με βάση αυτό θα γίνει η αξιολόγηση των μηχανών. Βέβαια υπάρχει επιπλέον η επιλογή χρήσης HFO(Heavy Fuel Oil) όμως με χρήση scrubber για κατακράτηση του θείου από τα καυσαέρια. Τα εναλλακτικά καύσιμα που εξετάζονται δεν περιέχουν καθόλου θείο όμως στα καυσαέρια των κινητήρων περιέχονται οξείδια του θείου λόγω της κατανάλωσης πλοτικού καυσίμου. Η αξιολόγηση λοιπόν θα γίνει με βάση την ποσότητα πλοτικού καυσίμου που χρησιμοποιείται στις διάφορες τεχνολογίες.

3.5 Ιδιαιτερότητες καυσίμων

Για να υπάρξει μια σωστή σύγκριση μεταξύ των κινητήρων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα βασικά χαρακτηριστικά των καυσίμων τα οποία επηρεάζουν τόσο την τροφοδότηση της μηχανής ή την αποθήκευσή τους στο πλοίο όσο και την μεταφορά αυτών από τις εγκαταστάσεις παραγωγής στο πλοίο.

Η ασφάλεια των καυσίμων είναι ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει κάποιο καύσιμο για να χρησιμοποιηθεί σε πλοίο. Όπως είναι αντιληπτό το πλοίο πλέει συνήθως σε ωκεανούς μακριά από την ξηρά με αποτέλεσμα να είναι υπερβολικά δύσκολη κάποια εξωτερική βοήθεια πάνω σε αυτό. Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι τα καύσιμα ή γενικότερα οι τεχνολογίες όπου θα εγκατασταθούν πάνω σε ένα πλοίο πρέπει να είναι ασφαλείς ως προς το πλήρωμα αλλά και ως προς το πλοίο. Για να έχουμε μια όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη σύγκριση μπορούμε, θα κατηγοριοποιήσουμε την ασφάλεια σε 5 ποσοτικά υποκριτήρια όπως φαίνεται στο σχήμα 3-13.



ΣΧΗΜΑ 3-13: Ποσοτική κατηγοριοποίηση της Ασφάλειας των καυσίμων

Σε αυτά τα υποκριτήρια θα δοθούν συντελεστές βαρύτητας από ανθρώπους της ναυτιλίας με γνώμονα πρωτίστως την ανθρώπινη ασφάλεια πάνω στο πλοίο. Παρακάτω εξηγούνται τα υποκριτήρια του σχήματος 3-13[21].

- Όρια αναφλεξιμότητας: Η ανώτερη και κατώτερη περιεκτικότητα καυσίμου σε αέρα όπου μπορεί να αναπτυχθεί καύση αν υπάρχει μια παραγωγή φλόγας.
- Θερμοκρασία αυτανάφλεξης: Η χαμηλότερη θερμοκρασία όπου μπορεί να αναφλεγεί αυθόρμητα το καύσιμο σε μια κανονική ατμόσφαιρα χωρίς την παρουσία σπινθήρα ή φλόγας.
- Σημείο ανάφλεξης: Η κατώτερη θερμοκρασία όπου μπορεί να δημιουργηθεί έκρηξη παρουσία φλόγας.
- Κρυογενικό: Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία του καυσίμου τόσο χαμηλότερη θα είναι η θερμοκρασία στην μεταλλική κατασκευή των δεξαμενών αλλά και των σωληνώσεων που κυκλοφορεί το καύσιμο. Αυτό εγείρει προβλήματα σε περίπτωση λάθους του πληρώματος καθώς μπορεί να προκληθεί κάποιο έγκραμα από τις παγωμένες επιφάνειες με αποτέλεσμα τον τραυματισμό κάποιου ανθρώπου. Επιπλέον η χαμηλή θερμοκρασία αυξάνει την ψαθυρότητα του χάλυβα με αποτέλεσμα να είναι πιθανή η αύξηση κάποιας ρωγμής χωρίς πλαστική παραμόρφωση (προειδοποίηση).
- Τοξικότητα: Η τοξικότητα μπορεί να είναι με άμεση ή με έμμεση επαφή με τον άνθρωπο. Όλα τα καύσιμα δεν έχουν θέμα τοξικότητας εκτός από την μεθανόλη και ακόμη παραπάνω την αμμωνία.

Ένα ζήτημα που προκύπτει είναι το πως θα γίνει η αξιολόγηση στα όρια της αναφλεξιμότητας του καυσίμου[22]. Για να αξιολογηθούν τα όρια αναφλεξιμότητας πρέπει να κατασκευαστεί ένας δείκτης όπου να αναπαριστά τη πιθανότητα ανάφλεξης του μείγματος αέρα καυσίμου αλλά και το μέτρο των κινδύνων που μπορεί να προκληθούν σε μια τέτοια καύση. Η πιθανότητα ανάφλεξης εξαρτάται από το πόσο μεγάλο είναι το εύρος των ορίων άρα και πιο πιθανό να έχουμε σχηματισμό κάποιας σύστασης που είναι μέσα σε αυτό το όριο. Από την άλλη όμως όσο μικρότερο είναι το κατώτερο όριο ανάφλεξης τόσο πιο εύκολα παράγεται ανάφλεξη. Συνεπώς η πιθανότητα εξαρτάται και από το εύρος των ορίων όσο και από το κατώτερο όριο ανάφλεξης. Άρα προκύπτει ο παρακάτω δείκτης [22].

$$\frac{(U L)^{0.5} - L}{L} = (U/L)^{0.5} - 1 \quad (3.5.1)$$

Όπου:

U: Άνω όριο αναφλεξιμότητας

L: Κάτω όριο αναφλεξιμότητας

Το μέτρο των κινδύνων που μπορεί να υπάρξει σε περίπτωση καύσης μπορεί να προσδιοριστεί από την ποσότητα ενέργειας που εκλύεται κατά την καύση ανά μονάδα μάζας καυσίμου. Αυτό προσδιορίζεται από τον λόγο Q/M με

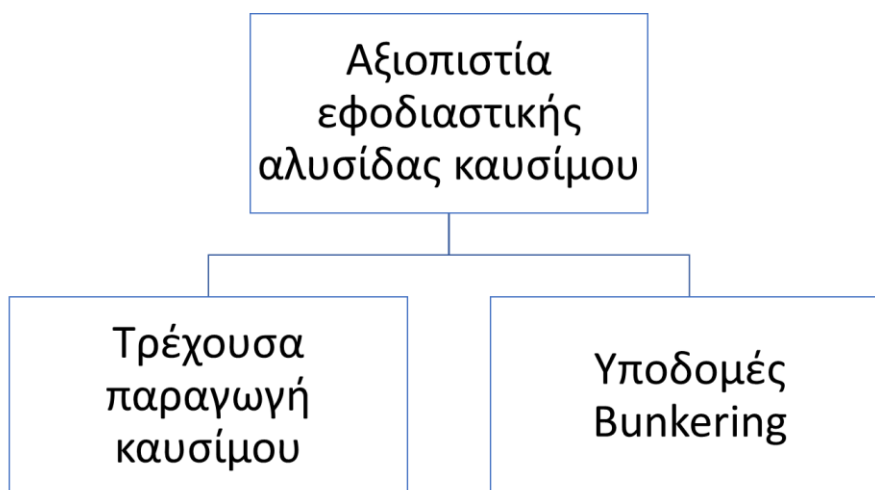
Q: Ενέργεια που εκλύεται από την καύση[kJ/mol]

M: Μοριακό βάρος καυσίμου [gr/mol]

Έτσι συνδέοντας τα παραπάνω παράγεται ένας δείκτης όπως φαίνεται παρακάτω.

$$RF = [(U/L)^{0.5} - 1] \cdot \frac{Q}{M} \quad (3.5.2)$$

Η αξιοπιστία τροφοδοσίας του καυσίμου αν και είναι ένας εξωτερικός παράγοντας όπου δεν εμπλέκεται η μηχανή που χρησιμοποιεί το καύσιμο ή το πλοίο είναι αρκετά σημαντικό να υπάρχει για την ενδεχόμενη χρήση κάποιας τεχνολογίας. Όπως και στην ασφάλεια έτσι και εδώ θα χρησιμοποιηθούν 2 υποκατηγορίες για την σωστή αξιολόγηση της. Αυτές οι υποκατηγορίες παρουσιάζονται στο σχήμα 3-14.



ΣΧΗΜΑ 3-14: Ποιοτική κατηγοριοποίηση της αξιοπιστίας της εφοδιαστικής αλυσίδας

- Τρέχουσα παραγωγή καυσίμου: Σε αυτό το υποκριτήριο λήφθηκε υπόψη η ποσότητα καυσίμων που παράγεται και εμπορεύεται αλλά και η τάση παραγωγής για τα επόμενα χρόνια ενσωματώνοντας διαφορετικούς τρόπους παραγωγής.
- Υποδομές Bunkering: Λήφθηκε υπόψη ο αριθμός και ο τύπος εγκαταστάσεων τροφοδοσίας των πλοίων με τα εν' λόγω καύσιμα αλλά και οι μελλοντικές βλέψεις αυτών.

Ένα ακόμη κριτήριο για τις ιδιαιτερότητες των καυσίμων είναι η αναπτυγμένη νομοθεσία και η ύπαρξη κανόνων από διάφορους νηογνώμονες. Ο βασικός κώδικας

που αναφέρεται σε καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης όπως αυτά που μελετώνται είναι ο IGF code (International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels). Επιπλέον έχουν κυκλοφορήσει κανόνες και συμβουλές από διάφορους νηογνώμονες. Στην παρούσα διπλωματική θα εξεταστούν κανονισμοί από τους παρακάτω νηογνώμονες.

- American Bureau of Shipping (ABS)
- Bureau Veritas (BV)
- Det Norske Veritas (DNV)
- Lloyd's Register (LR)

Η ενεργειακή πυκνότητα ενός καυσίμου είναι η ενέργεια που καταλαμβάνει αυτό σε 1 κυβικό μέτρο m^3 . Ενώ η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου είναι η ενέργεια που καταλαμβάνει αυτό σε 1 kg.

Η ενεργειακή πυκνότητα του καυσίμου είναι ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει το σχεδιασμό του πλοίου αλλά και την τεχνολογία ανάπτυξης μιας δεξαμενής αποθήκευσης του. Είναι πολύ σημαντικό ζήτημα μια μηχανή με χρήση εναλλακτικού καυσίμου να πρέπει να λειτουργεί με καύσιμο που καταλαμβάνει πολύ μεγαλύτερο όγκο ή βάρος από το συμβατικό.

Το τελευταίο κριτήριο που θα προστεθεί στη συγκεκριμένη ομάδα έχει να κάνει με το χρόνο που μπορεί να κρατηθεί στη δεξαμενή το κάθε καύσιμο σε υγρή φάση. Τα καύσιμα που είναι υγρά σε συνθήκες περιβάλλοντος (VLSFO, μεθανόλη) δεν έχουν πρόβλημα αεριοποίησης σε αντίθεση με τα άλλα καύσιμα (LNG, LPG, αμμωνία) τα οποία χαρακτηρίζονται από ένα συγκεκριμένο ποσοστό αεριοποίησης τους λόγω απωλειών θερμότητας. Συγκεκριμένα αυτό το ποσοστό για το LNG είναι 0.15 με 0.25 % ανά μέρα, για το LPG 0.5 με 1 % ανά μέρα και για την αμμωνία από 1 με 2% ανά μέρα. Αυτά τα ποσοστά αναφέρονται σε δεξαμενή σχεδόν 100% γεμάτη. Επιπλέον παρατηρείται ότι το LNG έχει τη μικρότερη αεριοποίηση ενώ αποθηκεύεται σε υπερβολικά χαμηλή θερμοκρασία σε σχέση με τα άλλα δύο καύσιμα. Αυτό συμβαίνει διότι η τάση ατμών του είναι αρκετά μικρότερη από του LPG και αυτό με τη σειρά του έχει μικρότερη τάση ατμών από την αμμωνία.

3.6 Τεχνολογία

Το θέμα της τεχνολογίας είναι ένα διφορούμενο ζήτημα καθώς από διάφορες απόψεις το πιο απλό και το πιο συνηθισμένο σύστημα είναι καλύτερο ανεξάρτητα

από άλλους παράγοντες ενώ από την άλλη μια καινοτόμα τεχνολογία είναι πιο ελκυστική και ως προσφέρει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και δυσκολία. Επιπλέον πέρα από την τεχνολογία του συστήματος μεγάλη σημασία έχει η τεχνολογία διαχείρισης του καυσίμου. Οι κατηγορίες οι οποίες θα εξεταστούν είναι η ωριμότητα τεχνολογίας των κινητήρων αλλά και της γενικότερης χρήσης του εκάστοτε καυσίμου, η ενεργειακή πυκνότητα των καυσίμων, η πολυπλοκότητα των συστημάτων καθώς και το ρίσκο αστοχίας αυτών.

Στο κριτήριο της ωριμότητας της τεχνολογίας η αξιολόγηση προκύπτει ποιοτικά λαμβάνοντας την άποψη των εξειδικευμένων ανθρώπων της ναυτιλίας. Η ωριμότητα της τεχνολογίας αποτελείται από την ωριμότητα της εκάστοτε μηχανής δηλαδή τις ώρες λειτουργίας που έχουν καταγραφεί αλλά και το πόσες χρησιμοποιούνται πλέον, του καυσίμου ως φορτίο και ως καύσιμο κάτι που δηλώνει το πόσο εξοικειωμένο είναι το πλήρωμα με αυτό. Επιπλέον μεγάλο ρόλο έχει η χρήση του καυσίμου σε λέβητες για την παραγωγή ατμού και σε ηλεκτροκινητήρες. Γιατί έτσι υποδηλώνεται το μειονέκτημα κάποιου καυσίμου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κύρια μηχανή αλλά χρειάζεται συμβατικό καύσιμο για τη λειτουργία των βοηθητικών συστημάτων. Το πρόβλημα λοιπόν της ωριμότητας της τεχνολογίας είναι ένα αρκετά σύνθετο θέμα όπου δεν μπορεί να υπάρξει ποσοτική αξιολόγηση.

Η πολυπλοκότητα του εκάστοτε συστήματος των μηχανών και η απαραίτητη ικανότητα να ανταπεξέλθει σε αυτό το πλήρωμα είναι ένα ποιοτικό κριτήριο και αυτό εξαρτάται από το είδος του επιπρόσθετου εξοπλισμού που χρειάζεται κυρίως για το σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου στη μηχανή και τον τρόπο αποθήκευσης του καυσίμου στις κατάλληλα διαμορφωμένες δεξαμενές. Επιπλέον εξαρτάται και για το πόσο εξοικειωμένο είναι το πλήρωμα σε κάποιες ιδιαιτερότητες που μπορούν να έχουν τα καύσιμα. Εξοπλισμός όπως αντλίες υψηλής πίεσης, συστήματα θέρμανσης ή ψύξης του καυσίμου, vaporizers κ.α αυξάνουν την πολυπλοκότητα των μηχανών με αποτέλεσμα να γίνεται δυσκολότερη η χρήση τους από το πλήρωμα. Η αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος είναι ένα σοβαρό θέμα όπου πρέπει να ληφθεί υπόψη για κάθε τεχνολογία διότι έχει άμεσο αντίκτυπο στη λειτουργία του πλοίου και στις εργασίες του πληρώματος και τυχόν εκπαίδευση που μπορεί να χρειαστεί να προσφερθεί.

Τελευταίο κριτήριο που τέθηκε είναι το ρίσκο αστοχίας σε κάποιο εξάρτημα ή σύστημα της μηχανής που μπορεί να επέλθει και να δημιουργήσει πρόβλημα στη λειτουργία της. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την οικονομική ζημία στην οποία θα επέλθει ο πλοιοκτήτης ώστε να επισκευαστεί η βλάβη αλλά και η τυχόν αδυναμία του πλοίου να πλεύσει σε τυχόν σημαντική ζημιά. Αυτό είναι κάτι που θίχτηκε από τους εκπροσώπους των ναυτιλιακών εταιρειών καθώς αποτελεί σημαντικό ζήτημα εξόδων και αξιοπιστίας για κάθε μηχανή.

3.7 Σύνοψη κεφαλαίου 3

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε μια σύντομη αναφορά στα κριτήρια τα οποία χρίζουν αξιολόγηση και στον τρόπο που θα πραγματοποιηθεί αυτή. Η βέλτιστη αξιολόγηση των κριτηρίων θα ήταν αν υπήρχε μια ποσοτική σύγκριση αυτών ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Όπως αναφέρθηκε κάποια κριτήρια λόγω της εξάρτησης τους από πολλούς παράγοντες ή λόγω της υποκειμενικότητας τους δεν είναι δυνατόν να αξιολογηθούν ποσοτικά με αποτέλεσμα η αξιολόγηση τους να γίνει ποιοτικά με κλίμακα score από 1 έως 10. Για να υπάρχει όσο το δυνατόν πιο σωστή αξιολόγηση αυτών των κριτηρίων τα scores θα προκύψουν από ανθρώπους που εργάζονται στον χώρο της ναυτιλίας και έχουν μια καλύτερη άποψη για αυτά τα θέματα τεχνολογιών.

Κεφάλαιο 4. Βασικές ιδιότητες καυσίμων

Η αξιολόγηση των μηχανών που περιγράφηκαν παραπάνω εξαρτάται άμεσα από το καύσιμα που χρησιμοποιούν και τις ιδιότητες τους. Κάθε καύσιμο έχει συγκεκριμένες ιδιότητες και συμπεριφορά. Μεγάλο ρόλο όπως προαναφέρθηκε έχει η ασφάλεια αποθήκευσης και χρήσης του καυσίμου η οποία αναλύεται συνοπτικά στο παρόν κεφάλαιο. Επιπλέον σημαντική επιρροή στο περιβάλλον δεν έχουν μόνο οι εκπομπές ρύπων κατά την καύση των καυσίμων αλλά και οι εκπομπές που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή τους. Όπως παρουσιάζεται και παρακάτω τα περισσότερα εναλλακτικά καύσιμα που μελετώνται σε αυτήν την εργασία παράγονται με ποικίλους τρόπους με κάθε έναν από αυτούς να εκλύει διαφορετικά ποσά ρύπων. Γίνεται λοιπόν παρακάτω μια σύντομη περιγραφή του κάθε τρόπου παραγωγής των καυσίμων και των ιδιαιτεροτήτων της κάθε μεθόδου.

4.1 Fuel Oil

Παραγωγή

Τα συμβατικά υγρά καύσιμα παράγονται μέσω ατμοσφαιρικής απόσταξης και απόσταξης υπό κενό σε διυλιστήρια. Με το πέρασμα των χρόνων έχει αλλάξει κατά πολύ η ποιότητα και γενικότερα η σύσταση των συμβατικών καυσίμων. Σύμφωνα με το ISO 8217 τα καύσιμα που προορίζονται για την ναυτιλία χωρίζονται σε αποστάγματα και υπολειμματικά καύσιμα. Τα υπολειμματικά καύσιμα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται κυρίως από την κύρια μηχανή ενώ τα αποστάγματα σε ηλεκτρογεννήτριες. Τα είδη των παραπάνω καυσίμων παρουσιάζονται παρακάτω.

Αποστάγματα: DMX, DMA, DMZ, DMB.

Υπολειμματικά: RMA, RMB, RMD, RME, RMG, RMK.

Τα υπολειμματικά καύσιμα τα οποία έχουν ιξώδες 180 με 380 cSt (στους 50°C) τα τελευταία χρόνια λόγω της δημιουργίας των περιοχών SECA χρειάζονται επεξεργασία αποθείωσης. Έτσι πλέον χρησιμοποιείται σε περιοχές εκτός SECA το VLSFO με περιεκτικότητα σε θείο 0.5% και σε περιοχές SECA ένα απόσταγμα πετρελαίου(DMA, DMZ) όπου η περιεκτικότητα σε θείο είναι 0.1%. Αυτά τα καύσιμα χρησιμοποιούνται σε πλοία που δεν έχει εγκατασταθεί σύστημα κατακράτησης θείου scrubber. Η παραγωγή του VLSFO δεν μπορεί να καλύψει ολόκληρη τη ζήτηση καυσίμου της ναυτιλίας καθώς η μείωση της περιεκτικότητας θείου στα καύσιμα είναι μια ακριβή διαδικασία και δεν έχουν τη δυνατότητα αυτή όλα τα διυλιστήρια.

Ασφάλεια

Η ασφάλεια στα καύσιμα είναι πολύ σημαντική παράμετρος και πρέπει να ληφθεί υπόψη πριν εφαρμοστεί το καύσιμο σε κάποιο πλοίο. Συγκεκριμένα τα συμβατικά καύσιμα παράγονται και διατίθενται στην αγορά με σημείο ανάφλεξης άνω των 55°C για λόγους ασφαλείας ώστε να αποφευχθεί τυχόν έκρηξη. Δεν επηρεάζει την ποιότητα του καυσίμου το σημείο ανάφλεξης, υπάρχει ως προδιαγραφή μόνο για θέμα ασφαλείας.

4.2 LNG

Παραγωγή

Το LNG είναι υγροποιημένο φυσικό αέριο το οποίο χρησιμοποιείται διότι έχει μειωμένο όγκο με αποτέλεσμα να γίνεται πιο εύκολη η μεταφορά του. Συγκεκριμένα καταλαμβάνει 600 φορές λιγότερο όγκο από το φυσικό αέριο. Το φυσικό αέριο περιέχει κυρίως μεθάνιο αλλά και άλλα συστατικά με ποσοστά που φαίνονται παρακάτω ανάλογα το είδος του φυσικού αερίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: Περιεκτικότητα φυσικού αερίου([24])

Methane	CH ₄	70-90%
Ethane	C ₂ H ₆	0-20%
Propane	C ₃ H ₈	
Butane	C ₄ H ₁₀	
Carbon Dioxide	CO ₂	0-8%
Oxygen	O ₂	0-0.2%
Nitrogen	N ₂	0-5%
Hydrogen sulphide	H ₂ S	0-5%
Rare gases	A, He, Ne, Xe	trace

Η παραπάνω σύσταση δεν είναι αυτή κατά την εξόρυξη του φυσικού αερίου. Στο υπέδαφος, αυτό περιέχει ποικίλα άλλα αέρια και συστατικά όπως πετρέλαιο και νερό. Η διαδικασία επεξεργασίας λοιπόν η οποία δεν είναι τόσο σύνθετη όσο του αργού πετρελαίου είναι να γίνει διαχωρισμός του αερίου από πετρέλαιο και άλλους υδρογονάνθρακες όπου τυχόν να υπάρχουν και διαχωρισμός αυτού με το νερό και

με άλλα ανεπιθύμητα συστατικά όπως θείο και διοξείδιο του άνθρακα. Η παραγωγή μεθανίου στα διυλιστήρια πραγματοποιείται μέσω ατμοσφαιρικής απόσταξης του αργού πετρελαίου καθώς είναι το πρώτο προϊόν που παράγεται στην αποστακτική στήλη.

Ασφάλεια

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο αποθηκεύεται σε ατμοσφαιρική πίεση αλλά με πολύ χαμηλή θερμοκρασία(-162°C). Αυτό δημιουργεί πρόβλημα στη μεταλλική κατασκευή της δεξαμενής καθώς η χαμηλή θερμοκρασία αυξάνει την ψαθυρότητα στο χάλυβα. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει εύκολα ξαφνικές ρωγμές χωρίς παραμορφώσεις. Επίσης η χαμηλή θερμοκρασία μπορεί να δημιουργήσει κρυογενή εγκαύματα σε κάποιον άνθρωπο. Το LNG είναι ένα άχρωμο υγρό, δεν είναι ούτε διαβρωτικό ούτε εύφλεκτο. Βέβαια το BOG είναι εύφλεκτο και σε συνδυασμό της μεγάλης πτητικότητας του LNG δημιουργείται ένα πρόβλημα ασφάλειας αλλά υπάρχει αποδεδειγμένα επαρκή ασφάλεια τόσο για τη μεταφορά όσο και για τη καύση του καυσίμου. Άλλωστε πλέον η μεταφορά και αποθήκευση του LNG είναι πολύ ευρεία σε χρήση με αποτέλεσμα να υπάρχει η τεχνογνωσία για τη μεταφορά της.

4.3 LPG

Παραγωγή

Διάφοροι υδρογονάνθρακες(Natural Gas Liquids) που βρίσκονται στο φυσικό αέριο κατά την εξόρυξη του και διαχωρίζονται από αυτό όπως το προπάνιο, το βουτάνιο και το ισοβουτάνιο αποτελούν το LPG. Αυτά βρίσκονται σε περιεκτικότητα έως 10% στο φυσικό αέριο. Η παραγωγή λοιπόν LPG μέσω του φυσικού αερίου είναι σε ποσοστό περίπου στο 60%. Το άλλο 40% της παραγωγής του LPG γίνεται μέσω της επεξεργασίας του αργού πετρελαίου στα διυλιστήρια. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ατμοσφαιρική απόσταξη, αναμόρφωση και πυρόλυση. Η ακριβής διαδικασία επεξεργασίας εξαρτάται από τη ποιότητα του αργού πετρελαίου και τη σύσταση του LPG σε προπάνιο και βουτάνιο.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί η παραγωγή του βιοLPG αν και είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Η παραγωγή του γίνεται από ανανεώσιμες πηγές ή απόβλητα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πολύ μικρή παραγωγή ρύπων κατά την παραγωγή του. Είναι χημικά όμοιο με τα παραπάνω είδη LPG και υπάρχει η δυνατότητα ανάμιξης τους[28].

Ασφάλεια

Αποθηκεύεται σε αρκετή πίεση αλλά με όχι τόσο χαμηλή θερμοκρασία σε σχέση με το LNG. Και αυτό δεν είναι εύφλεκτο καύσιμο ούτε διαβρωτικό. Χρειάζεται άμεση ανίχνευση διαρροής και για αυτό το λόγο οι σωληνώσεις που διέρχεται το καύσιμο μέσα σε χώρους υψηλού κινδύνου φωτιάς είναι διπλού τοιχώματος. Επειδή όμως είναι και αυτό ένα κρυογενικό υγρό δημιουργούνται ατμοί οι οποίοι έχουν μεγαλύτερη πίεση από την ατμοσφαιρική με αποτέλεσμα σε περίπτωση διαρροής να συγκεντρώνεται στο κάτω μέρος κάποιου διαμερίσματος του πλοίου(μηχανοστάσιο) και έτσι είναι αρκετά επικίνδυνο για κάποια έκρηξη. Είναι αναγκαίο λοιπόν να υπάρχουν εξαεριστικά ή κάποιο σύστημα επανυγροποίησης των ατμών. Παρατηρούμε λοιπόν ότι τόσο το LNG όσο και το LPG επειδή είναι σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα τόσο στη μεταλλική κατασκευή όσο και σε άνθρωπο και επίσης είναι επικίνδυνα λόγω των ατμών που παράγουν[29 ,30].

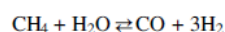
4.4 Μεθανόλη

Παραγωγή

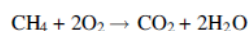
Υπάρχουν 4 είδη μεθανόλης ανάλογα τον τρόπο παραγωγής τους.

- Grey methanol: Παράγεται από φυσικό αέριο και αποτελεί σχεδόν το 90% της παραγωγής της μεθανόλης. Η διαδικασία ξεκινάει με την παραγωγή μίγματος αερίου σύνθεσης(H₂,CO,CO₂) μέσω αναμόρφωσης ατμού ή αυτοθερμική αναμόρφωση του φυσικού αερίου(μεθανίου) όπως φαίνεται παρακάτω.

Steam reforming:



Autothermal reforming:

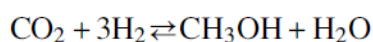


Στη συνέχεια αυτό το αέριο μετατρέπεται σε ένα αρχικό στάδιο μεθανόλης μέσω συγκεκριμένων αντιδράσεων(όπως υδρογονοποίηση του μονοξειδίου και του διοξειδίου του άνθρακα) σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Τέλος αυτή η μεθανόλη οδηγείται σε αποστακτική στήλη ώστε να έχουμε το τελικό καθαρό προϊόν της μεθανόλης.

- Black methanol: Παράγεται από κάρβουνο. Η παραγωγή της μεθανόλης είναι αρκετά παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω. Στην αρχή έχουμε μετατροπή του κάρβουνο σε μίγμα αερίου σύνθεσης το οποίο επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του αεριοποιητή (gasifier) και στη συνέχεια προκύπτει η

σύνθεση της αρχικής μορφής της μεθανόλης ,παίρνοντας την τελική της μορφή μέσω καθαρισμού της.

- Blue methanol: Παράγεται από αντίδραση διοξειδίου του άνθρακα με υδρογόνο. Για να είναι blue η μεθανόλη πρέπει το διοξείδιο του άνθρακα να δεσμεύεται από ένα σύστημα carbon capture και το υδρογόνο να προέρχεται από φυσικό αέριο.



- Green methanol: Η παραγωγή του γίνεται ώστε η διαδικασία να είναι ουδέτερη από CO₂. Για να γίνει αυτό υπάρχουν δύο τρόποι.
 - Παραγωγή από βιομάζα με τρόπο ακριβώς ίδιο με αυτόν που πραγματοποιείται από κάρβουνο.
 - Παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μέσω ηλεκτρόλυσης και παραγωγής υδρογόνου και αυτού με ανανεώσιμο τρόπο.

Ασφάλεια

Είναι ένα πτητικό και διαβρωτικό καύσιμο με χαμηλό ιξώδες, γι' αυτό οι σωληνώσεις που διέρχεται είναι διπλού τοιχώματος. Επίσης είναι τοξικό για τον άνθρωπο αν έρθει σε άμεση επαφή με αυτόν . Τέλος είναι ένα αρκετά εύφλεκτο υλικό με θερμοκρασία ανάφλεξης τους 9°C και ιδιαίτερα εύφλεκτοι είναι οι ατμοί της μεθανόλης. Βέβαια είναι ένα καύσιμο με τη μισή πτητικότητα του LPG άρα έχει μειωμένη πιθανότητα παραγωγής αναφλέξιμων ατμών. Ένα μειονέκτημα τόσο της μεθανόλης αλλά ακόμα και περισσότερο του LPG είναι ότι σε περίπτωση διαρροής ατμών αυτά δε θα διαφύγουν στην ατμόσφαιρα αλλά θα μείνουν στο μηχανοστάσιο καθώς οι ατμοί τόσο της μεθανόλης όσο και του LPG έχουν μεγαλύτερο βάρος από τον αέρα.

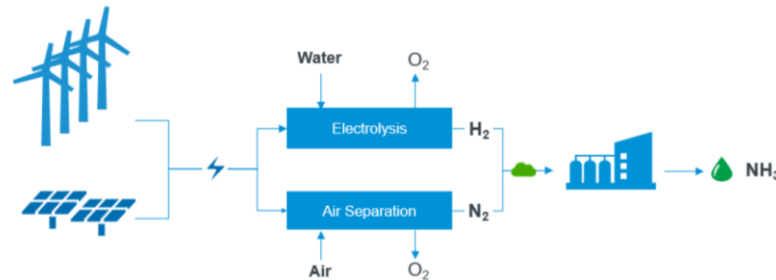
4.5 Αμμωνία

Παραγωγή

Η αμμωνία παράγεται μέσω της αντίδρασης αζώτου και υδρογόνου και κατατάσσεται σε 3 είδη ανάλογα τον τρόπο παραγωγής της. Το άζωτο δεσμεύεται από τον αέρα και το υδρογόνο παράγεται με διάφορους τρόπους όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

- Brown ammonia: Παράγεται υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα όπως φυσικό αέριο και κάρβουνο. Αυτό συμβαίνει μέσω αναμόρφωσης ατμού για το φυσικό αέριο ή άλλα υγρά καύσιμα και μέσω αεριοποίησης για το κάρβουνο. Οι διαδικασίες περιεγράφηκαν παραπάνω.

- Blue ammonia: Παράγεται υδρογόνο με τον ίδιο τρόπο με την brown αλλά υπάρχει ένα σύστημα να δεσμεύει τον άνθρακα(CCS), να τον υγροποιεί και να τον μεταφέρει σε κατάλληλες δεξαμενές αποθήκευσης.
- Green ammonia: Σε αυτό το είδος αμμωνίας έχουμε σχεδόν μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα καθώς χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την ηλεκτρόλυση του νερού για παραγωγή υδρογόνου.



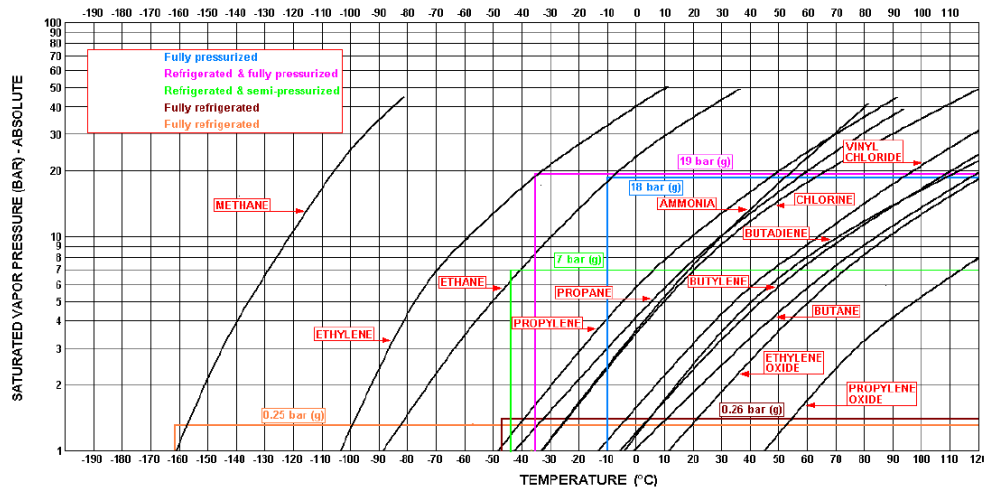
ΣΧΗΜΑ 4-1: Διαδικασία παραγωγής πράσινης αμμωνίας

Ασφάλεια

Υπάρχουν πολλές ανησυχίες για τη χρήση της αμμωνίας ως ναυτιλιακό καύσιμο λόγω της επικινδυνότητάς της. Η αμμωνία πέρα από την έντονη μυρωδιά έχει διαβρωτικό και τοξικό χαρακτήρα κάτι που την καθιστά αρκετά επικίνδυνη για τον άνθρωπο. Επιπλέον λόγω της αποθήκευσης της σε δεξαμενές με αρκετή πίεση σε περίπτωση διαρροής της συγκεντρώνεται μεγάλη ποσότητα. Αν και είναι ένα από τα πιο επικίνδυνα εναλλακτικά καύσιμα για την υγεία του ανθρώπου, είναι ένα από τα πιο ακίνδυνα σε θέματα αναφλεξιμότητας.

4.6 Δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων

Η αποθήκευση καυσίμου όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3 είναι ένα σοβαρό ζήτημα για την αξιολόγηση καθώς αρκετά εναλλακτικά καύσιμα για να διατηρηθούν σε υγρή φάση πρέπει να αποθηκεύονται είτε σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία είτε σε πολύ υψηλή πίεση είτε συνδυασμό των δύο. Σε αυτήν την κατηγορία καυσίμων (κρυογενικά) είναι το LNG, LPG και η αμμωνία. Ενώ σε συμβατικές δεξαμενές μπορεί να αποθηκευτεί fuel oil και μεθανόλη με μερικές τροποποιήσεις όπως θα αναφερθεί παρακάτω.

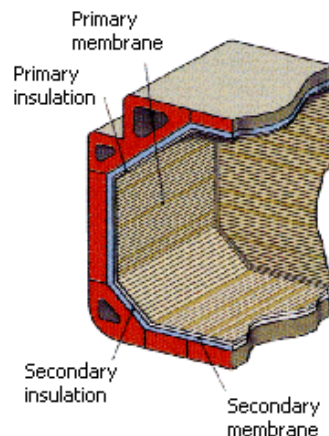


ΣΧΗΜΑ 4-2: Διάγραμμα πίεσης και θερμοκρασίας διαφόρων υγροποιημένων αερίων

Οι κρυογενικές και υπό πίεση δεξαμενές χωρίζονται σε 4 κατηγορίες με κάποιες από αυτές να χρησιμοποιούνται είτε για LNG είτε για LPG είτε για αμμωνία όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

- Integrated tank

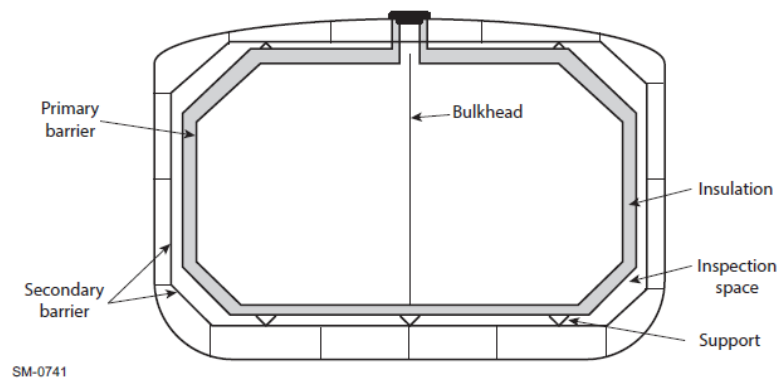
Είναι δεξαμενές που φτιάχνονται ως μέρος του πλοίου και όχι ξεχωριστά. Η πιο διαδεδομένη είναι η membrane tank (Δεξαμενή μεμβράνης). Είναι σχεδιασμένη για χαμηλή πίεση (έως 0.7bar) και κρατάει χαμηλά τη θερμοκρασία. Ανάμεσα στο primary (πρώτο) και στο secondary barrier (δεύτερο προστατευτικό) διοχετεύεται άζωτο. Χρήση κυρίως για LNG με πίεση σχεδίασης στα 5barg (μανομετρική) μέσω pressure relief valves.



ΣΧΗΜΑ 4-3: Integrated Tank

- Type A tank

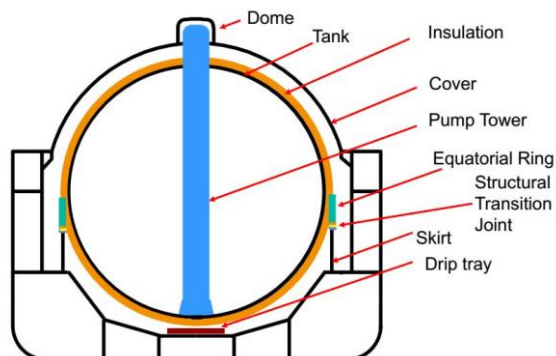
Είναι δεξαμενές που φτιάχνονται ξεχωριστά από το πλοίο και τοποθετούνται ανεξάρτητα σε αυτό. Η πίεση είναι λίγο μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική και διατηρούν χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό επιτυγχάνεται διότι υπάρχει ανάμεσα στο primary και secondary barrier ένα μονωτικό στερεό στρώμα και ένα στρώμα με αέρα. Βέβαια εάν υπάρχει διαρροή πέρα από το secondary barrier θα υπάρχει αεριοποίηση του καυσίμου. Χρήση κυρίως για μεγάλες δεξαμενές LPG.



ΣΧΗΜΑ 4-4: Type A tank

- Type B tank(Moss type)

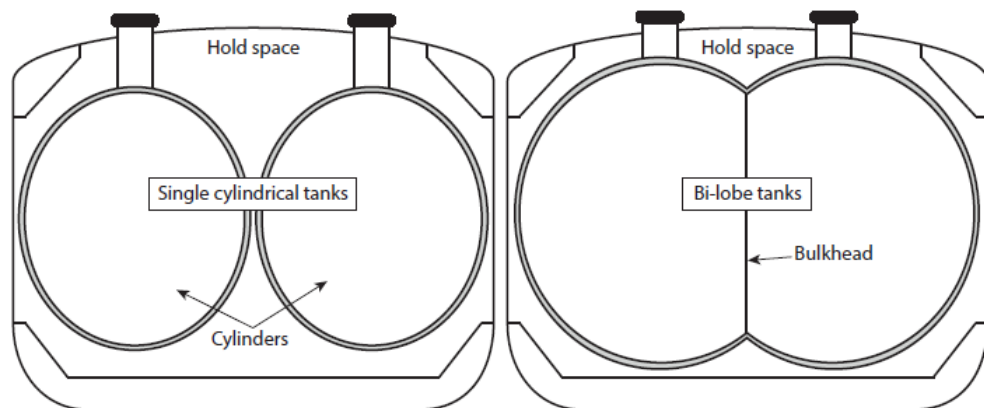
Όπως και η παραπάνω δεξαμενή έτσι και σε αυτή δεν αναπτύσσονται μεγάλες πιέσεις. Είναι κατασκευασμένη με partial secondary barrier (drip tray) διότι λόγω της σφαιρικής διάταξης της είναι πιθανή η διαρροή μόνο από το κατώτερο μέρος της κατασκευής όπως φαίνεται στο σχήμα. Χρήση για μεγάλες δεξαμενές LNG.



ΣΧΗΜΑ 4-5: Moss Type tank

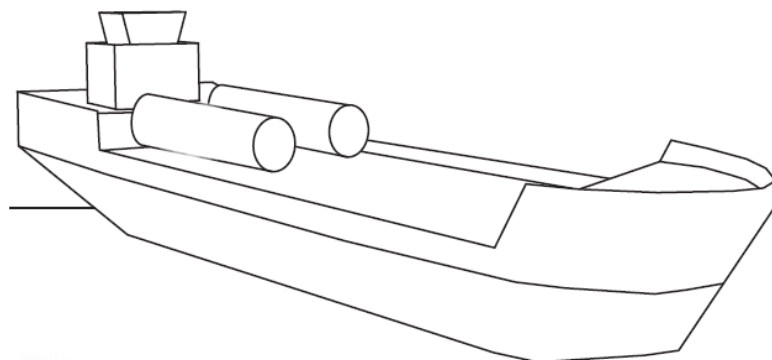
- Type C tank

Δεξαμενές που είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν με πίεση μεγαλύτερη των 2 bar έως 15 bar. Επίσης μπορούν να διατηρήσουν χαμηλή θερμοκρασία αλλά όχι τόσο μεγάλη όπως στις προηγούμενες (semi-refrigerated). Έχουν δύο διαφορετικές διατάξεις με την δεύτερη να είναι καλύτερη λόγω μεγαλύτερης εκμετάλλευσης όγκου (βλ. σχήμα 4-5). Δεν απαιτείται secondary barrier αλλά απαιτούνται αισθητήρες αερίου μέσα στη δεξαμενή. Χρήση κυρίως για LPG.



ΣΧΗΜΑ 4-6: Type C tank

Μια καλή λύση είναι να τοποθετηθούν στο κατάστρωμα διότι έτσι αυξάνεται η ασφάλεια καθώς σε περίπτωση διαρροής αερίου αυτό ελευθερώνεται σε ανοιχτό χώρο και δεν υπάρχει μεγάλος κίνδυνος έκρηξης.



ΣΧΗΜΑ 4-7: Type C tank σε κατάστρωμα πλοίου

Η αμμωνία και το LPG μπορούν να αποθηκευτούν σε παρόμοιες θερμοκρασίες και πιέσεις. Αποθηκεύεται είτε με υψηλή πίεση (έως 18 bar δηλαδή σε

type-C δεξαμενές) είτε με θερμοκρασία (-33 °C και -42°C αντίστοιχα). Βέβαια θα πρέπει να υπάρχει μία επίστρωση στο χώρο της δεξαμενής και σύστημα ανίχνευσης διαρροής διότι η αμμωνία είναι διαβρωτική και τοξική[37, 39].

Η αποθήκευση της μεθανόλης είναι πολύ εύκολη και λιγότερο πολύπλοκη σε σχέση με τα περισσότερα εναλλακτικά καύσιμα. Δε χρειάζεται κρυογενικές δεξαμενές για να αποθηκευτεί διότι είναι σε υγρή φάση σε συνθήκες περιβάλλοντος. Μπορεί να αποθηκευτεί σχεδόν σε κάθε τύπου δεξαμενή. Λόγω της μικρής όμως ενεργειακής της πυκνότητα όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως χρειάζεται 2.4 φορές μεγαλύτερο όγκο από το πετρέλαιο για δεδομένη παραγωγή ενέργειας. Για λόγους ασφαλείας η δεξαμενή που αποθηκεύεται η μεθανόλη πρέπει να είναι διπλού τοιχώματος(ύπαρξη cofferdam) όπως και οι σωληνώσεις από τη δεξαμενή στη μηχανή ώστε να διασφαλιστεί ότι δε θα προκύψει καμία διαρροή. Αυτό χρειάζεται διότι η μεθανόλη είναι ένα πτητικό και εύφλεκτο υγρό. Επίσης προκαλεί διάβρωση στο χάλυβα γι'αυτό συνήθως χρειάζεται μια επίστρωση ψευδαργύρου ή η κατασκευή να είναι από ανοξείδωτο χάλυβα[33, 34, 40].

Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα κριτηρίων-Σχολιασμός

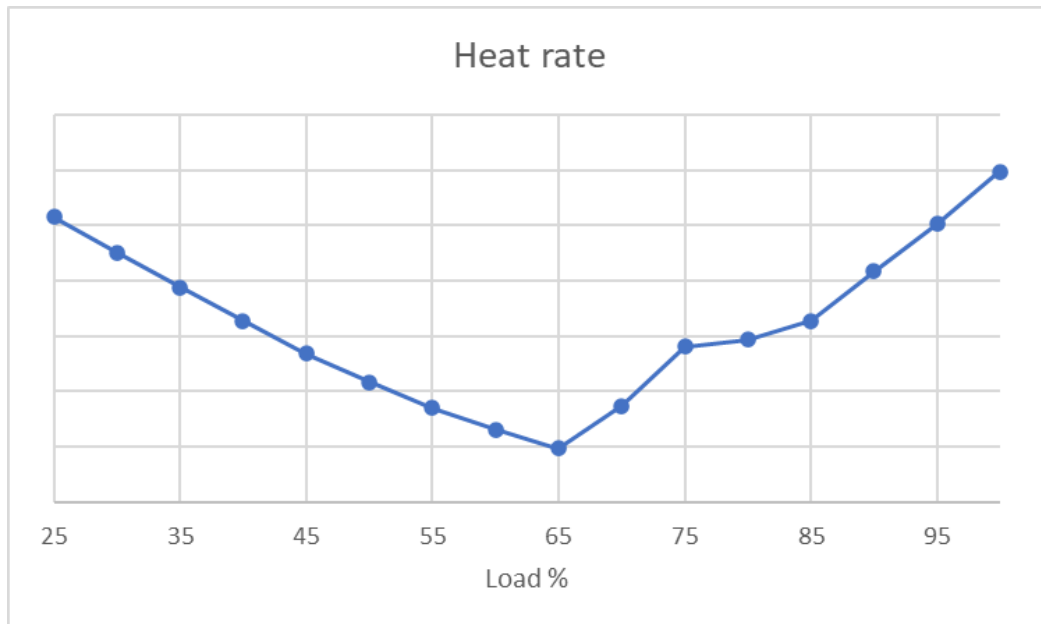
5.1 Τεχνικά

5.1.1 Heat Rate-Βαθμός απόδοσης

Το μέγεθος Heat rate δηλώνει την ενέργεια καυσίμου που καταναλώνεται στη μηχανή προκειμένου να παραχθεί 1 kWh ενέργεια πρόωσης. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι είναι ένα αντιστρόφως ανάλογο μέγεθος του θερμοδυναμικού βαθμού απόδοσης και έχει θετική επίδραση όσο μικρότερη είναι η τιμή του. Στη σχέση 3.2.1 φαίνεται και η σχέση που συνδέει το Heat rate με το θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης.

$$\text{Heat Rate} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kWh}} \right] = \frac{3600}{\eta} \quad (5.1.1)$$

Για να συγκριθεί το heat rate σε κάθε μηχανή θα πρέπει να υπάρχει μια βάση αναφοράς στο θέμα της ισχύς διότι μεταβάλλεται αυτό το μέγεθος ανάλογα την ισχύ εξόδου. Αυτή η ποιοτική μεταβολή φαίνεται στο σχήμα 3-6. Γι' αυτό το λόγο επιλέγεται το heat rate από μία σύνθεση διαφορετικών ισχύων μέσω συντελεστών βαρύτητας. Αυτοί οι συντελεστές βαρύτητας επιλέχθηκαν μέσω του E3 cycle ως οι πλέον αντικατοπτρικοί για τη λειτουργία ενός πλοίου[41].

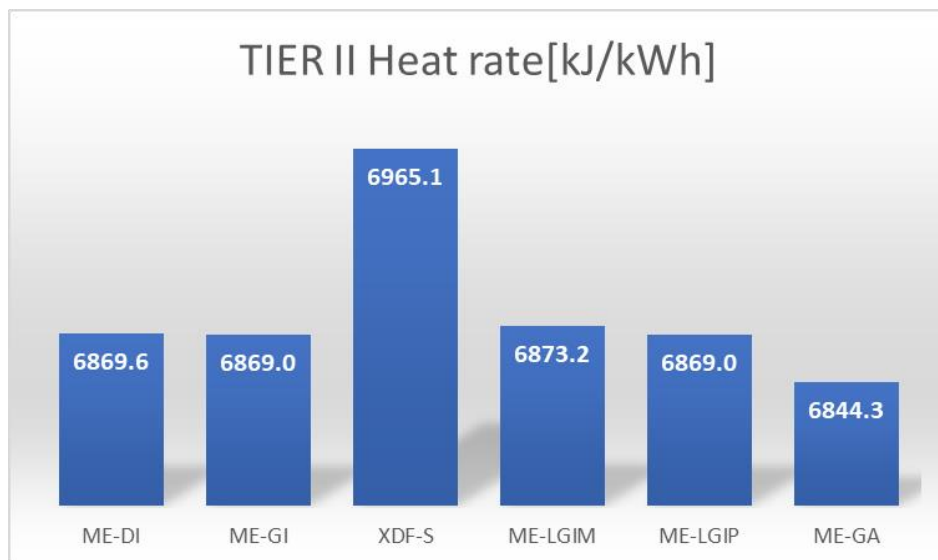


ΣΧΗΜΑ 5-1: Ποιοτική κατανομή Heat rate σε σχέση με το φορτίο της μηχανής

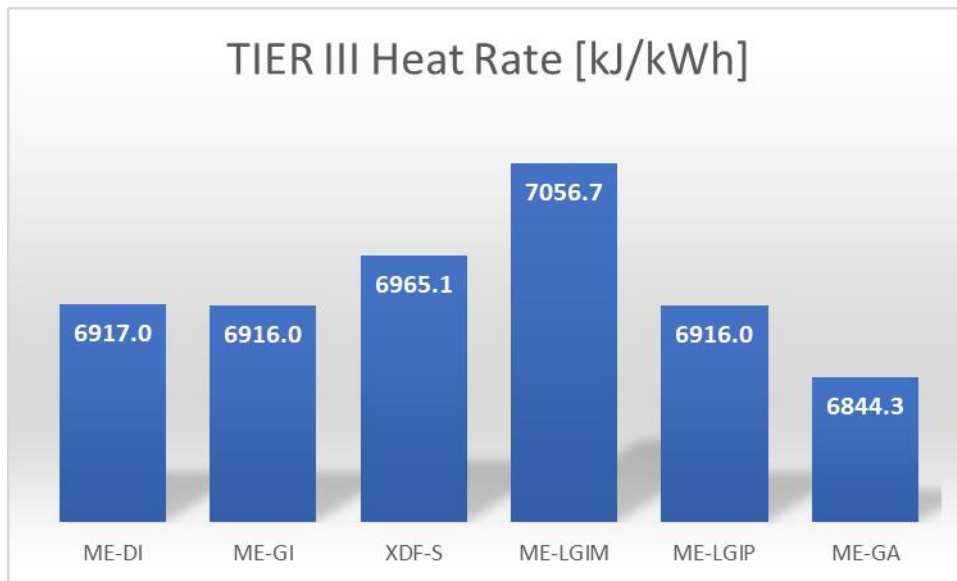
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1: Συντελεστές βάρους E3 cycle

Power[%]	100	75	50	25
Weighting factors	0.2	0.5	0.15	0.15

Η σύγκριση θα γίνει τόσο σε λειτουργία TIER II όσο και σε λειτουργία TIER III. Υπάρχει διαφορά στις δύο αυτές καταστάσεις καθώς στο TIER III η μηχανή λειτουργεί είτε με SCR είτε με EGR ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές καταναλώσεις σε NO_x σε αντίθεση με τη λειτουργία TIER II. Η εξαίρεση βρίσκεται στις μηχανές LNG χαμηλής πίεσης τροφοδοσίας(XDF, ME-GA) οι οποίες δε χρειάζονται κάποια επιπρόσθετη τεχνολογία για να επιτευχθεί το TIER III όμως χρησιμοποιούν EGR μόνιμα για να μειωθεί η μεγάλη ποσότητα CH₄ slip.



ΣΧΗΜΑ 5-2: Heat Rate TIER II



ΣΧΗΜΑ 5-3: Heat Rate TIER III

Παρατηρείται ότι οι μηχανές XDF και ME-GA δεν έχουν μεταβολή στις δύο καταστάσεις λόγω της μόνιμης χρήσης EGR ενώ σε λειτουργία TIER III όλες οι μηχανές έχουν αυξημένο heat rate λόγω της επιπρόσθετης τεχνολογίας με τη ME-LGIM να έχει πολύ μεγάλη αύξηση λόγω χρήσης EGR όπου μειώνει το ποσό αέρα εισαγωγής λόγω της διέλευσης καυσαερίων με αποτέλεσμα να χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου ώστε να επιτευχθεί συγκεκριμένη ισχύς. Επιπλέον παρατηρείται αυξημένη τιμή heat rate στην μηχανή XDF σε σχέση με τις άλλες κυρίως σε λειτουργία TIER II ενώ για τη ME-GA ισχύει το αντίθετο.

Η αξιολόγηση των μηχανών θα γίνει για το αντιστρόφως ανάλογο μέγεθος του Heat rate, τον θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης. Λόγω της διαφοράς στις τιμές που παρατηρείται στις δύο λειτουργίες των μηχανών Tier II και Tier III για να ληφθεί μια ρεαλιστική τιμή του βαθμού απόδοσης θα ληφθεί 80% η τιμή στο Tier II και 20% στο Tier III. Αυτή η κατανομή θεωρείται ρεαλιστική για τα περισσότερα εμπορικά πλοία του κόσμου. Τυχόν πλοία τα οποία ταξιδεύουν σε μεγαλύτερο ποσοστό σε ECA περιοχές δηλαδή σε λειτουργία Tier III είναι σχετικά μικρά σε μέγεθος τύπου MR tankers. Έτσι προκύπτουν τα αποτελέσματα του πίνακα 5-2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2: Θερμοδυναμικοί βαθμοί απόδοσης μηχανών (%)

Δείκτης (%)	Βαθμός απόδοσης TIER II	Βαθμός απόδοσης TIER III	Βαθμός απόδοσης (20% TIER III και 80%TIER II)
ME-DI	52.40	52.05	52.33
ME-GI	52.41	52.05	52.34
ME-LGIM	52.38	51.02	52.11
ME-LGIP	52.41	52.05	52.34
XDF-S2.0	51.69	51.69	51.69
ME-GA	52.60	52.60	52.60
Ammonia Engine	52.41	52.05	52.34

5.1.2 Ισχύς Καυσαερίων-Παραγωγή Ατμού

Η ισχύς καυσαερίων όπως και η παραγωγή ατμού μέσω economizer μεταβάλλεται ανάλογα την ισχύ της μηχανής και ανάλογα τη λειτουργία της.

Ο υπολογισμός της ισχύς καυσαερίων έγινε μέσω της σχέσης 3.2.2

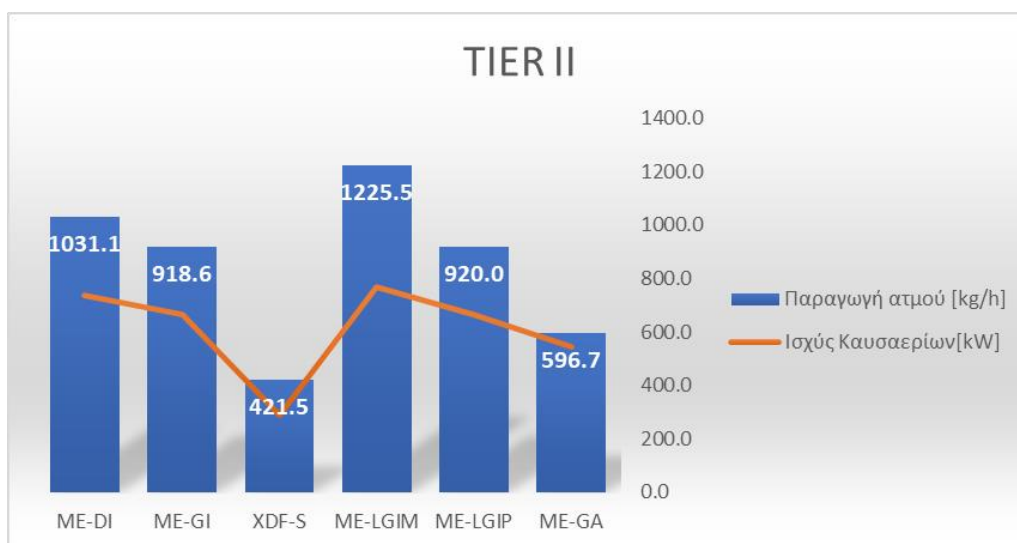
$$Q_{eg} = C_p \cdot \dot{m}_{eg} \cdot (T_{eg,in} - T_{eg,out}) \quad (5.1.2)$$

Όπου,

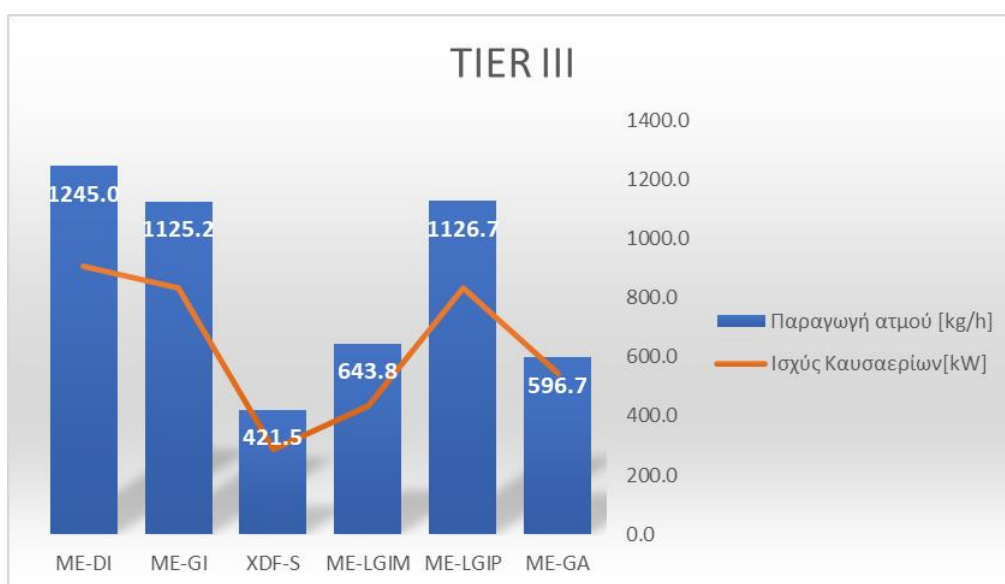
- C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα (θεωρήθηκε 1.04 kJ/kgK)
- \dot{m}_{eg} : Παροχή καυσαερίων
- $T_{eg,in}$: Θερμοκρασία εισόδου καυσαερίων στον economizer (θεωρήθηκε ίδια με τη θερμοκρασία εξόδου από τον T/C)
- $T_{eg,out}$: θερμοκρασία καυσαερίων μετά τον economizer (θεωρήθηκε 180°C)

Οι παροχές μάζας [kg/h] ατμού είναι υπολογισμένες για ατμό πίεσης 7 bar με pinch point temperature difference (ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ατμού και

καυσαερίων στο λέβητα) στους 15 °C κατά International Organization for Standardization (ISO) στο 85% του φορτίου της μηχανής.



ΣΧΗΜΑ 5-4: Ισχύς καυσαερίων-Παραγωγή ατμού TIER II



ΣΧΗΜΑ 5-5: Ισχύς καυσαερίων-Παραγωγή ατμού TIER III

Στις μηχανές με SCR η θερμοκρασία καυσαερίων είναι μεγαλύτερη ώστε να λειτουργεί αποδοτικά. Το EGR μειώνει τη θερμοκρασία καυσαερίων ώστε να μειώσει την παραγωγή NO_x. Άρα λόγω της διαφοράς λειτουργίας του EGR με το SCR στην TIER

III λειτουργία στη ME-LGIM παρατηρείται χαμηλή ενέργεια στα καυσαέρια. Παρατηρείται ότι στις μηχανές που λειτουργούν με κύκλο Otto και καύσιμο LNG με χαμηλή πίεση τροφοδοσίας υπάρχει γενικά πολύ χαμηλή παραγωγή ατμού από όλες τις άλλες μηχανές. Αυτό συμβαίνει για διαφορετικό λόγω για τη ME-GA και την ΧDF. Σε σχέση με τις άλλες μηχανές η ME-GA έχει συγκρίσιμη θερμοκρασία καυσαερίων μετά τον T/C (turbocharger) αλλά αρκετά χαμηλότερη παροχή. Σε αντίθεση με την ΧDF όπου η παροχή καυσαερίων είναι συγκρίσιμη ενώ η θερμοκρασία μετά τον T/C είναι αρκετά χαμηλότερη. Αυτό συμβαίνει σε αυτές τις μηχανές λόγω της μόνιμης λειτουργίας του EGR ώστε να επιτευχθεί μείωση του methane slip. Γενικά λοιπόν παρατηρείται ότι οι μηχανές που χρησιμοποιούν EGR αποδίδουν λιγότερη ισχύ καυσαερίων και συνεπών μικρότερη παραγωγή ατμού.

Σε αυτό το κριτήριο όπως και στο θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης η σύγκριση θα γίνει σε ποσοστό 80% σε Tier II και 20% σε Tier III. Στους πίνακες 5-3 και 5-4 παρουσιάζονται οι τιμές της ισχύς καυσαερίων για κάθε μηχανή και οι παροχές παραγωγής ατμού αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3: Ισχύς καυσαερίων μηχανών (kW)

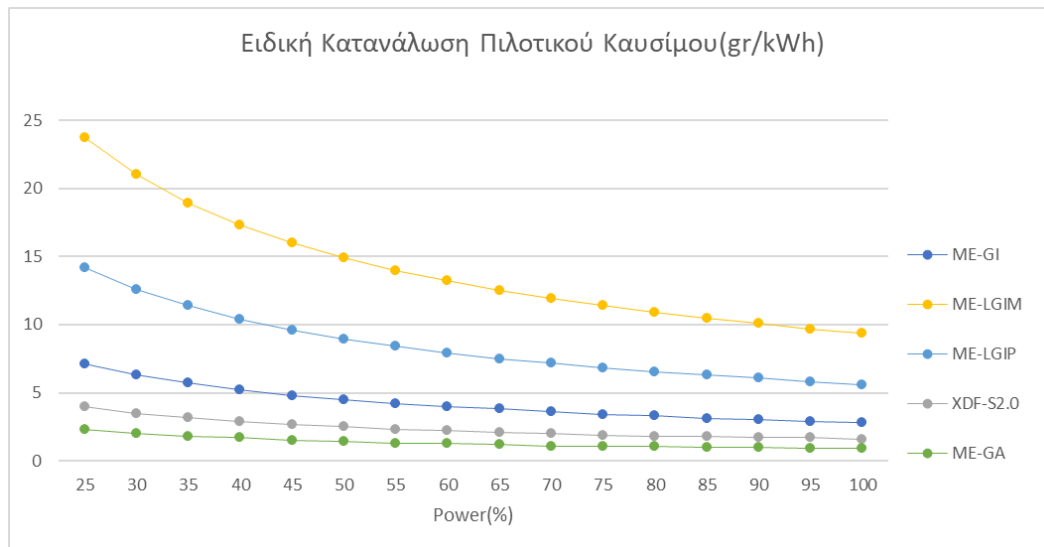
Δείκτης(kW)	Ισχύς Καυσαερίων TIER II	Ισχύς Καυσαερίων TIER III	Ισχύς Καυσαερίων (20% TIER III και 80%TIER II)
ME-DI	737	907	771
ME-GI	664	831	697
ME-LGIM	768	433	701
ME-LGIP	664	833	697
ΧDF-S2.0	288	288	288
ME-GA	544	544	544
Ammonia Engine	664	833	697

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4: Παραγωγή Ατμού (kg/h)

Δείκτης(kg/h)	Παραγωγή Ατμού TIER II	Παραγωγή Ατμού TIER III	Παραγωγή Ατμού (20% TIER III και 80%TIER II)
ME-DI	1031.1	1245.0	1073.8
ME-GI	918.6	1125.2	959.9
ME-LGIM	1225.5	643.8	1109.1
ME-LGIP	920.0	1126.7	961.3
XDF-S2.0	421.5	421.5	421.5
ME-GA	596.7	596.7	596.7
Ammonia Engine	920.0	1126.7	961.3

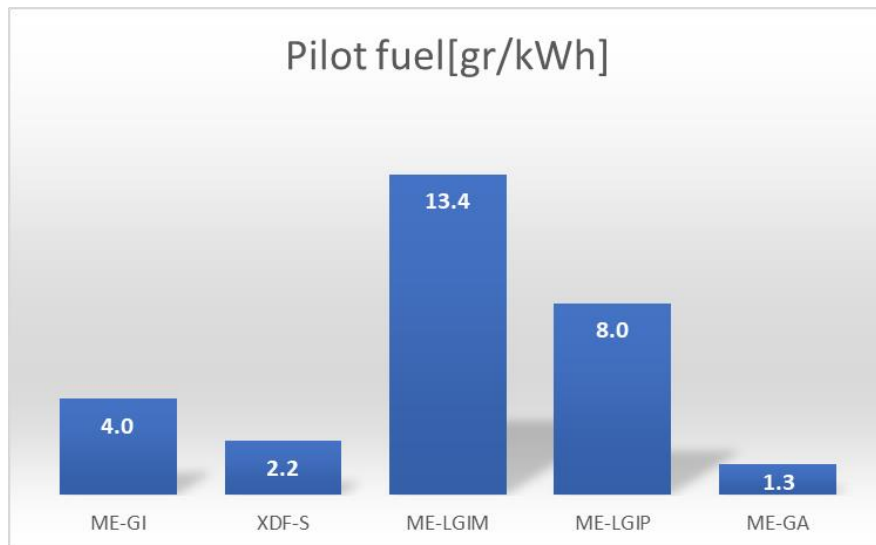
5.1.3 Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί όλες οι dual fuel μηχανές χρησιμοποιούν μια μικρή ποσότητα πετρελαίου (pilot fuel oil) για την έναυση του κύριου καυσίμου. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης δυσκολίας αυτανάφλεξης που αντιμετωπίζουν τα εναλλακτικά καύσιμα που μελετώνται. Κάθε μηχανή χρειάζεται και άλλη ποσότητα πιλοτικού καυσίμου κάτι που σημαίνει και άλλες απαιτήσεις αποθήκευσης πετρελαίου στο πλοίο αλλά και άλλους ρύπους που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Αυτό το κριτήριο ουσιαστικά χρησιμοποιείται για να δηλώσει το πόσο ανεξάρτητη είναι η κάθε μηχανή από το συμβατικό καύσιμο. Οι κατασκευαστές δίνουν μια τιμή πιλοτικού καυσίμου ως ποσοστό της συνολικής ενέργειας καυσίμων που διοχετεύονται στον κύλινδρο με τη μικρότερη να είναι στην μηχανή ME-GA και τη μεγαλύτερη να φαίνεται πως θα είναι στην μηχανή της αμμωνίας καθώς η έναυση της είναι πιο δύσκολη και θα χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα πιλοτικού καυσίμου(10-20%). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου(gr/kWh) συναρτήσει της ισχύς της μηχανής.



ΣΧΗΜΑ 5-6: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου συναρτήσει της ισχύς πρόωσης

Συγκεκριμένα ακολουθώντας τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω σύμφωνα με τον E3 cycle προκύπτουν οι παρακάτω τιμές στον πίνακα 5-5 για την κατανάλωση του πιλοτικού καυσίμου σε κάθε μηχανή οι οποίες είναι ανεξάρτητες των λειτουργιών TIER II και TIER III. Αυτό συμβαίνει διότι για να παραχθεί ίδια ισχύς αλλά με λειτουργία για παράδειγμα EGR αυξάνεται η κατανάλωση του κύριου καυσίμου και όχι του πιλοτικού. Επιπλέον παρατηρείται ότι η ειδική κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου είναι μικρότερη όσο αυξάνεται η ισχύς πρόωσης. Αυτό συμβαίνει διότι είναι ανάλογη της ενέργειας καυσίμου η οποία με τη σειρά της είναι ανάλογη της ισχύς. Ο λόγος που χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα πιλοτικού καυσίμου στη μεθανόλη και ακόμη περισσότερη στην αμμωνία είναι λόγω της μεγάλης δυσκολίας που αντιμετωπίζουν τα καύσιμα αυτά να αναφλεγούν. Δηλαδή η θερμοκρασία ανάφλεξης τους είναι σχετικά υψηλή σε σχέση με το LNG και το LPG όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.4.1.



ΣΧΗΜΑ 5-7: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου(gr/kWh)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-5: Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου(gr/kWh)

Δείκτης(gr/kWh)	Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου
ME-DI	0
ME-GI	4
ME-LGIM	13
ME-LGIP	8
XDF-S2.0	2
ME-GA	1
Ammonia Engine	40

5.1.4 Ισχύς επιπρόσθετων συστημάτων

Τα επιπρόσθετα μηχανήματα σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές είναι ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια που πρέπει να ληφθεί υπόψη και είναι μηχανήματα κυρίως τα οποία χρησιμοποιούνται στο σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου στην μηχανή όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3. Αυτά τα μηχανήματα καταναλώνουν μεγάλα ποσά ισχύος με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ηλεκτρικά φορτία άρα μεγαλύτερη ισχύ των ηλεκτρογεννητριών. Καθώς δε χρησιμοποιούνται όλα τα εναλλακτικά καύσιμα που μελετώνται σε ηλεκτροκινητήρες, η κατανάλωση πετρελαίου είναι αυξημένη σε αυτές.

Το κάθε είδος μηχανής λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο και χρησιμοποιεί διαφορετικού είδους βοηθητικά μηχανήματα. Η αξιολόγηση της ισχύς που καταναλώνεται από αυτά θα γίνει με ποιοτικό τρόπο διότι είναι δύσκολος ο ακριβής προσδιορισμός τους. Οι μηχανές που χρησιμοποιούν καύσιμο σε υγρή φάση(LPG, μεθανόλη, αμμωνία) χρησιμοποιούν γενικότερα λιγότερα και χαμηλότερης ισχύς συστήματα σε σχέση με τις μηχανές αέριου καυσίμου(LNG υψηλής και χαμηλής πίεσης). Συγκεκριμένα το σύστημα της μεθανόλης είναι το πιο απλό λόγω της υγρής φάσης του καυσίμου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και λόγω της χαμηλής πίεσης τροφοδοσίας της(13 bar). Η μηχανή με LPG καταναλώνει μεγαλύτερη ισχύ λόγω της εύκολης εξάτμισης του καυσίμου και της συνεχούς ρύθμισης της θερμοκρασίας του μέσω heater/cooler. Επίσης οι αντλίες καταναλώνουν μεγαλύτερη ισχύ λόγω της μεγαλύτερης πίεσης τροφοδοσίας (53 bar). Από την άλλη η μηχανή κατανάλωσης αμμωνίας έχει το πιο απαιτητικό σύστημα τροφοδοσίας διότι πέρα από την υψηλή πίεση τροφοδοσίας της(80 bar), θα πρέπει να έχει ένα υψηλής ποιότητας σύστημα αποφυγής διαρροής λόγω της υψηλής τοξικότητας του καυσίμου. Συγκεκριμένα αποτελείται από knock-out drums και σύστημα κατακράτησης της αμμωνίας ώστε να μη διαφύγει εκτός συστήματος. Στις μηχανές χρήσης αέριου καυσίμου η μηχανή με υψηλής πίεσης τροφοδοσίας (300 bar) έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση στα βοηθητικά της μηχανήματα λόγω της χρήσης κρουογενικών αντλιών και του vaporizer υψηλής πίεσης. Αντίθετα στη μηχανή χαμηλής πίεσης LNG οι αντλίες και ο vaporizer καταναλώνουν λιγότερη ισχύ διότι λειτουργούν για πίεση καυσίμου LNG στα 5.5- 12 bar.

Η ποιοτική αξιολόγηση στηρίζεται στα παραπάνω και έγινε σε κλίμα 1 έως 10 με το μεγαλύτερο score να αντιστοιχεί σε χαμηλή κατανάλωση ισχύος των επιπρόσθετων συστημάτων όπως φαίνεται στον πίνακα 5-6. Συγκεκριμένα το 10 αντιστοιχεί σε μηδενική κατανάλωση ισχύος των βοηθητικών μηχανημάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-6: Αξιολόγηση Ισχύος επιπρόσθετων συστημάτων

Δείκτης(score)	Ισχύς επιπρόσθετων συστημάτων
ME-DI	7
ME-GI	1
ME-LGIM	6
ME-LGIP	4
XDF-S2.0	2
ME-GA	2
Ammonia Engine	3

5.2 Οικονομικά

5.2.1 Κόστος Κατανάλωσης καυσίμου

Η κατανάλωση καυσίμου σε κάθε κύρια μηχανή είναι ένα υψηλού ύψους οικονομικό έξοδο συνήθως για τα πλοία. Στις τεχνολογίες που εξετάζονται θα πρέπει να ληφθεί η κατανάλωση τόσο του κύριου εναλλακτικού καυσίμου όσο και η κατανάλωση του πιλοτικού συμβατικού καυσίμου. Ο υπολογισμός του κόστους κατανάλωσης καυσίμου θα πραγματοποιηθεί για ισχύ της κύριας μηχανής στο 80% του MCR και σε λειτουργία 80% σε Tier II και 20% σε Tier III.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-7: Κατανάλωση κύριων μηχανών

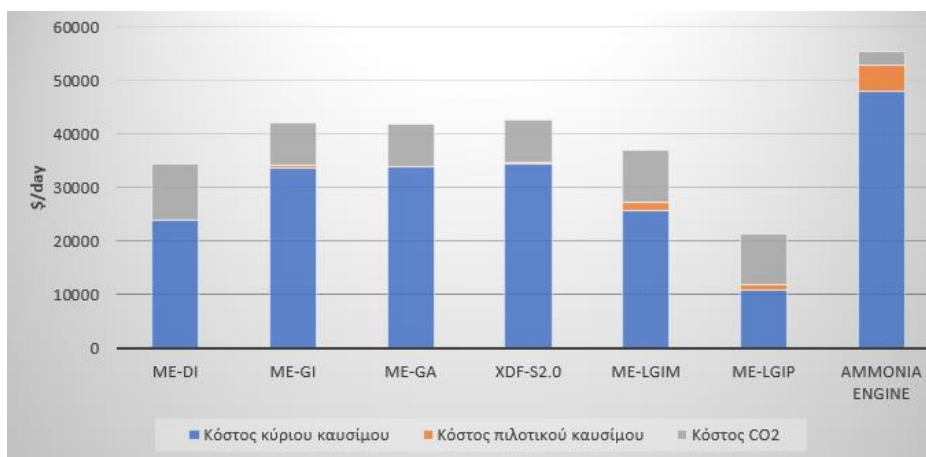
Κατανάλωση κύριων μηχανών							
gr/kWh	ME-DI	ME-GI	ME-GA	XDF-S2.0	ME-LGIM	ME-LGIP	Ammonia Engine
Κατανάλωση κύριου καυσίμου	159.3	133.28	133.9	136	320.12	141.8	141.8
Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου	0	3.27	1.05	1.8	10.9	6.54	32.7

Επιπλέον λαμβάνονται υπόψη τιμές καυσίμων όπως αναφέρονται στον πίνακα 5-8 [42-45].

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-8: Τιμές καυσίμων

Fuel type	\$/tn _{fuel}
VLSFO	713
LNG	1193.6
LPG	365
Μεθανόλη	379
Αμμωνία	1600

Στην ανάλυση που κάνουμε προβλέπεται και μια τιμή για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα 97\$/tn CO_{2e} [47]. Επίσης οι εκπομπές λήφθηκαν από τον δείκτη GWP-100 όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5.3.1.



ΣΧΗΜΑ 5-8: Κόστος καυσίμων ανά μέρα

Παρατηρούμε λοιπόν ότι οι μηχανές που χρησιμοποιούν LNG λόγω της υψηλής τιμής του LNG έχουν ένα μεγάλο ημερήσιο κόστος. Αυτό συμβαίνει λόγω της αλματώδους αύξησης της τιμής του τον τελευταίο καιρό. Η κατάσταση όμως που υπάρχει οικονομικά αυτή τη στιγμή στον κόσμο είναι μια ασταθής κατάσταση και δεν σημαίνει ότι τα επόμενα χρόνια θα διατηρηθεί έτσι. Μέχρι το 2020 η τιμή του LNG ήταν το 1/10 της τιμής που είναι τώρα. Επιπλέον η υψηλή τιμή της αμμωνίας αποκλείεται να συνεχίσει να υφίσταται στο μέλλον διότι το καύσιμο αυτό είναι σε ένα πρώιμο στάδιο και σίγουρα θα είναι πιο διαδεδομένο στο μέλλον με αποτέλεσμα να μειωθεί η τιμή του αρκετά. Προβλέπεται ότι θα βρίσκεται στη μισή τιμή έως το 2035 [46].

Η αμμωνία ως καύσιμο επίσης είναι σε υψηλή τιμή λόγω της ελάχιστης χρησιμοποίησης της ως καύσιμο έως τώρα. Στα επόμενα χρόνια σε περίπτωση όπου είναι διαδεδομένες μηχανές με καύσιμο αμμωνίας η τιμή της θα μειωθεί δραματικά και θα γίνει πιο βιώσιμη.

Επιπλέον ένα ακόμα ζήτημα που προκύπτει είναι το ποσό που είναι αναγκαίο να πληρωθεί για την ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που εκλύεται στην ατμόσφαιρα. Αυτή η νομοθεσία θα τεθεί σε εφαρμογή κατά πάσα πιθανότητα από το 2023 και θα έχει μεταβαλλόμενη τιμή ανά τόνο CO₂ όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.2. Δεδομένου της αύξησης της τιμής για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα τα επόμενα χρόνια στο μέλλον μια συμβατική μηχανή θα είναι λιγότερο προσιτή από μια άλλη μηχανή χαμηλών εκπομπών CO₂.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-9: Κόστος καυσίμων ανά μέρα

\$/day	ME-DI	ME-GI	ME-GA	XDF-S2.0	ME-LGIM	ME-LGIP	Ammonia Engine
Κόστος κύριου καυσίμου	23988	33598	33755	34284	25624	10931	47917
Κόστος πιλοτικού καυσίμου	0	492	158	271	1641	985	4924
Κόστος συνολικού καυσίμου χωρίς κόστος CO ₂	23988	34091	33913	34555	27265	11916	52841
Κόστος CO ₂	10368	8094	7971	8133	9727	9446	2425
Κόστος συνολικού καυσίμου με κόστος CO ₂	34356	42185	41884	42688	36993	21361	55267

5.2.2 Κόστος δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμου

Οι δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων είναι αρκετά ιδιαίτερες και περίπλοκες για τα περισσότερα εναλλακτικά καύσιμα. Επιπλέον επηρεάζει και η χαμηλή ενεργειακή τους πυκνότητα σε σχέση με το συμβατικό καύσιμο. Το κόστος των δεξαμενών φαίνεται στον πίνακα 5-10 και ουσιαστικά ακολουθεί αυτά που αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 3.2 και 4.6. Για να γίνει όσο το δυνατόν πιο ακριβές γίνεται το κόστος αυτό θα πρέπει να επιλεχθεί το μέγεθος της σύμφωνα με τα GJ (Giga Joule) καυσίμου που μπορεί να αποθηκεύσει. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγονται 40000 GJ όπου είναι μια συνήθης επιλογή για ένα πλοίο που λειτουργεί στο 80 % του MCR που έχει επιλεγεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-10: Κόστος κατασκευής δεξαμενών καυσίμου (USD/GJ)

Τύπος καυσίμου	Κόστος κατασκευής δεξαμενών καυσίμου(USD/GJ)
VLSFO	20
LNG	130
LPG	60
Methanol	45
Ammonia	80

5.2.3 Κόστος μηχανής

Σε αυτό το κριτήριο εξετάζεται το κόστος της κάθε μηχανής με βάση δεδομένα που πάρθηκαν από τις συναντήσεις που πραγματοποιήθηκαν με ναυτιλιακές εταιρείες στα πλαίσια της διπλωματικής. Μέσα στο κόστος μηχανής αποτελείται και το σύστημα τροφοδοσίας του καυσίμου που αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του ολικού κόστους μηχανής. Αξίζει να αναφερθεί ότι κάθε είδος μηχανής έχει από ένα ίδιο σύστημα τροφοδοσίας συμβατικού καυσίμου το οποίο χρησιμοποιείται όταν η μηχανή λειτουργεί σε fuel oil mode ή σε dual fuel mode για την έγχυση του πιλοτικού καυσίμου. Έτσι στο συγκεκριμένο κριτήριο θα γίνει σύγκριση για το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης του συστήματος τροφοδοσίας του εναλλακτικού καυσίμου το οποίο έχει αρκετές ιδιαιτερότητες όπως αναλύθηκαν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3.1 αλλά και το κόστος της μηχανής από τον κατασκευαστή.

Στον πίνακα 5-11 αναφέρεται το κόστος των μηχανών κατά προσέγγιση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-11: Κόστος μηχανής

Τύπος καυσίμου	Million USD
VLSFO	2.53
LNG, low pressure	5.72
LNG, high pressure	7.7
Ammonia	8.54
Methanol	3.96
LPG	4.4

Παρατηρείται όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.1 ότι αρκετά μεγάλο κόστος παρουσιάζουν οι LNG μηχανές και ειδικά η υψηλής πίεσης τροφοδοσίας λόγω του ακριβού συστήματος τροφοδοσίας που διαθέτουν και ειδικά του Pump vaporizer unit. Αυτά τα μηχανήματα αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους της μηχανής. Στη συνέχεια λόγω της ιδιαιτερότητας της αμμωνίας και της μη παραγωγής της ακόμα είναι λογικό να αποτελεί την πιο ακριβή μηχανή η οποία τιμή της όμως είναι προσεγγιστική καθώς όπως προαναφέρθηκε δεν έχει βγει ακόμα στην αγορά. Στη συνέχεια ακολουθεί η μηχανή LPG και ακόμα πιο κάτω η μηχανή της μεθανόλης. Αυτές είναι δύο όμοιες μηχανές οι οποίες διαφέρουν σαν κόστος κυρίως στο σύστημα τροφοδοσίας τους εναλλακτικού καυσίμου καθώς είναι απαραίτητη η επίτευξη υψηλότερης πίεσης τροφοδοσίας στη μηχανή LPG (53bar) σε σχέση με της μεθανόλης (13bar). Τέλος η πιο προσιτή λύση λόγω της μαζικότητας της παραγωγής και της έλλειψης δεύτερου συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου είναι η συμβατική μηχανή η οποία παραμένει αρκετά χαμηλά σε σχέση με τις άλλες επιλογές.

5.2.4 Κόστος συντήρησης

Το κόστος συντήρησης της μηχανής που είναι ένα έξοδο μαζί με το κόστος καυσίμου που είναι απαραίτητο να πληρώνει ένας πλοιοκτήτης για τη σωστή λειτουργία του πλοίου είναι ένα απαραίτητο κριτήριο που πρέπει να τεθεί κατά την επιλογή κάποιας μηχανής. Λόγω της δυσκολίας να αξιολογηθεί αυτό το κριτήριο ποσοτικά μέσω από βιβλιογραφικές πηγές και μέσα από συζήτηση με εκπροσώπους της ναυτιλιακών εταιρειών έγινε μια ποιοτική αξιολόγηση για τις μηχανές όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5-12 [29, 67, 68].

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-12: Κόστος συντήρησης

Τύπος καυσίμου	Κόστος συντήρησης
VLSFO	10
LNG, low pressure	7
LNG, high pressure	7
Ammonia	6
Methanol	9
LPG	8

Το παραπάνω score όσο πιο μεγάλο είναι τόσο πιο μικρό δηλώνει ότι είναι το κόστος συντήρησης. Ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι το κόστος συντήρησης σε μηχανές υγροποιημένων αέριων καυσίμων (LNG, LPG, αμμωνία) είναι μεγαλύτερο λόγω της μεγίστης ασφάλειας που είναι αναγκαίο να υπάρχει σε συστήματα εξαερισμού και διαρροών. Το μεγαλύτερο από όλα να είναι το κόστος της αμμωνίας λόγω της χρήσης ειδικών συστημάτων αποφυγής διαρροής της αμμωνίας αλλά και της νέας τεχνολογίας η οποία θα έρθει στο προσκήνιο με αποτέλεσμα τα πρώτα χρόνια να υπάρχει μια αβέβαιη κατάσταση. Επιπλέον λόγω των διαφόρων περίπλοκων συστημάτων που απαρτίζουν τις μηχανές LNG το κόστος συντήρησης είναι πιθανό να ξεπερνάει το κόστος συντήρησης της μηχανής του LPG.

5.3 Περιβαλλοντολογικά

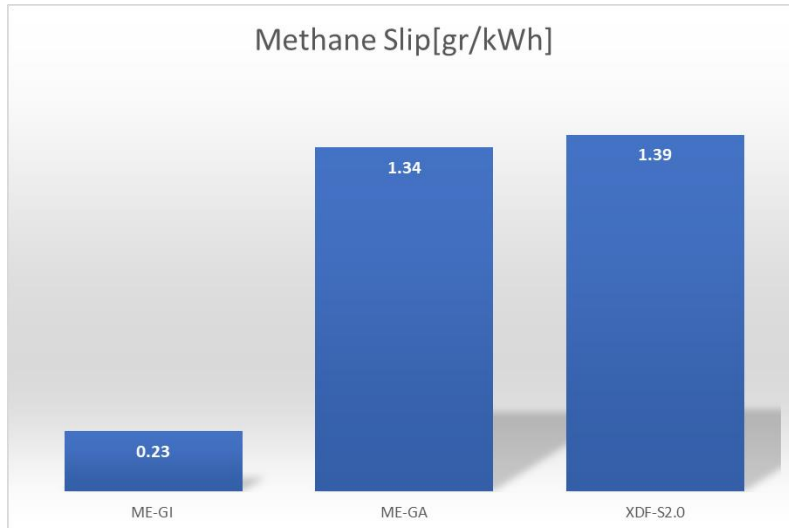
5.3.1 Global Warming Potential – 100 years

Το Global Warming Potential είναι ένα από τα περιβαντολογικά κριτήρια και δηλώνει την θερμότητα που απορροφάται από οποιοδήποτε αέριο του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα ως πολλαπλάσιο της θερμότητας που απορροφάται από το CO₂. Τα αέρια θερμοκηπίου τα οποία θα εξεταστούν στο παρόν κεφάλαιο είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το άκαυστο μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου στην περίπτωση της αμμωνίας καθώς στις άλλες μηχανές η εκπομπή νιτρικού οξέος είναι αμελητέα. Οι εκπομπές άκαυστου μεθανίου στην ατμόσφαιρα είναι 28 φορές πιο βλαβερές από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα συνεπώς θα πολλαπλασιαστούν με 28 ώστε να προκύψει το συνολικό GWP – 100. Οι μηχανές που εκπέμπουν άκαυστο μεθάνιο είναι αυτές που λειτουργούν με LNG ως καύσιμο λόγω της φύσης αυτού. Στον πίνακα 5-12 παρουσιάζονται οι εκπομπές μεθανίου για τις μηχανές αυτές ανάλογα το φορτίο του κινητήρα. Αυτές οι τιμές έχουν προκύψει από συνδυασμό πηγών από κατασκευαστές, από ναυτιλιακές εταιρείες και συγκεκριμένες παρουσιάσεις νηογυμνώνων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-13: Εκπομπές μεθανίου ανάλογα το φορτίο του κινητήρα

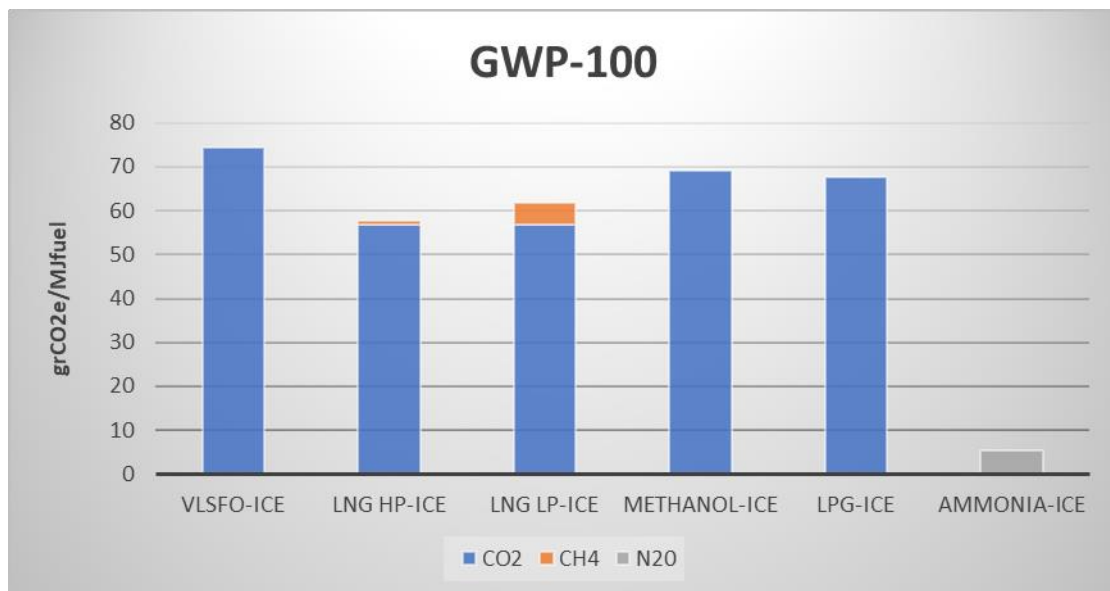
Methane Slip[gr/kWh]				
LOAD	25%	50%	75%	100%
ME-GI	0.28	0.25	0.23	0.2
ME-GA	1.7	1.5	1.29	1.08
X-DF-S2.0	1.7	1.5	1.3	1.3

Επιπλέον ανάγοντας τις παραπάνω εκπομπές στον E3 cycle προκύπτει το σχήμα 5-9 για τις εκπομπές μεθανίου αυτών των μηχανών.



ΣΧΗΜΑ 5-9: Εκπομπές μεθανίου με βάση τον E3 cycle

Για τη σύγκριση των μηχανών με βάση το GWP θα γίνει αναγωγή των εκπομπών σε $\text{gr/MJ}_{\text{fuel}}$. Αυτό προϋποθέτει ότι θα θεωρήσουμε ένα συμβολικό βαθμό απόδοσης για την κάθε μηχανή στο 50% ώστε να γίνει η αναγωγή από gr/kWh μηχανής σε $\text{gr/MJ}_{\text{fuel}}$. Προκύπτουν λοιπόν οι παρακάτω τιμές του κριτηρίου όπως φαίνεται στο σχήμα 5-10 και στον πίνακα 5-13.



ΣΧΗΜΑ 5-10: Global Warming Potential – 100 years

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-14: Global Warming Potential – 100 years

TANK-TO-PROPELLER						
gr/MJfuel	VLSFO-ICE	LNG HP-ICE	LNG LP-ICE	Methanol-ICE	LPG-ICE	Ammonia-ICE
CO ₂	74.4 ⁴⁸	56.8 ⁴⁹	56.7 ⁴⁹	69.1 ⁴⁸	67.5 ⁴⁸	-
CH ₄	-	0.03	0.18	-	-	-
28 CH ₄	-	0.89	5.02	-	-	-
N ₂ O	-	-	-	-	-	5.5 ⁵⁰
GWP 100	74.4	57.7	61.7	69.1	67.5	5.5
% μείωση σε σχέση με VLSFO ICE	0	22.4	17	7.1	9.3	92.6

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρείται ότι η συμβατική μηχανή εκπέμπει τη μεγαλύτερη ποσότητα αέριων του θερμοκηπίου ακολουθώντας η μηχανή της μεθανόλης και του LPG. Η LNG μηχανή με κύκλο Diesel εκπέμπει λιγότερες εκπομπές από την αντίστοιχη με κύκλο Otto λόγω της χαμηλής ποσότητας διαφυγής μεθανίου η οποία είναι μεγαλύτερη στον κύκλο Otto διότι εκπέμπεται μεγάλη ποσότητα πριν την καύση διότι διαφεύγει περιμετρικά του εμβόλου καθώς παραμένει για αρκετό χρόνο μέσα στον κύλινδρο. Τέλος το μοναδικό καύσιμο που δεν περιέχει άνθρακα δηλαδή η αμμωνία έχει αμελητέες εκπομπές αέριων του θερμοκηπίου. Βέβαια λόγω του γεγονότος ότι δεν έχει κατασκευαστεί μηχανή με καύσιμο αμμωνία δεν είναι ακριβή τα παραπάνω αποτελέσματα για το υποξείδιο του αζώτου, όμως ακόμη και η ποσότητα αυτών να είναι μεγάλη υπάρχει η τεχνολογία κατασκευής καταλύτη όπου θα εμποδίζει την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων νιτρικού οξέος στην ατμόσφαιρα.

5.3.2 Εκπομπές NO_x

Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι αρκετά βλαβερές στο περιβάλλον όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.4. Όλες οι μηχανές χρειάζονται μια τεχνολογία μείωσης των εκπομπών αυτών σε φυσιολογικά επίπεδα εκτός από την μηχανή με καύσιμο LNG και κύκλο Otto. Αυτή η μηχανή αν και δεν χρειάζεται κάποια πρόσθετη τεχνολογία είναι μόνιμα σε λειτουργία το EGR ώστε να μειώσει τις εκπομπές άκαυστου μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον στις μηχανές συμβατικού καυσίμου, LNG κύκλου Diesel και από ότι φαίνεται και της αμμωνίας υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης τόσο SCR όσο και EGR. Κάθε μία τεχνολογία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με αποτέλεσμα να χρειάζεται ανάλυση για το ποια τεχνολογία αξίζει να χρησιμοποιηθεί. Έτσι οι μηχανές του LPG και της μεθανόλης

όπου μπορούν να χρησιμοποιήσουν μόνο SCR και EGR αντίστοιχα έχουν ένα μειονέκτημα σε σχέση με τις παραπάνω μηχανές. Επίσης στη μηχανή της μεθανόλης υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί έγχυση νερού ώστε να μειώσει τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Στις μηχανές με LPG χρησιμοποιείται SCR διότι ο συνδυασμός LPG και EGR οδηγεί σε σχηματισμό ανεπιθύμητου καπνού στα καυσαέρια. Επιπλέον ο συνδυασμός μεθανόλης και SCR οδηγεί σε ανεπιθύμητες εκπομπές αερίων οι οποίες δεν είναι νομοθετημένες για περιορισμό αλλά αυτό μπορεί να προκύψει στο μέλλον. Έτσι στον πίνακα 5-14 φαίνεται η αξιολόγηση αυτού του κριτηρίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-15: Αξιολόγηση εκπομπών NO_x με βάση τις τεχνολογίες που απαιτούνται

Δείκτης(score)	Εκπομπές NO _x
ME-DI	10
ME-GI	10
ME-LGIM	8
ME-LGIP	5
XDF-S2.0	5
ME-GA	5
Ammonia Engine	10

5.3.2 Εκπομπές SO_x

Οι εκπομπές οξειδίων του θείου ήταν ένα σοβαρό θέμα στο παρελθόν αλλά έχει μειωθεί αρκετά με τη χρήση καυσίμου VLSFO. Κανένα από τα υπόλοιπα καύσιμα που εξετάζονται δεν περιέχει θείο ώστε να εκπέμπει οξείδια του θείου. Έτσι η κάθε μηχανή αξιολογείται ανάλογα τη ποσότητα πιλοτικού καυσίμου που χρησιμοποιείται διότι μόνο από αυτό προκύπτουν εκπομπές θείου. Η αξιολόγηση γίνεται με το ποσοστό έγχυσης πιλοτικού καυσίμου ως προς τη συνολική ενέργεια καυσίμου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-16: Αξιολόγηση εκπομπών SO_x με βάση την κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου

Δείκτης(%)	Εκπομπές SO _x
ME-DI	100
ME-GI	1.5
ME-LGIM	5
ME-LGIP	3
XDF-S2.0	0.84
ME-GA	0.48
Ammonia Engine	15

5.4 Ιδιαιτερότητες καυσίμων

5.4.1 Ασφάλεια καυσίμου

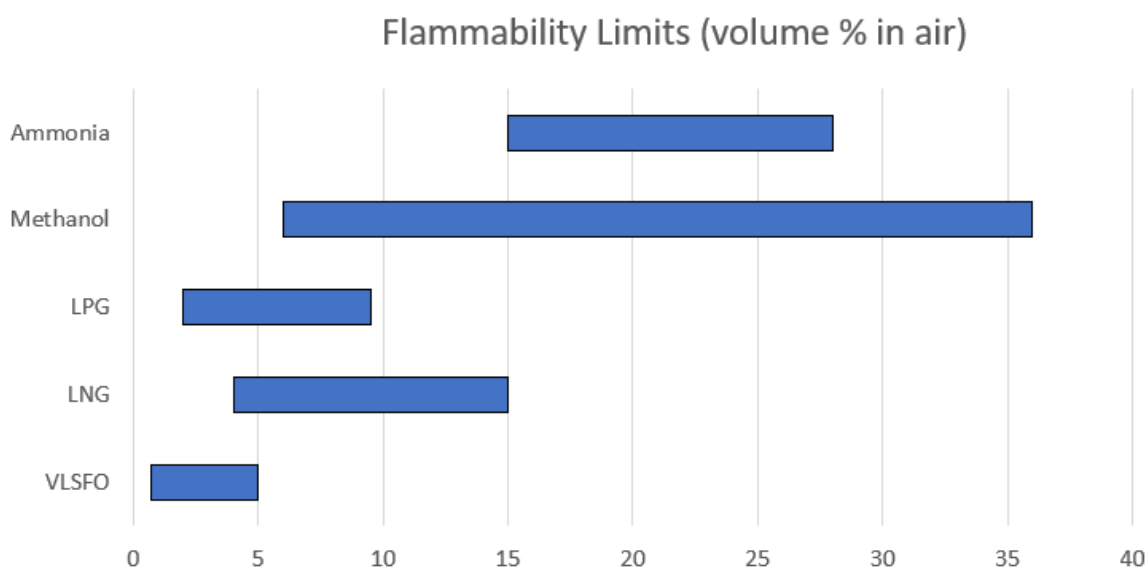
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ασφάλεια του κάθε καυσίμου είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα που αξίζει να αξιολογηθούν. Για να γίνει σωστά η αξιολόγηση της για κάθε καύσιμο θα χωριστεί σε υποκατηγορίες όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3-13.

- Όρια αναφλεξιμότητας

Δηλώνουν την ελάχιστη και τη μέγιστη περιεκτικότητα καυσίμου σε αέρα ώστε να γίνει ανάφλεξη παρουσία φλόγας. Στον πίνακα 5-17 και στο σχήμα 5-11 παρουσιάζονται αυτά τα όρια για κάθε καύσιμο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-17: Όρια αναφλεξιμότητας για κάθε καύσιμο

Fuel type	Flammability Limits (volume % in air)
VLSFO	0.7-5
LNG	4-15
LPG	2-9.5
Methanol	6-36
Ammonia	15-28



ΣΧΗΜΑ 5-11: Όρια αναφλεξιμότητας για κάθε καύσιμο

Η αξιολόγηση του υποκριτηρίου των ορίων αναφλεξιμότητας θα πραγματοποιηθεί μέσω του αριθμού RF όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.5 ώστε να ληφθεί υπόψη τόσο το εύρος των ορίων όσο και οι τιμές αυτών. Έτσι προκύπτει λοιπόν ο πίνακας 5-18.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-18: Αριθμός RF για όλα τα καύσιμα

Τύπος καυσίμου	Αριθμός RF
VLSFO	80.66
LNG	46.82
LPG	54.64
Methanol	32.71
Ammonia	6.82

Προκύπτει λοιπόν ότι την χειρότερη συμπεριφορά την έχει το συμβατικό καύσιμο ενώ με μεγάλη διαφορά την καλύτερη συμπεριφορά την έχει η αμμωνία. Επίσης αξίζει να αναφερθεί ότι τα στοιχεία που λήφθηκαν για το LPG λήφθηκαν συγκεκριμένα για το

προπάνιο όπου είχε μικρή διαφορά από το βουτάνιο. Αυτό έγινε διότι δεν είναι δεδομένη η σύσταση του LPG και επιπλέον η μηχανή LGIP έχει φτιαχτεί να λειτουργεί με προπάνιο κυρίως και όλα τα δεδομένα της είναι με αυτό ως καύσιμο αναφοράς.

- **Θερμοκρασία αυτανάφλεξης**

Δηλώνει την ελάχιστη θερμοκρασία όπου μπορεί να αυταναφλεγεί το καύσιμο σε κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό το κριτήριο επιδρά θετικά σε όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του σε θέμα καύσης σε μηχανή Diesel όπου θέλουμε σχετικά γρήγορη αυτανάφλεξη αλλά επιδρά αρνητικά σε θέμα ασφάλειας διότι αυξάνονται οι πιθανότητες καύσης σε περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας του. Στον πίνακα 5-19 φαίνεται η θερμοκρασία αυτανάφλεξης για κάθε καύσιμο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-19: Θερμοκρασία αυτανάφλεξης καυσίμων

Τύπος καυσίμου	Θερμοκρασία αυτανάφλεξης(°C)
VLSFO	250
LNG	537
LPG	490
Methanol	470
Ammonia	630

Παρατηρείται ότι και σε αυτό το υποκριτήριο ασφάλειας το συμβατικό καύσιμο έχει τη χειρότερη συμπεριφορά ενώ η αμμωνία την καλύτερη. Τα υπόλοιπα καύσιμα έχουν μικρές διαφορές με ικανοποιητική θερμοκρασία αυτανάφλεξης.

- **Σημείο Ανάφλεξης**

Το σημείο ανάφλεξης σε αντίθεση με την θερμοκρασία αυτανάφλεξης δεν επηρεάζει καθόλου τη λειτουργία της καύσης και γενικότερα της μηχανής. Αντίθετα είναι πολύ σημαντική σε θέμα ασφάλειας καθώς δηλώνει την ελάχιστη θερμοκρασία όπου

μπορεί να αναφλεγεί το καύσιμο παρουσία φλόγας. Στον πίνακα 5-20 παρουσιάζονται οι τιμές αυτού του κριτηρίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-20: Σημείο ανάφλεξης καυσίμων

Τύπος καυσίμου	Σημείο ανάφλεξης (°C)
VLSFO	61
LNG	-188
LPG	-105
Methanol	9
Ammonia	132

Παρατηρείται ότι πάλι την καλύτερη συμπεριφορά την έχει η αμμωνία αλλά τα άλλα κρυογενικά καύσιμα(LNG, LPG) πολύ κακή συμπεριφορά και συγκεκριμένα υποδεικνύουν ότι τυχόν ανάπτυξη φλόγας θα οδηγήσει σε ακαριαία ανάφλεξη τους. Επίσης η μεθανόλη είναι σε αρκετά χαμηλά επίπεδα ενώ το συμβατικό καύσιμο έχει μια ικανοποιητική τιμή που δεν δημιουργεί κάποιο πρόβλημα.

- Κρυογενικό

Με την παρουσία εναλλακτικών καυσίμων τα οποία κάποια από αυτά αποθηκεύονται σε χαμηλές θερμοκρασίες προκύπτει το θέμα της κρυογενικότητας όπου δημιουργεί αρκετά προβλήματα τα οποία αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.5 λεπτομερώς. Στον πίνακα 5-21 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες αποθήκευσης του κάθε καυσίμου όπου με βάση αυτές θα γίνει η αξιολόγηση αυτού του υποκριτηρίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-21: Κρυογενικότητα καυσίμων

Τύπος καυσίμου	Κρυογενικό
VLSFO	No
LNG	-162 °C
LPG	-42 °C
Methanol	No
Ammonia	-33 °C

Στη χειρότερη κατάσταση βρίσκεται το LNG ακολουθώντας το LPG και η αμμωνία, ενώ τα άλλα καύσιμα δεν έχουν πρόβλημα κρυογενικότητας.

- Τοξικότητα

Η τοξικότητα είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα διότι μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο τραυματισμό ή ακόμα και σε θάνατο σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα τον δείκτη τοξικότητας του καυσίμου. Θα αξιολογηθεί ποιοτικά στην προκειμένη περίπτωση όπως φαίνεται στον πίνακα 5-22.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-22: Τοξικότητα καυσίμων

Δείκτης(Score)	Τοξικότητα
VLSFO	0
LNG	0
LPG	0
Methanol	4
Ammonia	10

Παρατηρείται ότι λόγω της υψηλής τοξικότητας της αμμωνίας όπου δημιουργεί προβλήματα ακόμα και σε έμμεση επαφή του ανθρώπου με αυτήν βρίσκεται στην

χειρότερη κατάσταση σε σχέση με τα άλλα καύσιμα. Επίσης η μεθανόλη μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα σε κάποιον άνθρωπο όταν έρθει σε άμεση επαφή με αυτόν λόγω της υψηλής διαβρωτικότητας της. Τα υπόλοιπα καύσιμα δεν έχουν κανένα πρόβλημα τοξικότητας.

Τέλος, συνοψίζοντας όλα τα υποκριτήρια της ασφάλειας καυσίμου μπορούμε να συμπεράνουμε ότι σε γενικές γραμμές η αμμωνία έχει την καλύτερη συμπεριφορά αν βέβαια εξαιρεθεί το τεράστιο πρόβλημα που δημιουργεί η τοξικότητα της που ίσως είναι το πιο σημαντικό ζήτημα ασφάλειας. Επιπλέον ένα ακόμα καύσιμο που ακολουθεί σε θέματα ασφάλειας σε όλα τα επίπεδα εκτός από το σημείο ανάφλεξης είναι το LPG. Τα υπόλοιπα καύσιμα είναι περίπου στην ίδια κατηγορία, εξαρτάται βέβαια και από τη σημαντικότητα του κάθε υποκριτηρίου η οποία θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια συντελεστών βαρύτητας στο κεφάλαιο 6.

5.4.2 Αξιοπιστία εφοδιαστικής αλυσίδας καυσίμου

Για να πραγματοποιηθεί μια σωστή αξιολόγηση αυτού του κριτηρίου θα πρέπει να χωριστεί σε δύο επιμέρους υποκριτήρια όπως φαίνεται στο σχήμα 3-14. Συγκεκριμένα θα αξιολογηθούν ποιοτικά η τρέχουσα παραγωγή των καυσίμων και οι υπάρχουσες υποδομές bunkering. Παρακάτω θα αναφερθούν στοιχεία για κάθε καύσιμο όπου θα βοηθήσουν στην αξιολόγηση του κάθε υποκριτηρίου.

- LNG

Η διαθεσιμότητα του φυσικού αερίου φαίνεται ότι είναι μεγάλη και μπορεί να καλύψει επαρκώς και πιθανές αυξημένες ζητήσεις στο μέλλον. Το 2021 υπήρξε αύξηση του εμπορίου του LNG κατά 4.5% σε σχέση με το 2020 δηλαδή συνολικά 372.3 million tn. Αυτή η αύξηση προέκυψε κυρίως από την Αμερική, την Αίγυπτο και την Αλγερία. Η βάση παραγωγής λοιπόν είναι ευρεία και αναπτύσσεται ακόμα περισσότερο τα τελευταία χρόνια.

Οι σταθμοί και γενικότερα οι υποδομές που υπάρχουν για να φορτώνουν τα πλοία LNG και να το χρησιμοποιούν ως καύσιμο είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για την εφοδιαστική αλυσίδα του LNG. Σε ένα πλοίο υπάρχουν 4 τρόποι να φορτωθεί LNG.

α) Από φορτηγό σε πλοίο(κυρίως για μικρών απαιτήσεων πλοία)

β) Από δεξαμενή τερματικού σταθμού σε πλοίο

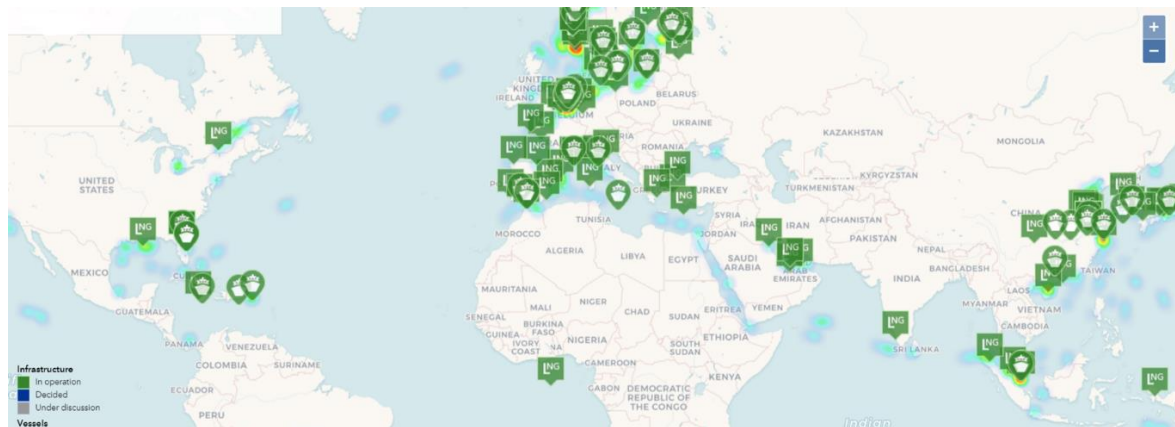
γ) Από πλοίο σε πλοίο

δ) Μέσω μεταφοράς φορητών δεξαμενών(container)

Η δεύτερη και η τρίτη επιλογή είναι οι πιο συνηθισμένες για πλοία υψηλών απαιτήσεων σε LNG. Η τρίτη επιλογή δίνει μεγάλη ευελιξία στον εφοδιασμό καθώς

μπορεί να γίνει ο εφοδιασμός των πλοίων σχεδόν σε οποιοδήποτε μέρος χρειάζεται μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων φορτηγίδων. Επιπλέον δεν θεωρείται ακριβή υποδομή σε σχέση με τις άλλες επιλογές. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν 39 μάρτζες σε λειτουργία με τις μισές να είναι από 5000-10000 m³ και είναι σε παραγγελία άλλες 4. Η τέταρτη επιλογή είναι και η πιο καινοτόμα αλλά χωρίς να είναι πλήρως ανεπτυγμένη. Είναι όμως και αυτή μια λύση η οποία εισήλθε στην αγορά από τη Wartsila το 2010 ως 'LNGpac' [11, 52-56].

Παρακάτω στο σχήμα 5-12 παρουσιάζεται και ο χάρτης με όλες τις υποδομές για εφοδιασμό LNG αυτή τη στιγμή στον κόσμο.



ΣΧΗΜΑ 5-12: Υποδομές εφοδιασμού LNG στον κόσμο([51])

- LPG

Η παραγωγή του LPG είναι σχεδόν στα ίδια επίπεδα με την κατανάλωση του fuel oil στη ναυτιλία και φαίνεται να αυξάνεται τα τελευταία χρόνια κατά 2-3 % ανά έτος. Συνολικά το 2021 υπήρξαν 106.4 million tn εξαγωγές LPG με τους 52.9 tn να είναι από την Αμερική. Ενώ η παραγωγή του LPG το 2019 ήταν 332.3 million tn. Μπορεί λοιπόν να αυξηθεί η παραγωγή LPG τα επόμενα χρόνια σε περίπτωση που αυξηθεί η ζήτηση από τη ναυτιλία.

Η φόρτωση του LPG ως καύσιμο γίνεται με τους τρόπους που γίνεται και η φόρτωση στο LNG. Και εδώ η τροφοδοσία καυσίμου από πλοίο σε πλοίο είναι η καλύτερη επιλογή και από οικονομικής σκοπιάς και λόγω της μεγάλης ευελιξίας που προσφέρει. Τα πλοία που τροφοδοτούν με καύσιμο (LPG bunker vessels) είναι μικρά σε μέγεθος (500-20000 m³) και μπορούν να εφοδιάσουν πλοία τόσο μέσα όσο και

έξω από το λιμάνι. Υπάρχει μεγάλη ανάπτυξη για τις υποδομές εφοδιασμού πλοίων LPG καθώς υπάρχουν πάνω από 1000 υποδομές αποθήκευσης ή τερματικοί σταθμοί και πάνω από 700 μικρά πλοία για vessel to vessel bunkering. Είναι λοιπόν εύκολο να αναπτυχθούν και άλλες υποδομές εφοδιασμού πλοίων στις ήδη υπάρχουσες υποδομές αποθήκευσης LPG. Παρακάτω στο σχήμα 5-13 φαίνονται όλοι οι τερματικοί σταθμοί εισαγωγής και εξαγωγής στην Ευρώπη. [29, 52, 56, 58-60].



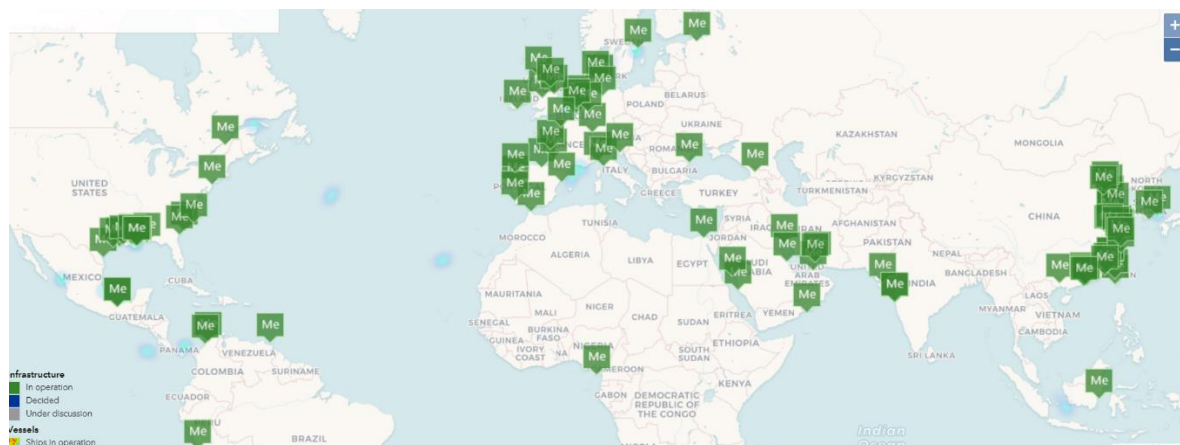
ΣΧΗΜΑ 5-13: Τερματικοί σταθμοί LPG στην Ευρώπη([57])

- Μεθανόλη

Το 90% της μεθανόλης που παράγεται σήμερα είναι από φυσικό αέριο. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή της μεθανόλης είναι εξαρτώμενη από την παραγωγή φυσικού αερίου. Το 2021 υπήρξε παραγωγή σχεδόν 107 million tn μεθανόλης 4.5% μεγαλύτερη παραγωγή σε σχέση με το 2020. Βέβαια λόγω της πολύ χαμηλής της θερμογόνου δύναμης αυτό μεταφράζεται σε περίπου 55 million tn HFO. Οι εισαγωγές και εξαγωγές κυμαίνονται γύρω στα 30-32 million tn σταθερά σε σχέση με το 2020. Γενικά υπάρχει αρκετή παραγωγή δεδομένου ότι η πλειοψηφία της μεθανόλης παράγεται από φυσικό αέριο. Φαίνεται λοιπόν πως αν στο μέλλον χρησιμοποιηθούν περισσότερο οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή της μεθανόλης ίσως μπορεί να υπάρξει σε μεγάλη διαθεσιμότητα.

Οι υποδομές τροφοδοσίας της μεθανόλης ως καύσιμο δεν έχουν αναπτυχθεί αρκετά με αποτέλεσμα να είναι αρκετά περιορισμένες. Βέβαια υπάρχουν 117 αποθηκευτικοί

χώροι μεθανόλης σε αντίστοιχους τερματικούς σταθμούς. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει δυνατότητα ανάπτυξης υποδομών εφοδιασμού των πλοίων σε αυτούς τους τερματικούς σταθμούς. Για να υπάρχουν λοιπόν οι κατάλληλες υποδομές για να μπορούν να υποστηριχθούν τα πλοία από μεθανόλη πρέπει να γίνουν αρκετές επενδύσεις τόσο στους τερματικούς σταθμούς όσο και σε bunker vessels (πλοία εφοδιασμού). Παρακάτω στο σχήμα 5-14 φαίνονται οι 117 αποθηκευτικοί χώροι σε όλο το κόσμο.[31, 33, 52, 56, 61]



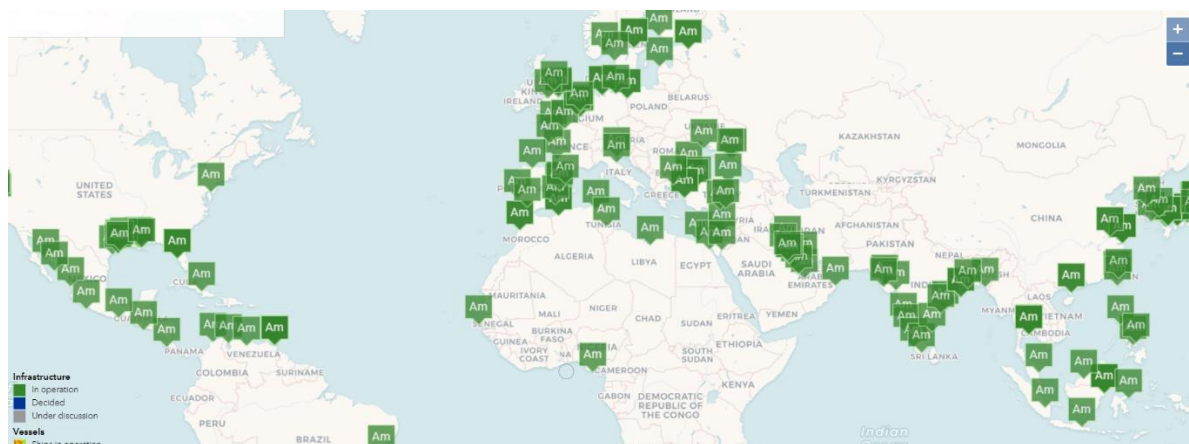
ΣΧΗΜΑ 5-14: Αποθηκευτικοί χώροι μεθανόλης στον κόσμο ([51])

- Αμμωνία

Η αμμωνία αν και δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμα ως καύσιμο μεταφέρεται για άλλες χρήσεις(το 80% για σύνθεση λιπασμάτων) μέσω πλοίων LPG(σχεδόν 71 πλοία LPG από 2500 έως 40000 m³) διότι έχει παρόμοιες ιδιότητες για την αποθήκευση της. Γενικά η συνολική της παραγωγή ανέρχεται σχεδόν στα 185 million tn το 2020 συνολικά έχοντας σταθερή πορεία τα τελευταία χρόνια, με το μεγαλύτερο ποσοστό να είναι brown αμμωνία δηλαδή να προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Αν ξεκινήσει η χρήση της και στη ναυτιλία ως καύσιμο τότε θα αυξηθεί δραματικά η παραγωγή της και μπορεί να αξιοποιηθεί έτσι η αποθήκευση άνθρακα στα πλοία (Carbon Capture System) καθώς μέσω αυτού μπορεί να παραχθεί η blue αμμωνία. Επίσης οι εισαγωγές και εξαγωγές άγγιξαν σχεδόν τα 19 million tn το 2020.

Υπάρχουν ήδη επαρκείς υποδομές για τη μεταφορά της αμμωνίας αλλά υποδομές για τη τροφοδοσία αμμωνίας σε πλοία ως καύσιμο δεν έχουν δημιουργηθεί ακόμα. Ένα θετικό είναι ότι μπορεί η αμμωνία να παραχθεί από υδρογόνο και άζωτο τοπικά σε κάποιο αποθηκευτικό χώρο στα λιμάνια. Το μόνο που χρειάζεται είναι ηλεκτρικό ρεύμα. Επειδή όμως αυτό είναι μία κοστοβόρα και καινοτόμα διαδικασία ειδικά για τα λιμάνια είναι πιο πιθανή η τροφοδοσία της αμμωνίας όπως ακριβώς γίνεται και με το LPG. Η μόνη διαφορά προκύπτει στη φύση της τοξικότητας της αμμωνίας με

αποτέλεσμα η πιο ασφαλή λύση να είναι η τροφοδοσία από πλοίο σε πλοίο παρά από τερματικό σταθμό ή φορτηγό σε πλοίο. Καταλήγουμε λοιπόν ότι αν και δεν υπάρχουν ακόμα διαθέσιμες υποδομές bunkering(είναι υπό συζήτηση 2 σύμφωνα με τον DNV), υπάρχει η τεχνογνωσία μεταφοράς της αμμωνίας και είναι θετικό το ότι η αμμωνία έχει πολλά κοινά χαρακτηριστικά ως καύσιμο με το LPG. Παρακάτω στο σχήμα 5-15 παρουσιάζονται οι υποδομές αποθήκευσης αμμωνίας στον κόσμο(συνολικά 195).[39, 52, 62, 63]



ΣΧΗΜΑ 5-15: Αποθηκευτικοί χώροι αμμωνίας στον κόσμο ([51])

Η αξιολόγηση λοιπόν για την αξιοπιστία της εφοδιαστικής αλυσίδας των καυσίμων θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια αξιολόγησης των δύο επιμέρους υποκριτηρίων όπως φαίνεται στον πίνακα 5.23.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-23: Αξιολόγηση εφοδιαστικής αλυσίδας καυσίμων

Δείκτης(Score)	Τρέχουσα παραγωγή καυσίμου	Υποδομές bunkering	Αξιοπιστία εφοδιαστικής αλυσίδας
VLSFO	9	10	9.5
LNG	9	9	9
LPG	7	7	7
Methanol	4	5	4.5
Ammonia	5	3	4

Το συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι αν και οι υποδομές bunkering του VLSFO είναι πλήρως ανεπτυγμένες, υπάρχει περιθώριο βελτίωσης στην παραγωγή του καθώς δεν καλύπτει όλες τις ανάγκες της ναυτιλίας αφού αρκετά πλοία χρησιμοποιούν HFO με χρήση scrubber. Επιπλέον η παραγωγή LNG είναι σε ένα πολύ καλό επίπεδο και έχει μεγάλες δυνατότητες βελτίωσης αλλά η τροφοδοσία του ως καύσιμο χρήζει ανάπτυξη όπως συμβαίνει με το LPG όπου η παραγωγή του είναι λίγο χαμηλότερη. Η μεθανόλη λόγω της μειωμένης της χρήσης δεν έχει μεγάλη παραγωγή και ούτε υποδομές τροφοδοσίας της ως καύσιμο. Βέβαια το θετικό της είναι ότι μπορεί να αποθηκευτεί σε συμβατικές δεξαμενές χωρίς μεγάλο κόστος. Τέλος η αμμωνία έχει μια παραγωγή η οποία δεν καλύπτει τις ανάγκες της ναυτιλίας με αποτέλεσμα να έχει περιθώριο ανάπτυξης. Η τροφοδοσία της στα πλοία αν και δεν είναι καθόλου ανεπτυγμένη έχει ως θετικό ότι μπορεί να γίνει μέσω πλοίων LPG αφού έχουν παρόμοιες ιδιότητες ως καύσιμα.

5.4.3 Νομοθεσία

Εξαιτίας της πρόσφατης αξιοποίησης των εναλλακτικών καυσίμων, δημιουργείται ένα πρόβλημα στη νομοθεσία καθώς δεν έχουν νομοθετηθεί κανονισμοί από τον IMO και συγκεκριμένα από τον IGF code(International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels) για όλα τα εναλλακτικά καύσιμα κάτι το οποίο είναι ένα μειονέκτημα για την χρήση αυτών σε πλοία.

Επιπλέον ένα ακόμη θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι κατά πόσο έχουν αναπτυχθεί κανόνες και γενικά υποδείξεις για τη χρήση των καυσίμων αυτών και την λειτουργία του πλοίο από τους νηογνώμονες.

Ο IGF code έχει δημιουργηθεί για να παρέχει υποχρεωτικές διατάξεις για όλα τα καύσιμα με χαμηλό σημείο ανάφλεξης τόσο για την εγκατάσταση των συστημάτων όσο και για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των μηχανημάτων και του εξοπλισμού. Επίσης περιλαμβάνει κανονισμούς για τις λειτουργικές απαιτήσεις μόνο για το υγροποιημένο ή συμπιεσμένο φυσικό αέριο (LNG, CNG) ως καύσιμο. Για τη χρησιμοποίηση όμως άλλου καυσίμου με χαμηλό σημείο ανάφλεξης πρέπει να κατασκευαστεί ένα εναλλακτικό design για να γίνει συμμόρφωση με τους κανονισμούς και να εγκριθεί από την σημαία του πλοίου. Οι κανονισμοί που αφορούν όμως gas carriers καλύπτονται από τον IGC code. Συνεπώς επιτρέπεται η χρήση LPG ως καύσιμο σε LPG πλοία σύμφωνα με τον IGC code [64, 65]. Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί ότι καύσιμα με χαμηλό σημείο ανάφλεξης είναι αυτά που έχουν χαμηλότερο από το επιτρεπόμενο που ορίζεται από τη SOLAS II-2/4.2.1.1 (δηλαδή 60°C). Αυτό σημαίνει ότι η αμμωνία δεν είναι καύσιμο χαμηλού σημείου ανάφλεξης. Επιπλέον λαμβάνοντας υπόψη τους νηογνώμονες ABS, BV, DNV, LR παρατηρούμε ότι κάποιιοι από αυτούς έχουν αναπτύξει κανόνες για χρήση εναλλακτικών καυσίμων ενώ κάποιιοι άλλοι όχι. Στον πίνακα 5-24 παρουσιάζονται οι νηογνώμονες και τα καύσιμα τα οποία έχουν αναπτύξει κανόνες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-24: Κανόνες νηογνωμόνων για εναλλακτικά καύσιμα

	LNG	LPG	Methanol	Ammonia
ABS	✓	✓	✓	✓
DNV	✓	✓	✓	✓
LR	✓		✓	
Bureau Veritas	✓*	✓**	✓**	✓**

*: Αναφέρονται κανονισμοί μόνο για κινητήρες LNG με τροφοδοσία χαμηλής πίεσης.

** : Αναφέρονται κανονισμοί μόνο για surveys

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι αρκετοί νηογνώμονες έχουν αναπτύξει κανόνες για χρήση εναλλακτικών καυσίμων με κάποιες μικρές εξαιρέσεις. Έτσι και σε συνδυασμό με

τους κανονισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω προκύπτει η αξιολόγηση που φαίνεται στον πίνακα 5-25.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-25: Αξιολόγηση Νομοθεσίας

Δείκτης(Score)	Νομοθεσία
VLSFO	10
LNG	10
LPG	9
Methanol	8
Ammonia	3

5.4.4 Ενεργειακή Πυκνότητα

Όλα τα εναλλακτικά καύσιμα έχουν ως μεγάλο μειονέκτημα την ενεργειακή τους πυκνότητα. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζονται μεγαλύτερες δεξαμενές καυσίμων για να μεταφέρουν την ίδια ενέργεια. Έτσι απαιτείται διαφορετική σχεδίαση του πλοίου με μεγαλύτερες δεξαμενές ανάλογα το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται στη μηχανή. Το πρακτικό πρόβλημα που προκύπτει σε καύσιμα με χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα όπως είναι τα εναλλακτικά που εξετάζουμε είναι ότι είτε οι δεξαμενές καυσίμου θα είναι αρκετά μικρές σε ενεργειακό περιεχόμενο με αποτέλεσμα το πλοίο να είναι αναγκασμένο να εφοδιάζεται με καύσιμο πολύ συχνά είτε η μηχανή δε θα μπορεί να λειτουργεί συνεχώς σαν dual fuel. Αν όμως επιλεγθεί κατά την κατασκευή του πλοίου να γίνουν μεγάλες δεξαμενές καυσίμου ώστε να φέρουν το απαραίτητο ενεργειακό περιεχόμενο αυτό επιφέρει απώλεια στο χώρο φορτίου κάτι το οποίο είναι ζημιογόνο για το πλοίο. Άρα μέσω αυτού του κριτηρίου αξιολογούμε τα καύσιμα στα τυχόν προβλήματα και αλλαγές σχεδιασμού που μπορεί να επιφέρουν στο πλοίο. Στον πίνακα 5-26 παρουσιάζεται η ενεργειακή πυκνότητα του κάθε καυσίμου και το μέγεθος της δεξαμενής σε σχέση με τη συμβατική.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-26: Αξιολόγηση ενεργειακής πυκνότητας

Δείκτης	Ενεργειακή πυκνότητα[GJ/m ³]	Μέγεθος δεξαμενής σε σχέση με το συμβατικό καύσιμο
VLSFO	35.7	1
LNG	21.2	1.7
LPG	26.7	1.34
Methanol	14.9	2.4
Ammonia	12.7	2.8

5.4.5 Χρόνος κράτησης στη δεξαμενή

Τα εναλλακτικά καύσιμα που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία εκτός της μεθανόλης είναι υγροποιημένα αέρια που αποθηκεύονται είτε μέσω πτώσης της θερμοκρασίας τους είναι μέσω αύξησης της πίεσης τους στις δεξαμενές. Στα εξωτερικά τοιχώματα των δεξαμενών όμως είναι πιθανό να υπάρξουν τυχόν απώλειες θερμότητας με αποτέλεσμα ένα μέρος του καυσίμου να εξατμίζεται μέσα στη δεξαμενή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται το υγρό καύσιμο μέσα στη δεξαμενή και να διατηρείται στη δεξαμενή λιγότερο χρόνο. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα των υγροποιημένων αερίων που επηρεάζει αρκετά τον τρόπο λειτουργίας της μηχανής. Από τη βιβλιογραφία δίνονται τυπικές τιμές ποσοστού εξατμίσεως ανά μέρα για σχεδόν γεμάτες δεξαμενές όπως φαίνονται παρακάτω.

- LNG: 0.15 – 0.25%
- LPG: 0.5 – 1%
- Αμμωνία: 1 – 2%

Έτσι παρατηρούμε ότι εξατμίζεται μικρότερο ποσοστό από το LNG και μεγαλύτερο από το LPG και την αμμωνία αν και η θερμοκρασία αποθήκευσης του LNG είναι αρκετά χαμηλότερη. Αυτό συμβαίνει διότι τα άλλα δύο καύσιμα και ειδικά η αμμωνία έχουν πολύ μεγαλύτερη τάση ατμών από το LNG με αποτέλεσμα να εξατμίζονται πιο εύκολα. Για να δούμε το πρακτικό πρόβλημα που δημιουργεί αυτό στην λειτουργία

του πλοίου θεωρήθηκε ότι είναι σκόπιμο να γίνει ένα ρεαλιστικό παράδειγμα όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Από ένα ήδη υπάρχον δεξαμενόπλοιο με δεξαμενές αποθήκευσης εναλλακτικού καυσίμου 2500 m³ και καθημερινή κατανάλωση 50 m³ λαμβάνοντας τις μέσες τιμές ποσοστών εξάτμισης για τα παραπάνω καύσιμα προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα για τον χρόνο κράτησης στις δεξαμενές.

- LNG: 47 ημέρες
- LPG: 42 ημέρες
- Αμμωνία: 37 ημέρες

Αυτό σημαίνει πολλά για τη λειτουργία της παραλαβής καυσίμων του πλοίου καθώς στην περίπτωση της αμμωνίας για παράδειγμα θα χρειαστεί σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα παραλαβή. Προφανώς αυτά τα νούμερα δεν είναι απόλυτα ακριβή διότι δε γνωρίζουμε ακριβώς το ποσοστό εξάτμισης του καυσίμου το οποίο αλλάζει κιόλας συναρτήσει του ποσοστού πληρότητας της δεξαμενής και της σύστασης του καυσίμου. Είναι όμως ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα το οποίο όμως χρίζει ποιοτική αξιολόγηση όπως φαίνεται στον πίνακα 5-27.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-27: Αξιολόγηση χρόνου κράτησης στη δεξαμενή

Δείκτης(Score)	Χρόνος κράτησης στη δεξαμενή
VLSFO	10
LNG	9
LPG	7
Methanol	10
Ammonia	5

5.5 Τεχνολογία

Σε αυτήν την ομάδα κριτηρίων αξιολογείται η ωριμότητα της τεχνολογίας για την κατασκευή μηχανών εναλλακτικών καυσίμων, η πολυπλοκότητα των συστημάτων σε μια εναλλακτική μηχανή και η απαραίτητη ικανότητα του πληρώματος που πρέπει να υπάρχει ώστε να λειτουργεί ομαλά το πλοίο χωρίς ανθρώπινα λάθη και τέλος το ρίσκο αστοχίας σημαντικών εξαρτημάτων ή συστημάτων της μηχανής τα οποία θίγουν το ζήτημα της αξιοπιστίας.

5.5.1 Ωριμότητα τεχνολογίας

Η ωριμότητα τεχνολογίας προκύπτει από την ποσότητα των μηχανών που έχουν κατασκευαστεί και τις ώρες λειτουργίας που έχουν καταγράψει. Συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η αξιολόγηση θα γίνει για τις μηχανές που κατασκευάζονται από την MAN Energy Solutions διότι η WinGD έχει κατασκευάσει μόνο μία μηχανή εναλλακτικού καυσίμου και συγκεκριμένα την μηχανή με LNG χαμηλής πίεσης τροφοδοσίας. Παρακάτω αναφέρονται τα στοιχεία για την ωριμότητα της τεχνολογίας [66].

- Συμβατική μηχανή

Διαχρονικά χρησιμοποιείται fuel oil σε αργόστροφες δίχρονες μηχανές οπότε είναι δεδομένη ωριμότητα της τεχνολογίας.

- Μηχανή LNG υψηλής πίεσης(ME-GI)

Η πρώτη μηχανή που λήφθηκε σε ναυπηγείο ήταν το 2012 και πλέον η ME-GI μετράει 2 εκατομμύρια ώρες σε λειτουργία. Αυτή τη στιγμή κυκλοφορούν 490 μηχανές ME-GI (27/10/22).

- Μηχανή LNG χαμηλής πίεσης(ME-GA, XDF)

Η WinGD κυκλοφόρησε την πρώτη μηχανή το 2013 και η MAN το 2019. Αυτή τη στιγμή κυκλοφορούν 192 μηχανές ME-GA (27/10/22). Ενώ η XDF μετράει 1.3 εκατομμύρια ώρες σε λειτουργία.

- Μεθανόλη(ME-LGIM)

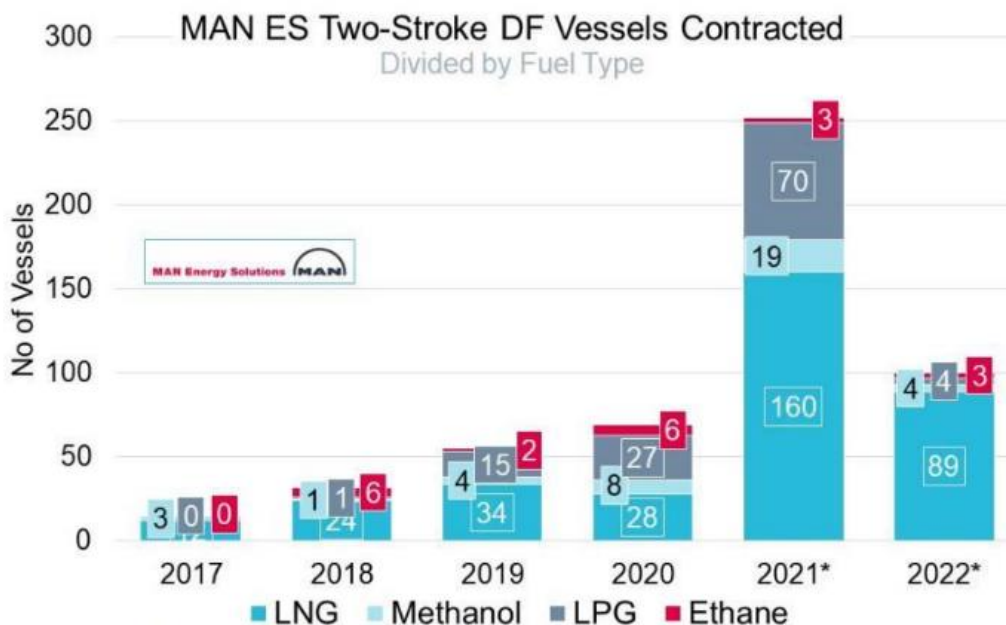
Η πρώτη μηχανή κατασκευάστηκε το 2016 και μετράει 120,000 ώρες λειτουργίας . Αυτή τη στιγμή κυκλοφορούν 68 μηχανές ME-LGIM (27/10/22).

- LPG(ME-LGIP)

Η πρώτη μηχανή κατασκευάστηκε το 2019 και μετράει πάνω από 7,000 ώρες λειτουργίας. Αυτή τη στιγμή κυκλοφορούν 134 μηχανές ME-LGIP (27/10/22).

- Αμμωνία

Άρχισε το project στην MAN το 2021 και αναμένεται η πρώτη μηχανή το 2023/2024



ΣΧΗΜΑ 5-16: Συμβόλαια της MAN για Dual Fuel μηχανές([66])

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι από τις μηχανές εναλλακτικών καυσίμων αυτή με την μεγαλύτερη ωριμότητα είναι η μηχανή LNG υψηλής πίεσης και ακολουθεί η μηχανή LNG χαμηλής πίεσης. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης ομοιότητας της πρώτης μηχανής με τη συμβατική καθώς εκτελείται κύκλος Diesel και όχι Otto όπως στην δεύτερη. Παρακάτω ακολουθεί η μηχανή LPG η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε LPG carriers χρησιμοποιώντας το φορτίο ως καύσιμο και φαίνεται ότι θα αυξηθεί η ζήτηση της στο μέλλον σύμφωνα με το σχήμα 5-16 ενώ παρακάτω είναι η μηχανή της μεθανόλης. Τέλος η μηχανή της αμμωνίας δεν έχει κατασκευαστεί ακόμα αλλά λόγω της έρευνας που γίνεται τα τελευταία χρόνια και λόγω της ομοιότητας του καυσίμου με το LPG προκύπτει μια μικρή αλλά ουσιαστική ωριμότητα. Στον πίνακα 5-28 παρουσιάζεται η ποιοτική αξιολόγηση αυτού του φορτίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-28: Αξιολόγηση ωριμότητας τεχνολογίας

Δείκτης(Score)	Ωριμότητα τεχνολογίας
ME-DI	10
ME-GI	8
ME-GA	7
ME-LGIP	5
ME-LGIM	4
Ammonia	2

5.5.2 Πολυπλοκότητα Συστημάτων και ικανότητα πληρώματος

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.6 η πολυπλοκότητα συστημάτων και η ικανότητα του πληρώματος ως κριτήριο διακλαδίζεται σε δύο υποκριτήρια που είναι το είδος του επιπρόσθετου εξοπλισμού για την κάθε τεχνολογία και ο τρόπος αποθήκευσης του εκάστοτε καυσίμου όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.6.

Στην περίπτωση του LNG η πολυπλοκότητα είναι η χειρότερη λόγω της ύπαρξης vaporizer καθώς χρειάζεται η μετατροπή του σε αέριο. Επίσης χρειάζεται ένα επιπλέον σύστημα τροφοδοσίας για το boil-off-gas στις ηλεκτρογεννήτριες. Η πολυπλοκότητα στις LNG μηχανές υψηλής πίεσης είναι ακόμα μεγαλύτερη λόγω της υψηλής πίεσης που απαιτείται σε συνδυασμό με τον vaporizer (PVU: Pump Vaporizer Unit). Τέλος η αποθήκευση του LNG γίνεται σε ιδιαίτερα διαμορφωμένες δεξαμενές που χρειάζονται υψηλού επιπέδου μόνωση για να επιτευχθεί θερμοκρασία στους -162°C. Οι κινητήρες μεθανόλης, LPG, αμμωνίας έχουν ίδιες αρχές λειτουργίας όμως λόγω της πίεσης τροφοδοσίας του καυσίμου χρειάζονται διαφορετικές αντλίες και γενικότερα ένα σύστημα προστασίας έναντι διαρροής πιο προστατευτικό σε χρήση LPG και ειδικά αμμωνίας λόγω της τοξικότητας της. Η δεξαμενή αποθήκευσης της

μεθανόλης είναι ίδια με τη συμβατική με μικρές διαφορές λόγω επίστρωσης ψευδαργύρου έναντι διάβρωσης. Από την άλλη οι δεξαμενές αμμωνίας, LPG είναι ειδικά διαμορφωμένες και μονωμένες ώστε να διατηρούν μία θερμοκρασία στους -33°C και -42° C αντίστοιχα. Έτσι συμπεραίνουμε ότι μια εταιρεία είναι απαραίτητο να εκπαιδεύσει το πλήρωμα που χρησιμοποιεί τόσο στην πολυπλοκότητα και τις ιδιαιτερότητες του νέου επιπρόσθετου εξοπλισμού αλλά και στις ιδιαιτερότητες που τυχόν έχουν τα καύσιμα στην αποθήκευση τους. Η εκπαίδευση πρέπει να γίνει διότι αλλιώς είναι πιθανόν να επέλθει κάποιο ανθρώπινο λάθος λόγω των νέων τεχνολογιών, Με βάση αυτά που αναφέρθηκαν παρουσιάζεται στον πίνακα 5-29 η αξιολόγηση τόσο των υποκριτηρίων όσο και του κριτηρίου της πολυπλοκότητας των συστημάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-29: Αξιολόγηση πολυπλοκότητας συστημάτων και ικανότητα πληρώματος

Δείκτης(Score)	Επιπρόσθετος Εξοπλισμός	Αποθήκευση καυσίμου	Πολυπλοκότητα συστημάτων και ικανότητα πληρώματος
ME-DI	10	10	10
ME-GI	3	5	4
ME-GA	4	5	4.5
ME-LGIP	7	7	7
ME-LGIM	8	9	8.5
Ammonia Engine	6	6	6

5.5.3 Ρίσκο αστοχίας

Σε αυτό το κριτήριο στόχος είναι να αξιολογηθούν οι μηχανές με βάση την αξιοπιστία που προσφέρουν σε τυχόν αστοχία κάποιου εξαρτήματος τους ή και ενός ολόκληρου συστήματος. Αυτό είναι κάτι που δεν το θέλει να συμβαίνει συχνά καμία ναυτιλιακή εταιρεία διότι πέρα από το κόστος της επισκευής της ζημιάς είναι πιθανό η ζημιά που θα προκληθεί να αναγκάσει το σταμάτημα του πλοίου με αποτέλεσμα να μην συνεχίσει τις διαδρομές που έκανε και να χαθούν αρκετά έσοδα. Το κριτήριο θα αξιολογηθεί ποιοτικά λαμβάνοντας υπόψη την γνώση των εκπροσώπων των ναυτιλιακών εταιρειών. Βασική σκέψη για την αξιολόγηση του ρίσκου αστοχίας ήταν κυρίως το ίδιο το καύσιμο που χρησιμοποιείται στη μηχανή. Αναφέρθηκε ότι στο LNG και στη μεθανόλη υπάρχει μια καθαρή καύση λόγω της καθαρότητας του καυσίμου με το μοναδικό μειονέκτημα στη χρήση LNG να είναι τα πολλά επιπρόσθετα συστήματα που υπάρχουν τα οποία αυξάνουν τον κίνδυνο αστοχίας. Στη συνέχεια η συμβατική μηχανή λόγω του καυσίμου το οποίο μπορεί είτε να μην είναι καλής ποιότητας είτε να περιέχει σε μεγάλο ποσοστό μέταλλα (catfines) μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα μέσα στο χώρο καύσης όπως φθορά στα χιτώνια και στα έμβολα, αστοχία των ελατηρίων και σχηματισμό εξανθρακωμάτων τόσο στα έμβολα όσο και στη βαλβίδα εξαγωγής. Τέτοια προβλήματα είναι καταστροφικά για τον κινητήρα και μπορεί να προκαλέσουν πέρα από καταστροφή κάποιου από αυτά τα εξαρτήματα και φωτιά σε περίπτωση εισροής καυσαερίων στην εισαγωγή μετά από αστοχία των ελατηρίων του εμβόλου. Τέλος λόγω της επικινδυνότητας και του μεγάλου ποσού εξάτμισης της αμμωνίας και του LPG αυξάνονται τα συστήματα έναντι διαρροής του καυσίμου και τα συστήματα τα οποία πρέπει να διατηρούν τα καύσιμα σε υγρή φάση με αποτέλεσμα κάποια αστοχία σε αυτά να είναι πιο πιθανή. Έτσι με βάση τα παραπάνω που αναφέρθηκαν αυτό το κριτήριο αξιολογείται όπως φαίνεται στον πίνακα 5-30.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-30: Αξιολόγηση ρίσκου αστοχίας

Δείκτης(Score)	Ρίσκο αστοχίας
ME-DI	6
ME-GI	8
ME-GA	8
ME-LGIP	3
ME-LGIM	9
Ammonia	3

Κεφάλαιο 6. Πολυκριτηριακή Σύγκριση Συστημάτων

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 έχει γίνει η επιλογή και η ομαδοποίηση κριτηρίων και τα αποτελέσματα αυτών είτε ποιοτικά είτε ποσοτικά υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 5. Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί κανονικοποίηση των ήδη υπολογιζόμενων δεικτών, ορισμός των συντελεστών βαρύτητας τόσο για τα υποκριτήρια, τα κριτήρια όσο και για τις ομάδες κριτηρίων ανάλογα το σενάριο που εξετάζεται και τέλος συνδυασμός αυτών ώστε να βγει ένα τελικό αποτέλεσμα στη σύγκριση των συστημάτων.

6.1 Υπολογισμός των δεικτών υποκριτηρίων

Για να προκύψει η τελική σύγκριση των συστημάτων είναι αναγκαίο να υπολογιστούν οι δείκτες των υποκριτηρίων λαμβάνοντας υπόψη συντελεστές βαρύτητας για να προκύψουν οι δείκτες των κριτηρίων στο κεφάλαιο 6.2. Τα υποκριτήρια που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση και τους επιλεγμένους συντελεστές βαρύτητας παρουσιάζονται στον πίνακα 6-1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1: Συντελεστές βαρύτητας υποκριτηρίων

Ασφάλεια καυσίμου	
Υποκριτήριο	Συντελεστής βαρύτητας
RF number	0.2
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης	0.1
Σημείο ανάφλεξης	0.25
Κρυογενικό	0.05
Τοξικότητα	0.4
Αξιοπιστία εφοδιαστικής αλυσίδας καυσίμου	
Υποκριτήριο	Συντελεστής βαρύτητας
Τρέχον παραγωγή καυσίμου	0.5
Υποδομές Bunkering	0.5
Πολυπλοκότητα συστημάτων	
Υποκριτήριο	Συντελεστής βαρύτητας
Επιπρόσθετος εξοπλισμός	0.5
Αποθήκευση καυσίμου	0.5

Επιπλέον είναι αναγκαία η κανονικοποίηση των τιμών των υποκριτηρίων ώστε με τη βοήθεια των συντελεστών βαρύτητας να υπολογιστούν οι δείκτες των εκάστοτε κριτηρίων. Στους πίνακες 6-2 έως 6-4 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες τιμές των υποκριτηρίων που αναφέρθηκαν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-2: Δείκτες υποκριτηρίων ασφάλειας καυσίμου

Καύσιμο/Υποκριτήριο	VLSFO	LNG	LPG	Μεθανόλη	Αμμωνία
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης	0	0.76	0.63	0.58	1
Σημείο Ανάφλεξης	0.78	0	0.26	0.62	1
Κρυογενικό	1	0	1	0.64	0.69
Τοξικότητα	1	1	1	0.4	0
RF number	0	0.46	0.35	0.65	1

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-3: Δείκτες υποκριτηρίων αξιοπιστίας εφοδιαστικής αλυσίδας καυσίμου

Καύσιμο/Υποκριτήριο	VLSFO	LNG	LPG	Μεθανόλη	Αμμωνία
Τρέχον παραγωγή καυσίμου	0.9	0.9	0.7	0.4	0.5
Υποδομές bunkering	1	0.9	0.7	0.5	0.3

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-4: Δείκτες υποκριτηρίων πολυπλοκότητας συστημάτων

Καύσιμο/Υποκριτήριο	ME-DI	ME-GI	ME-GA	ME-LGIP	ME-LGIM	Ammonia Engine
Επιπρόσθετος εξοπλισμός	1	0.3	0.4	0.7	0.8	0.6
Αποθήκευση καυσίμου	1	0.5	0.5	0.7	0.9	0.6

6.2 Υπολογισμός των δεικτών κριτηρίων

Ο υπολογισμός των δεικτών θα γίνει μέσω κανονικοποίησης λαμβάνοντας υπόψη την θετική ή αρνητική επίδραση του εκάστοτε δείκτη όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 και τους συντελεστές βαρύτητας των υποκριτηρίων όπου είναι απαραίτητο. Καταρχάς στον πίνακα 6-5 παρουσιάζονται τα κατώτερα και ανώτερα όρια των δεικτών που υπολογίζονται για κάθε ομάδα κατηγοριών. Στα κριτήρια που αξιολογούνται με ποιοτικό τρόπο τα όρια είναι από 1 έως 10 ενώ στα υπόλοιπα είναι ανάλογα το κάθε κριτήριο και των τιμών τους που προέρχονται από το κεφάλαιο 5. Στη συνέχεια θα γίνει η κανονικοποίηση των δεικτών για κάθε ομάδα κριτηρίων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-5: Κατώτερο και ανώτερο όριο κριτηρίων

ΤΕΧΝΙΚΑ				
Συμβολισμός	Κριτήριο	Μονάδα Μέτρησης	Κατώτερο όριο	Ανώτερο όριο
I1,1	Βαθμός Απόδοσης	-	0	1
I2,1	Ισχύς Καυσαερίων	kW	288	771
I3,1	Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου	gr/kWh	0	40
I4,1	Ισχύς βοηθητικών συστημάτων	-	0	10
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ				
Συμβολισμός	Κριτήριο	Μονάδα Μέτρησης	Κατώτερο όριο	Ανώτερο όριο
I1,2	Κόστος κατανάλωσης καυσίμου	\$/day	21361	55267
I2,2	Κόστος δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμου	\$/GJ	20	130
I3,2	Κόστος Μηχανής	\$	2.53	8.54
I4,2	Κόστος Συντήρησης	-	0	10
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ				
Συμβολισμός	Κριτήριο	Μονάδα Μέτρησης	Κατώτερο όριο	Ανώτερο όριο
I1,3	Global Warming Potential	grCO2e/Mjfuel	5.5	74.4
I2,3	Εκπομπές NOx	-	0	10
I3,3	Εκπομπές SOx	%	0	100

ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Συμβολισμός	Κριτήριο	Μονάδα Μέτρησης	Κατώτερο όριο	Ανώτερο όριο
I1,4	Ασφάλεια καυσίμου	-		*
I2,4	Αξιοπιστία εφοδιαστικής αλυσίδας καυσίμου	-	0	10
I3,4	Νομοθεσία	-	0	10
I4,4	Ενεργειακή Πυκνότητα	GJ/m ³	12.7	35.7
I5,4	Χρόνος κράτησης στη δεξαμενή	-	0	10

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Συμβολισμός	Κριτήριο	Μονάδα Μέτρησης	Κατώτερο όριο	Ανώτερο όριο
I1,5	Ωριμότητα τεχνολογίας	-	0	10
I2,5	Πολυπλοκότητα Συστημάτων και ικανότητα πληρώματος	-	0	10
I3,5	Ρίσκο αστοχίας	-	0	10

*: Τα όρια είναι διαφορετικά για κάθε υποκριτήριο που υπολογίζεται.

Στους πίνακες 6-6 έως 6-10 φαίνεται η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων των κριτηρίων που υπολογίσθηκαν στο κεφάλαιο 5 χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 2.1, 2.2 όπως αναφέρθηκαν και στο κεφάλαιο 2.

Όπου *i* συμβολίζει το κριτήριο της κάθε ομάδας και *j* την ομάδα κριτηρίων όπως φαίνεται παρακάτω.

j=1: Τεχνικά

j=2: Οικονομικά

j=3: Περιβαλλοντολογικά

j=4: Ιδιαιτερότητες καυσίμων

j=5: Τεχνολογία

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-6: Υπολογισμός δεικτών τεχνικών χαρακτηριστικών

Συμβολισμός/Μηχανή	$I_{1,1}$	$I_{2,1}$	$I_{3,1}$	$I_{4,1}$
ME-DI	0.52	1	0	0.7
ME-GI	0.523	0.847	0.985	0.1
ME-GA	0.526	0.53	0.995	0.2
ME-LGIP	0.523	0.847	0.97	0.4
ME-LGIM	0.521	0.855	0.95	0.6
Ammonia engine	0.523	0.847	0.85	0.3

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-7: Υπολογισμός δεικτών οικονομικών δεδομένων

Συμβολισμός/Μηχανή	$I_{1,2}$	$I_{2,2}$	$I_{3,2}$	$I_{4,2}$
ME-DI	0.617	1	1	1
ME-GI	0.386	0	0.14	0.7
ME-GA	0.395	0	0.47	0.7
ME-LGIP	1	0.636	0.69	0.8
ME-LGIM	0.539	0.773	0.76	0.9
Ammonia engine	0	0.455	0	0.6

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-8: Υπολογισμός δεικτών περιβαλλοντολογικής απόδοσης

Συμβολισμός/Μηχανή	$I_{1,3}$	$I_{2,3}$	$I_{3,3}$
ME-DI	0	1	0
ME-GI	0.24	1	0.985
ME-GA	0.18	0.5	0.995
ME-LGIP	0.10	0.5	0.97
ME-LGIM	0.08	0.8	0.95
Ammonia engine	0.80	1	0.85

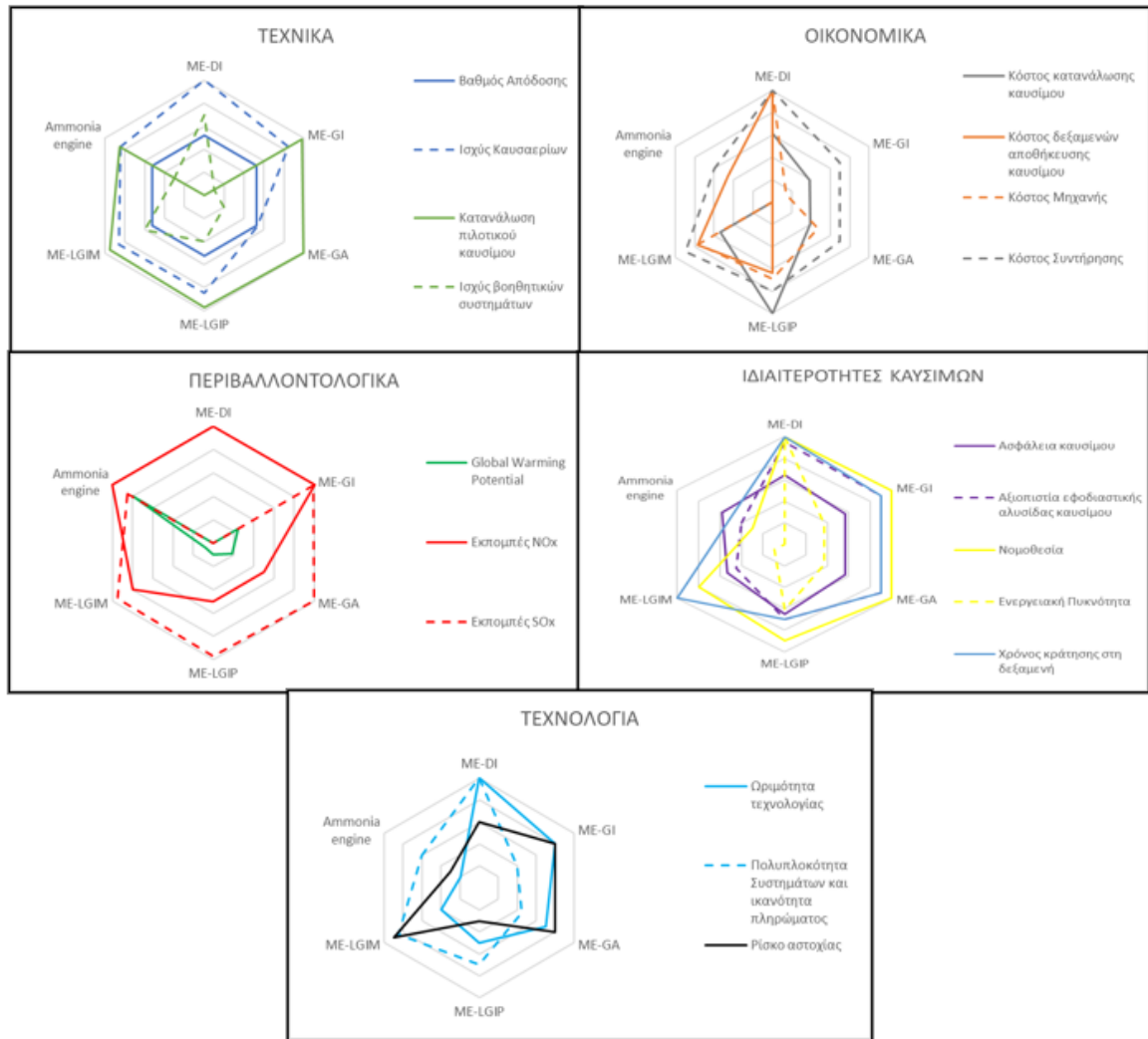
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-9: Υπολογισμός δεικτών ιδιαιτεροτήτων καυσίμων

Συμβολισμός/Μηχανή	$I_{1,4}$	$I_{2,4}$	$I_{3,4}$	$I_{4,4}$	$I_{5,4}$
ME-DI	0.645	0.95	1	1	1
ME-GI	0.568	0.9	1	0.37	0.9
ME-GA	0.568	0.9	1	0.37	0.9
ME-LGIP	0.648	0.7	0.9	0.61	0.7
ME-LGIM	0.535	0.45	0.8	0.095	1
Ammonia engine	0.5845	0.4	0.3	0	0.5

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-10: Υπολογισμός δεικτών τεχνολογίας

Συμβολισμός/Μηχανή	$I_{1,5}$	$I_{2,5}$	$I_{3,5}$
ME-DI	1	1	0.6
ME-GI	0.8	0.4	0.8
ME-GA	0.7	0.45	0.8
ME-LGIP	0.5	0.7	0.3
ME-LGIM	0.4	0.85	0.9
Ammonia engine	0.2	0.6	0.3

Για να γίνει καλύτερα η σύγκριση των κριτηρίων για τις μηχανές που μελετώνται παρουσιάζονται παρακάτω spider diagrams (διαγράμματα αράχνης) ανά ομάδα κριτηρίων για κάθε μηχανή.



ΣΧΗΜΑ 6-1: Spider diagrams για κάθε ομάδα κριτηρίων

6.3 Υπολογισμός των δεικτών ομάδων κριτηρίων

Για να υπολογιστούν οι τιμές των δεικτών για κάθε ομάδα κατηγοριών είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων. Ο καθορισμός αυτών των συντελεστών είναι ένα υποκειμενικό ζήτημα και καθορίζονται όπως φαίνεται παρακάτω.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-11: Καθορισμός συντελεστών βάρους κριτηρίων

ΤΕΧΝΙΚΑ		
Συμβολισμός	Κριτήριο	Συντελεστής βάρους
w1,1	Βαθμός Απόδοσης	0.25
w2,1	Ισχύς Καυσαερίων	0.35
w3,1	Κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου	0.25
w4,1	Ισχύς βοηθητικών συστημάτων	0.15
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ		
Συμβολισμός	Κριτήριο	Συντελεστής βάρους
w1,2	Κόστος κατανάλωσης καυσίμου	0.35
w2,2	Κόστος δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμου	0.1
w3,2	Κόστος Μηχανής	0.35
w4,2	Κόστος Συντήρησης	0.2
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ		
Συμβολισμός	Κριτήριο	Συντελεστής βάρους
w1,3	Global Warming Potential	0.9
w2,3	Εκπομπές NOx	0.05
w3,3	Εκπομπές SOx	0.05
ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ		
Συμβολισμός	Κριτήριο	Συντελεστής βάρους
w1,4	Ασφάλεια καυσίμου	0.35
w2,4	Αξιοπιστία εφοδιαστικής αλυσίδας καυσίμου	0.2
w3,4	Νομοθεσία	0.1
w4,4	Ενεργειακή Πυκνότητα	0.2
w5,4	Χρόνος κράτησης στη δεξαμενή	0.15

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ		
Συμβολισμός	Κριτήριο	Συντελεστής βάρους
w1,5	Ωριμότητα τεχνολογίας	0.6
w2,5	Πολυπλοκότητα Συστημάτων και ικανότητα πληρώματος	0.15
w3,5	Ρίσκο αστοχίας	0.25

Χρησιμοποιώντας όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2 την εξίσωση 2.3 και τους συντελεστές βάρους του πίνακα 6-11 λαμβάνονται οι τελικοί δείκτες απόδοσης κάθε ομάδας του πίνακα 6-12.

όπου w_{ij} ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου i της ομάδας κριτηρίων j όπως προσδιορίστηκε στο κεφάλαιο 6.2

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-12: Τιμές δεικτών για κάθε ομάδα κριτηρίων

Ομάδα κριτηρίων/Μηχανή	ΤΕΧΝΙΚΑ ($I_{s,1}$)	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ($I_{s,2}$)	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ ($I_{s,3}$)	ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ($I_{s,4}$)	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ($I_{s,5}$)
ME-DI	0.586	0.866	0.050	0.866	0.900
ME-GI	0.689	0.324	0.317	0.688	0.740
ME-GA	0.596	0.443	0.241	0.688	0.688
ME-LGIP	0.730	0.815	0.164	0.684	0.480
ME-LGIM	0.757	0.712	0.157	0.526	0.593
Ammonia engine	0.685	0.166	0.813	0.390	0.285

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 6-12 είναι αναγκαίο να δημιουργηθούν sector plots για κάθε μηχανή ώστε να μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν σε ποια ομάδα κριτηρίων υστερεί ή είναι σε καλό επίπεδο η εκάστοτε μηχανή. Στο σχήμα 6-2 παρουσιάζονται τα εκάστοτε sector plots (διαγράμματα κυκλικών τομέων).

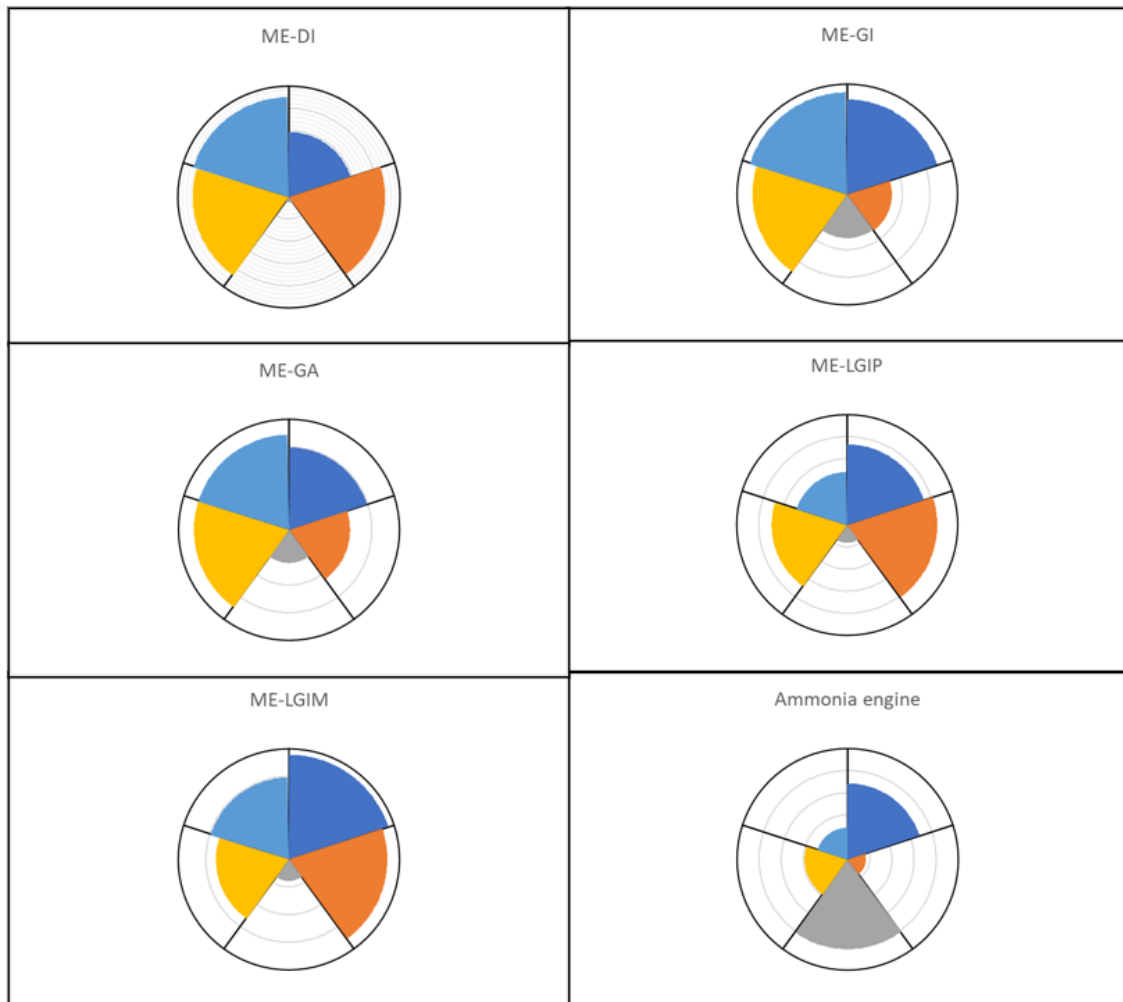
■ ΤΕΧΝΙΚΑ

■ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ

■ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ

■ ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

■ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



ΣΧΗΜΑ 6-2: Sector plots για κάθε μηχανή

Έτσι παρατηρούμε ότι η ME-DI έχει μια καλή συμπεριφορά σε όλες τις ομάδες κριτηρίων αλλά είναι σε πολύ χαμηλό επίπεδο στην περιβαλλοντολογική ομάδα κριτηρίων καθώς είναι η χειρότερη μηχανή συγκριτικά με τις άλλες. Κάτι παρόμοιο προκύπτει και για την ME-GI σε σχέση με τις άλλες ήδη υπάρχουσες μηχανές στην κατηγορία των οικονομικών δεδομένων. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της μεγάλης αύξησης των τιμών του LNG τα τελευταία χρόνια καθώς βρισκόμαστε σε μια κατάσταση μεταβατική. Αν γινόταν η ανάλυση με τιμές καυσίμων πριν από 3 έτη η ME-GI θα είχε μια από τις υψηλότερες βαθμολογίες στο οικονομικό θέμα. Για αυτό το κομμάτι ισχύουν τα ίδια για την ME-GA όμως αυτή χαρακτηρίζεται από χαμηλή βαθμολογία και στο περιβαλλοντολογικό κομμάτι λόγω της μεγάλης ποσότητας methane slip που εκλύεται από αυτήν κατά την καύση. Στη συνέχεια το ίδιο θέμα με τη περιβαλλοντολογική απόδοση προκύπτει και για την ME-LGIP. Γενικά λόγω των υπερβολικά χαμηλών εκπομπών CO₂ της μηχανής της αμμωνίας όλες οι άλλες μηχανές φαίνονται αρκετά ρυπογόνες. Επίσης χαμηλή βαθμολογία στο θέμα της τεχνολογίας έχει η ME-LGIP λόγω του μεγάλου ρίσκου αστοχίας. Τέλος, τόσο η ME-LGIM όσο και η ammonia engine είναι σε χαμηλό επίπεδο στις ιδιαιτερότητες του καυσίμου και στην τεχνολογία η οποία δεν είναι ανεπτυγμένη πλήρως.

6.4 Εξέταση διαφορετικών σεναρίων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν διάφοροι συνδυασμοί των συντελεστών βαρών των ομάδων κριτηρίων (σενάρια) ώστε να εξεταστεί η βέλτιστη λύση ανάλογα την ομάδα κατηγοριών που θεωρείται σε κάθε σενάριο. Τα διάφορα σενάρια θα προκύψουν από ανθρώπους εξειδικευμένους στον τομέα της ναυτιλίας καθώς αυτοί γνωρίζουν πολύ καλά ποιες είναι οι ανάγκες ενός πλοίου και τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή μιας κύριας μηχανής πλοίου αλλά θα σχηματιστούν κριτήρια λογικά σκεπτόμενα και τεκμηριωμένα. Επειδή όμως αυτό το θέμα είναι υποκειμενικό και εξαρτάται τόσο από το προφίλ της κάθε εταιρείας όσο και από τον τύπο των πλοίων που βρίσκονται στο στόλο των εταιρειών υπάρχουν διαφορετικά σενάρια τα οποία εξετάζονται. Έτσι είναι σίγουρο ότι δεν υπάρχει κάποια βέλτιστη επιλογή γενικά αλλά εξαρτάται από το βάρος που δίνει το κάθε σενάριο σε συγκεκριμένα κριτήρια.

Σενάριο 1

Το πρώτο σενάριο δε βασίζεται σε κάποια συγκεκριμένη φιλοσοφία αλλά γίνεται για να δούμε τη συμπεριφορά των δεικτών σε μια ομοιόμορφη κατανομή συντελεστών βάρους για τις ομάδες κριτηρίων. Με αυτόν τον τρόπο θεωρείται κάθε ομάδα κατηγοριών το ίδιο σημαντική με κάθε άλλη. Στον πίνακα 6-13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-13: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 1

ME-DI	0.65
ME-GI	0.55
ME-GA	0.53
ME-LGIP	0.57
ME-LGIM	0.55
Ammonia engine	0.47

Σε αυτό το σενάριο λοιπόν η συμβατική μηχανή με χρήση καυσίμου VLSFO θεωρείται η καλύτερη επιλογή. Σε αυτό το σενάριο όμως δεν έχει δοθεί κάποια βαρύτητα σε σημαντικά κριτήρια αλλά έχουν παρθεί όλες οι ομάδες ισοδύναμες. Βέβαια ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ότι παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές οι μηχανές που καταναλώνουν LNG έχουν παρόμοια απόδοση και αυτό

συμβαίνει λόγω του ίδιου καυσίμου που χρησιμοποιούν καθώς πολλά κριτήρια είναι εφαρμοσμένα για κάθε καύσιμο ανεξαρτήτως το είδος της μηχανής. Επιπλέον το ίδιο συμβαίνει στις ME-LGIM και ME-LGIP καθώς αν και δεν χρησιμοποιούν ίδιο καύσιμο η λειτουργία τους είναι παρόμοια με έγχυση καυσίμου σε υγρή καύση. Έτσι η παρόμοια λειτουργία τους ως μηχανές επιφέρει και παρόμοια απόδοση γενικά σε όλες τις ομάδες κριτηρίων. Σίγουρα στα επόμενα σενάρια όπου θα δοθούν συντελεστές βάρους σε συγκεκριμένες ομάδες κριτηρίων αυτή η ομοιομορφία δεν θα συνεχίσει να εμφανίζεται για αυτές τις μηχανές.

Σενάριο 2

Το δεύτερο σενάριο θα βασιστεί στην οικονομική ανάλυση της κάθε τεχνολογίας δίνοντας περισσότερη βάση σε αυτή. Ουσιαστικά η καλύτερη τεχνολογία είναι κατά πολύ συνώνυμη με την τεχνολογία στην οποία έχουμε τα μικρότερο οικονομικό αντίκτυπο τόσο στην κατασκευή όσο και στη λειτουργία της. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω συντελεστές βαρύτητας με βάση τα παραπάνω.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-14: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 2

Ομάδες κατηγοριών	ΤΕΧΝΙΚΑ	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ	ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
Συντελεστές βαρύτητας	0.1	0.6	0.1	0.1	0.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-15: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 2

ME-DI	0.76
ME-GI	0.44
ME-GA	0.49
ME-LGIP	0.69
ME-LGIM	0.63
Ammonia engine	0.32

Έτσι προκύπτει ότι η καλύτερη λύση για αυτό το σενάριο είναι η μηχανή που χρησιμοποιεί VLSFO με μικρή διαφορά από τη LGIP. Αυτό συμβαίνει διότι έχει δοθεί μεγαλύτερη έμφαση τόσο στην καθημερινή κατανάλωση καυσίμου όσο και στο

κόστος μηχανής στο οποίο υπερτερεί με διαφορά η συμβατική μηχανή σε σχέση με όλες τις άλλες. Οι υπόλοιπες επιλογές δεν είναι και πολύ οικονομικές ιδιαίτερα η επιλογή της αμμωνίας και των μηχανών LNG. Για την αμμωνία αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι ακόμα εφαρμόσιμη ως καύσιμο κάτι που την καθιστά ακριβή. Αυτό ίσως αλλάξει στο μέλλον όταν η χρήση της αμμωνίας γίνει ευρεία και η κυκλοφορία αυτής της μηχανής ξεκινήσει. Επιπλέον για τις μηχανές LNG τα κόστη καυσίμου είναι ακριβά το τελευταίο διάστημα λόγω του πολέμου. Αυτό έχει επηρεάσει αρκετά την τιμή του LNG όμως είναι πολύ πιθανό να επανέλθει το LNG στην πολύ χαμηλή τιμή του και έτσι να γίνει μια πολύ καλή και βιώσιμη επιλογή. Επιπλέον η επιλογή της ME-LGIM φαίνεται αρκετά καλή έχοντας όμως περιθώρια βελτίωσης όταν χρησιμοποιείται και αυτή ευρέως μειώνοντας έτσι το κόστος της.

Σενάριο 3

Εξαιτίας της τάσης των τελευταίων καιρών για ραγδαία μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου και γενικότερα των βλαβερών ουσιών που εκπέμπονται στο περιβάλλον τέθηκε ορθό να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στην περιβαλλοντολογική απόδοση της κάθε τεχνολογίας. Με αυτήν την επιλογή δίνεται μια καινοτόμα επιλογή καθώς όλες οι συμβατικές λύσεις που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια είναι σε ένα μεγάλο ποσοστό τους αρκετά ρυπογόνες στο περιβάλλον. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω συντελεστές βαρύτητας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-16: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 3

Ομάδες κατηγοριών	ΤΕΧΝΙΚΑ	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ	ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
Συντελεστές βαρύτητας	0.1	0.1	0.6	0.1	0.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-17: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 3

ME-DI	0.35
ME-GI	0.43
ME-GA	0.39
ME-LGIP	0.37
ME-LGIM	0.35
Ammonia engine	0.64

Η καλύτερη λύση φαίνεται ότι στην προκειμένη περίπτωση είναι η μηχανή που καταναλώνει αμμωνία διότι παράγει τις λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και συγκεκριμένα μηδενικό διοξείδιο του άνθρακα. Επειδή όμως η συγκεκριμένη μηχανή δεν έχει χρησιμοποιηθεί σε κάποιο πλοίο αλλά βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο είναι άγνωστο για το τι θα προκύψει σχετικά με τις εκπομπές N₂O. Οι εκπομπές αυτές σε περίπτωση που είναι υψηλές θα αντιμετωπιστούν με συγκεκριμένο καταλύτη. Αυτό όμως είναι ένα αρνητικό για αυτήν τη μηχανή καθώς προσθέτει μια νέα και άγνωστη τεχνολογία η οποία μπορεί να επηρεάσει αρκετά τη λειτουργία της. Για τον παραπάνω λόγο έχει τεθεί μία χαμηλότερη τιμή στον δείκτη I_{1,3} για τη μηχανή της αμμωνίας η οποία έχει συμπεριληφθεί στον παραπάνω υπολογισμό. Επόμενη επικρατέστερη λύση με μικρή διαφορά από τις υπόλοιπες είναι η ME-GI. Αυτό συμβαίνει λόγω της σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης άκαυστου μεθανίου που προκύπτει από αυτή σε αντίθεση με τη ME-GA.

Σενάριο 4

Ένα άλλο σενάριο το οποίο αξίζει να γίνει είναι ένα σενάριο που θα δώσει έμφαση περισσότερο σε τεχνικά ζητήματα όπου έτσι δίνεται μια βάση περισσότερο στην μηχανή και στη λειτουργία της χωρίς όμως να υποεκτιμά τη σημαντικότητα του οικονομικού και του περιβαλλοντολογικού μέρους. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω συντελεστές βαρύτητας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-18: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 4

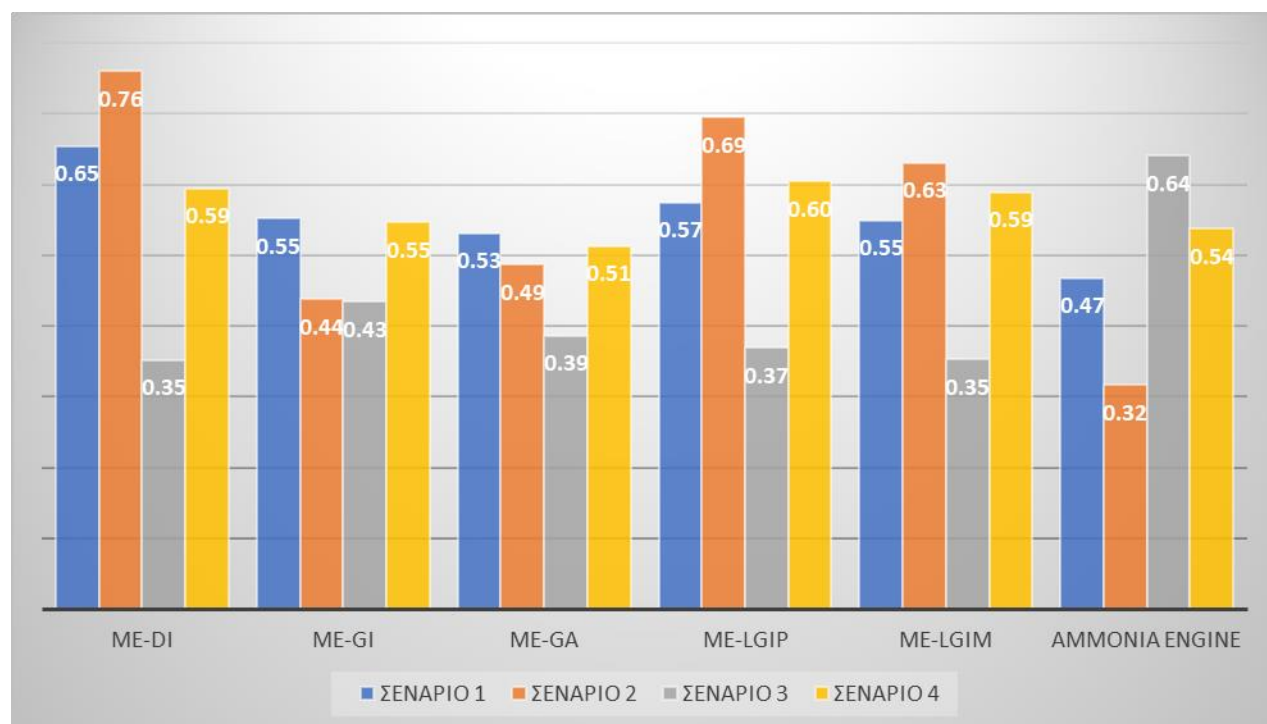
Ομάδες κατηγοριών	ΤΕΧΝΙΚΑ	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ	ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
Συντελεστές βαρύτητας	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-19: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 4

ME-DI	0.59
ME-GI	0.55
ME-GA	0.51
ME-LGIP	0.60
ME-LGIM	0.59
Ammonia engine	0.54

Όπως παρατηρούμε σε αυτό το σενάριο όλες οι μηχανές είναι βαθμολογημένες με μικρή διαφορά. Κυρίως οι μηχανές LGIP, LGIM και ME-DI είναι οι καλύτερες επιλογές με τη LGIP να έχει μια μικρή διαφορά. Οι μηχανές LGIP και LGIM οι οποίες λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο και το μόνο που διαφοροποιείται σε αυτές τις δύο μηχανές είναι το καύσιμο αποτελούν πολύ καλές λύσεις αν δοθεί έμφαση στα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Αυτό συμβαίνει λόγω της χαμηλής τους σχετικά κατανάλωσης πιλοτικού καυσίμου και της χαμηλής ισχύος που χρειάζεται για τα βοηθητικά μηχανήματα σε σχέση με τις άλλες μηχανές εναλλακτικών καυσίμων. Επιπλέον και οι δύο αυτές μηχανές δεν αποτελούν κακή λύση σε οικονομικό επίπεδο όπως η αμμωνία και ούτε σε περιβαλλοντολογικό επίπεδο όπως η συμβατική μηχανή.

Παρακάτω στο σχήμα 6-3 φαίνεται σε κοινό διάγραμμα η βαθμολογία της κάθε μηχανής για τα 4 σενάρια τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω.



ΣΧΗΜΑ 6-3: Τιμές δεικτών των μηχανών για κάθε σενάριο (1-4)

Σε αυτό το σημείο είμαστε σε θέση να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα μερικών σεναρίων τα οποία προέκυψαν επ' ακριβώς από κάθε ναυτιλιακή εταιρεία μετά από συζήτηση που έγινε με εκπροσώπους τους. Τα παρακάτω σενάρια λοιπόν αντιπροσωπεύουν πλήρως τον κλάδο της ναυτιλίας σε επαγγελματικό και πρακτικό επίπεδο. Έτσι συμπεραίνουμε ότι αποτελούν σημαντικές πληροφορίες για την παρούσα διπλωματική εργασία.

Σενάριο 5

Σε αυτό το σενάριο έχει δοθεί έμφαση κατά κύριο λόγο στο οικονομικό κομμάτι ώστε να δοθεί έμφαση στη φθηνότερη επιλογή τόσο σε έξοδα κτήσεως όσο και σε κόστη που ακολουθούν την μηχανή σε όλη τη διάρκεια ζωής της. Επιπλέον θεωρήθηκε σημαντικό να υπάρχει μια τεχνολογία η οποία είναι ώριμη, απλή και με μεγάλη αξιοπιστία ώστε και να μειωθεί η πιθανότητα κάποιας απρόσμενης βλάβης αλλά και να μη χρειαστεί προσαρμογή του πληρώματος αλλά και γενικά των ανθρώπων που διαχειρίζονται το πλοίο σε νέα συστήματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-20: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 5

Ομάδες κατηγοριών	ΤΕΧΝΙΚΑ	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ	ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
Συντελεστές βαρύτητας	0.1	0.4	0.1	0.1	0.3

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-21: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 5

ME-DI	0.77
ME-GI	0.52
ME-GA	0.54
ME-LGIP	0.63
ME-LGIM	0.61
Ammonia engine	0.34

Παρατηρούμε ότι σε αυτό το σενάριο την καλύτερη συμπεριφορά την έχει η συμβατική μηχανή λόγω του μικρότερου συνολικά κόστους της αλλά και της αξιοπιστίας που την διακατέχει. Επιπλέον οι μηχανές LGIP, LGIM φαίνεται ότι είναι καλές λύσεις λόγω του σχετικά χαμηλού τους κόστους τόσο κτήσης όσο και καθημερινών εξόδων. Αυτή η καλή συμπεριφορά εμφανίζεται αν και η ωριμότητα τους ως τεχνολογίας είναι μικρή καθώς δεν έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μηχανές ούτε για πολλά χρόνια. Σαν πρώτη όψη φαίνεται λοιπόν ότι η συμβατική μηχανή είναι η καλύτερη επιλογή όμως οι μηχανές LGIP και LGIM σε μερικά χρόνια που θα είναι

πιο διαδεδομένες και με μεγαλύτερη ωριμότητα θα είναι άκρως ανταγωνιστικές της συμβατικής μηχανής. Οι LNG μηχανές αν και είναι αρκετά τεχνολογικά ώριμες με μικρό ρίσκο αστοχίας λόγω της καθαρής τους καύσης τα οικονομικά τους έξοδα είναι αρκετά μεγάλα με αποτέλεσμα να μην έχουν ένα μεγάλο score. Βέβαια αυτό συμβαίνει λόγω και της υψηλής τιμής που υπάρχει αυτή τη στιγμή στο LNG που μπορεί μετά από λίγο καιρό να αλλάξει. Τέλος η αμμωνία είναι η χειρότερη επιλογή τόσο τεχνολογικά που είναι σε ένα πολύ πρώιμο στάδιο αλλά τόσο και οικονομικά.

Σενάριο 6

Στο παρόν σενάριο συνεχίζεται να δίνεται βάση τόσο στο οικονομικό όσο και στο τεχνολογικό κομμάτι κάτι που μας δείχνει μια κοινή κατευθυντήρια γραμμή από τους εκπροσώπους των ναυτιλιακών εταιρειών αλλά έχει δοθεί έμφαση όχι μόνο στη μηχανή αλλά στο καύσιμο που καταναλώνει η κάθε μηχανή και τον τρόπο που αποθηκεύεται στο πλοίο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-22: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 6

Ομάδες κατηγοριών	ΤΕΧΝΙΚΑ	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ	ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
Συντελεστές βαρύτητας	0.05	0.4	0.05	0.3	0.2

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-23: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 6

ME-DI	0.82
ME-GI	0.53
ME-GA	0.56
ME-LGIP	0.67
ME-LGIM	0.61
Ammonia engine	0.31

Και σε αυτήν την περίπτωση η μηχανή με το υψηλότερο score είναι η συμβατική με αρκετή διαφορά από τα υπόλοιπα. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι λήφθηκε υπόψη σε αρκετά μεγάλο βαθμό το καύσιμο και οι ιδιαιτερότητες του όπου το VLSFO γενικά είναι ένα ασφαλές καύσιμο και ευρέως χρησιμοποιούμενο στη ναυτιλία. Επίσης δεν αντιμετωπίζει πρόβλημα στον όγκο των δεξαμενών λόγω της μεγάλης ενεργειακής του πυκνότητας σε αντίθεση με τη μεθανόλη όπου κυρίως γι' αυτό το λόγο και την αξιοπιστία της εφοδιαστικής της αλυσίδας τάσσεται χαμηλότερα από τη μηχανή του LPG η οποία παραμένει η δεύτερη καλύτερη λύση. Για τις μηχανές LNG ο λόγος που παραμένουν χαμηλά είναι πάλι το οικονομικό καθώς στις άλλες κατηγορίες που δόθηκε μεγάλη βάση η συμπεριφορά της είναι πολύ καλή. Τέλος η αμμωνία είναι λογικό να βρίσκεται στην τελευταία θέση όταν θεωρείται σημαντική κατηγορία το καύσιμο και οι ιδιαιτερότητες του λόγω της τοξικότητας της που από πολλούς θεωρείται απαγορευτική η χρήση της.

Σενάριο 7

Σε αυτό το σενάριο υπάρχει μια διαφοροποίηση με τα άλλα κριτήρια καθώς δε δίνεται βάση τόσο πολύ στο τεχνολογικό κομμάτι καθώς θεωρείται ότι δεν είναι μεγάλο πρόβλημα μια νέα τεχνολογία καθώς μπορεί να αντιμετωπιστεί με εκπαίδευση του πληρώματος αλλά και αύξηση της αξιοπιστίας με το πέρασμα του χρόνου. Βέβαια και σε αυτήν την περίπτωση το βάρος δίνεται στις ιδιαιτερότητες καυσίμων και στα οικονομικά δεδομένα τα οποία είναι αναπόσπαστο κομμάτι μια τέτοιας αξιολόγησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-24: Συντελεστές βαρύτητας για το Σενάριο 7

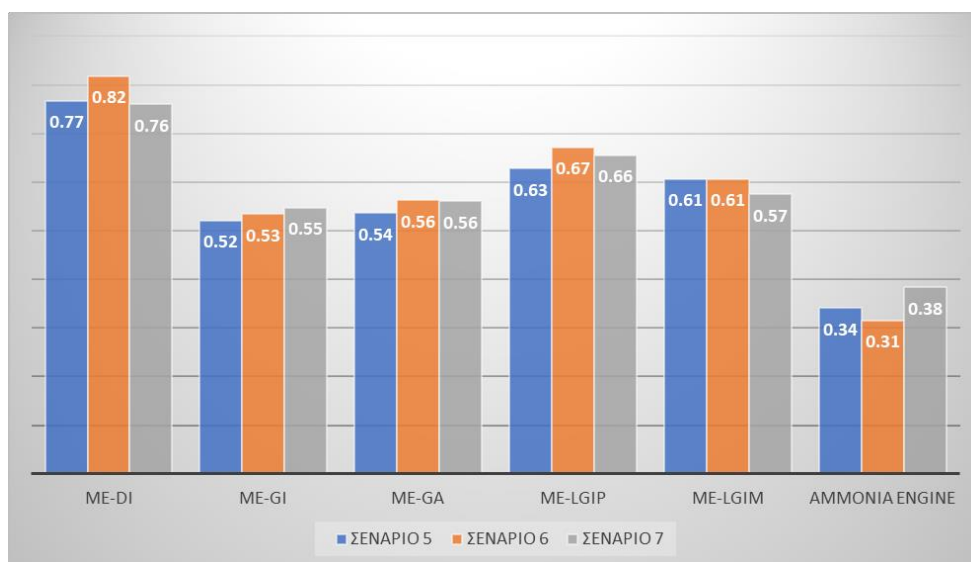
Ομάδες κατηγοριών	ΤΕΧΝΙΚΑ	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΑ	ΙΔΙΑΙΤΕΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
Συντελεστές βαρύτητας	0.1	0.3	0.1	0.4	0.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-25: Τιμές δεικτών για κάθε μηχανή στο Σενάριο 7

ME-DI	0.76
ME-GI	0.55
ME-GA	0.56
ME-LGIP	0.66
ME-LGIM	0.57
Ammonia engine	0.38

Η εικόνα από αυτό σενάριο παραμένει παρόμοιο με τα προηγούμενα έχοντας ως πρώτη τη συμβατική μηχανή ακολουθώντας η μηχανή LGIP και αρκετά πιο κάτω αυτή της μεθανόλης όπου ως καύσιμο δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο και έχει το πρόβλημα της μικρής ενεργειακής πυκνότητας. Πάλι το LNG δε θεωρείται καλή λύση από οικονομικής πλευράς και η μηχανή της αμμωνία λόγω της τοξικότητας της και του υψηλού της κόστους παραμένει στην τελευταία θέση.

Στο σχήμα 6-4 παρουσιάζονται σε κοινό γράφημα οι τιμές των δεικτών των μηχανών για αυτά τα τρία σενάρια που επιλέχθηκαν από τους εκπροσώπους των ναυτιλιακών εταιρειών.



ΣΧΗΜΑ 6-4: Τιμές δεικτών των μηχανών για κάθε σενάριο (5-7)

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα

Καταρχάς, αξίζει να αναφερθεί η πολυπλοκότητα που διακατέχει μια αξιολόγηση μηχανών εναλλακτικών καυσίμων και της σύγκρισης του με τη μηχανή συμβατικού καυσίμου VLSFO. Η πολυπλοκότητα που εμφανίζεται σε αυτό το πρόβλημα είναι λόγω των απαραίτητων διαφορετικών ειδών κριτηρίων αξιολόγησης που έχουν τεθεί. Στην παρούσα διπλωματική τέθηκαν κριτήρια τα οποία αξιολογούσαν την τεχνική πλευρά των μηχανών τόσο από τις επιδόσεις της μηχανής όσο και από τις εκπομπές καυσαερίων που εκπέμπουν. Επιπλέον τέθηκαν κριτήρια για τα οικονομικά δεδομένα των μηχανών, την τεχνολογία από την οποία είναι ανεπτυγμένες και τυχόν προβλήματα τα οποία μπορεί να εμφανίζουν και τέλος τέθηκαν κριτήρια τα οποία αναλύουν την κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα καύσιμα από πλευράς ασφαλείας, παραγωγής και διαφόρων άλλων ιδιοτεροτήτων που έχουν. Όταν λοιπόν αξιολογούνται κάποια συστήματα μέσω όλων αυτών των κριτηρίων θα πρέπει να δοθεί σε κάποια μεγαλύτερη βάση. Αυτό έγινε μέσω συντελεστών βαρύτητας υποθέτοντας διαφορετικά σενάρια. Αυτό έγινε διότι είναι λογικό να μην υπάρχει ίδια λογική για την σημαντικότητα των κριτηρίων και έτσι καλύφθηκαν πολλές απόψεις μέσω των οποίων προέκυψαν διαφορετικά αποτελέσματα. Τα 4 πρώτα σενάρια διαμορφώθηκαν ώστε να δειχθεί ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου μέσω συντελεστών βαρύτητας των οποίων δικαιολογήθηκε η επιλογή τους. Μέσα από αυτά τα κριτήρια βγήκαν κάποια βασικά συμπεράσματα. Πρώτον ότι αν δοθεί βάση στην επιλογή κάποιας μηχανής στο περιβαλλοντολογικό κομμάτι το οποίο είναι στο προσκήνιο αυτά τα χρόνια η μηχανή της αμμωνίας είναι η επικρατέστερη επιλογή καθώς δεν παράγει καθόλου διοξείδιο του άνθρακα όμως υπάρχει ένα ζήτημα σχετικά με τις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου το οποίο είναι ένα θέμα που ίσως να αντιμετωπιστεί με συγκεκριμένο καταλύτη κατά τη λειτουργία της. Στη συνέχεια εξετάστηκε το σενάριο που δίνει μεγαλύτερη βάση στο οικονομικό κομμάτι των μηχανών τόσο σε κόστος κτήσης μέσω του κόστους της μηχανής και του κόστους των δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων όσο και μέσω των λειτουργικών εξόδων της μηχανής δηλαδή το καθημερινό κόστος κατανάλωσης καυσίμου και το κόστος συντήρησης της. Σε αυτό το σενάριο η συμβατική μηχανή είναι η καλύτερη λύση ανταγωνίζοντας την όμως η LGIP και η LGIM οι οποίες είναι αρκετά καλές επιλογές σε οικονομικό κομμάτι. Αυτές οι μηχανές θα είναι ακόμα πιο ανταγωνιστικές όταν χρησιμοποιηθούν ευρέως και αποκτήσουν μια εξοικείωση τόσο στην κατασκευή όσο και στη συντήρησή τους. Τέλος χωρίς να υποεκτιμηθούν τα οικονομικά και περιβαλλοντολογικά κριτήρια τέθηκε βάση στα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθε μηχανής και στις επιδόσεις τους. Σε αυτήν τη περίπτωση όλες οι μηχανές είχαν μια καλή βαθμολόγηση συμπεραίνοντας ότι καμία από αυτές δεν υστερεί σε επιδόσεις και γενικότερα στα τεχνικά χαρακτηριστικά. Βέβαια η

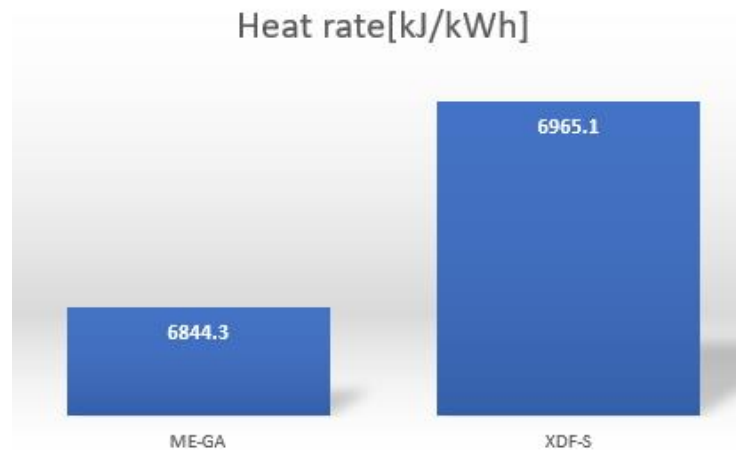
καλύτερη επιλογή είναι η μηχανή LGIP κάτι που σημαίνει ότι αν και είναι μια σχετικά νέα τεχνολογικά ανεπτυγμένη μηχανή έχουν επιτευχθεί ήδη τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία είναι ακόμα καλύτερα από αυτήν της συμβατικής. Τα επόμενα 3 σενάρια ήταν αποτέλεσμα συζητήσεων που πραγματοποιήθηκαν με εκπροσώπων ναυτιλιακών εταιρειών ώστε να έχουμε μια αντιπροσωπευτική άποψη από εξειδικευμένους στον τομέα της ναυτιλίας. Σε αυτά τα σενάρια δόθηκε μεγάλη βάση στο οικονομικό κομμάτι των μηχανών διότι ήταν κάτι στο οποίο επικεντρώθηκαν οι ναυτιλιακές εταιρείες. Επιπλέον σημαντικά ζητήματα για την επιλογή μηχανών είναι οι εναλλακτικές αυτές τεχνολογίες να είναι σε ένα επίπεδο ώριμο ώστε να μην δημιουργηθούν τυχόν απρόοπτα προβλήματα και γενικότερα να είναι αρκετά αξιόπιστες και απλές σε θέμα λειτουργίας ώστε να μπορεί το πλήρωμα να ανταπεξέλθει χωρίς δυσκολίες. Τέλος, δόθηκε βάση σε κάποιες ιδιαιτερότητες καυσίμων πρωτίστως στην ασφάλεια και στον τρόπο αποθήκευσης στις δεξαμενές και συγκεκριμένα στον απαραίτητο όγκο που χρειάζονται τα καύσιμα για την αποθήκευση τους και στον χρόνο κράτησης στους στις δεξαμενές. Με βάση αυτά τα σημαντικά ζητήματα που τέθηκαν και τα 3 σενάρια (5, 6, 7) είχαν ως αποτέλεσμα ότι η συμβατική μηχανή είναι η καλύτερη επιλογή σε σχέση με άλλες μηχανές εναλλακτικών καυσίμων. Αυτό ως συμπέρασμα είναι πολύ σημαντικό καθώς δείχνει ότι η ναυτιλία και συγκεκριμένα οι ναυτιλιακές εταιρείες δεν είναι ακόμα σε θέση να επιλέξουν μηχανές εναλλακτικών καυσίμων για την πρόωση των πλοίων τους. Βέβαια αυτό ισχύει κάνοντας μια ανάλυση μόνο των μηχανών αποκλείοντας τον τύπο του πλοίου και των ιδιαιτεροτήτων του. Άλλωστε σε πλοία μεταφοράς LNG ή LPG αυτές οι εταιρείες έχουν επιλέξει κινητήρες χρησιμοποιώντας το φορτίο και ως καύσιμο. Βέβαια σε αυτήν τη περίπτωση θα πρέπει να εξεταστούν άλλοι παράγοντες οι οποίοι δεν έχουν ληφθεί υπόψη στην παρούσα διπλωματική. Κάνοντας όμως μια εξειδικευμένη μόνο στο είδος των μηχανών φαίνεται ότι οι ναυτιλιακές εταιρείες θα επέλεγαν τη συμβατική και όχι κάποια εναλλακτικού καυσίμου λόγω του οικονομικού παράγοντα, του ρίσκου της επένδυσης σε θέματα τεχνολογίας και σε ιδιαιτερότητες που έχουν κάποια από τα καύσιμα που επιδρούν αρνητικά σε αυτήν την επιλογή.

Αυτή η διπλωματική εργασία συγκρίνει τις μηχανές συγκεκριμένων εναλλακτικών καυσίμων με τη συμβατική μηχανή ανεξάρτητα από τις ιδιαιτερότητες που μπορεί να έχει το πλοίο εγκατάστασης αυτών. Σε συνέχεια αυτής της διπλωματικής προτείνεται η εισαγωγή και του παράγοντα του πλοίου καθώς ανάλογα των τύπο του κάθε πλοίου θα προκύψουν διαφορετικές περιπτώσεις αξιολόγησης για το κάθε εναλλακτικό καύσιμο. Η συγκεκριμένη εισαγωγή αναμένεται να επιφέρει πληθώρα διαφορετικών σεναρίων και ανάγκη για ανακάλυψη όλων των ιδιαιτεροτήτων του κάθε πλοίου ώστε να γίνει σωστά η αξιολόγηση.

Παράρτημα

Η μηχανή 8X52DF-S2.0 που χρησιμοποιεί ως καύσιμο LNG με χαμηλή πίεση τροφοδοσίας χρησιμοποιεί επίσης κύκλο Otto ώστε να πραγματοποιηθεί η καύση. Επιπλέον είναι αναγκαία η χρήση EGR λόγω του αυξημένου άκαυστου μεθανίου που παράγει και όχι για την επίτευξη του TIER III. Στην παραπάνω αξιολόγηση δε χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη μηχανή διότι θεωρήθηκε ορθότερο να χρησιμοποιηθεί η 5G70ME-C10.5-GA η οποία έχει παρόμοια λειτουργία με την παραπάνω όμως είναι κατασκευασμένη με ίδιο κατασκευαστή με τις άλλες μηχανές. Ανάμεσα στις δύο αυτές μηχανές υπάρχουν μερικές μικρές διαφορές όπου είναι σωστό να ληφθούν υπόψη σε μια συγκεκριμένη επιλογή μηχανής. Οι διαφορές οι οποίες προκύπτουν ανάμεσα σε αυτές τις δύο μηχανές είναι κατά βάση σε τεχνικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα παρατηρούνται διαφορές στον θερμοδυναμικό βαθμό απόδοσης και κατ' επέκταση στο Heat rate της κάθε μηχανής, στην ισχύ των καυσαερίων και κατ' επέκταση στην παραγωγή ατμού από έναν economizer και τέλος στην κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου. Τα παρακάτω αποτελέσματα προέκυψαν από τα Performance data των συγκεκριμένων μηχανών.

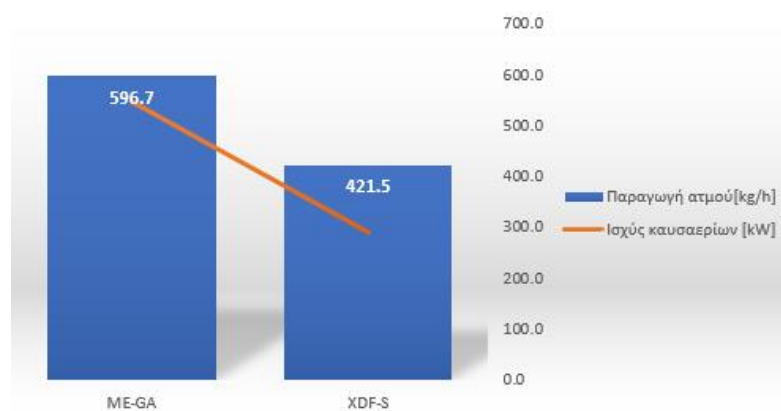
Για την τιμή του Heat rate παρατηρείται ότι η μηχανή ME-GA έχει ελαφρώς μικρότερη τιμή κάτι που την κάνει πιο αποδοτική από την XDF μηχανή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Συγκεκριμένα η τιμή του Heat rate της XDF είναι κατά 1.8% μεγαλύτερη από τη ME-GA.



ΣΧΗΜΑ Π-1: Σύγκριση Heat rate για μηχανές ME-GA και XDF

Η ισχύς των καυσαερίων διαφέρει κατά πολύ από μεταξύ αυτών των μηχανών. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα ακόμα για την ME-GA καθώς η μεγάλη ισχύς καυσαερίων που παράγεται μπορεί να εκμεταλλευτεί με διάφορους τρόπους. Αυτή η

μηχανή έχει μια ισχύς καυσαερίων κατά 89% μεγαλύτερη από την ισχύς καυσαερίων της XDF.



ΣΧΗΜΑ Π-2: Σύγκριση Ισχύς καυσαερίων και παραγωγής ατμού για μηχανές ME-GA και XDF

Η κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την σύγκριση αυτών των μηχανών διότι επηρεάζει τόσο την απαιτούμενη ποσότητα συμβατικού καυσίμου VLSFO σε πλοίο που χρησιμοποιεί dual fuel μηχανή αλλά επηρεάζει επίσης και τους περιβαλλοντολογικούς ρύπους από την κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου. Αυτές οι δύο μηχανές έχουν χαμηλή απαιτούμενη ποσότητα πιλοτικού καυσίμου σε σχέση με την ME-GI διότι υπάρχει κατά τη συμπίεση αρκετός χρόνος ανάμιξης τους αερίου με τον αέρα με αποτέλεσμα η καύση του μίγματος να είναι πιο εύκολη και γρήγορη. Συγκεκριμένα παρατηρείται 75% μεγαλύτερη κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου από την XDF σε σχέση με την ME-GA.



ΣΧΗΜΑ Π-3: Σύγκριση κατανάλωσης πιλοτικού καυσίμου για μηχανές ME-GA και XDF

Αυτές είναι σημαντικότερες διαφορές που παρατηρήθηκαν ανάμεσα στις δύο μηχανές κύκλου Otto. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα πάρθηκαν από performance data (δεδομένα απόδοσης) του κάθε κατασκευαστή για την κάθε μηχανή. Αυτά τα δεδομένα είναι πιθανό να μην προσομοιάζουν επ' ακριβώς την πραγματική λειτουργία των μηχανών με αποτέλεσμα να υπάρχουν κάποιες μικρές διαφορές οι οποίες είναι ανεπαίσθητες. Ακόμα όμως και με τυχόν μικρές αλλαγές με την πραγματικότητα το γενικό συμπέρασμα δεν απέχει πολύ για τη σύγκριση αυτών των δύο μηχανών.

Βιβλιογραφία

- [1]: MAN Energy solutions “Shipping enroute to Paris agreement overshoot” (σελ.6)
- [2]: https://www.bimco.org/news/market_analysis/2021/20210624-world_fleet_to_grow_by_slower_in_next_5_years
- [3]: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- [4]: MAN Energy Solutions “Ammonia Energy Association August 2022 Melbourne” (σελ.4)
- [5]: MAN Energy Solutions “LNGC-optimised designs of ME-GI engines and fuel gas supply systems” (σελ.5)
- [6]: WinGD “Marine Installation Manual X52DF-S2.0” (σελ.4-40)
- [7]: MAN Energy Solutions “ME-GA Technical Paper” (σελ.7)
- [8]: Naim H. Afgan, Maria G. Carvalho, Nikolai V. Hovanov “Energy system assessment with sustainability indicators”
- [9]: Christos A. Frangopoulos and Despoina E. Keramioti “Multi-Criteria Evaluation of Energy Systems with Sustainability Considerations” (σελ.3, 4)
- [10]: Amit Batra, Suresh Sampath, Theoklis Nikolaidis and Pericles Pilidis “Techno-Economic Model-Based Design Space Exploration of ‘Combined’ Ship Propulsion Systems” (σελ. 32)
- [11]: Julia Hansson, Stina Månsson, Selma Brynolf, Maria Grahn “Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders” (σελ. 162)
- [12]: Selma Brynolf “Environmental Assessment of Present and Future Marine Fuels” (σελ.40)
- [13]: MAN Energy Solutions “Project Guide G50ME-C 9.6” (σελ.223)
- [14]: MAN Energy Solutions “Project Guide G50ME-C 9.6-GI” (σελ.279)
- [15]: MAN Energy Solutions “THE METHANOL FUELLED MAN LGIM “ (σελ.15)
- [16]: MAN Energy Solutions “ME-LGIP DUAL FUEL ENGINES Technical Paper“ (σελ.6)
- [17]: MAN Energy Solutions “2 STROKE ENGINE OPERATING ON AMMONIA“ (σελ.11)
- [18]: DNV “Maritime Forecast to 2050” (σελ.73)
- [19]: <https://www.ship-technology.com/news/gtt-completes-test-new-lng-fuel-tank/>

- [20]: http://www.bergermaritiem.nl/nox_tier_iii_neca
- [21]: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/flammability-limit>
- [22]: Shigeo Kondo, Akifumi Takahashi ,Kazuaki Tokuhashi , Akira Sekiya “RF number as a new index for assessing combustion hazard of flammable gases”
- [23]: <https://group.met.com/en/media/energy-insight/natural-gas-processing>
- [24]: <https://www.carbonbrief.org/whats-the-difference-between-natural-gas-liquid-natural-gas-shale-gas-shale-oil-and-methane-an-oil-and-gas-glossary/>
- [25]: <http://naturalgas.org>
- [26]: Stavros Niotis-2022 “LNG LPG Carriers” (σελ.6, 13, 29, 30, 33-53)
- [27]: Wartsila-2020 “Shipping in the 2020 era –selection of fuel and propulsion machinery”
- [28]: <https://www.wlpga.org/about-lpg/what-is-lpg/where-does-lpg-come-from/>
- [29]: WLPGA “LPG FOR MARINE ENGINES” (σελ.99, 100)
- [30]: I. L. Maclaine-cross , E. Leonardi “Performance and Safety of LPG Refrigerants” (σελ.10-14)
- [31]: Francesco Dalena, Alessandro Senatore, Alessia Marino, Amalia Gordano, Marco Basile, Angelo Basile “Methanol Production and Applications: An Overview” (σελ.7-18)
- [32]: <https://www.methanol.org/renewable/>
- [33]: MAN Energy Solutions “Methanol in shipping “(σελ.6)
- [34]: <https://www.royalihc.com/innovations/methanol-realistic-alternative-fuel-work-vessels>
- [35]: Kerry-Ann Adamson, Peter Pearson “Hydrogen and methanol: a comparison of safety, economics,efficiencies and emissions” (σελ.549, 550)
- [36]: Islam Rafiqul, Christoph Weber, Bianca Lehmann, Alfred Voss “Energy efficiency improvements in ammonia production—perspectives and uncertainties” (σελ.2488, 2489)
- [37]: ALFA LAVAL, HAFNIA, HALDOR TOPSØE, VESTAS, SIEMENS GAMESA 2020 “Ammonfuel An industrial view of ammonia as a marine fuel” (σελ.9, 33-41, 47-49)
- [38]: Duijm, N.J.; Markert, Frank; Paulsen, Jette Lundtang “Safety assessment of ammonia as a transport fuel”
- [39]: George Dimopoulos 2020 “Ammonia as a marine fuel”

[40]: Mærsk Mc-Kinney Møller Center “Preparing Container Vessels for Conversion to Green Fuels” (σελ.7)

[41]: The International Council on Combustion Engines “EMISSION CALCULATION CHECK GUIDE – IMO NOx Technical Code” (σελ.4)

[42]: <https://shipandbunker.com/>

[43]: <https://fred.stlouisfed.org/>

[44]: <https://www.eia.gov>

[45]: <https://tradingeconomics.com/>

[46]: Dr.-Ing. Pierre C Sames, Dr. Mohd Shahrin bin Osman, Hans Anton Tvete “Towards Ammonia as Ship Fuel” (σελ.7)

[47]: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>

[48]: Christos Chryssakis, Selim Stahl "Well-To-Propeller Analysis of Alternative Fuels for Maritime Applications" INTERNATIONAL COUNCIL ON COMBUSTION ENGINES

[49]: Sphera Solutions"2nd Life Cycle GHG Emission Study on the Use of LNG as Marine Fuel"

[50]: Dr.-Ing. Pierre C Sames, Dr. Mohd Shahrin bin Osman, Hans Anton Tvete "Towards Ammonia as Ship Fuel" presented at 117th annual meeting of Schiffbautechnische Gesellschaft, 2022-11-18, Hamburg, Germany

[51]: DNV “Alternative Fuels Insight (AFI)”

[52]: DNV “ Comparison of Alternative Marine Fuels” (σελ.47-50)

[53]:International Gas Union “LNG Report 2022” (σελ.13, 14)

[54]: Franziska Holz, Philipp M. Richter, and Ruud Egginy “A Global Perspective on the Future of Natural Gas: Resources, Trade, and Climate Constraints” (σελ.94-98)

[55]: Marlene Calderón, Diana Illing , Jaime Veiga “Facilities for bunkering of liquefied natural gas in ports” (σελ.2437-2439)

[56]: DNV “ASSESSMENT OF SELECTED ALTERNATIVE FUELS AND TECHNOLOGIES” (σελ.12)

[57]: DNV “LPG AS A MARINE FUEL” (σελ.12, 13)

[58]: BW LPG “Report Presentation Q4 2021” (σελ.9, 10)

[59]: Poten and Partners “LPG in World Markets” (σελ.14-23)

[60]: WLPGA“ LPG Bunkering-Guide for LPG Marine Fuel Supply” (σελ.15, 16, 19-24)

[61]: Methanol Institute- Marine, Supply/Demand (<https://www.methanol.org/>)

- [62]: INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION “Production & Trade Tables”(https://www.ifastat.org/supply/Nitrogen%20Products/Ammonia)
- [63]: DNV “Ammonia as a Marine fuel” (σελ.10, 11)
- [64]: “ ANNEX 1, RESOLUTION MSC.391(95), IGF CODE”
- [65]: “ANNEX 6, RESOLUTION MSC.370(93), IGC CODE”
- [66]: https://www.man-es.com/marine/products/two-stroke-engines
- [67]: Cengiz Deniz, Burak Zincir “Environmental and economical assessment of alternative marine fuels” (σελ.445)
- [68]: Julia Hansson , Selma Brynolf , Erik Fridell and Mariliis Lehtveer “The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis” (σελ.9)
- [69]: https://shipnerdnews.com/comply-with-eexi-cii-in-the-upcoming-years/