



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΤΟ ΚΑΥΣΙΜΟ LNG ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΚΑΙ
ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ»**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Καθ. Αναστ. Τσελεπίδης



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΤΟ ΚΑΥΣΙΜΟ LNG ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ
ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ
ΤΟΥ»**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Καθ. Αναστ. Τσελεπίδης

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΕΠΙΤΡΟΠΗ: Καθ. Ερνεστοσπυρίδων Τζαννάτος ,
Καθ. Βασίλης Τσελέντης**

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, Απρίλιος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα υποκατάστασης των συμβατικών υγρών καυσίμων από υγροποιημένο φυσικό αέριο. Οι περιβαλλοντικές επιδόσεις των πλοίων που αξιοποιούν LNG είναι σημαντικά καλύτερες σε σχέση με τις επιδόσεις πλοίων που καταναλώνουν υγρά καύσιμα ναυτιλίας. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου σε σχέση με τη χρήση υγρών καυσίμων μειώνονται κατά περίπου 80-85%, λόγω της καθαρότερης καύσης που πραγματοποιείται στις μηχανές διπλού καυσίμου. Οι εκπομπές οξειδίων του θείου σχεδόν μηδενίζονται, καθώς το LNG δεν περιέχει θείο, οι σωματιδιακές εκπομπές είναι πολύ μικρές, ενώ οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από την καύση περιορίζονται κατά 20-30%. Το LNG αναδεικνύεται ως μία οικονομικότερη και οικολογικότερη εναλλακτική επιλογή στον τομέα της ναυτιλίας και, όπως σημειώθηκε με την αναφορά σε χαρακτηριστικά παραδείγματα σκαφών που λειτουργούν καταναλώνοντας LNG, η ναυπήγηση σκαφών και η κατασκευή μηχανών διπλού καυσίμου συνιστούν μία ενδιαφέρουσα τάση που μπορεί να επιφέρει σημαντικά μακροπρόθεσμα περιβαλλοντικά οφέλη.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Περιβάλλον, Καύσιμα, Ναυτιλία **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** LNG, πλοία, μεταφορές

ABSTRACT

In the current thesis the use of liquefied natural gas (LNG) in maritime transportation is examined. The environmental performance of ships using LNG is significantly higher than the relevant performance of LNG-fueled ships. NO_x emissions are 80-85% lower, while SO_x emissions are near zero and emissions of particulate matter are very low. The emissions of CO₂ produced by the combustion of natural gas are 20-30% lower. Moreover, the economic benefit arising from the substitution of conventional maritime fuels by LNG is another important favorable element. As a result, the construction of ships fueled by LNG and the use of dual-fuel engines in maritime transportation is becoming a new trend.

SUBJECT AREA: Environment, Fuel, Maritime Engineering **KEYWORDS:** LNG, ships, transport

Αφιερώνω την παρούσα εργασία..

Στην οικογένεια μου η οποία τόσο με στήριξε σε όλη την διαδρομή μου προπτυχιακά όσο κι σε μεταπτυχιακό επίπεδο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον Καθηγητή μου κο Αναστ. Τσελεπίδη για την καθοδήγηση του καθ' ολη τη διάρκεια της εργασίας καθώς και τους φίλους μου και την οικογενεια για την εμπύχωση τους

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|----|
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 2. ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ | 2 |
| 2.1. Σύσταση, ιδιότητες και προέλευση..... | 2 |
| 2.2. Υγροποιημένο φυσικό αέριο..... | 8 |
| 3. LNG ΣΤΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ | 14 |
| 3.1. Γενικές παρατηρήσεις..... | 14 |
| 3.2. Παραδείγματα | 17 |
| 4. ΜΗΧΑΝΕΣ ΠΛΟΙΩΝ..... | 24 |
| 4.1. Μηχανές πρόωσης | 24 |
| 4.2. Ηλεκτροπρόωση στα πλοία..... | 26 |
| 4.3. Μηχανές εσωτερικής καύσης διπλού καυσίμου | 29 |
| 4.3.1. Αρχή λειτουργίας..... | 29 |
| 4.3.2. Δίχρονη μηχανή διπλού καυσίμου..... | 35 |
| 4.3.3. Τετράχρονη μηχανή διπλού καυσίμου..... | 38 |
| 4.4. Παραδείγματα μηχανών..... | 38 |
| 4.4.1. Man B&W MC-GI..... | 38 |
| 4.4.2. Wärtsilä..... | 39 |
| 4.4.3. Rolls-Royce..... | 41 |
| 4.5. Συστήματα ελέγχου και ρύθμισης | 41 |
| 5. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ..... | 49 |
| 5.1. Οικονομικά πλεονεκτήματα..... | 49 |
| 5.2. Περιβαλλοντικά οφέλη | 52 |
| 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 73 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 75 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1.1. Διεθνής παραγωγή φυσικού αερίου το 2014 | 2 |
| Σχήμα 1.2. Εκτιμώμενα αποθέματα φυσικού αερίου σε χώρες με τους μεγαλύτερους αποταμιευτήρες το 2014 | 3 |
| Σχήμα 1.3. Υποδομές φυσικού αερίου στον ελληνικό χώρο | 4 |
| Σχήμα 1.4. Προέλευση εισαγωγών φυσικού αερίου, 2007-2013..... | 6 |
| Σχήμα 1.5. Στάδια διαχείρισης LNG..... | 10 |
| Σχήμα 1.6. Πλοίο μεταφοράς LNG..... | 10 |
| Σχήμα 1.7. Σφαιρική δεξαμενή πλοίου μεταφοράς LNG | 11 |
| Σχήμα 3.1. Creole Spirit..... | 18 |
| Σχήμα 3.2. Isla Bella | 18 |
| Σχήμα 3.3. Searoad Mersey II..... | 19 |
| Σχήμα 3.4. Rem Eir..... | 20 |
| Σχήμα 3.5. MV Greenland | 21 |
| Σχήμα 3.6. El Coqui | 21 |
| Σχήμα 3.7. Scheldt River | 22 |
| Σχήμα 3.8. Ρυμουλκά Bokn και Borgøy | 23 |
| Σχήμα 4.1. Κύκλος ισχύος ατμοστροβίλου..... | 26 |
| Σχήμα 4.2. Λειτουργία της μηχανής κατά τη φάση όπου χρησιμοποιείται μόνον φυσικό αέριο..... | 30 |
| Σχήμα 4.3. Εγκατάσταση μηχανής σε σκάφος..... | 31 |
| Σχήμα 4.4. Αρχή λειτουργίας μηχανής διπλού καυσίμου..... | 32 |
| Σχήμα 4.5. Μονάδα όπου πραγματοποιείται η ρύθμιση της ροής του φυσικού αερίου | 34 |
| Σχήμα 4.6. Συνδεσμολογία μηχανής διπλού καυσίμου..... | 35 |
| Σχήμα 4.7. Μία από τις μεγαλύτερες και αποδοτικότερες δίχρονες μηχανές διπλού καυσίμου | 37 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 4.8. Κινητήρας διπλού καυσίμου Wärtsilä 46DF | 40 |
| Σχήμα 4.9. Εσωτερικό δωμάτιο στο οποίο πραγματοποιείται ο έλεγχος της μηχανής..... | 42 |
| Σχήμα 4.10. Σύστημα ρύθμισης της ψύξης του λιπαντικού ελαίου..... | 44 |
| Σχήμα 4.11. Δεξαμενή αποθήκευσης LNG τύπου C και σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου προς καύση σε προωστήρια μηχανή | 47 |
| Σχήμα 5.1. Τιμές καυσίμων | 50 |
| Σχήμα 5.2. Τιμές καυσίμων σε κάθε περιφέρεια του πλανήτη..... | 51 |
| Σχήμα 5.3. Σύνδεση των εκπομπών με τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το οικοσύστημα | 54 |
| Σχήμα 5.4. Εκπομπές διοξειδίου του αζώτου | 55 |
| Σχήμα 5.5. Εκπομπές οξειδίων του αζώτου..... | 56 |
| Σχήμα 5.6. Ζώνες ECAs | 57 |
| Σχήμα 5.7. Εξάρτηση αερίων θερμοκηπίου από τη διαρροή μεθανίου..... | 63 |
| Σχήμα 5.8. Δρομολόγια για κάθε είδος πλοίου..... | 66 |
| Σχήμα 5.9. Δρομολόγια για κάθε μέγεθος πλοίου | 67 |
| Σχήμα 5.10. Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του κυκλώματος ψύξης και του κυκλώματος των απαερίων της κύριας μηχανής πρόωσης..... | 68 |
| Σχήμα 5.11. Ενεργειακή απόδοση για κάθε εξεταζόμενο σενάριο..... | 71 |
| Σχήμα 5.12. Εκπομπές CO ₂ για κάθε εξεταζόμενο σενάριο..... | 71 |
| Σχήμα 5.13. Κατανάλωση LNG για κάθε εξεταζόμενο σενάριο | 72 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1.1. Σύσταση διαφόρων ειδών φυσικού αερίου που ανήκουν στις κατηγορίες του ανεξάρτητου και του παρελκόμενου φυσικού αερίου | 7 |
| Πίνακας 1.2. Ταξινόμηση φυσικών αερίων, ανάλογα με την % κατ' όγκον σύσταση..... | 7 |
| Πίνακας 5.1. Πρόγραμμα περιορισμού των εκπομπών οξειδίων του θείου | 57 |

| | |
|---|----|
| Πίνακας 5.2. Πρόγραμμα περιορισμού των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. | 58 |
| Πίνακας 5.3. Μείωσης των εκπομπών που προκύπτουν από τη χρήση των υγρών καυσίμων σε συστήματα που διαθέτουν κατάλληλη αντιρρυπαντική τεχνολογία και έχουν τροποποιηθεί, και τη χρήση του LNG..... | 60 |
| Πίνακας 5.4. Σύγκριση LNG με άλλα καύσιμα ναυτιλίας..... | 62 |
| Πίνακας 5.5. Χρόνος που αντιστοιχεί στην κίνηση των φορτηγών χύδην φορτίου, Ro-Ro, δεξαμενοπλοίων και κρουαζιεροπλοίων σε ζώνες ECA..... | 64 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας της ναυτιλίας κατά τα τελευταία έτη υφίσταται σημαντική πίεση, λόγω της αύξησης της τιμής του πετρελαίου και των καυσίμων που προκύπτουν από τη διύλιση αυτού, ενώ παράγοντας που επιτείνει την ανάγκη για εξεύρεση οικονομικότερων και φιλικότερων προς το περιβάλλον λύση είναι και οι αυστηρότερες προδιαγραφές που αφορούν τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων οι οποίες προκύπτουν από την καύση των ενεργειακών πηγών στις μηχανές των πλοίων.

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas, LNG) μπορεί να αποτελέσει μία εναλλακτική επιλογή λόγω της δελεαστικότερης τιμής του και του ότι οι εγκαταστάσεις παραγωγής του μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση σε διεθνές επίπεδο, ενώ τα αποθέματα φυσικού αερίου είναι επαρκή και, μάλιστα, αυξάνονται καθώς βελτιώνονται οι τεχνολογίες εκμετάλλευσής του (Bengtsson et al., 2011).

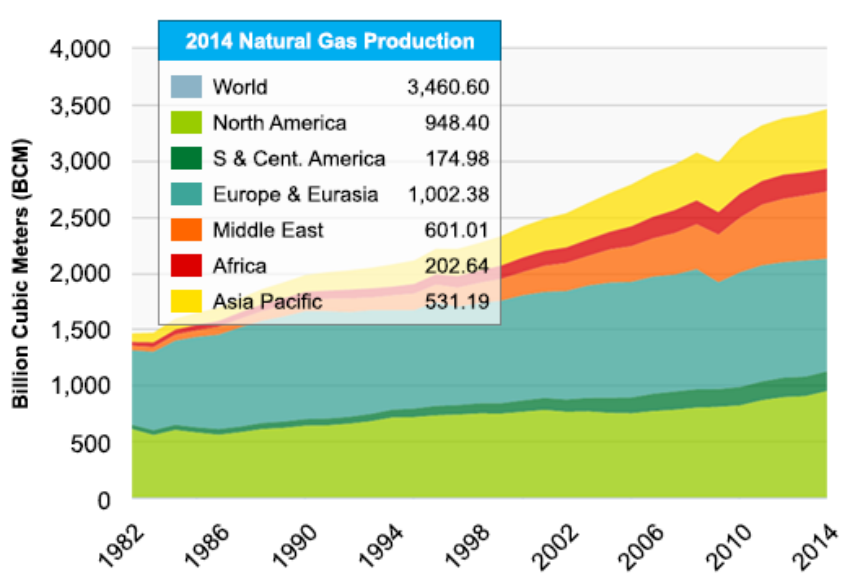
Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν τα τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά που διέπουν την κατανάλωση του LNG, με ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή της λειτουργίας μηχανών διπλού καυσίμου και τις παραγόμενες εκπομπές που συνεπάγεται η χρήση του.

2. ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

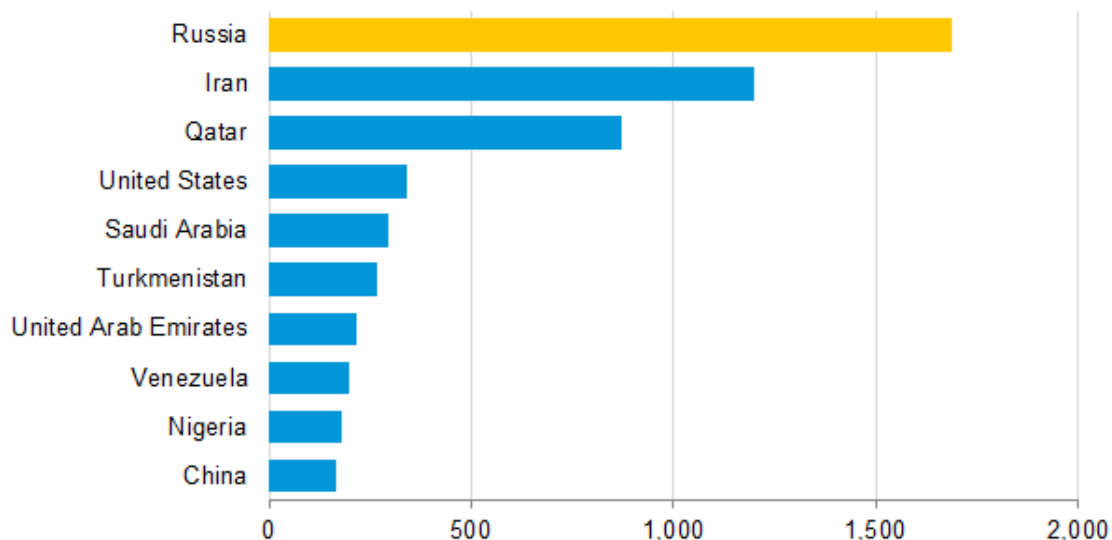
2.1. Σύσταση, ιδιότητες και προέλευση

Το φυσικό αέριο αποτελείται από μείγμα ελαφρών παραφινικών υδρογονανθράκων, με κύρια συστατικά το μεθάνιο και αιθάνιο, και δευτερεύοντα συστατικά το προπάνιο και τις παραφίνες μεγαλύτερου μοριακού βάρους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το φυσικό αέριο περιέχει σημαντικές συγκεντρώσεις υδροθείου και διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες απαιτείται να απομακρυνθούν πριν την διοχέτευσή του στην κατανάλωση.

Σε αντίθεση με το αργό πετρέλαιο, του οποίου η εκμετάλλευση ξεκίνησε το 1859 στην Πενσυλβάνια των ΗΠΑ, η χρήση του φυσικού αερίου άρχισε να διαδίδεται (στις ΗΠΑ) μετά το 1960. Ο κυριότερος λόγος για την καθυστέρηση στην εκμετάλλευση των κοιτασμάτων του φυσικού αερίου υπήρξε η δυσκολία μεταφοράς του από τον τόπο εξόρυξης στον τόπο κατανάλωσης. Για την εκμετάλλευση απαιτείται η κατασκευή εκτεταμένων δικτύων μεταφοράς του στην αέρια κατάσταση ή η μετατροπή του σε υγροποιημένη μορφή, η οποία είναι ευρύτερα γνωστή ως Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο ή LNG (Liquefied Natural Gas, LNG) (Βασάλος & Λεμονίδου, 2009). Οι δύο παραπάνω τρόποι μεταφοράς αναπτύχθηκαν ραγδαία τα τελευταία σαράντα χρόνια και για τον λόγο αυτό η παραγωγή του φυσικού αερίου εξελίχθηκε με γρήγορους ρυθμούς όπως δείχνει και το Σχήμα 1.1. Παράλληλα με την αύξηση του ρυθμού παραγωγής αυξήθηκαν σημαντικά και τα αποθέματα του φυσικού αερίου στον κόσμο (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.1. Διεθνής παραγωγή φυσικού αερίου το 2014 (BP, 2015).



Σχήμα 1.2. Εκτιμώμενα αποθέματα φυσικού αερίου σε χώρες με τους μεγαλύτερους αποταμιευτήρες το 2014 (BP, 2015).

Στην Ελλάδα η εισαγωγή του φυσικού αερίου ξεκίνησε το 1996, μετά την ολοκλήρωση της βασικής υποδομής για τη μεταφορά, διανομή και αποθήκευση. Η εγχώρια παραγωγή φυσικού αερίου στην Ελλάδα είναι αρκετά μικρή. Το κοιτάσμα νοτίως της Καβάλας, που βρίσκεται στον Κόλπο της Καβάλας, παρήγαγε 5 bcm φυσικού αερίου το 2012. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 η ζήτηση σε φυσικό αέριο έχει αυξηθεί σταθερά και το 2012 ανήλθε σε 4.4 bcm (12 bcm/ημέρα). Το 2011 η ηλεκτροπαραγωγή και η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμικής ενέργειας αντιστοιχούσε γύρω στο 61% της συνολικής κατανάλωσης, η βιομηχανική χρήση στο 24% ενώ η οικιακή χρήση γύρω στο 9% (Sifnaios, 2014).

Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου περιλαμβάνει την κύρια γραμμή μεταφοράς υψηλής πίεσης (70 bar) από τα ελληνοβουλγαρικά σύνορα στην Αττική (περιοχή Ελευσίνας), τις διακλαδώσεις υψηλής, μέσης (19 bar) και χαμηλής (4 bar) πίεσης που συνδέουν τις επιμέρους περιοχές της χώρας με τον κύριο αγωγό, συμπεριλαμβανομένης της διακλάδωσης που συνδέει τον κύριο αγωγό με τα ελληνοτουρκικά σύνορα, τις εγκαταστάσεις Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου στο νησί της Ρεβυθούσας, καθώς και επιπρόσθετες εγκαταστάσεις και υποδομές που εξυπηρετούν το σύστημα διανομής του φυσικού αερίου (Σχήμα 1.3).

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3, το φυσικό αέριο εισέρχεται στο ελληνικό σύστημα μεταφοράς μέσω τριών σημείων, του Σιδηροκάστρου (ελληνοβουλγαρικά σύνορα), των Κήπων

του Έβρου (ελληνοτουρκικά σύνορα) και της Αγίας Τριάδας (της ακτής που βρίσκεται απέναντι της Ρεβυθούσας). Το 2013 ένα ποσοστό μεγαλύτερο από το 66% της συνολικής ποσότητας του εισαγόμενου φυσικού αερίου προήλθε από τη Ρωσία, ενώ ένα ποσοστό της τάξης του 18% εισήχθη από την Τουρκία. Το υπόλοιπο 16% εισήχθη στη μορφή του LNG, το οποίο κατά 90% προέρχεται από την Αλγερία (με σταθμό το νησί της Ρεβυθούσας), και εισήλθε στο σύστημα μεταφοράς από το σημείο εισόδου της Αγίας Τριάδος (Σχήμα 1.4) (ΡΑΕ, 2014).



Σχήμα 1.3. Υποδομές φυσικού αερίου στον ελληνικό χώρο (Sifnaios, 2014).

Η Ελλάδα ανέλαβε πρωταγωνιστικό ρόλο στον χώρο της αγοράς φυσικού αερίου των Βαλκανίων και της Μεσογείου το 1999, καθώς πραγματοποιήθηκαν κατάλληλες επενδύσεις τον ενεργειακό τομέα και ιδιαίτερα στην εγκατάσταση τερματικού σταθμού στη Ρεβυθούσα, ο οποίος και αντιστοιχεί σε μία από τις σημαντικότερες ενεργειακές υποδομές της χώρας. Η εγκατάσταση περιλαμβάνεται στους δεκατρείς σταθμούς LNG που βρίσκονται σε λειτουργία στον χώρο της Μεσογείου και της Ευρώπης. Ο σταθμός ευρίσκεται στη νήσο Ρεβυθούσα, σε απόσταση 500

μέτρων από την ακτή Αγίας Τριάδας, 45 km δυτικά της Αθήνας. Το 2000 η εν λόγω εγκατάσταση κατέστη λειτουργική, ενώ στις αρχές του 2008 έλαβε χώρα η ολοκλήρωση του σταδίου επέκκτησης της εγκατάστασης, με συνέπεια την αύξηση της δυναμικότητας έγχυσης φορτίου και της δυναμικότητας αεριοποίησης. Πλέον ο τερματικός σταθμός μπορεί να δέχεται δεξαμενόπλοια μεγαλύτερης χωρητικότητας και να παραλαμβάνει ταχύτερα και αποτελεσματικότερα την διπλάσια ποσότητα LNG. Η συνεχής δυναμικότητα της αεριοποίησης έχει πλέον τριπλασιαστεί (από 271 σε 1000 m³ LNG/h) και παρέχει γύρω στα 5.2-5.3 δισ. m³ φυσικού αερίου σε ημερήσια βάση. Επί του παρόντος πραγματοποιούνται μελέτες για τη δεύτερη αναβάθμιση των εγκαταστάσεων.

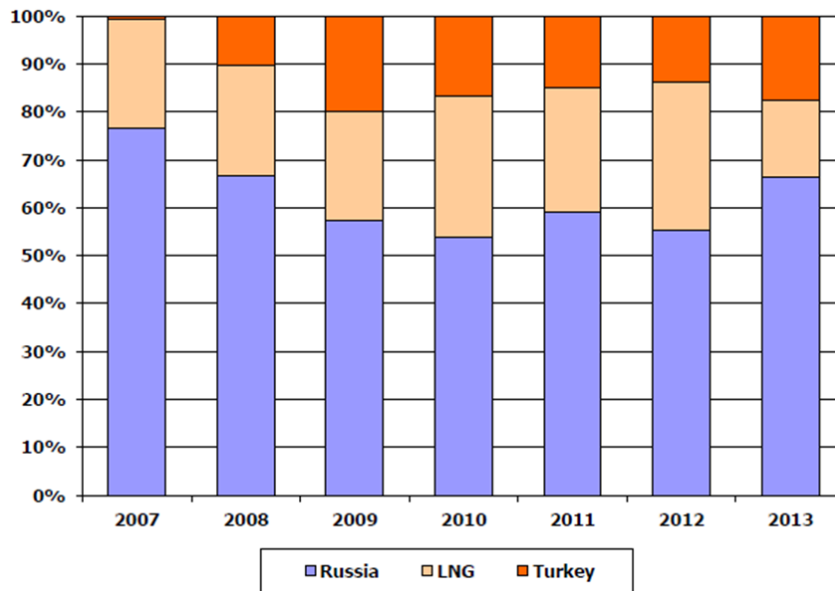
Ο τερματικός σταθμός συνιστά σημαντικό ενεργειακό κεφάλαιο για τη χώρα, παρέχοντας την απαιτούμενη ασφάλεια σε σχέση με την ενεργειακή τροφοδοσία, τη λειτουργική ευελιξία του συστήματος μεταφοράς, καθώς και αυξημένη ικανότητα να καλύπτει αιχμιακές απαιτήσεις της αγοράς του φυσικού αερίου (Κροκιδάς, 2009). Ο σχεδιασμός και η λειτουργία του σταθμού πραγματοποιήθηκαν και πραγματοποιούνται με βάση τις πιο αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας, τόσο για το προσωπικό του σταθμού όσο και για τον πληθυσμό της περιοχής. Η εφαρμοζόμενη τεχνολογία αναφορικά με την επεξεργασία του LNG τηρεί τους όρους της ευρωπαϊκής και της εθνικής νομοθεσίας. Η διατήρηση υψηλών προδιαγραφών περιβαλλοντικής απόδοσης και ασφαλείας ελέγχονται διαρκώς και πιστοποιούνται από ανεξάρτητους φορείς. Ο σταθμός έχει λάβει πιστοποίηση ISO 14001 και OHSAS 18001 (ΔΕΣΦΑ, 2013). Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του έχει λάβει χώρα η παραλαβή περισσότερων από 300 φορτίων LNG τα οποία μεταφέρονται στην Ελλάδα μέσω δεξαμενοπλοίων και προσωρινά αποθηκεύονται σε δύο δεξαμενές με χωρητικότητα 130,000 m³. Εν συνεχεία, στην εγκατάσταση αεριοποίησης, μέρος του LNG μετατρέπεται σε φυσικό αέριο και πάλι τροφοδοτώντας το εθνικό σύστημα διανομής και μεταφοράς φυσικού αερίου.

Για να γίνει λόγος για τη σύσταση του φυσικού αερίου θα πρέπει να εξεταστούν πρώτα οι διαφορετικοί τρόποι συνύπαρξης των κοιτασμάτων του φυσικού αερίου με το αργό πετρέλαιο. Αν και ο μηχανισμός σχηματισμού του φυσικού αερίου είναι κατά βάση ενιαίος με εκείνον του αργού πετρελαίου, η συνύπαρξη των δύο αυτών ορυκτών φυσικών πόρων μπορεί να υφίσταται με τους παρακάτω τρόπους (Gold, 1985):

1. Το φυσικό αέριο αποτελεί ένα ανεξάρτητο αέριο που το οποίο δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με το αργό πετρέλαιο (non-associated gas).

2. Το φυσικό αέριο είναι ένα υπερκείμενο αέριο (gas-cap) το οποίο ευρίσκεται ακριβώς πάνω από ένα κοιτάσμα αργού πετρελαίου.

3. Το φυσικό αέριο υφίσταται ως παρελκόμενο αέριο (associated gas) το οποίο προέρχεται από αέριο διαλυμένο εντός της μάζας του αργού πετρελαίου.



Σχήμα 1.4. Προέλευση εισαγωγών φυσικού αερίου, 2007-2013 (ΠΑΕ, 2014).

Οι προαναφερθέντες ορισμοί σε καμία περίπτωση δεν υποδηλώνουν και τη σπουδαιότητα, σε ό,τι αφορά την οικονομική αξιοποίηση, ενός κοιτάσματος φυσικού αερίου, καθώς:

1. Ορισμένα κοιτάσματα που περιλαμβάνονται στην κατηγορία των υπερκείμενων αερίων είναι περιορισμένης οικονομικής σπουδαιότητας, ενώ άλλα μπορεί να υπερβαίνουν σε αξία και εκείνα που περιλαμβάνονται στα κοιτάσματα υποκείμενου αργού πετρελαίου.

2. Ο λόγος αερίου-πετρελαίου (gas-oil ratio, GOR), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του αερίου προς τον όγκο του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες, είναι δυνατόν να διαφέρει από κοιτάσμα σε κοιτάσμα (από κάποιο κλάσμα του κυβικού μέτρου έως 150 m^3). Ο εν λόγω όγκος καθορίζεται στην πράξη μετά τον διαχωρισμό της υγρής από την αέρια φάση, κατά τον φυσικό διαχωρισμό.

Στον Πίνακα 1.1 δίνονται ορισμένα παραδείγματα φυσικού αερίου που ανήκουν στις κατηγορίες του «ανεξάρτητου» και του «παρελκόμενου» φυσικού αερίου. Παρατηρείται ότι η σύσταση ενός ανεξάρτητου φυσικού αερίου εμφανίζει μεγαλύτερη συγκέντρωση σε μεθάνιο και

αιθάνιο, ενώ η σύσταση ενός παρελκόμενου φυσικού αερίου περιέχει σημαντικό ποσοστό υδρογονανθράκων που συνιστούν συστατικά του υγραερίου (προπάνιο, βουτάνιο). Το LNG αποτελεί γενικά ένα μείγμα με μεγάλη περιεκτικότητα σε μεθάνιο (περίπου 95%).

Πίνακας 1.1. Σύσταση διαφόρων ειδών φυσικού αερίου που ανήκουν στις κατηγορίες του ανεξάρτητου και του παρελκόμενου φυσικού αερίου (Βασάλος & Λεμονίδου, 2009).

| Σύστατικό | Ανεξάρτητο φυσικό αέριο | | | Παρελκόμενο φυσικό αέριο | | |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|
| | Lacq (Γαλλία) | Groningen (Ολλανδία) | Frigg (Νορβηγία) | Darentis (Γαλλία) | Ekofisk (Νορβηγία) | Kirkuk (Ιράκ) |
| Μεθάνιο | 69.0 | 71.3 | 95.7 | 73.6 | 83.3 | 56.9 |
| Αιθάνιο | 3.0 | 2.9 | 3.6 | 10.2 | 8.5 | 21.2 |
| Προπάνιο | 0.9 | 0.4 | - | 7.6 | 3.4 | 6.0 |
| Βουτάνια | 0.5 | 0.1 | - | 5.0 | 1.5 | 3.7 |
| C ₅ + | 0.5 | 0.1 | - | 3.6 | 1.0 | 1.6 |
| Άζωτο | 1.5 | 14.3 | 0.4 | - | 0.3 | - |
| Υδροθείο | 15.3 | - | - | - | - | 3.5 |
| Διοξείδιο του άνθρακα | 9.3 | 0.9 | 0.4 | - | 2.0 | 7.1 |

Εκτός από υδρογονάνθρακες, το φυσικό αέριο μπορεί να περιέχει και άλλα συστατικά, όπως υδροθείο, το οποίο δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στο στάδιο της παραγωγής, άζωτο και διοξείδιο του άνθρακα. Με βάση την περιεκτικότητα του φυσικού αερίου στα παραπάνω συστατικά το φυσικό αέριο που προέρχεται από ένα κοίτασμα ταξινομείται σε μία από τις κατηγορίες που αναφέρονται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2. Ταξινόμηση φυσικών αερίων, ανάλογα με την % κατ' όγκον σύσταση (Βασάλος & Λεμονίδου, 2009). **Error! Not a valid link.**

2.2. Υγροποιημένο φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο αποτελεί ένα άχρωμο, μη τοξικό και άοσμο μείγμα, με πυκνότητα περίπου 460 kg/m^3 , χαμηλή ταχύτητα φλόγας και μεγάλο ποσοστό αναφλεξιμότητας στον αέρα. Η μεγάλη τάση του για αυτανάφλεξη αντιστοιχεί σε ένα από τα πιο επικίνδυνα χαρακτηριστικά του. Επίσης, πρόκειται για ένα αέριο μείγμα μη διαβρωτικό και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από -110°C αρκετά ελαφρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα, εν αντιθέσει με υδρογονάνθρακες όπως το αιθάνιο, το προπάνιο και το βουτάνιο, οι οποίοι είναι βαρύτεροι του αέρα σε όλες τις θερμοκρασίες (Guo & Ghalamog, 2005).

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Υποκεφάλαιο, θεμελιώδες πρόβλημα σε σχέση με τη διαχείριση του φυσικού αερίου είναι η μεταφορά του. Το μεθάνιο, συστατικό που συναντάται στο μείγμα στη μεγαλύτερη περιεκτικότητα, δεν είναι δυνατόν να υγροποιηθεί με απλή συμπίεση (αντίθετα με το βουτάνιο, το προπάνιο αλλά και το αιθάνιο) και, κατά συνέπεια, θα πρέπει να ψυχθεί τουλάχιστον σε θερμοκρασία -161°C (σημείο βρασμού του μεθανίου), όπου και μειώνεται ο όγκος του σε βαθμό $1/600$, γεγονός που καθιστά δυνατή και οικονομικά βιώσιμη τη θαλάσσια μεταφορά του (Bengtsson et al., 2011).

Η υγροποίηση του φυσικού αερίου πραγματοποιείται σε εξειδικευμένες παραγωγικές μονάδες, γνωστές και ως τερματικοί σταθμοί (LNG liquefaction terminals), που ευρίσκονται σε σχετικά μικρή απόσταση σε σχέση με τα πεδία παραγωγής του ορυκτού καυσίμου. Η φόρτωση πραγματοποιείται με τη βοήθεια αντλιών των τερματικών σταθμών, ενώ η εκφόρτωση λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια των αντλιών των πλοίων.

Πριν την αποθήκευση και μεταφορά του φυσικού αερίου μεταφέρεται σε εγκατάσταση επεξεργασίας όπου υφίσταται καθαρισμό προς απομάκρυνση συμπυκνωμένων συστατικών, όπως νερού, πετρελαίου, λάσπης και άλλων αερίων (όπως υδροθείου και διοξειδίου του άνθρακα), αλλά και απομάκρυνση υδραργύρου σε κατάλληλο εναλλάκτη θερμότητας. Εν συνεχεία, το αέριο ψύχεται βαθμιαία μέχρι την υγροποίησή του (Cozzani et al., 2011).

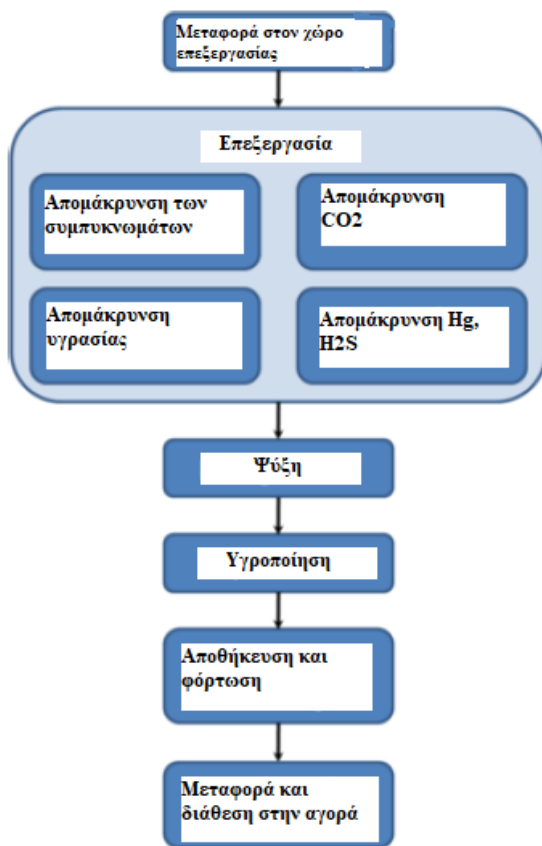
Ακολούθως, το LNG αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές αποθήκευσης οι οποίες μπορούν να φορτωθούν σε πλοίο και να μεταφερθούν. Η μείωση που υφίσταται το LNG εν σχέσει με το συμπιεσμένο φυσικό αέριο είναι τέτοια ώστε η πυκνότητα ενέργειας να είναι 2-4 φορές μεγαλύτερη εκείνης του ντίζελ. Συνοπτικά, η διαδικασία που υφίσταται το φυσικό αέριο από τη μεταφορά του στον χώρο επεξεργασίας έως τη διάθεσή του στην αγορά απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5.

Η μεταφορά του LNG λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια ειδικά σχεδιασμένων πλοίων, εφοδιασμένων με διπλό κύτος ώστε να προστατεύονται επαρκώς τα συστήματα που είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο του φορτίου από διαρροές ή βλάβες. Τα συγκεκριμένα πλοία (Σχήμα 1.6) είναι ένα είδος εμπορικών σκαφών ή/και δεξαμενόπλοιων που το φορτίο τους είναι το υγροποιημένο φυσικό αέριο, του οποίου η μεταφορά πραγματοποιείται με τρόπο αντίστοιχο με τον οποίον λαμβάνει χώρα η μεταφορά του αργού πετρελαίου. Η κατασκευή των πρώτων σκαφών του εν λόγω είδους πραγματοποιήθηκε κατά τη δεκαετία του 1960 και την περίοδο εκείνη τα συγκεκριμένα πλοία ονομάζονταν «μεθανιοφόρα».

Η αποθήκευση του LNG στα σκάφη ρυθμίζεται από τον Διεθνή Κώδικα Μεταφοράς Αερίων (International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk ή, απλούστερα, IGC Code), ο οποίος είναι τμήμα των εκδόσεων του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας που αφορούν την ασφάλεια ζωής στη θάλασσα (Safety Of Life At Sea, SOLAS). Ο εν λόγω κώδικας περιέχει απαιτήσεις αναφορικά με την κατασκευή και την αντοχή των δεξαμενών, με κανόνες υπολογισμού της πίεσης που επιτρέπεται να έχουν οι δεξαμενές και την ρύθμιση της μέγιστης επιτρεπόμενης πίεσης που αφορά τις βαλβίδες εκτόνωσης. Με βάση τον IGC Code γίνονται αποδεκτά συγκεκριμένα μόνον είδη δεξαμενών (IMO, 2014).

Γενικά, οι δεξαμενές αποθήκευσης του LNG είναι ανεξάρτητες και στα σύγχρονα πλοία είναι τύπου μεμβράνης, κατασκευάζονται δε από παχύ έλασμα αποτελούμενο από αντιδιαβρωτικό κράμα αλουμινίου το οποίο πλαισιώνεται από θερμομόνωση (Seamanship International, 2006). Στις συγκεκριμένες δεξαμενές επιτυγχάνεται η μεταφορά του LNG σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία που φτάνει περίπου τους -163°C , πλησίον δηλαδή της θερμοκρασίας εξαέρωσης του υγροποιημένου φυσικού αερίου.

Με βάση τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι συγκριτικά με τους αγωγούς μεταφοράς και διανομής φυσικού αερίου σε μεγάλες αποστάσεις τα πλοία μεταφοράς LNG εμφανίζουν ως βασικό πλεονέκτημα την ικανότητά τους να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες καυσίμου (συνήθως περί τα $160,000\text{ m}^3$ LNG), καθώς το προϊόν που μεταφέρεται έχει υποστεί ιδιαίτερα μεγάλη συμπύκνωση (Alderton, 2004).

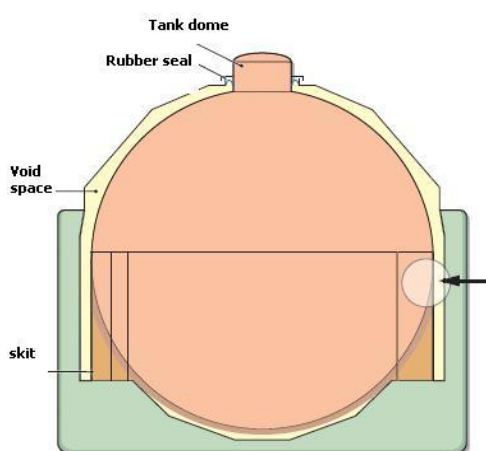


Σχήμα 1.5. Στάδια διαχείρισης LNG (Cozzani et al., 2011).



Σχήμα 1.6. Πλοίο μεταφοράς LNG (Marinetraffic, 2018).

Σχετικά με τους νέους τρόπους σχεδιασμού των δεξαμενόπλοιων και με στόχο την βέλτιστη και ασφαλέστερη μεταφορά LNG, αναφέρεται ότι τα πλοία προηγμένης τεχνολογίας τα οποία εξυπηρετούν μακροχρόνιες συμβάσεις μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου χαρακτηρίζονται από διάρκεια ζωής ίση με 30-35 έτη. Με βάση τον τρόπο κατασκευής μπορούν να διακριθούν σε δεξαμενόπλοια πρισματικών δεξαμενών, σε σκάφη σφαιρικών δεξαμενών και σε σκάφη με δεξαμενές μεμβρανών. Οι δεξαμενές είναι εφοδιασμένες στο εσωτερικό τους με ειδική μόνωση, ενίοτε δε και με ειδικές διατάξεις (για ορισμένους τύπους δεξαμενών) προς ελαχιστοποίηση του ποσοστού του LNG που μεταβαίνει στην αέρια φάση (boil-off gas). Στο Σχήμα 1.7 απεικονίζεται δεξαμενή πλοίου μεταφοράς LNG σφαιρικού σχήματος (Zellouf & Bortannier, 2011).



Σχήμα 1.7. Σφαιρική δεξαμενή πλοίου μεταφοράς LNG (Mokhatab et al., 2014).

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτουν τα πλοία μεταφοράς LNG με στόχο την πρόληψη των ατυχημάτων. Θεμελιώδη χαρακτηριστικά είναι τα διπλά τοιχώματα το διπλό κύτος, ούτως ώστε να παρέχεται η απαραίτητη προστασία έναντι οποιασδήποτε απελευθέρωσης LNG που μπορεί να προκληθεί λόγω εξωτερικής βλάβης. Επιπλέον, τα πλοία μεταφοράς LNG θα πρέπει να έχουν ανθεκτικότητα στις φυσιολογικές επιπτώσεις κάποιας εκροής που μπορεί να προκληθεί λόγω μίας εξωτερικής βλάβης (π.χ. ανθρώπινο σφάλμα, βλάβη του πηδαλίου ή του συστήματος πρόωσης, βλάβη στον εξοπλισμό). Με βάση τον IGC Code απαιτείται ο διαχωρισμός του εσώκλειστου χώρου της κατασκευής του πλοίου, όπου βασίζονται οι θέσεις αποθήκευσης του προς μεταφορά φορτίου (hold places) από τους χώρους μηχανολογικών εγκαταστάσεων, ενδιαίτησης, ελέγχου, τις δεξαμενές πόσιμου νερού, κ.ά.

Επιπροσθέτως, υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις που αφορούν την απομόνωση των σωληνώσεων του φορτίου από τις υπόλοιπες σωληνώσεις, ώστε να αποφεύγεται η μεταφορά του φορτίου ή των ατμών που προκύπτουν από την εξαέρωσή του μέσω του δικτύου άλλων σωληνώσεων. Ακόμη, καθορίζονται οι σταθμοί ελέγχου, οι χώροι υπηρεσίας και οι χώροι των μηχανολογικών εγκαταστάσεων. Επιπλέον, προβλέπονται ειδικές ρυθμίσεις που καθιστούν εφικτή την οπτική επιθεώρηση της εσωτερικής γάστρας καθώς και της μόνωσης των θέσεων αποθήκευσης (Mokhatab et al., 2014).

Επίσης, απαιτείται να διασφαλίζεται η ικανοποιητική πρόσβαση στις δεξαμενές, με τέτοιον τρόπο ώστε να καθίσταται εφικτή η εσωτερική επιθεώρηση αυτών. Η εγκατάσταση, η ορθή λειτουργία και η συντήρηση των συστημάτων ανίχνευσης ενδεχόμενων διαρροών LNG είναι επίσης αναγκαίες προϋποθέσεις της ασφαλούς μεταφοράς του καυσίμου. Ακόμη, η διαμόρφωση ενός συγκεκριμένου σχεδίου φύλαξης του μεταφερόμενου φορτίου, το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν τη μέγιστη πίεση εκτόνωσης των βαλβίδων ανακούφισης και τις μέγιστες πιέσεις των ατμών, κατά τις προδιαγραφές του IGC Code, κρίνονται απαραίτητα. Ο IGC Code απαιτεί επίσης η ανάλυση της κατασκευής του πλοίου να συμφωνεί με τον σχεδιασμό κάθε είδους χώρου φύλαξης του μεταφερόμενου φορτίου με τέτοιον τρόπο ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν το σύνολο των φορτίσεων που διέπουν κάθε έναν από αυτούς τους χώρους (Zellner & Hindo, 2005).

Είναι επιπλέον αναγκαία η ύπαρξη δευτεροβάθμιων χώρων του φορτίου, ώστε σε περίπτωση διαρροής να καρακρατούνται οι ποσότητες LNG που διαφεύγουν από τις κύριες δεξαμενές αποθήκευσης (για 15 ημέρες περίπου), ούτως ώστε να αποτρέπεται η μείωση της θερμοκρασίας του μεταλλικού σκελετού του πλοίου σε ακατάλληλα επίπεδα. Εν συνεχεία, με τη βοήθεια κατάλληλων συστημάτων διασφαλίζεται η μεταλλική κατασκευή του πλοίου από την επαφή με το ψυχρό LNG.

Ο IGC Code περιλαμβάνει κανονισμούς που αφορούν τον γενικό σχεδιασμό, το πάχος των σωληνώσεων, τις πιέσεις σχεδιασμού, τα επιτρεπτά όρια αντοχής των σωληνώσεων, τις δοκιμές και τις συγκολλήσεις τους, τις δοκιμές για ανίχνευση διαρροών, κ.ά. Οι απαιτήσεις αυτές είναι απαραίτητες για να εξασφαλιστούν ο κατάλληλος σχεδιασμός και η ορθή λειτουργία του δικτύου των σωληνώσεων. Οι βαλβίδες ασφαλείας και το σύνολο του εξοπλισμού ασφαλείας απαιτείται να είναι αυτοματοποιημένα, με στόχο την αποφυγή των ατυχημάτων. Στα συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας και της πίεσης εφαρμόζεται μηχανική ψύξη, ενώ ο κορεσμένος ατμός του LNG αξιοποιείται ως καύσιμο ή μέσο θέρμανσης.

Στα συστήματα εκτόνωσης ιδίως είναι εγκατεστημένες δύο τουλάχιστον βαλβίδες οι οποίες πρέπει να επικοινωνούν με δίκτυο σωληνώσεων, με σκοπό την αποτροπή της συσσώρευσης του LNG σε περιοχές που εμφανίζουν μεγάλη επικινδυνότητα ή στο κατάστρωμα. Ο εξοπλισμός του πλοίου μεταφοράς LNG θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει συστήματα προστασίας κενού, που περιλαμβάνουν δύο διακόπτες με συναγερμό, και τα οποία αποτρέπουν την αναρρόφηση υγρού ή αερίου από τις δεξαμενές LNG καθώς απενεργοποιούν το σύστημα ψύξης. Τα συγκεκριμένα συστήματα είναι εφοδιασμένα με βαλβίδες εκτόνωσης ενδεχόμενου κενού, οι οποίες είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν στη βάση του μέγιστου ρυθμού εκτόνωσης του κενού.

Κατά τον IGC Code, τα πλοία μεταφοράς LNG υποχρεούνται να διαθέτουν κύριο σύστημα πυρόσβεσης και πυροσβεστικές φωλιές που έχουν την ικανότητα να τροφοδοτούν οποιοδήποτε σημείο του καταστρώματος, αλλά και άλλα τμήματα του σκάφους. Ως μέσο πυρόσβεσης χρησιμοποιείται ξηρή σκόνη. Στο σύστημα καταγραφής και ελέγχου περιλαμβάνονται το σύστημα ανίχνευσης αερίων, το οποίο άμα τη εμφανίσει μιας διαρροής θέτει σε λειτουργία έναν συναγερμό, συσκευή μέτρησης της στάθμης του υγρού σε κάθε δεξαμενή, οπτικός και ακουστικός συναγερμός που όταν ενεργοποιηθούν διακόπτουν τη ροή φορτίου εντός της δεξαμενής, μετρητές πίεσης των δεξαμενών, όπου είναι μαρκαρισμένες οι μέγιστες και οι ελάχιστες πιέσεις στις δεξαμενές, καθώς μετρητές θερμοκρασίας και συναγερμοί, ούτως ώστε να πραγματοποιείται ο κατάλληλος έλεγχος για πιθανές διαρροές στο στρώμα της μόνωσης ή στις περιοχές της μεταλλικής κατασκευής του σκάφους οι οποίες είναι παρακείμενες στις δεξαμενές (Mokhatab et al., 2014).

Επίσης, θεωρούνται απαραίτητα τα συστήματα ανεφοδιασμού που αποκρίνονται αυτομάτως σε ανίχνευση υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα, διά της αυτόματης διακοπής της άντλησης και του κλεισίματος των βαλβίδων απομόνωσης της γραμμής μεταφοράς του LNG. Μεγάλης σημασίας θεωρούνται και οι «συνδέσεις έκτακτης απελευθέρωσης», που είναι σχεδιασμένες με τέτοιον τρόπο ώστε το ποσό του LNG που θα απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα να είναι το ελάχιστο δυνατό.

Πέραν των κανόνων ασφαλείας που διέπουν τις δεξαμενές και, γενικότερα, τη λειτουργία των δεξαμενόπλοιων LNG, θεμελιώδη ρόλο στην βέλτιστη και ασφαλέστερη μεταφορά LNG διαδραματίζουν και οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης, εκφόρτωσης, απενεξάτμισης και εισαγωγής του LNG στο δίκτυο μεταφοράς. Κατά συνέπεια, σε μία εγκατάσταση φόρτωσης, εκφόρτωσης και υποδοχής LNG θα πρέπει να είναι εγκατεστημένος ο ακόλουθος εξοπλισμός.

α. Δεξαμενές αποθήκευσης

β. Προβλήματα εκφόρτωσης με «βραχιόνες» εκφόρτωσης και «βραχιόνες» επιστροφής των ατμών που προκύπτουν από την εξαέρωση (boil-off gas)

γ. Αντλίες χαμηλής πίεσης, που είναι βυθισμένες εντός των δεξαμενών

δ. Αντλίες υψηλής πίεσης προς συμπίεση του LNG μέχρι την πίεση στην οποία λειτουργεί το δίκτυο μεταφοράς. Για τη συμπίεση του LNG απαιτείται τριάντα φορές μικρότερη ενέργεια από τη συμπίεση του φυσικού αερίου.

ε. Συμπιεστές που χρησιμοποιούνται για την επανυγροποίηση των ατμών που προκύπτουν από την εξαέρωση του LNG

στ. Επανυγροποιητής

ζ. Εξατμιστήρες καύσης (για την κάλυψη των φορτίων αιχμής) και θαλασσινού νερού (για την κάλυψη των φορτίων βάσης)

η. Πυρσός για την καύση των περισσευόμενων ατμών που προκύπτουν από την εξαέρωση του LNG

θ. Βοηθητικές εγκαταστάσεις

3. LNG ΣΤΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ

3.1. Γενικές παρατηρήσεις

Η σύγχρονη ναυτιλία αντιμετωπίζει τρεις νέες πραγματικότητες που τα τελευταία έτη μεταβάλλουν τις επιλογές γύρω από τις επενδύσεις σε καύσιμα ναυτιλίας. Αρχικά, οι φορείς λήψης αποφάσεων, οι ερευνητές που αναλύουν στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλιακής δραστηριότητας και οι υπεύθυνοι για ζητήματα της ανθρώπινης υγείας ενδιαφέρονται ολοένα και περισσότερο για τις επιπτώσεις που προκύπτουν από τις εκπομπές ρύπων κοντά σε παράκτιες πόλεις με μεγάλο πληθυσμό. Οι Corbett & Fishbeck (1997) παρατηρούν ότι καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας τα σκάφη εξέπεμπαν ιδιαίτερα μεγάλες ποσότητες ρύπων στην ατμόσφαιρα. Αν και είναι γεγονός ότι με την πάροδο του χρόνου γενικά έχει βελτιωθεί η περιβαλλοντική επίδοση των πλοίων, η διεθνής ναυτιλία εξακολουθεί να αποτελεί ένα μεγάλο τμήμα του προβλήματος της

ρύπανσης σε τοπικό επίπεδο, ιδίως κατά μήκος των παράκτιων ζωνών, από τη στιγμή που το 70% των εκπομπών επηρεάζουν μία έκταση που εκτείνεται μέχρι και 400 km στο εσωτερικό της ξηράς. Οι αναλύσεις που αφορούσαν τα έτη 2007-2012 έδειξαν ότι η διεθνής ναυτιλία παραμένει προβληματική από άποψη περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και οι εκπομπές που προκύπτουν από ναυτιλιακές δραστηριότητες μπορούν να συμβάλλουν καίρια στην υποβάθμιση της ανθρώπινης υγείας (IMO, 2014).

Ενώ η υιοθέτηση της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Θαλάσσιας Ρύπανσης από τα Πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL) από την πλευρά του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization, IMO) το 1973 αποτέλεσε σημείο-τομή στη διαχείριση των εκπομπών ορισμένων ρύπων η αντίδραση από τη διεθνή ναυτιλιακή κοινότητα υπήρξε καθυστερημένη. Ο IMO χρησιμοποίησε το πλαίσιο της MARPOL για την εισαγωγή ρυθμίσεων που θα έλεγχαν τις εκπομπές συγκεκριμένων ρύπων. Το Παράρτημα VI της MARPOL, το οποίο υιοθετήθηκε αρχικά το 1997, αποτέλεσε σημείο έναρξης μιας προσπάθειας περιορισμού των εκπομπών οξειδίων του θείου και του αζώτου από τα φουγάρα των πλοίων διά της καθιέρωσης προτύπων εκπομπής για πλοία που στόχευαν στον περιορισμό των εκπομπών των παραπάνω οξειδίων κατά 80%, σε διεθνές επίπεδο, και σε ποσοστό μεγαλύτερο του 90% σε ειδικές περιοχές ελέγχου των εκπομπών που καθορίστηκαν από τον IMO (emission control areas, ECAs) κατά μήκος ευρωπαϊκών ακτών και ακτών των ΗΠΑ (Thomson et al., 2015). Οι συγκεκριμένες ECAs διέπονται από αυστηρότερους περιορισμούς των εκπομπών για πλοία που κινούνται κατά μήκος των παράκτιων ζωνών τους, όπως για παράδειγμα το όριο του 0.1% για την περιεκτικότητα των καυσίμων ναυτιλίας σε θείο. Οι κατασκευαστές μηχανών, οι υπεύθυνοι λειτουργίας των πλοίων και οι πάροχοι της τεχνολογίας ανταποκρίθηκαν στη θέσπιση των νέων ορίων με έλεγχο των εκπομπών που εξέρχονται από τις καπνοδόχους και με αλλαγή των καυσίμων που χρησιμοποιούνται. Το φυσικό αέριο αποτελεί γενικώς μια λύση που συνεπάγεται χαμηλότερα επίπεδα ρύπανσης σε σχέση με τα καύσιμα που προέρχονται από την απόσταξη του αργού πετρελαίου. Στην περίπτωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου οι υφιστάμενες μηχανές παράγουν εκπομπές ίσες με εκείνες των μηχανών που αξιοποιούν κλάσματα διύλισης του πετρελαίου, ενώ οι προτεινόμενες βελτιώσεις στον σχεδιασμό αυτών ενδέχεται να περιορίσουν έτι περαιτέρω τις εκπομπές, ώστε να ικανοποιούνται τα επίπεδα Tier III χωρίς επιπλέον διεργασίες (Wärtsilä, 2018). Οι έρευνες δείχνουν ότι οι εκπομπές οξειδίων του θείου και αιωρούμενων σωματιδίων PM₁₀ που προκύπτουν από τη χρήση του φυσικού αερίου ικανοποιούν τα ισχύοντα, καθώς και τα προτεινόμενα κριτήρια που διέπουν τη λειτουργία των πλοίων.

Σε δεύτερο επίπεδο η διαφορά της τιμής μεταξύ του φυσικού αερίου και των κλασμάτων δύλισης που περιέχουν μικρή περιεκτικότητα σε θείο, και η οποία παρατηρείται από το 2002 και εξής, συνιστά αιτία υπέρ της προτίμησης του πρώτου καυσίμου έναντι του δεύτερου. Πράγματι, ένα διαρκώς αυξανόμενο πλήθος νέων σκαφών προωθούνται είτε με την αποκλειστική χρήση φυσικού αερίου ή με έναν συνδυασμό συμβατικού τήζελ και φυσικού αερίου (Posplech, 2013). Οι άμεσα διαθέσιμες στην αγορά παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν στη βάση του φυσικού αερίου ή έχουν τη δυνατότητα χρήσης δύο καυσίμων αποτέλεσαν μία οικονομικά αποδοτική λύση που αξιοποίησαν οι εταιρείες ναυπήγησης σκαφών. Επιπλέον, σε διεθνές επίπεδο παρατηρείται πολλαπλασιασμός και διεύρυνση των υποδομών που αφορούν τη διαχείριση του φυσικού αερίου, καθιστώντας ακόμα μια αποδοτική τη χρήση του LNG από οικονομική σκοπιά. Τόσο η περιβαλλοντική κινητήριος δύναμη όσο και το οικονομικό αντίστοιχό της, που σχετίζεται με τον ανταγωνισμό στη ναυτιλιακή αγορά, οδήγησαν σε μία σημαντική αύξηση του ενδιαφέροντος των ναυτιλιακών εταιρειών αναφορικά με τη χρήση του υγροποιημένου φυσικού αερίου για την πρόωση των πλοίων.

Εν τούτοις, η αυξημένη χρήση του LNG στον τομέα της ναυτιλίας μπορεί να επιδράσει αρνητικά έναν τρίτο σημαντικό παράγοντα που είναι η κλιματική αλλαγή. Συμπληρώνοντας τις ανησυχίες του IMO ως προς τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, οξειδίων του θείου και PM₁₀, νεότερες έρευνες που αφορούν τη διερεύνηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (greenhouse gases, GHGs) που προκύπτουν από τη λειτουργία των πλοίων έχουν εστιάσει σε προσπάθειες για τον περιορισμό των εκπομπών GHGs που ανάγεται στη διεθνή ναυτιλιακή δραστηριότητα. Επί του παρόντος, η τελευταία ευθύνεται για το 2-3% περίπου των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και το 2011 ο IMO υιοθέτησε δεσμευτικά μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών αυτών. Η αυξημένη χρήση του φυσικού αερίου στον τομέα της ναυτιλίας μπορεί να συνεπάγεται την αύξηση των εκπομπών GHGs, λόγω του δυναμικού υπερθέρμανσης πλανήτη (global warming potential, GWP) που χαρακτηρίζει το φυσικό αέριο, σε συνδυασμό με τη διαφυγή μεθανίου στην ατμόσφαιρα που λαμβάνει χώρα κατά τις διεργασίες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής του εν λόγω καυσίμου (Brynolf et al., 2014). Όταν λαμβάνονται υπ' όψιν οι εκπομπές GHGs που οφείλονται στις διεργασίες που προηγούνται της κατανάλωσης του φυσικού αερίου (γνωστές και ως “upstream emissions”), τα πλεονεκτήματα από τη χρήση του συγκεκριμένου καυσίμου, από τη σκοπιά της επίπτωσης στην υπερθέρμανσης του πλανήτη, είναι αβέβαια, καθώς η παραγωγή του φυσικού αερίου μπορεί να είναι περισσότερο εντατική από ενεργειακή άποψη σε σχέση με την παραγωγή του αργού πετρελαίου, ενώ η διαφυγή μεθανίου στην ατμόσφαιρα κατά την εξαγωγή

και μεταφορά του LNG μπορεί να συνεπάγεται σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση, καθώς πρέπει να τονιστεί ότι το μεθάνιο έχει 25 φορές μεγαλύτερο GWP σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα (Thomson et al., 2015).

3.2. Παραδείγματα

Μερικά εκ των σημαντικότερων πλοίων που κινούνται με χρήση LNG, υφιστάμενα ή σε φάση σχεδιασμού είναι τα ακόλουθα:

Το Creole Spirit θεωρείται σε διεθνές επίπεδο το πιο αποδοτικό πλοίο που χρησιμοποιεί LNG, ήτοι το σκάφος με το μικρότερο κόστος ανά μονάδα φορτίου (Σχήμα 3.1). Το συγκεκριμένο σκάφος, μήκους 295 m και χωρητικότητας 174,000 m³ LNG, είναι το πρώτο με έγχυση αερίου που πραγματοποιείται με ηλεκτρονικό έλεγχο τύπου M (M-type Electronically Controlled Gas Injection, MEGI). Η ιδιοκτήτρια εταιρεία είναι η Teekay και χρησιμοποιεί δίχρονους κινητήρες MAN Diesel. Το σύστημα πρόωσης καταναλώνει μόνον 110 τόνους καυσίμου, σε αντίθεση με τα συμβατικά ντηζελοηλεκτρικά συστήματα διπλού καυσίμου, τα οποία καταναλώνουν σε ημερήσια βάση περί τους 125-130 τόνους. Πέραν του κινητήρα, η αύξηση της συνολικής απόδοσης και η μείωση του κόστους, αποτελεί επακόλουθο και της μείωσης του αριθμού των κυλίνδρων οι οποίοι απαιτούν γενικευμένη επισκευή, της μείωσης του μεγέθους των σύνθετων ηλεκτρικών συστημάτων, καθώς και η εισαγωγή συστήματος «μερικής επανυγροποίησης». Το σκάφος έχει ναυλωθεί στην εταιρεία εφοδιασμού LNG Cheniere και τέθηκε σε λειτουργία στις αρχές του 2016. Μάλιστα, η άφιξή του σε λιμάνι της Πορτογαλίας τον Απρίλιο του ίδιου έτους σηματοδότησε την παραλαβή του πρώτου φορτίου αμερικανικού LNG στην ευρωπαϊκή ήπειρο.



Σχήμα 3.1. Creole Spirit (Marinetraffic, 2018)

Το Isla Bella αντιστοιχεί στο πρώτο σε διεθνές επίπεδο φορτηγό πλοίο εμπορευματοκιβωτίων (containership) που κινείται με χρήση LNG (Σχήμα 3.2). Ιδιοκτήτρια εταιρεία του συγκεκριμένου σκάφους είναι η TOTE, σε συνεργασία με την εταιρεία General Dynamics NASSCO. Άλλες δυο πρωτιές του σκάφους συνεπάγονται τα γεγονότα ότι αποτελεί το πρώτο από τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τύπου Marlin και το μεγαλύτερο πλοίο μεταφοράς ξηρού φορτίου που κινείται με κατανάλωση LNG. Το σκάφος έχει εξοπλιστεί με πιστοποιημένο σύστημα καύσης Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (DSME), στη βάση των προδιαγραφών του νόμου Jones (Jones Act) και αντιστοιχεί στο πρώτο πλοίο διεθνώς που λειτουργεί με μηχανή πρόωσης MAN ME-GI, διπλού καυσίμου και χαμηλής ταχύτητας. Αναφέρεται ότι η χρήση των εν λόγω κινητήρων συνεπάγεται μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά 98%, των εκπομπών οξειδίων του θείου κατά 97% και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 72%, στοιχεία που καθιστούν το σκάφος το φιλικότερο στο περιβάλλον σε σχέση με τα υπόλοιπα πλοία της ίδιας κατηγορίας, διαθέτοντας παράλληλα σύστημα επεξεργασίας έρματος. Το Isla Bella ξεκίνησε τις δραστηριότητές του τον Οκτώβριο του 2015, ενώ το αδελφό πλοίο του, Perla del Caribe, το 2016.

**Σχήμα 3.2.** Isla Bella (Satellitoday, 2017).

Η Carnival Corporation πρόκειται να παραλάβει (μεταξύ 2019-2022) τέσσερα κρουαζιερόπλοια που θα κινούνται με τη χρήση LNG, εκ των οποίων τα δύο θα αποτελούν μέρος του στόλου της AIDA Cruises. Η κατασκευή τους θα πραγματοποιηθεί στα ναυπηγία Fincantieri SpA και Meyer Werft. Τα τέσσερα πλοία θα είναι επίσης εφοδιασμένα με καινοτόμο σύστημα «πράσινης πλεύσεως». Τα σκάφη θα είναι τα πρώτα κρουαζιερόπλοια που θα καταναλώνουν LNG. Η συνολική χωρητικότητα τους κάθε ενός εξ' αυτών θα είναι περί τα 6600 άτομα, ενώ θα διαθέτει αριθμό κλινών μεγαλύτερο των 5000 και θα υπερβαίνει τους 180,000 κόρους.

Το SeaRoad Mersey II τέθηκε σε λειτουργία στα τέλη του 2016 (Σχήμα 3.3). Η αυστραλιανή εφοπλιστική εταιρεία SeaRoad διαθέτει το μεγαλύτερο σε διεθνές επίπεδο Ro-Ro οχηματαγωγό πλοίο που κινείται με LNG, μήκους 181 m. Το σκάφος διαθέτει ολοκληρωμένο πακέτο εξοπλισμού RoRo για την πρόσβαση του φορτίου, όπως κάλυμμα ράμπας, δύο ράμπες-πόρτες πρύμνης, δύο πόρτες καταφυγίου και ράμπα πρόσβασης. Το σκάφος διαθέτει μία ευέλικτη ικανότητα μεταφοράς φορτίου, ενώ έχει τη δυνατότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, συμπεριλαμβανομένων τρέηλερ, μονάδων ψύξης, ζώνων, επικίνδυνων εμπορευμάτων και αυτοκινήτων.



Σχήμα 3.3. Searoad Mersey II (MarineTraffic, 2018).

Το Rem Eir αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο σε διεθνές επίπεδο σκάφος εφοδιασμού πλατφόρμας που κινείται με LNG (Σχήμα 3.4). Το εν λόγω πλοίο, που καθελκύστηκε το 2014, ανήκει στη Remøy Shipping και έχει σχεδιαστεί από την Wärtsilä Ship Design. Το μήκος του είναι 92.5 m, το πλάτος του 20 m και διαθέτει χωρητικότητα καταστρώματος της τάξης των 1080 m².

Είναι το μεγαλύτερο στο είδος του που κινείται με LNG και η περιβαλλοντική του απόδοση κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική. Το Rem Eir είναι μακροπρόθεσμα ναυλωμένο από τη Statoil.



Σχήμα 3.4. Rem Eir (MarineTraffic, 2018).

Στο ναυπηγείο Ferus Smit κατασκευάστηκε το πρώτο πλοίο μεταφοράς τσιμέντου που κινείται με LNG για λογαριασμό της εταιρείας μεταφοράς τσιμέντου JT Cement, MV Greenland (Σχήμα 3.5). Το σύστημα που χρησιμοποιεί για τη φόρτωση και εκφόρτωση του τσιμέντου προς και από το πλοίο είναι εξ' ολοκλήρου αυτοματοποιημένο και η λειτουργία του βασίζεται στη ρευστοποίηση του τσιμέντου με την παροχή πεπιεσμένου αέρα. Το ειδικό σύστημα ρευστοποίησης, καθώς και οι κεκλιμένες κορυφές στις δεξαμενές, καθιστούν εφικτή τη ροή του χύδην φορτίου σε κεντρικό σημείο αναρρόφησης, στο αμπάρι, από όπου και το φορτίο μεταφέρεται διά μέσου αγωγών. Οι δεξαμενές φορτίου είναι πλήρως κλειστές και προσιδιάζουν σε εκείνες ενός βυτιοφόρου, γεγονός που εξασφαλίζει φιλική προς το περιβάλλον λειτουργία, χωρίς την έκλυση αιωρούμενων σωματιδίων, και ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Ο εξοπλισμός που αφορά τη διακίνηση του φορτίου μπορεί να διαχειρίζεται έως 500 m³ σε ωριαία βάση. Η χωρητικότητα του φορτίου είναι 7200 DWT, ενώ το μήκος του είναι περίπου 110 m και το πλάτος του 15 m.



Σχήμα 3.5. MV Greenland (MarineTraffic, 2018).

Τα πρώτα διεθνώς κινούμενα με LNG πλοία ConRo, El Coqui (Σχήμα 3.6) και Taino τέθηκαν σε λειτουργία το 2017. Η ναυπήγηση και η χρήση τους εξυπηρετούν τη μεγιστοποίηση του αριθμού των εμπορευματοκιβωτίων που είναι δυνατόν να μεταφέρονται. Τα σκάφη έχουν μήκος περί τα 220 m και πλάτος περί τα 32 m, με χωρητικότητα νεκρού φορτίου 26,500 τόνους. Η χωρητικότητα φορτίου κυμαίνεται στα 2400 TEUs και διαθέτουν συμπληρωματικό χώρο για 400 περίπου οχήματα. Τα συγκεκριμένα σκάφη είναι συμβατά με τον Νόμο Jones και παρέχουν στους πελάτες της εταιρείας μεγάλη ταχύτητα μεταφοράς και πολλαπλές χρήσεις.



Σχήμα 3.6. El Coqui (MarineTraffic, 2018).

Το πρώτο πλοίο γεωτρήσεων που κινείται με τη χρήση LNG πρόκειται να ναυπηγηθεί από την Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (DSME) με τη βοήθεια της ABS. Η DSME έχει διενεργήσει προκαταρκτική μελέτη, στην οποία συγκρίνονται μεταξύ δύο ειδών δεξαμενών αποθήκευσης LNG και πραγματοποιείται ανάλυση της εγκατάστασης παροχής του φυσικού αερίου που πρόκειται να εγκατασταθεί στο σκάφος. Ο τομέας εργασίας της ABS αναφέρεται στην αναθεώρηση της αρχικής σύλληψης σχεδιασμού, των βασικών μηχανικών χαρακτηριστικών και ανάλυση επικινδυνότητας του χώρου των δεξαμενών, του χώρου πρόσβασης, του μηχανοστασίου, της εγκατάστασης παροχής φυσικού αερίου και των σχετικών συστημάτων ελέγχου και ρύθμισης.

Το σκάφος Scheldt River (Σχήμα 3.7) αποτελεί μία βυθοκόρο νέας γενιάς και κλάσεως “Antigoon” και η πρώτη που είναι σε θέση να καταναλώσει φυσικό αέριο. Ναυπηγήθηκε στις Κάτω Χώρες, για να ενταχθεί στον στόλο της DEME Group και με μηχανολογικό εξοπλισμό της Wärtsilä, κατασκευάστρια των μηχανών διπλού καυσίμου. Η λειτουργία του δίνει τη δυνατότητα στην ιδιοκτήτρια εταιρεία να περιορίσει τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων. Η βυθοκόρος, μήκους 104 m και χωρητικότητας 8000 m³, η οποία κατελκύστηκε το 2017, είναι εφοδιασμένη με έναν δωδεκακύλινδρο και έναν εννεακύλινδρο κινητήρα Wärtsilä 34DF, δύο έλικες μεταβλητού βήματος Wärtsilä, δύο εγκάρσιους προωθητήρες και σύστημα προμήθειας-αποθήκευσης LNG γνωστό ως LNGPac.



Σχήμα 3.7. Scheldt River (MarineTraffic, 2018).

Το πρώτο διεθνώς RoPax Ferry υψηλής ταχύτητας (High Speed) που μπορεί να κινείται με καύσιμο LNG πρόκειται να παραδοθεί στην εταιρεία Rederi AB Gotland εντός του 2018, με μηχανολογικό εξοπλισμό της Rederi AB Gotland. Το συγκεκριμένο σκάφος, μήκους περίπου 200 m θα ικανοποιεί τους κανονισμούς Tier III του IMO αναφορικά με τους περιορισμούς που έχουν τεθεί για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Το πλοίο πρόκειται να μεταφέρει 1650 επιβάτες, θα περιλαμβάνει διάδρομο μεταφοράς μήκους 1750 m και θα είναι δυνατόν να φιλοξενήσει αντίστοιχο αριθμό αυτοκινήτων, λεωφορείων και τροχόσπιτων. Ο συνολικός σχεδιασμός του πλοίου πραγματοποιήθηκε τηρουμένων των αυστηρών προδιαγραφών του νηογνώμονα DNV-GL για το θόρυβο, το κλίμα και τις δονήσεις. Μεταξύ άλλων, στον μηχανολογικό εξοπλισμό περιλαμβάνονται τέσσερις προωστήριες μηχανές διπλού καυσίμου Wärtsilä 50DF και τέσσερις βοηθητικές Wärtsilä 20DF, δύο έλικες με ρυθμιζόμενο βήμα (Controllable Pitch Propellers, CPPs) και σύστημα τηλεχειρισμού, δύο κιβώτια ταχυτήτων, πηδάλια EnergoPac, σύστημα LNGPac, σύστημα για τη διαχείριση του έρματος, καθώς και διαχωριστή πετρελαίου με στόχο τον έλεγχο και την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης.

Τέλος, τα ρυμουλκά Bokn και Borgøy (Σχήμα 3.8), που σχεδιάστηκαν από την Buksér og Berging AS, την ιδιοκτήτρια εταιρεία ρυμουλκών, είναι τα πρώτα που τροφοδοτούνται από LNG, παράγοντας σχεδόν μηδενικές εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων και επιφέροντας μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα κατά 80-90% και 26% αντιστοίχως. Τα συγκεκριμένα ρυμουλκά είναι μήκους 35 m, πλάτους 15 m και βυθίσματος 5.5 m, ενώ είναι σε θέση να ρυμουλκήσουν φορτίο βάρους μέχρι και 100 τόνων.



Σχήμα 3.8. Ρυμουλκά Bokn και Borgøy (MarineTraffic, 2018).

4. ΜΗΧΑΝΕΣ ΠΛΟΙΩΝ

4.1. Μηχανές πρόωσης

Οι μηχανές πρόωσης στα σύγχρονα πλοία διακρίνονται σε μηχανές εσωτερικής και εξωτερικής καύσης. Οι πρώτες αντιστοιχούν σε θερμικές μηχανές στις οποίες πραγματοποιείται η καύση ενός καυσίμου, παρουσία αέρα, εντός θαλάμου (θαλάμου καύσης). Ο βασικός τύπος μηχανής εσωτερικής καύσης που αξιοποιείται στη ναυτιλία είναι ο κινητήρας ντήζελ, που μπορεί να είναι δίχρονος ή τετράχρονος. Ο θεμελιώδης κύκλος λειτουργίας περιλαμβάνει την εισαγωγή, τη συμπίεση, την καύση/εκτόνωση και την εξαγωγή (Soares & Santos, 2015).

Αναλυτικά, τα στάδια του θερμικού κύκλου είναι τα ακόλουθα:

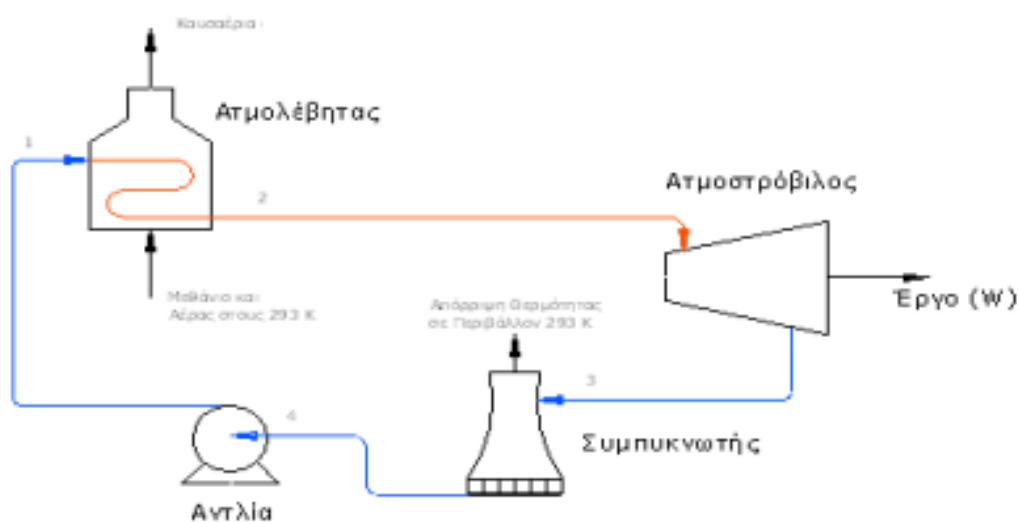
1. Στην εισαγωγή, στον θάλαμο καύσης εισέρχεται συμπιεσμένος αέρας διά της ανοιχτής βαλβίδας εισαγωγής. Το έμβολο της μηχανής ευρίσκεται στο «κάτω νεκρό σημείο».
2. Στο στάδιο της συμπίεσης, πραγματοποιείται η κίνηση του εμβόλου προς το «άνω νεκρό σημείο», συμπιέζοντας τον αέρα που περιέχεται στον κύλινδρο. Λίγο πριν φτάσει το έμβολο στο

άνω νεκρό σημείο λαμβάνει χώρα έγχυση του καυσίμου από εγχυτήρα και η γρήγορη θερμοκρασιακή αύξηση επιφέρει την ανάφλεξη του μείγματος καύσης.

3. Κατά την καύση-εκτόνωση πραγματοποιείται καύση και εκτόνωση του μείγματος, ενώ το έμβολο κινείται προς το κάτω νεκρό σημείο και παράγεται ωφέλιμο έργο.

4. Κατά την εξαγωγή, το έμβολο το οποίο, λόγω της δύναμης των απαερίων της καύσης έχει προσεγγίσει το κάτω νεκρό σημείο, αρχίζει την προς τα άνω κίνηση, χάρη στην αδράνεια του συστήματος σφόνδυλος-στροφαλοφόρος-έμβολο και τα απαέρια της καύσης εξέρχονται εκ του θαλάμου της καύσης.

Οι μηχανές εξωτερικής καύσης διαφοροποιούνται από τις παραπάνω. Είναι και αυτές θερμικές μηχανές, αλλά σε αυτές η κατανάλωση του καυσίμου δεν πραγματοποιείται εντός του χώρου παραγωγής του έργου αλλά εκτός. Το μέσον μεταφοράς της ενέργειας δεν αντιστοιχεί στα καυσαέρια αλλά σε κάποιο ρευστό. Βασικός τύπος μηχανών εξωτερικής καύσης που αξιοποιούνται στη σύγχρονη ναυτιλία είναι οι ατμοστρόβιλοι. Τα βασικά μέρη των ατμοστρόβιλων είναι η αντλία τροφοδοσίας, ο λέβητας, ο στρόβιλος και ο συμπυκνωτής. Η αντλία τροφοδοσίας παρέχει στον λέβητα απεσταγμένο νερό, ενώ στον τελευταίο καίγεται η καύσιμη ύλη στον θάλαμο καύσης. Αποτέλεσμα της καύσης είναι η παραγωγή καυσαερίων που βοηθούν την εξαέρωση του νερού. Ο παραγόμενος ατμός διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο, εκτονώνεται και επιφέρει την κίνηση των πτερυγίων του στρόβιλου. Στον συμπυκνωτή λαμβάνει χώρα η μετατροπή του ατμού σε νερό, ώστε να επανέλθει στον λέβητα και να ολοκληρωθεί ο κύκλος της θερμικής μηχανής (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1. Κύκλος ισχύος ατμοστροβίλου (Κροκιδάς et al., 2009).

Οι εν λόγω μηχανές συνήθως αξιοποιούν ως καύσιμη ύλη το υπολειμματικό πετρέλαιο (Heavy Fuel Oil, HFO) και αποστάγματα αυτού, όπως το πετρέλαιο ναυτιλίας (Marine Gas Oil, MGO και Marine Diesel Oil, MDO). Ωστόσο, όπως θα εξηγηθεί σε επόμενο σημείο, υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης της συμβατικής μηχανής εσωτερικής καύσης προς αξιοποίηση υγροποιημένου φυσικού αερίου, π.χ. από δεξαμενόπλοια μεταφοράς LNG (Soares & Santos, 2015).

Βασικές παράμετροι κάθε συστήματος πρόωσης συνιστούν η αποδοτικότητα στη χρήση του καυσίμου (σε όλα τα στάδια της λειτουργίας), η ασφάλεια, η αξιοπιστία, το κόστος συντήρησης, η λειτουργικότητα, οι εκπομπές των ρύπων, η ευελιξία της συνολικής εγκατάστασης σε όλα τα στάδια της λειτουργίας της και η δυνατότητα για εξοικονόμηση χώρου εγκατάστασης.

4.2. Ηλεκτροπρόωση στα πλοία

Η ηλεκτροπρόωση αντιστοιχεί στο είδος πρόωσης που αναφέρεται στην απευθείας κίνηση των αξόνων του πλοίου με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων και όχι, όπως πραγματοποιείται σε άλλες περιπτώσεις, με τη βοήθεια ατμοστροβίλων, αεριοστροβίλων ή μηχανών ντήζελ. Ασφαλώς, οι μηχανές ντήζελ, οι αεριοστροβίλοι και οι ατμοστροβίλοι υφίστανται στις εν λόγω ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, όμως δεν κινούν το αξονικό σύστημα μέσω της έλικας, αλλά τις ηλεκτρογεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτροκινητήρες πρόωσης (Βλαχογιάννης, 2009). Οι εγκαταστάσεις πρόωσης των κύριων και των βοηθητικών μηχανημάτων ολοκληρώνονται με την εγκατάσταση κατάλληλου συστήματος ελέγχου, η οποία αποβαίνει στον έλεγχο και την αύξηση ή μείωση των στροφών και την αλλαγή της περιστροφής των κινητήρων.

Συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εφαρμόστηκαν αρχικά πριν από περίπου εξήντα χρόνια και επί ένα μεγάλο χρονικό διάστημα ήσαν του τύπου ΣΡ/ΣΡ ή Ward-Leonard παραγωγής συνεχούς ρεύματος και κίνησης με τη συνεχή τροφοδότηση ηλεκτρικού ρεύματος. Στις αρχές της δεκαετίας του 1950 άρχισε η χρήση του εναλλασσόμενου ρεύματος σε διάφορα πλοία, ενώ τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης συνέχισαν να στηρίζονται σε κινητήρες τύπου ΣΡ. Ωστόσο, στην τελευταία

εικοσαετία-εικοσιπενταετία η εξέλιξη των διατάξεων και των μεθόδων ελέγχου κινητήρων τύπου EP, ικανοποιητικών για τις ανάγκες πρόωσης των πλοίων, σε ό,τι αφορά την ευελιξία και την οικονομία καυσίμου, παρείχαν τη δυνατότητα για τη μεγαλύτερη διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης για ποικίλους τύπους πλοίων, ιδίως δε για τα εμπορικά πλοία.

Είναι οπωσδήποτε γεγονός ως η ηλεκτροπρόωση έβρισκε παλαιότερα εφαρμογή αποκλειστικά σε σκάφη που αξιοποιούνταν για την πόντιση καλωδίων, σε ερευνητικά σκάφη ή σε παγοθραυστικά. Εν τούτοις, κατά τη δεκαετία του 1990, η εν λόγω μέθοδος πρόωσης σκαφών εμφανίζει τάση αύξησης στην χρησιμοποίησή της στη ναυσιπλοΐα και συναντάται πλέον σε οχηματαγωγά, δεξαμενόπλοια, κρουαζιερόπλοια, κ.ά. Όπως προκύπτει από την εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε σκάφη, πρόκειται για την πλέον κατάλληλη ως βοηθητικό ή κύριο σύστημα πρόωσης σκαφών στους εξής τύπους:

1. Σκάφη με βοηθητικά μηχανήματα μεγάλης ισχύος
2. Σκάφη μεγάλων φορτίων ενδιαίτησης, τα οποία εμφανίζουν μεγάλη διακύμανση ισχύος πρόωσης
3. Σκάφη που είναι εξοπλισμένα με αρκετές ταχύστροφες, μη αναστρέψιμες μηχανές
4. Βαθυσκάφη και υποβρύχια

Σε ό,τι αφορά τα πολεμικά σκάφη, αξίζει να αναφερθεί πως η ηλεκτρική πρόωση συνιστά μία εκ των βασικότερων επιλογών για τη θαλάσσια κίνηση υποβρυχίων. Η εφαρμογή της τεχνολογίας σε πλοία επιφάνειας του πολεμικού ναυτικού, που παλαιότερα ήταν σχετικά περιορισμένη, προσελκύει πλέον το ενδιαφέρον ναυτικών χωρών που ναυπηγούν πολεμικά πλοία.

Η επιλογή για την εγκατάσταση και λειτουργία συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης σε πλοίο είναι δυνατόν να παρέχει μεγαλύτερη ελευθερία ως προς την επιλογή των υποσυστημάτων και τη σχεδίαση και διάταξη της συνολικής εγκατάστασης. Θεωρείται πως οι ηλεκτροκινητήρες συνιστούν ίσως την πιο αξιόπιστη λύση σε ό,τι αφορά τη βοηθητική πρόωση, με αξιοποίηση ιδίως των μεγάλης ισχύος επαγωγικών κινητήρων (0.5-2.5 MW).

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης είναι:

1. Το γεγονός ότι η ταχύτητα περιστροφής της έλικας και η ταχύτητα του πλοίου μεταβάλλονται συνεχώς σε όλο το εύρος (0-100%).

2. Η απόκριση κατά την δυναμική τοποθέτηση του σκάφους και κατά τη διάρκεια ελιγμών είναι ταχεία.
3. Η στάθμη των κραδασμών και του θορύβου είναι χαμηλή.
4. Η αξιοποίησή της συνεπάγεται μειωμένη κατανάλωση καυσίμου, αφού είναι εφικτή η επιλογή των εν λειτουργία μηχανών, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε μία από αυτές να λειτουργεί πολύ κοντά στο βέλτιστο σημείο.
5. Παρέχεται ελευθερία αναφορικά με την τοποθέτηση των μηχανημάτων του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό του πλοίου και στην εξοικονόμηση του ωφέλιμου χώρου.
6. Η στρεπτική ροπή αξιοποιείται πλήρως καθ' όλο το εύρος λειτουργίας.
7. Μεγαλύτερη ευκολία αυτοματισμών.
8. Αυξημένη αξιοπιστία, αφού υφίσταται η παράλληλη σύνδεση πολλών συστημάτων και αυξημένη ασφάλεια
9. Μειωμένες εκπομπές ρύπων, λόγω της μικρότερης κατανάλωσης
10. Μειωμένος κίνδυνος για θαλάσσια ρύπανση λόγω ατυχήματος, αφού η απόκριση του συστήματος είναι ταχύτερη.

Παρ' όλ' αυτά, η αξιοποίηση της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίζει τα εξής μειονεκτήματα (Bose, 1997):

1. Το υψηλό κόστος για την προμηθεια και εγκατάστασή του, που παρά τις προσπάθειες που έχουν καταβληθεί για τον περιορισμό του, δεν φαίνεται να μπορεί να μειωθεί εύκολα λόγω του υψηλού κόστους των κινητήρων και των συνακόλουθων συστημάτων ελέγχου
2. Μεγαλύτερες απώλειες που αφορούν το σύστημα μετάδοσης κίνησης σε σχέση με μηχανικό σύστημα. Για παράδειγμα, σε ένα συμβατικό σύστημα νηζελοκινητήρα και έλικας με ρυθμιζόμενο βήμα, οι αντίστοιχες απώλειες, σε συνθήκες βέλτιστης λειτουργίας, είναι περίπου 4% (2% στον μειωτήρα και 2% στην έλικα). Σε εγκατάσταση πρόωσης με νηζέλ και ηλεκτρική ενέργεια το σύστημα μετάδοσης εμφανίζει απώλειες της τάξης του 7-8% (2-3% στους ηλεκτροκινητήρες πρόωσης, 2% στους μετατροπείς συχνότητας και τους μετασχηματιστές, 3%

στις γεννήτριες). Κατά συνέπεια, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος ηλεκτροπρόωσης είναι μεγαλύτερος μόνον στην περίπτωση που κάθε μηχανή λειτουργεί σε συνθήκες σταθερής ταχύτητας περιστροφής και για μεγάλους χρόνους, στη βέλτιστη περιοχή.

3. Η ευρεία αξιοποίηση ηλεκτρονικών διατάξεων σε συνδυασμό με μεγάλη ισχύ μπορεί να συνεπάγεται προβλήματα σχετικά με την ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. λόγω προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

4. Ο παραγόμενος ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τις ευαίσθητες διατάξεις των ηλεκτρονικών συστημάτων, ιδίως τα κυκλώματα ελέγχου.

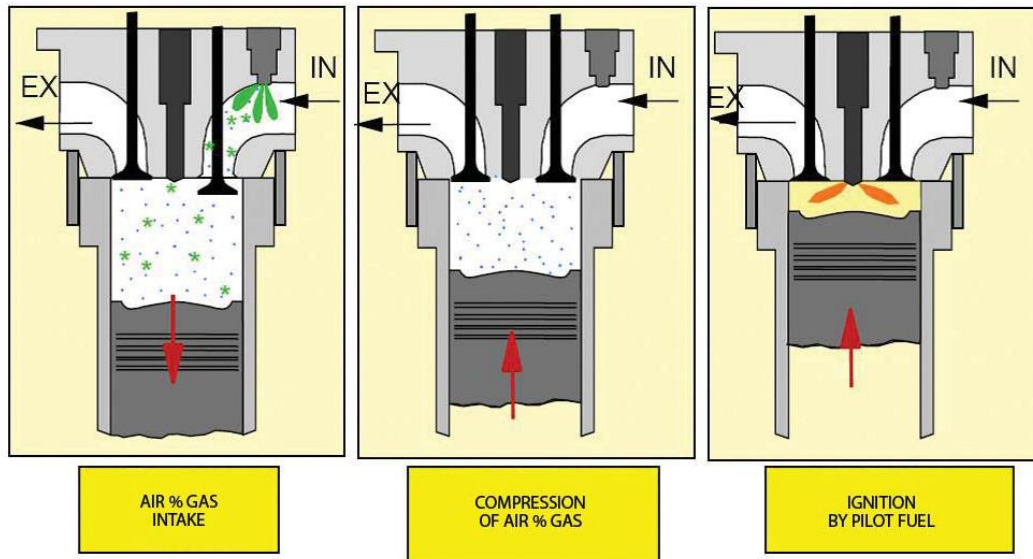
4.3. Μηχανές εσωτερικής καύσης διπλού καυσίμου

4.3.1. Αρχή λειτουργίας

Όπως είναι ευρέως γνωστό, οι συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης κυριαρχούν στον ναυτιλιακό τομέα. Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη της τεχνολογίας των μηχανών εσωτερικής καύσης διπλού καυσίμου (Dual fuel) έχει οδηγήσει στη δυνατότητα χρήσης LNG με αποτελεσματικό τρόπο. Οι εν λόγω μηχανές είναι στην ουσία τροποποιημένες μηχανές εσωτερικής καύσης και λειτουργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε θέση να καταναλώνουν όχι μόνον συμβατικά υγρά καύσιμα, αλλά να χρησιμοποιούν έναν αποδοτικό συνδυασμό υγρής και αέριας καύσιμης ύλης (Σχήμα 4.2). Οι κινητήρες διπλού καυσίμου αξιοποιούν μία πρωταρχική έγχυση πετρελαίου, για την ανάφλεξη του αερίου καυσίμου το οποίο έχει εισαχθεί στον κύλινδρο, σε χαμηλή πίεση, με τον αέρα που συντελεί στην καύση. Οι κινητήρες αυτοί μπορούν να συμμορφώνονται με αυστηρές απαιτήσεις και τους αντίστοιχους περιορισμούς σε ό,τι αφορά τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων, λειτουργώντας με τον κλασικό θερμοδυναμικό κύκλο του Otto. Στην περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα τροφοδότησης του αερίου καυσίμου, είναι σε θέση να μεταβάλλουν τον θερμοδυναμικό κύκλο σε κύκλο Diesel και να καταναλωθεί MGO ή HFO, χωρίς την διακοπή της λειτουργίας του κινητήρα. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναφέρεται ως «έγχυση χαμηλής πίεσης» (low pressure gas injection).

Η χρήση φυσικού αερίου ως καυσίμου σε λέβητα συνιστά μια τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται στις θαλάσσιες μεταφορές από το 1964. Το αέριο καύσιμο εισαγόταν με μέτρια πίεση σε τρία ή τέσσερα προφύσια στους καυστήρες που τροφοδοτούν την εστία του λέβητα με καύσιμο. Παλαιότερα, υπήρχε απαίτηση για την ύπαρξη πιλοτικής φλόγας πετρελαίου που ήταν πάντοτε αναμμένη, ώστε να πληρούνται οι κανόνες του νηογνώμονα. Αν και η συγκεκριμένη απαίτηση έχει πλέον καταργηθεί, υφίστανται συγκεκριμένοι κανόνες που διέπουν τη χρήση του φυσικού αερίου αναφορικά με τις διαδικασίες αναζωπυρώσεως και την εγκατάσταση και εύρυθμη λειτουργία των μηχανισμών ασφαλείας.

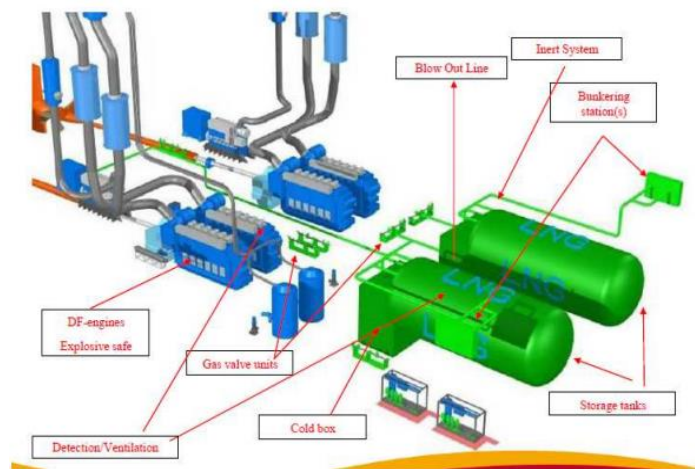
Ουσιαστικά, πρόκειται για μια απλή και αποδοτική διαδικασία. Πέραν της τροποποιημένης ρύθμισης του καυστήρα, ώστε να ελέγχεται η αναλογία αέρα-καυσίμου και να αντισταθμίζονται οι μεταβολές στο ποσό της θερμότητας του καυσίμου που καταναλώνονται, το υγρό και το αέριο καύσιμο μπορούν να εναλλάσσονται και μάλιστα με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι η ροή του καυσίμου είναι τέτοια ώστε να προστατεύεται η επιφάνεια του λέβητα από φαινόμενα υπερθέρμανσης (παροχή περισσότερης θερμότητας από εκείνη που μπορεί να απορροφηθεί από την επιφάνεια του λέβητα). Η λειτουργία της μηχανής κατά τη φάση όπου χρησιμοποιείται μόνον φυσικό αέριο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2. Λειτουργία της μηχανής κατά τη φάση όπου χρησιμοποιείται μόνον φυσικό αέριο (Dvornik & Dvornik, 2014).

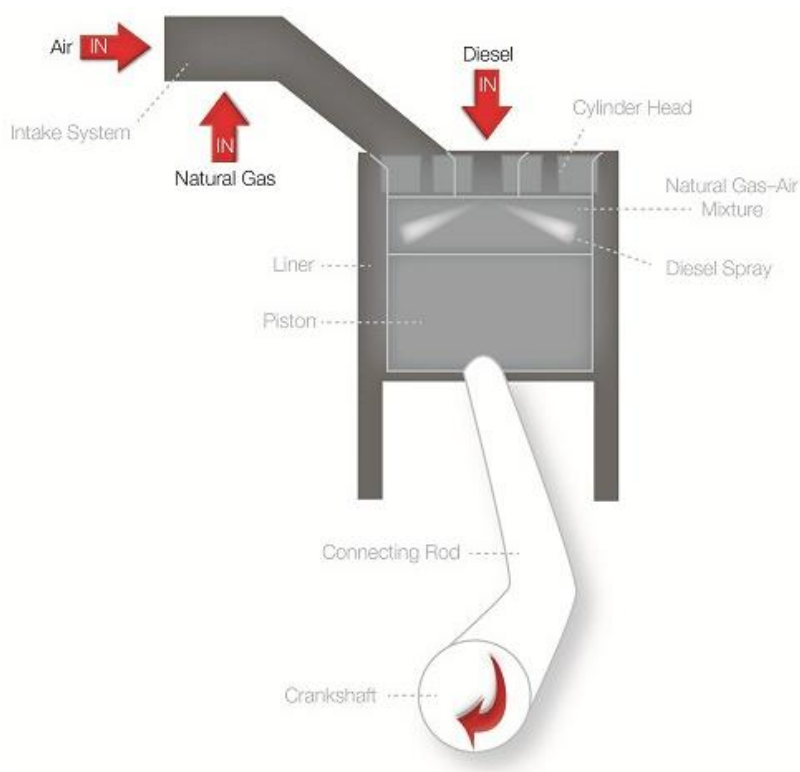
Οι μηχανές διπλού καυσίμου είναι εγκατεστημένες στο μηχανοστάσιο, τμήμα του σκάφους (του κύτους) κάτω από την υπερκατασκευή και την γέφυρα του πλοίου (Σχήμα 4.3). Η αρχή

λειτουργίας των μηχανών αυτών εδράζεται στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Η μετατροπή της μαγνητικής ροής σε ηλεκτρικό ρεύμα κατορθώνεται με την περιστροφική κίνηση του ρότορα, που πρόκειται για το κινούμενο μέρος της μηχανής (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.3. Εγκατάσταση μηχανής σε σκάφος (Bose, 1997).

Η πλειοψηφία των κινητήρων διπλού καυσίμου είναι σύγχρονοι με βαθμό απόδοσης της τάξης του 96-98%, μεγαλύτερο του βαθμού απόδοσης των επαγωγικών κινητήρων κατά 3-4%. Η ονομαστική τάση σε εγκαταστάσεις μεγάλης και μέσης ισχύος κυμαίνεται μεταξύ 3.3-6.6 kV. Πέραν από τους καθιερωμένους σύγχρονους κινητήρες, υφίστανται και οι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες, των οποίων η απόδοση (κατά τους κατασκευαστές) είναι μεγαλύτερη από 98% (Dvornik & Dvornik, 2014).



Σχήμα 4.4. Αρχή λειτουργίας μηχανής διπλού καυσίμου.

Κατά τη σύγχρονη λειτουργία των μηχανών διπλού καυσίμου το «τύλιγμα» διέγερσης του δρομέα (ο οποίος διαρρέεται από συνεχές ρεύμα) αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες. Το παραγόμενο αποτέλεσμα είναι το ίδιο, αφού παράγεται και στις δύο περιπτώσεις ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με σταθερή τιμή, το οποίο με την ταχύτητα του δρομέα στρέφεται στο χώρο. Σημαντικό πλεονέκτημα των συγκεκριμένων μηχανών είναι το γεγονός ότι δεν υφίσταται ανάγκη για παροχή συνεχούς ρεύματος, ενώ αυξάνεται η ολική απόδοση του κινητήρα, αφού μειώνονται οι ολικές ενεργειακές απώλειες στα «τυλίγματα» (Amit & Shoemaker, 1993).

Συμπερασματικά, με άλλα λόγια, μια μηχανή διπλού καυσίμου μπορεί να χαρακτηριστεί απλούστερα ως μια μηχανή εσωτερικής καύσης σταθερού αριθμού στροφών, με την οποία έχει συνδεθεί γεννήτρια. Ο έλεγχος των μηχανών διπλού καυσίμου περιλαμβάνει τόσο την εποπτεία της λειτουργίας της μηχανής αναφορικά με τις παραμέτρους της πίεσης, της θερμοκρασίας και του αριθμού των στροφών, όσο και με την δυνατότητα της γεννήτριας σχετικά με την παροχή της απαραίτητης έντασης του ρεύματος στα φορτία σταθερής τάσης.

Εν τούτοις, σε αρκετά σκάφη ο παράγοντας που καθορίζει την ισχύ που παράγεται κατά την λειτουργία της μηχανής διπλού καυσίμου αντιστοιχεί στους καυστήρες που ελέγχονται ηλεκτρικά.

Εν αντιθέσει με τις μηχανές πρόωσης στις οποίες η ροή του καυσίμου που παρέχεται στους κυλίνδρους ρυθμίζεται με τη βοήθεια ενός ηλεκτροπνευματικού μηχανισμού και ο κύκλος έγχυσης του καυσίμου συγχρονίζεται με μηχανικό τρόπο, με τη βοήθεια γραναζιών, στις μηχανές διπλού καυσίμου ηλεκτρικοί παλμοί ενεργοποιούν τους καυστήρες απευθείας. Για τη λειτουργία του συστήματος είναι απαραίτητη η χρήση αισθητήρων που ανιχνεύουν την ακριβή θέση του στροφάλου, ώστε να καθοριστούν οι παλμοί που στέλνονται σε κάθε καυστήρα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι ο τοπικός πίνακας ελέγχου των μηχανών διπλού καυσίμου περιλαμβάνει καταγραφείς και κομβία ελέγχου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους χειριστές για προσδιορισμό της κατάστασης και των συνθηκών λειτουργίας τους. Μέρος των ενδείξεων, καθώς και το σύνολο των κομβίων χειρισμού, μεταφέρονται και στο κύριο σύστημα ελέγχου του σκάφους, ώστε να επιτυγχάνεται ο κατάλληλος τηλεχειρισμός των μηχανών διπλού καυσίμου.

Η Wärtsilä έχει προβεί στην κατασκευή μεσόστροφου τετράχρονου κινητήρα διπλού καυσίμου, ο οποίος λειτουργεί σε τροποποιημένο κύκλο και χρησιμοποιεί MDO για την έναρξη της ανάφλεξης του αερίου (η ανάφλεξη γίνεται με συμπίεση). Ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι σε θέση να μεταβεί με ομαλό τρόπο στη λειτουργία σε κύκλο Diesel με κατανάλωση αποσταγμάτων MGO/MDO ή υπολειμματικού πετρελαίου, όταν το LNG δεν είναι διαθέσιμο. Σε διαφορετική περίπτωση, το εξαερωμένο LNG εισέρχεται στον κύλινδρο μαζί με τον αέρα. Παρόμοιο κινητήρα έχει κατασκευάσει και η MAN B&W

Αναλυτικότερα, η λειτουργία της μηχανής εδράζεται στην αρχή της καύσης ενός «φτωχού» μείγματος, γεγονός που δηλώνει ότι η αναλογία του αέρα προς την καύσιμη ύλη είναι υψηλή. Θεμελιώδες πλεονέκτημα της λειτουργίας της από περιβαλλοντική σκοπιά είναι η παραγωγή χαμηλών εκπομπών οξειδίων του αζώτου, αφού η θερμότητα που εκλύεται από την καύση αξιοποιείται στην θέρμανση της υψηλής περιέσειας του αέρα και, ως εκ τούτου, οι θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης διατηρούνται σε χαμηλά σχετικά επίπεδα. Όπως προαναφέρθηκε, υφίστανται δύο συστήματα για την τροφοδοσία του καυσίμου και η έναρξη της λειτουργίας του κινητήρα λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια υγρού καυσίμου. Όταν η καύση θεωρηθεί σταθερή, οι συνθήκες λειτουργίας μεταβάλλονται σε συνθήκες κατανάλωσης φυσικού αερίου, ήτοι μετά από ένα λεπτό, κατά το οποίο το υγρό καύσιμο σταδιακά υποκαθίσταται από το φυσικό αέριο.

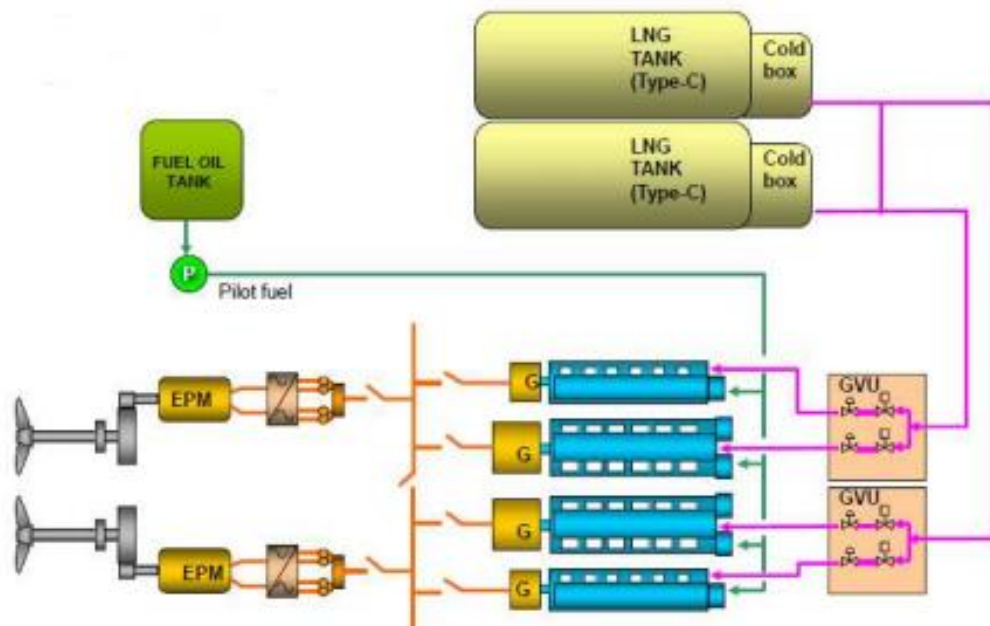
Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζεται η μονάδα ρύθμισης της ροής του φυσικού αερίου, όπου φαίνονται το φίλτρο (αριθμός 1), το ροόμετρο (αριθμός 2), η μονάδα του ρυθμιστή του φυσικού αερίου (αριθμός 3), οι βαλβίδες απομονώσεως (αριθμός 4), καθώς και η βαλβίδα εξαέρωσης (αριθμός 5).



Σχήμα 4.5. Μονάδα όπου πραγματοποιείται η ρύθμιση της ροής του φυσικού αερίου (Skjong et al., 2005).

Το ρεύμα του φυσικού αερίου διηθείται και, εν συνεχεία, διέρχεται μέσω ρυθμιστή πίεσης. Η έξοδος του τελευταίου καθορίζεται από το φορτίο του κινητήρα, καθώς και από το ενεργειακό περιεχόμενο του φυσικού αερίου, με μέγιστη τιμή 4 bar. Το συγκεκριμένο σύστημα περιλαμβάνει και τον αναγκαίο εξαερισμό και το κλείσιμο κάποιων βαλβίδων, στην περίπτωση που αυτό απαιτείται, για λόγους ασφάλειας. Ακολούθως, το φυσικό αέριο εισάγεται στον κινητήρα. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρατίθεται ο τρόπος λειτουργίας μιας δίχρονης και μιας τετράχρονης μηχανής διπλού καυσίμου.

Τυπική συνδεσμολογία μιας μηχανής διπλού καυσίμου παρατίθεται στο Σχήμα 4.6, όπου παρουσιάζονται και οι δεξαμενές αποθήκευσης του LNG και η σύνδεσή τους με τις κύριες μηχανές του σκάφους.



Σχήμα 4.6. Συνδεσμολογία μηχανής διπλού καυσίμου (Unseki, 2013).

4.3.2. Δίχρονη μηχανή διπλού καυσίμου

Στη δίχρονη μηχανή το φυσικό αέριο δεν μπορεί να αναμειχθεί απευθείας με τον αέρα που χρησιμοποιείται για την καύση. Σε αυτή την περίπτωση, υφίστανται δύο εναλλακτικές μέθοδοι εισαγωγής του φυσικού αερίου εντός του κυλίνδρου.

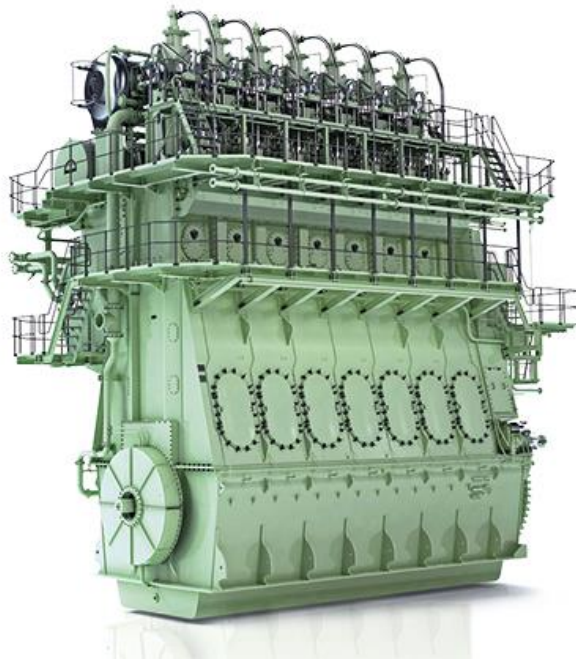
Στην πρώτη περίπτωση, εισάγεται φυσικό αέριο με χαμηλή πίεση διερχόμενο μέσα από βαλβίδα εισαγωγής που είναι τοποθετημένη στην κεφαλή του κυλίνδρου, με δεδομένο ότι έχει κλείσει η βαλβίδα εξαγωγής και υφίσταται χαμηλή πίεση εντός του κυλίνδρου. Ακολουθεί συμπίεση του αερίου, ανάμειξη αυτού με τον αέρα και ανάφλεξη του μείγματος με τη χρήση πιλοτικού εγχυτήρα ο οποίος ψεκάζει ντήζελ. Βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί η χαμηλή απόδοση της καύσης.

Τη δεύτερη μέθοδο χαρακτηρίζει η συμπίεση του φυσικού αερίου σε υψηλή πίεση (περί τα 250-300 bar) και η έγχυσή του εντός του κυλίνδρου με τη βοήθεια ειδικών εγχυτήρων ταυτοχρόνως με το ντήζελ. Παράδειγμα εφαρμογής της εν λόγω μεθόδου συνιστά η μέθοδος ανάμειξης της μηχανής ME-GI (που έχει κατασκευασθεί από την MAN B&W, βλ. Σχήμα 4.7). Ουσιαστικά, πρόκειται για την καινούρια, ηλεκτρονική μηχανή άνευ εκκεντροφόρου, η οποία διαθέτει τον επιπλέον εξοπλισμό που απαιτείται για την έγχυση του αερίου. Ο κινητήρας της

μηχανής εφοδιάζεται με βαλβίδες έγχυσης φυσικού αερίου και εγχυτήρες καυσίμου. Καθώς ελέγχεται με τη λειτουργία ηλεκτρονικού συστήματος, είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί για την καύση οποιασδήποτε αναλογίας αερίου και καύσιμης ύλης, επί τη βάσει μιας προκαθορισμένης ελάχιστης ποσότητας καύσιμης ύλης.

Στην δεύτερη αυτή μέθοδο, μετά τη συμπίεση του φυσικού αερίου σε πίεση μεταξύ 250 έως 300 bar, το καύσιμο ψύχεται και διέρχεται μέσω βαλβίδων, σε κάθε κύλινδρο. Σε κάθε «μπλοκ» βαλβίδων είναι ενσωματωμένος συσσωρευτής με όγκο εικοσαπλάσιο περίπου της ποσότητας του αερίου το οποίο παρέχεται κατά τη διάρκεια μιας κατάστασης λειτουργίας πλήρους φορτίου. Η χρήση του συσσωρευτή στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της πτώσης πίεσης που επέρχεται με την έγχυση του αερίου και στην εποπτεία και παρακολούθηση της παραμικρής πτώσης πίεσης, συνιστώντας βασικό μέρος του συστήματος της ασφάλειας των κινητήρων. Η μηχανή δύναται να λειτουργεί σε διάφορες λειτουργίες και ανάλογα με τις απαιτήσεις:

1. Σε «κανονική λειτουργία διπλού καυσίμου», κατά την οποία το εγχέομενο υγρό καύσιμο αποτελεί περίπου το 6% του φορτίου. Στην περίπτωση που η παροχή του φυσικού αερίου είναι περιορισμένη, θα πρέπει να εγχυθεί επιπλέον ποσότητα υγρού καυσίμου, ούτως ώστε να διατηρηθεί η ισχύς σε σταθερά επίπεδα.
2. Όταν είναι διαθέσιμη κάποια περιορισμένη αλλά σταθερή ποσότητα LNG ο κινητήρας δύναται να λειτουργήσει σε συνθήκες «συγκεκριμένης κατάστασης αερίου». Κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης λειτουργίας, εγχέεται σταθερή ποσότητα φυσικού αερίου κάθε φορά και η ποσότητα του υγρού καυσίμου καθορίζεται από το φορτίο της μηχανής.
3. Λειτουργία με αποκλειστική χρήση υγρού καυσίμου, που αντιστοιχεί σε ελιγμούς ή σε κατάσταση μη διαθεσιμότητας φυσικού αερίου.



Σχήμα 4.7. Μία από τις μεγαλύτερες και αποδοτικότερες δίχρονες μηχανές διπλού καυσίμου (MAN Diesel & Turbo, 2018).

Οι σωλήνες που εξυπηρετούν την παροχή του φυσικού αερίου έχουν διπλό τοίχωμα και είναι εφοδιασμένοι με αέρα στεγανοποίησης ο οποίος παρέχεται μεταξύ των δύο τοιχωμάτων. Ο αέρας είναι συμπιεσμένος, εισάγεται μέσω ανεμιστήρων και παρακολουθείται για οποιαδήποτε διαρροή αερίου. Μία βλάβη που θα υφίστατο ο εσωτερικός σωλήνας θα οδηγούσε σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες λόγω της επακόλουθης διαρροής του φυσικού αερίου που βρίσκεται σε υψηλή πίεση. Για αυτόν τον λόγο η εξωτερική σωληνώση κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα που χαρακτηρίζεται από ανθεκτικότητα σε τέτοιες χαμηλές θερμοκρασίες. Απουσία ροής συνεπάγεται το κλείσιμο του διακόπτη που ελέγχει την παροχή του αερίου και τον καθαρισμό των σωληνώσεων με προσθήκη αδρανούς αερίου. Για την αποφυγή οποιασδήποτε διαρροής και για τη λίπανση των κινούμενων μερών, στο σύστημα ψεκασμού τροφοδοτείται λάδι στεγανοποίησης, σε χαμηλή κατανάλωση (0.13 g/kWh) που συμπιέζεται σε πίεση 25-50 bar μεγαλύτερη της πίεσης έγχυσης του αερίου. Η ελάχιστη ποσότητα ελαίου που διαρρέει στο φυσικό αέριο καίγεται εν συνεχεία στη μηχανή.

Το σύστημα της στεγανοποίησης συνίσταται από δύο αντλίες και συσσωρευτή ο οποίος διατηρεί την πίεση σε σταθερά επίπεδα. Σε περίπτωση αποτυχίας μιας αντλίας, η εφεδρική αντλία («αναμονής») παρέχει την κατάλληλη πίεση. Στην περίπτωση που υπάρξει κάποιο πρόβλημα με την έγχυση του αερίου, ανιχνεύεται η πτώση της πίεσης στον συσσωρευτή και επακόλουθα είναι

το κλείσιμο του συστήματος και ο καθαρισμός των γραμμών με εισαγωγή αδρανούς αερίου. Αν δεν ανιχνευτεί η πτώση πίεσης, η περίσσεια του φυσικού αερίου που εισάγεται στον κύλινδρο συνεχίζει να καίγεται, με αποτέλεσμα υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων εντός του κυλίνδρου, επιβράδυνση της μηχανής και διακοπή της παροχής φυσικού αερίου. Για τη σπάνια περίπτωση που η ανάφλεξη του αερίου στο τμήμα εξαγωγής οδηγήσει σε γρήγορη αύξηση της πίεσης, το εν λόγω τμήμα έχει σχεδιαστεί με τέτοιον τρόπο ώστε να αντέχει πίεση της τάξης των 15 bar. Οποιοδήποτε πρόβλημα έγχυσης πιλοτικού καυσίμου, που συνεπάγεται την διακοπή της καύσης του εισαχθέντος φυσικού αερίου, οδηγεί στη διακοπή της τροφοδοσίας του αερίου και στον καθαρισμό των σωληνώσεων με την εισαγωγή αδρανούς αερίου (Tusiani & Shearer, 2007).

4.3.3. Τετράχρονη μηχανή διπλού καυσίμου

Η συνολική απόδοση της νηξελιοηλεκτρικής πρόωσης ανέρχεται περίπου στο 43% σε τετράχρονη μηχανή. Εν τούτοις, η απόδοση είναι κατά πολύ μεγαλύτερη εκείνης του συστήματος αμμοστροβίλου. Το εξαερωμένο φυσικό αέριο σε αυτή την περίπτωση συμπιέζεται σε πίεση περίπου 5.5 bar με τη βοήθεια συμπιεστή και, εν συνεχεία, θερμαίνεται. Το φυσικό αέριο διοχετεύεται ακολούθως προς τις μηχανές και ακολουθεί η έγχυση του αερίου στον οχετό εισαγωγής, πριν την εισαγωγή του αέρα στους κυλίνδρους. Η δε ανάφλεξη πραγματοποιείται με την πιλοτική έγχυση υγρού καυσίμου (Molland, 2008).

4.4. Παραδείγματα μηχανών

4.4.1. Man B&W MC-GI

Η μηχανή Man B&W MC-GI είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσει δύο είδη καυσίμων. Η εν λόγω μηχανή είναι αργόστροφη και αξιοποιεί τεχνολογία έγχυσης φυσικού αερίου σε υψηλή πίεση. Η συγκεκριμένη τεχνολογία υποστηρίζει αποτελεσματικά την εξάλειψη της κρουστικής καύσεως (knocking), η οποία αποτελεί περιοριστική παράμετρο για τη μέση πίεση συμπίεσης και, συνεπώς, για την ισχύ της μηχανής. Ταυτοχρόνως, η χρήση υψηλών πιέσεων έγχυσης εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι ο το φυσικό αέριο καθίσταται «απαθές» ως προς την χημική του σύσταση, γεγονός που συνεπάγεται την αποδοτική καύση συστατικών του αερίου με θερμαντική αξία που προσεγγίζει εκείνη του μεθανίου. Η προωστήρια εγκατάσταση που είναι εφοδιασμένη με μηχανή Man B&W MC-GI θα πρέπει να διαθέτει τα εξής επιπρόσθετα συστήματα:

1. Αεροσυμπιεστή ικανό να παρέχει υψηλή πίεση (250 bar), λαμβανομένου υπ' όψιν του ψυχρού δοχείου το οποίο πρέπει να διατηρεί μια θερμοκρασία της τάξης των 40-50°C.
2. Δοχείο αδρανείας (buffer tank) και συμπυκνωτής του φυσικού αερίου, που εμπεριέχει εικοσαπλάσια ποσότητα αερίου σε κάθε κύκλο. Το δοχείο αδρανείας παρέχει την δέουσα ποσότητα φυσικού αερίου, σε μικρή και συγκεκριμένη πτώση πίεσης. Πέραν αυτού, το δοχείο αδρανείας αποτελεί μέρος της ασφαλιστικής δικλείδας της εγκατάστασης.
3. Σύστημα ελέγχου και ρύθμισης του συμπιεστή.
4. Διάφορα συστήματα ασφαλείας, όπως, επί παραδείγματι, ανιχνευτής υδρογονανθράκων, με στόχο τον αδιάλειπτο έλεγχο της συγκέντρωσης των υδρογονανθράκων στο εσωτερικό του μηχανοστασίου και στον χώρο του αεροσυμπιεστή.

4.4.2. Wärtsilä

Το 1987 η Wärtsilä ξείνησε την ανάπτυξη κινητήρων αερίου δύο καυσίμων (GD), με νηξελοκινητήρα έγχυσης αερίου σε υψηλή πίεση. Ακολούθησε η δεύτερη γενιά κινητήρων φυσικού αερίου, περί τις αρχές της δεκαετίας του 1990, με την κατασκευή κινητήρων «επιβαλλόμενης ανάφλεξης» καθαρού αερίου, αξιοποιώντας φυσικό αέριο χαμηλής πίεσης (SG). Η τομή στην κατασκευή των μηχανών επήλθε το 1995, όταν δηλαδή ξεκίνησε η κατασκευή κινητήρων διπλού καυσίμου, τρίτης γενιάς. Στην τελευταία συνδυαζόταν η ευελιξία και η αποδοτικότητα στη χρήση των καυσίμων με τις πολύ καλές περιβαλλοντικές επιδόσεις.

Σήμερα η χρήση του LNG σε μηχανές Wärtsilä εστιάζει σε μηχανές μέσης ταχύτητας. Από το 2005, η συγκεκριμένη εταιρεία κατασκευάζει τετράχρονους κινητήρες και έχει προβεί στην πώληση περισσότερων των 1000 κινητήρων. Εκτιμάται ότι η λειτουργία αυτών των κινητήρων ανέρχεται σε παραπάνω από 7,000,000 επιχειρησιακές ώρες, σε θαλάσσιες αλλά και σε χερσαίες εφαρμογές. Τα τελευταία έτη η Wärtsilä έχει θέσει ως στόχο την επέκταση των πλεονεκτημάτων που συνεπάγεται η χρήση μηχανών διπλού καυσίμου στο σύνολο του κλάδου, με εφαρμογή σε δίχρονους κινητήρες. Οι μηχανές της είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι φιλικές προς τον χρήστη, χωρίς την απαίτηση να διαθέτουν οι μηχανικοί πλοίων επιπροσθετες δεξιότητες. Ταυτοχρόνως, παρέχεται ασφάλεια και σχετική απλότητα στην εγκατάσταση, καθώς δεν απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός, όπως επί παραδείγματι σύστημα καθαρισμού των απαερίων για

τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς περιορισμούς των οξειδίων του αζώτου Tier III (Kuiken, 2012).

Για παράδειγμα, η Wärtsilä 46DF (Σχήμα 4.8) αποτελεί τετράχρονο κινητήρα διπλού καυσίμου ο οποίος δύναται να λειτουργεί με τη χρήση φυσικού αερίου και βαρύ καύσιμο («μαζούτ») ή MDO. Ο κινητήρας μπορεί να μεταβεί ομαλά από τη λειτουργία καύσης φυσικού αερίου στη λειτουργία καύσης MDO/μαζούτ και, αντιστρόφως, χωρίς απώλεια ισχύος ή ταχύτητας. Η κατασκευή της συγκεκριμένης μηχανής εδράζεται στις δοκιμασμένες και αξιόπιστες οικογένειες κινητήρων 46F και 50DF, οι οποίες από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 έχουν αξιοποιηθεί επιτυχώς στον χώρο της ναυτιλίας (Wärtsilä, 2018).



Σχήμα 4.8. Κινητήρας διπλού καυσίμου Wärtsilä 46DF (Wärtsilä, 2018).

Η Wärtsilä 46DF αποτελεί ουσιαστικά επέκταση των κινητήρων διπλού καυσίμου με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτει το εύρος ισχύος 6.2-18.3 MW σε 600 rpm. Η λειτουργία της μηχανής συνδυάζεται με ολοκληρωμένο σύστημα αυτοματισμού, για ενισχυμένη ασφάλεια και διαρκή παρακολούθηση. Το ενσωματωμένο σύστημα αυτοματισμού ελαχιστοποιεί τις απαιτήσεις για την ύπαρξη εξωτερικών εγκαταστάσεων ελέγχου, γεγονός που συνδυάζεται με εξοικονόμηση χώρου.

4.4.3. Rolls-Royce

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες η εταιρεία Rolls-Royce έχει πραγματοποιήσει σημαντική έρευνα, που έχει συντελέσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών που αξιοποιούν την καύση του φυσικού αερίου σε μηχανές στον τομέα της ναυτιλίας. Η πρώτη μηχανή αυτής της κατηγορίας κατασκευάστηκε το 2005 και σήμερα χρησιμοποιείται από τουλάχιστον 5 επιβατηγά πλοία στη Νορβηγία. Οι εν λόγω μηχανές αξιοποιούν το σύστημα ανάφλεξης σπίθας, σύμφωνα με το οποίο ένα μείγμα φυσικού αερίου και αέρα, πλούσιο σε καύσιμο, τροφοδοτείται σε προθάλαμο και αναφλέγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να προκύψει ισχυρή πηγή ανάφλεξης σπίθας εντός του κυλίνδρου (Kuiken, 2012).

Στις μηχανές της εταιρείας υφίσταται περισσότερος αέρας εντός του κυλίνδρου σε σχέση με την ποσότητα που πραγματικά απαιτείται, γεγονός που συντελεί στη μείωση των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται ώστε να μειωθούν οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Ακόμα και σε χαμηλές στροφές, οι μηχανές διπλού καυσίμου της Rolls-Royce συνεπάγονται αρκετά χαμηλές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων. Οι μηχανές της εταιρείας είναι οι ακόλουθες (Kuiken, 2012):

1. Gas B Engines, 720-750 rpm, ισχύος 6760-9380 HP
2. Gas C Engines, 900-1000 rpm, ισχύος 1960-3260 HP.

4.5. Συστήματα ελέγχου και ρύθμισης

Στο πλοίο είναι συνήθως εγκατεστημένο ολοκληρωμένο σύστημα αυτοματισμού IAS (Integrated Automation Systems). Ιδιαίτερα στα σύγχρονα πλοία υφίσταται πλήρης αυτοματοποίησης του χώρου του μηχανοστασίου και η ρύθμιση πραγματοποιείται με τη χρήση πλήκτρων ειδικού θαλάμου ελέγχου του συστήματος IAS.

Ο χειριστής μηχανικός, ή και ο βοηθός μηχανικού, μέσω του συγκεκριμένου συστήματος μπορούν να ελέγχουν την ορθή λειτουργία της μηχανής, αναφορικά με τις τιμές των θερμοκρασιών και των πιέσεων και με την ψύξη και τη λίπανση της τελευταίας. Ωστόσο, μόνον ο χειριστής μηχανικός δύναται να μεταβάλλει οποιαδήποτε ρύθμιση και να «ξεκλειδώσει» το σύστημα με τη χρήση των κωδικών που κατέχει. Ο χειριστής μηχανικός έχει τη δυνατότητα πλήρους ελέγχου από την καμπίνα και από το γραφείο του. Οποιαδήποτε ενέργεια λαμβάνει χώρα διά του συστήματος IAS, αφού δεν υφίστανται χειριστήρια άμεσης πρόσβασης (Amit &

Shoemaker, 1993). Εσωτερικό δωμάτιο στο οποίο διενεργείται ο έλεγχος της μηχανής απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9. Εσωτερικό δωμάτιο στο οποίο πραγματοποιείται ο έλεγχος της μηχανής (Tusiani & Shearer, 2007).

Για να λειτουργήσει ικανοποιητικά ένα σύστημα IAS απαιτούνται εκ μέρους του μηχανικού οι κατάλληλες υπολογιστικές ικανότητες, ώστε να εκτελούνται με ακρίβεια υπολογισμοί προμήθειας και κατανάλωσης καυσίμων, ανταλλακτικών και λιπαντικών. Η επιδεξιότητα και οι τεχνικές γνώσεις αποτελούν επίσης καίρια προσόντα, ώστε να διενεργούνται επιδιορθώσεις και να βρίσκονται οι απαραίτητες λύσεις σε περίπτωση που προκύψει κάποια βλάβη. Είναι προφανές ότι ο μηχανικός θα πρέπει να διαθέτει υπευθυνότητα και διοικητική ικανότητα, με στόχο τον συντονισμό του πληρώματος της μηχανής.

Η ορθή λειτουργία των κινητήρων, εν γένει, εδράζεται στην αποδοτική λίπανση, η οποία εξαρτάται από την κατάλληλη και συστηματική απαγωγή θερμότητας (ψύξη) μέσω του λιπαντικού. Ακολούθως θα παρουσιαστεί μία σχετικά απλή διάταξη ηλεκτρονικού ελέγχου, που εφαρμόζεται για τον έλεγχο της θερμοκρασίας του λιπαντικού ελαίου σε μηχανές διπλού καυσίμου. Ο σχεδιασμός των μηχανών εσωτερικής καύσης, γενικότερα, προβλέπει δεδομένες προδιαγραφές αναφορικά με τη θερμοκρασία του λιπαντικού ελαίου.

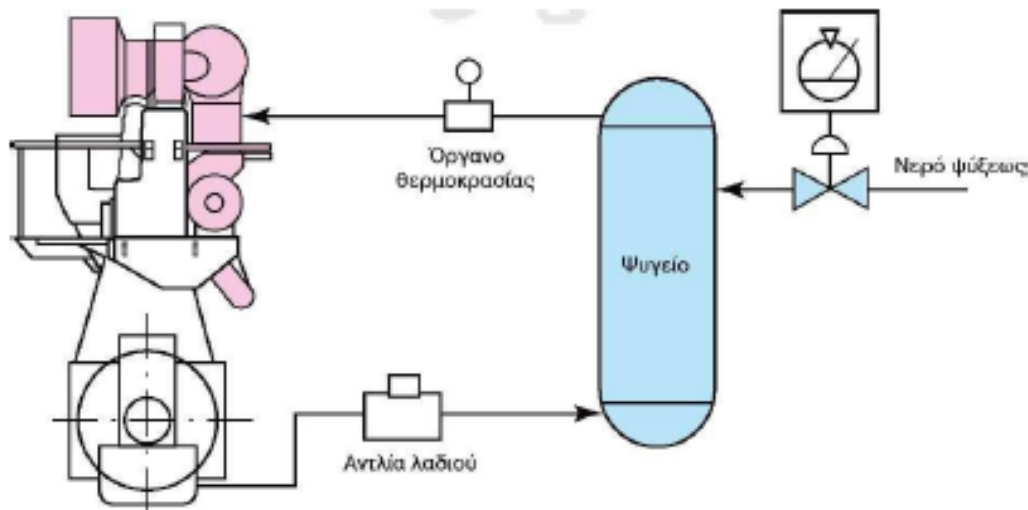
Αν η θερμοκρασία του λιπαντικού ελαίου είναι υψηλή, υφίσταται ο κίνδυνος για υπέρμετρη αύξηση της τριβής στα έδρανα καθώς και στις άλλες επιφάνειες ολίσθησης του κινητήρα και, ως εκ τούτου, ταχύτερη φθορά των περιστρεφόμενων μερών και, τελικώς, την καταστροφή της

μηχανής. Παράλληλα, αυξημένη θερμοκρασία συνεπάγεται μειωμένα απαγόμενα ποσά θερμότητας από τις περιοχές και τα σημεία που εμφανίζουν έντονη θερμική καταπόνηση, όπως θυρίδες εξαγωγής και βαλβίδες που, σε σύντομο χρονικό διάστημα, μπορούν να καταρρεύσουν (να «καούν»).

Οποσδήποτε και σε κάθε περίπτωση, τα παραπάνω φαινόμενα συνεπάγονται μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, χαμηλή ενεργειακή απόδοση αλλά και ατελή καύση, με την συνακόλουθη έκλυση ατμοσφαιρικών ρύπων. Στην περίπτωση κατά την οποία η θερμοκρασία του λιπαντικού ελαίου είναι χαμηλότερη της προβλεπόμενης, λαμβάνουν χώρα ανάλογα φαινόμενα. Το «ψυχρό» λιπαντικό έλαιο παρουσιάζει αυξημένο ιξώδες, συνθήκη που αντιτίθεται στις προδιαγραφές σχεδιασμού του κινητήρα. Κατά συνέπεια, οι τριβές τείνουν να καταναλώνουν υπερβολικά μεγάλο ποσοστό της ενέργειας που παρέχεται στον κινητήρα και ο τελευταίος λειτουργεί σε μικρή απόδοση μηχανικής ισχύος και σε συνθήκες ατελούς καύσης, κατάσταση η οποία επιφέρει δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συνεπώς, η διατήρηση της θερμοκρασίας του λιπαντικού ελαίου του κινητήρα στα προδιαγραφόμενα επίπεδα, διά του συστήματος IAS, επιφέρει:

1. Τον περιορισμό ως προς τις απαιτήσεις έκτακτης συντήρησης του κινητήρα, παράμετρος που επηρεάζει άμεσα αναφορικά με την εξοικονόμηση των δαπανών συντήρησης και έμμεσα καθώς διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του σκάφους.
2. Την αποδοτική εκμετάλλευση της μηχανής, με αποτέλεσμα μικρότερες δαπάνες προμήθειας καυσίμων και περιορισμό της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από την έκλυση ατμοσφαιρικών εκπομπών, τις διαρροές του λιπαντικού ελαίου, κτλ.
3. Τη διάρκεια ζωής της προωστήριας μηχανής και την ασφαλή λειτουργία της

Το σύστημα IAS ρυθμίζει την διεργασία ψύξης του λιπαντικού ελαίου σε εναλλάκτη θερμότητας («ψυγείο»), κατά την οποία απάγεται η θερμότητά του η οποία παρέχεται σε νερό ψύξης. Ο σκοπός του συστήματος ελέγχου είναι η ρύθμιση της παροχής του νερού στον εναλλάκτη, με στόχο τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας του λιπαντικού ελαίου, παρά τις αλλαγές του φορτίου του κινητήρα και τις αλλαγές των στροφών (Bose, 1997). Το εν λόγω σύστημα ελέγχου απεικονίζεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10. Σύστημα ρύθμισης της ψύξης του λιπαντικού ελαίου (Bose, 1997).

Στο σύστημα ελέγχου περιλαμβάνονται:

1. Ανιχνευτής της θερμοκρασίας του λιπαντικού ελαίου, ήτοι αναλογικός αισθητήρας ηλεκτρικής τάσης αέρα, ο οποίος συνδέεται στη γραμμή προσαγωγής του λιπαντικού ελαίου στη μηχανή.
2. Ηλεκτρονικός αναλογικός ρυθμιστής. Ο τελευταίος φέρει όργανο διπλής ένδειξης. Η μία ένδειξη αντιστοιχεί στη μετρούμενη και η δεύτερη στην επιθυμητή θερμοκρασία του ελαίου. Η θερμοκρασία αναφοράς καταχωρείται από τον χειριστή μηχανικό καθώς αυτός τοποθετεί τον δείκτη της θερμοκρασίας-στόχου στην αντίστοιχη θέση.
3. Ενισχυτής ρεύματος, που συνιστά τμήμα του ρυθμιστή, για τη μετατροπή του σήματος χαμηλής ισχύος του ρυθμιστή σε συνεχές ρεύμα με σταθερή τιμή και ανάλογη με το επίπεδο του σήματος.

Διά του ηλεκτρονικού συστήματος ρύθμισης της θερμοκρασίας του λιπαντικού ελαίου στον κινητήρα εξασφαλίζεται η ομαλή λίπανση και η δέουσα απαγωγή της θερμότητας από τον κινητήρα, με αντιστάθμιση των μεταβολών της ισχύος και των διακυμάνσεων που ενδέχεται να εμφανίσει η θερμοκρασία του νερού ψύξης. Η λειτουργία του βασίζεται σε απλό αναλογικό P ελεγκτή, όμως είναι επαρκής ως προς την αποδοτική διατήρηση της θερμοκρασίας του ελαίου στα επιθυμητά επίπεδα (Βλαχογιάννης, 2009).

Πέραν της ρύθμισης της θερμοκρασίας του ελαίου, είναι απαραίτητη η ρύθμιση και η διατήρηση των στροφών στην κατάλληλη ταχύτητα, διαδικασία που κατορθώνεται με την λειτουργία ελεγκτή που ανιχνεύει τις διακυμάνσεις που εμφανίζει το φορτίο της έλικας και

συνδυάζεται με την κατάλληλη ρύθμιση της τάσης στο επαγωγίμο του κινητήρα. Το σήμα εξόδου του ελεγκτή, που καθορίζεται από την ύπαρξη απόκλισης μεταξύ δύο ηλεκτρικών τάσεων, διεγείρει την γεννήτρια παλμών. Η μία εκ των δύο τάσεων αναφέρεται στον αριθμό στροφών αναφοράς του κινητήρα (σε rpm) και καθορίζεται από βαθμονομημένο ποτενσιόμετρο. Η δεύτερη αναφέρεται στην παρούσα (πραγματική) τιμή των στροφών και προκύπτει από μια διάταξη ταχογεννήτριας, η οποία συνδέεται με τον άξονα του κινητήρα. Τα στοιχεία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων που απαρτίζουν το σύστημα ελέγχου των στροφών μπορούν να χαρακτηριστούν από τις παραμέτρους αντίσταση, τάση και χρόνος υστέρησης προσαρμογής (Tusiani & Shearer, 2007).

Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου και ρύθμισης της ταχύτητας του ηλεκτροκινητήρα διατηρεί τις στροφές της έλικας σε σταθερά επίπεδα, ανεξαρτήτως των διακυμάνσεων του φορτίου και των συνθηκών πλεύσης. Τα βασικά δυναμικά του χαρακτηριστικά αφορούν τις συναρτήσεις μεταφοράς του ηλεκτροκινητήρα και της αναπτυσσόμενης αντίστασης στο σύστημα της πρόωσης του πλοίου.

4.6. Ασφάλεια

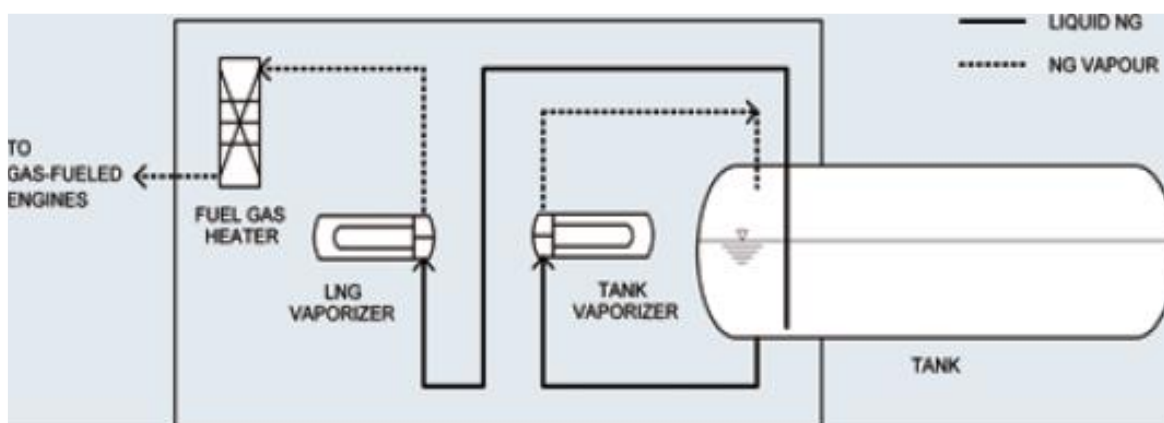
Είναι αυτονόητο ότι η εκπαίδευση του πληρώματος αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο ασφαλείας σε ό,τι αφορά τα τεχνικά ζητήματα. Τα θέματα ασφαλείας είναι αντίστοιχα εκείνων που είναι εγκατεστημένα σε δεξαμενόπλοιο LNG. Τυχόν διαρροή μεθανίου στον χώρο του μηχανοστασίου μπορεί να επιφέρει καταστροφική έκρηξη. Υφίστανται ποικίλα συστήματα ασφαλείας που καθιστούν εφικτό τον έλεγχο, σε κάθε κατάσταση η οποία δύναται να προκύψει κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος. Στην περίπτωση που ανιχνευτεί διαρροή αερίου, η λειτουργία του κινητήρα θα μεταβληθεί αυτομάτως στη λειτουργία με υγρό καύσιμο. Τα σύγχρονα συστήματα ανίχνευσης έχουν τη δυνατότητα προσδιορισμού ακόμα και μικρών ποσοτήτων φυσικού αερίου, συνθήκη που συνεπάγεται το κλείσιμο των σχετικών τμημάτων των εγκαταστάσεων αξιοποίησης του καυσίμου. Οι χώροι όπου μπορεί να ανιχνευτούν διαρροές εξοπλίζονται με συστήματα τελευταίας τεχνολογίας που εξασφαλίζουν ότι ακόμη και αν στην ατμόσφαιρα περιέχεται εκρηκτικό μείγμα αέρα και φυσικού αερίου, δεν θα υπάρχει οποιαδήποτε σπίθα που θα οδηγήσει στην ανάφλεξή του. Οι σωληνώσεις του φυσικού αερίου και του LNG είναι διπλού τοιχώματος, όπως προαναφέρθηκε, ή σε αεριζόμενο αγωγό. Οι ανιχνευτές διαρροών και δίσκοι στάλαξης (drip trays) ευρίσκονται σε όλα τα πιθανά σημεία όπου μπορεί να διαφύγει LNG και να επιφέρει τη φθορά των δομών του σκάφους από μειωμένη αντοχή λόγω χαμηλών

θερμοκρασιών. Τα μέρη των σωληνώσεων ανεφοδιασμού που δεν βρίσκονται εν λειτουργία αδρανοποιούνται με την παρουσία αζώτου, αφού διακοπεί ο ανεφοδιασμός σε καύσιμο. Το σύστημα των σωληνώσεων πρέπει να χαρακτηρίζεται από επαρκή ευελιξία, για την αποτροπή τυχόν βλάβης λόγω κόπωσης ή της ταλάντωσης του κινητήρα. Το σύστημα του αγωγού του αερίου απαιτείται να είναι εφοδιασμένο με σύστημα αδρανοποίησης με άζωτο. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής απαιτήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια σε σκάφος όπου χρησιμοποιείται LNG:

1. Κατά το στάδιο εκκίνησης του κινητήρα θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνον υγρό καύσιμο.
2. Κατά το στάδιο ασταθούς λειτουργίας του κινητήρα, καθώς και κατά τη διάρκεια λιμενικών εργασιών και ελιγμών θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνον υγρό καύσιμο.
3. Οι κινητήρες, σε περίπτωση που διακοπεί η παροχή του φυσικού αερίου, θα πρέπει να επιτρέπουν την συνεχή λειτουργία αποκλειστικά με τη χρήση υγρού καυσίμου.
4. Η πίεση λειτουργίας και κατασκευής των βαλβίδων ανακούφισης που είναι εγκατεστημένες θα πρέπει να καθορίζονται με βάση δεδομένα εκρήξεων οι οποίες έχουν λάβει χώρα λόγω διαρροής φυσικού αερίου.
5. Οι σωλήνες απαερίων καύσης των μηχανών διπλού καυσίμου δεν πρέπει να συνδέονται με σωλήνες εξάτμισης άλλων συστημάτων.
6. Θα πρέπει να υφίστανται φλογοπαγίδες στην είσοδο της παροχής αερίου στον κινητήρα.
7. Οι ρυθμίσεις πρέπει να πραγματοποιούνται με τέτοιον τρόπο ώστε η παροχή φυσικού αερίου στον κινητήρα να είναι εφικτό να διακοπεί από το κεντρικό δωμάτιο ελέγχου και γενικώς από οποιαδήποτε θέση ελέγχου.

Με την ασφάλεια στη χρήση του LNG συνδέονται καίρια οι συνθήκες αποθήκευσης του καυσίμου στις δεξαμενές του πλοίου. Θεωρείται, λοιπόν, σκόπιμο να πραγματοποιηθεί διεξοδικότερη αναφορά σε αυτές. Αναφορικά με την αποθήκευση του LNG, βασικό του μειονέκτημα αποτελεί η χαμηλή πυκνότητα, με αποτέλεσμα το καύσιμο να καταλαμβάνει περίπου διπλάσιο όγκο σε σχέση με τα υγρά καύσιμα, για δεδομένο ενεργειακό περιεχόμενο. Υφίστανται ποικίλοι τύποι συστημάτων αποθήκευσης, αλλά η παρούσα προσέγγιση περιλαμβάνει «αυτοφερόμενες δεξαμενές», όπως αυτό καθορίζεται από τον κώδικα IMO IGC. Οι δεξαμενές μπορεί να είναι Τύπου Α (μεμβρανών) και Τύπου Β (σφαιρικές ή πρισματικές), δεξαμενές των

οποίων τα προβλήματα συντήρησης δεν έχουν ακόμη λυθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Συνεπώς, το είδος δεξαμενών τύπου C (δοχεία πίεσης) έχει αναδειχθεί ως η πλέον προτιμώμενη λύση, λόγω της μεγάλης ασφάλειας και αξιοπιστίας τους. Οι δε υψηλές πιέσεις σχεδιασμού που διέπουν τη λειτουργία τους καθιστούν εφικτούς τους υψηλούς ρυθμούς φόρτωση και την αντοχή τους σε αυξήσεις της πίεσης λόγω εξάτμισης. Επίσης, αναφέρεται και η ευκολία στην κατασκευή και την εγκατάστασή τους. Βασικό μειονέκτημα αυτού του είδους δεξαμενής συνιστά η κατανάλωση χώρου, λόγω του υφιστάμενου περιορισμού σε κυλινδρικό και σε κωνικό σχήμα. Ένα σκαρίφημα δεξαμενής τύπου C, μαζί με το σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου στην προωστήρια μηχανή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11. Δεξαμενή αποθήκευσης LNG τύπου C και σύστημα μεταφοράς φυσικού αερίου προς καύση σε προωστήρια μηχανή (Tusiani & Shearer, 2007).

Η μόνωση των δεξαμενών LNG είναι απαραίτητη, για δύο λόγους: Αφ' ενός για να περιοριστεί η εξάτμιση στην είσοδο λόγω θέρμανσης, αφ' ετέρου δε για να προστατεύονται οι παρακείμενες δομές του πλοίου από τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Το πλέον οικονομικό είδος μόνωσης για τα σκάφη συνεχούς κατανάλωσης φυσικού αερίου, ή για σύντομες περιόδους ελάχιστης ή μικρής ζήτησης, συνιστά η αφρώδης μόνωση. Η κατανάλωση φυσικού αερίου από τους κινητήρες θα διατηρήσει την πίεση της δεξαμενής σε χαμηλά επίπεδα. Για σκάφη που εμφανίζουν μεγαλύτερες περιόδους χαμηλών επιπέδων κατανάλωσης φυσικού αερίου ενδέχεται να χρειαστεί να βελτιωθεί η μόνωση της δεξαμενής, ώστε να περιοριστεί η τάση για αύξηση της πίεσης εντός των δεξαμενών. Όσον αφορά τις μικρές δεξαμενές, κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με μόνωση κενού. Το σχήμα των συγκεκριμένων δεξαμενών περιορίζεται σε κυλινδρικό και δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση εξοπλισμού εντός αυτών, όπως και η διενέργεια επιθεωρήσεων. Για δεξαμενές πολύ μεγαλύτερες των 500 m³, ή στις περιπτώσεις όπου απαιτείται κωνικό σχήμα

δεξαμενής, συνιστάται η χρήση ειδικής μόνωσης με θερμομονωτικό πάνελ ώστε να βελτιωθεί η απόδοση της μόνωσης.

5. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

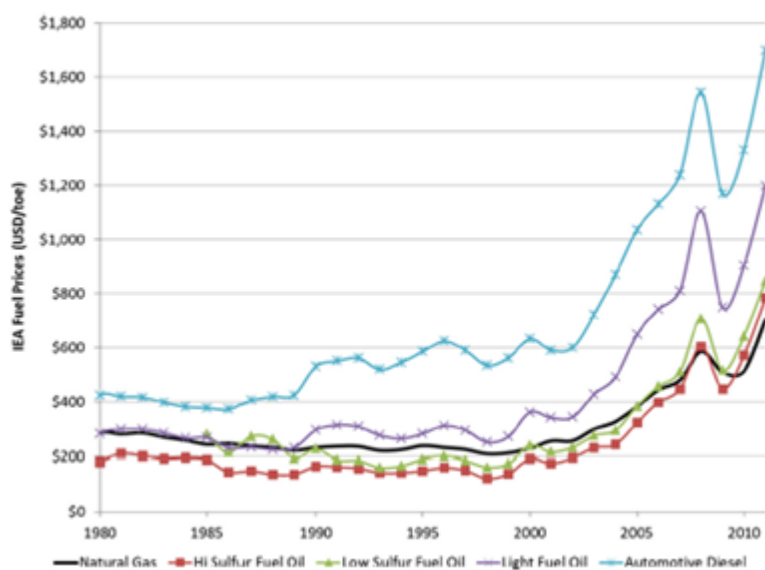
5.1. Οικονομικά πλεονεκτήματα

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στα παραπάνω Κεφάλαια, είναι προφανές ότι η οικονομική αποδοτικότητα της χρήσης του LNG ως καυσίμου είναι ιδιαίτερα μεγάλη στον χώρο της αλυσίδας εφοδιασμού LNG και σε αυτόν τον χώρο εστιάζουν οι διάφορες ερευνητικές εργασίες που έχουν κατά καιρούς δημοσιευτεί, χωρίς ασφαλώς να περιορίζεται μόνον στον συγκεκριμένο τομέα της ναυτιλίας. Απεναντίας, η αξιοποίηση μηχανών διπλού καυσίμου ενδιαφέρει ιδιαίτερα τον τομέα των επιβατηγών, των κρουαζιερόπλοιων, των οχηματαγωγών, καθώς και των σκαφών που χρησιμοποιούν σύστημα δυναμικής τοποθέτησης. Στην τελευταία περίπτωση θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης του LNG σε πλοία γεωτρήσεων (drillships). Ένας βασικός λόγος για την αξιοποίηση του LNG αντιστοιχεί στις ανταγωνιστικές τιμές, συγκριτικά με τα υγρά καύσιμα, στις οποίες το συγκεκριμένο καύσιμο μπορεί να παρέχεται σε οικονομικά αναπτυγμένες περιοχές του πλανήτη, όπως στις ΗΠΑ και την Ευρώπη. Με δεδομένη τη σημασία του LNG ως καυσίμου πλοίων, όλες σχεδόν οι μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες έχουν να υπηγάσει εμπορικά πλοία που κινούνται με κατανάλωση LNG, ενώ άλλες προετοιμάζονται στο να προβούν σε κάτι τέτοιο (Boylston, 2012).

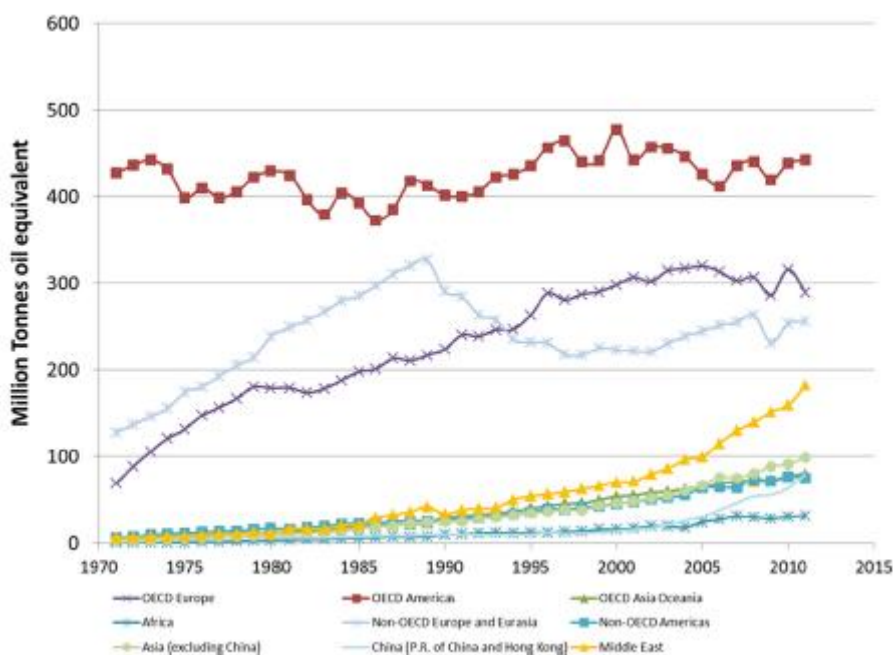
Καθώς οι τιμές του φυσικού αερίου σε διεθνές επίπεδο έχουν αυξηθεί κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, το καύσιμο εξακολουθεί να παραμένει οικονομικά ανταγωνιστικό σε σχέση με τις υφιστάμενες τιμές των υγρών καυσίμων ναυτιλίας (Σχήμα). Επιπλέον, μία ανασκόπηση των περιφερειακών τάσεων των τιμών αναφέρει ότι η τιμή του LNG εμφανίζει διακυμάνσεις από τη μία περιφερειακή περιοχή στην άλλη. Σε αρκετές περιοχές, διατηρείται η διεθνής τάση, ενώ αξιοσημείωτη εξαίρεση είναι η περιοχή OECD America, καθώς η αυξημένη παραγωγή φυσικού αερίου στη Βόρεια Αμερική σχετίζεται με τη μείωση των τιμών από το 2004. Οι εν λόγω τιμές κυμαίνονται σε επίπεδα μειωμένα κατά περισσότερο από 50% σε σχέση με τη διεθνή τιμή του φυσικού αερίου. Γενικώς, εκεί όπου οι περιφερειακές τιμές είναι μικρότερες της μέσης διεθνούς τιμής (π.χ. non-OECD Ευρώπη και Ευρασία, Ασία εκτός της Κίνας) τα δεδομένα δείχνουν ότι οι συγκεκριμένες περιοχές είναι καθαροί εξαγωγείς (net exporters) φυσικού αερίου. Οι περιοχές που η εγχώρια προσφορά υπερβαίνει την περιφερειακή ζήτηση μπορεί να είναι ευαίσθητες στη μεταβολή των τιμών, γεγονός που είναι δυνατόν να παρέχει ευκαιρίες σε ναυτιλιακές επενδύσεις που αφορούν τη μετάβαση σε τεχνολογίες αξιοποίησης LNG σε μηχανές διπλού καυσίμου (Thomson et al., 2015).

Οι τάσεις των τιμών των χωρών OECD Europe είναι οι κοντινότερες των μέσων διεθνών, αντιστοιχώντας σταθερά στο ιστορικό της ευρωπαϊκής ηπείρου ως περιοχής-καθαρού εισαγωγέα από άλλες περιοχές. Η Κίνα και η Μέση Ανατολή καταναλώνουν λιγότερο από το ένα τέταρτο των ποσοτήτων που καταναλώνονται από τις χώρες της OECD America πριν το 2005. Ωστόσο, από τις συγκεκριμένες περιοχές δεν αναφέρονται στοιχεία της τελευταίας δεκαετίας. Εν τούτοις, οι περιοχές αυτές εμφανίζουν τα υψηλότερα επίπεδα συνολικής αύξησης του όγκου του καυσίμου που μεταφέρεται στα λιμάνια τους. Η Ασία, εκτός της Κίνας, συνιστά περιοχή με μεγάλα λιμάνια που αμφανίζει ισχυρή σύνδεση με τη μέση διεθνή τιμή του φυσικού αερίου και ιδίως τα τελευταία έτη. Αντίθετα όμως με την Ευρώπη, η περιοχή συνιστά καθαρό εξαγωγέα από τη δεκαετία του 1980, ακόμα και η εγχώρια κατανάλωση έχει παρουσιάσει σταθερή αύξηση στη διάρκεια των τελευταίων ετών (Thomson et al., 2015).

Σε διεθνές επίπεδο, η κατανάλωση του φυσικού αερίου έχει αυξηθεί κατά τα τελευταία σαράντα έτη και σε ορισμένες περιοχές ταχύτερα σε σχέση με άλλες (Σχήματα 5.1-5.2) (IEA, 2012). Η αυξημένη κατανάλωση σχετίζεται με την ανάπτυξη των υποδομών παραγωγής, μεταφοράς και διανομής του φυσικού αερίου καθώς και με την τεχνική εμπειρία που έχει συσσωρευθεί, καθιστώντας ευκολότερη τη μετάβαση στη χρήση του φυσικού αερίου στον τομέα της ναυτιλίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2, η κατανάλωση στον χώρο των OECD Americas είναι μεγαλύτερη σε σχέση με άλλες περιοχές, συμπεριλαμβανομένου του τομέα των μεταφορών, γεγονός που μειώνει το ενδεχόμενο ρίσκο για ναυτιλιακές εταιρείες που εισέρχονται στο πεδίο της κατανάλωσης LNG.



Σχήμα 5.1. Τιμές καυσίμων (Acciaro, 2014).



Σχήμα 5.2. Τιμές καυσίμων σε κάθε περιφέρεια του πλανήτη (Acciario, 2014).

Οι χώρες της Ευρώπης και της Ευρασίας εμφανίζουν επίσης τάσεις σημαντικής κατανάλωσης φυσικού αερίου επί πολλές δεκαετίες. Για την Ευρώπη, αυτή η εμπειρία περιλαμβάνει και ναυτιλιακές εφαρμογές, αφού στον χώρο της δραστηριοποιούνται πολλά σκάφη που αξιοποιούν μόνον φυσικό αέριο για την πρόωσή τους (Acciario, 2014). Επιπλέον, οι ευρωπαϊκές εταιρείες σχεδιασμού μηχανών που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία (Wärtsilä, Rolls-Royce) έχουν τεθεί ουσιαστικά επικεφαλής της προώθησης των τεχνολογιών χρήσης του φυσικού αερίου στον εν λόγω τομέα, συμπεριλαμβανομένων πολλών σκαφών που διαθέτουν μηχανές διπλού καυσίμου ή σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν στη βάση της συγκεκριμένης λειτουργίας. Η Μέση Ανατολή εμφανίζει μία πρόσφατη τάση αυξανόμενης εγχώριας κατανάλωσης και, ταυτοχρόνως, αυξανόμενου όγκου φυσικού αερίου που εξάγεται. Με δεδομένο τον σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει η ναυτιλία στη μεταφορά ανεπεξέργαστων καυσίμων προς κατάλληλη επεξεργασία αυτών, η Μέση Ανατολή ενδέχεται να συνιστά μία νέα ευκαιρία για επενδύσεις στην κατανάλωση φυσικού αερίου στον τομέα της ναυτιλίας (Thomson et al., 2015).

Γενικότερα, η δυσκολία που αντιμετωπίζει η προμήθεια LNG για τη χρήση του ως καυσίμου σε ευρύτερη κλίμακα αφορά τις αναγκαίες υποδομές ανεφοδιασμού, ώστε το καύσιμο να είναι διαθέσιμο σε οποιαδήποτε περίπτωση απαιτηθεί από τις ενεργειακές ανάγκες των πλοίων. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλων υποδομών και εγκαταστάσεων που εξασφαλίζουν άμεση, αξιόπιστη και ασφαλή πρόσβαση στο LNG. Τα πρώτα βήματα στην

κατεύθυνση της αξιοποίησης LNG στη ναυτιλία σε μικρή κλίμακα πραγματοποιήθηκαν από το μικρού μεγέθους δεξαμενόπλοιο LNG “Pioneer Knutsen” (2004), στη Νορβηγία, από το “Shinju Maru” (2003) και από το “Coral Methane” (2009), που αντιστοιχεί στον πρώτο μεταφορέα που συνδυάζει LNG/αιθυλένιο σε μηχανή διπλού καυσίμου. Οι εγκαταστάσεις τερματικών σταθμών LNG μεγάλης κλίμακας, λοιπόν, στο παρόν στάδιο της ναυτιλίας, κρίνονται απαραίτητες. Μέρος των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την εφοδιαστική αλυσίδα, όπως αδρανοποίηση και προθέρμανση των δεξαμενών, εκφόρτωση και ψύξη θα μπορούσε να αναληφθεί από φορτηγίδες καυσίμων.

5.2. Περιβαλλοντικά οφέλη

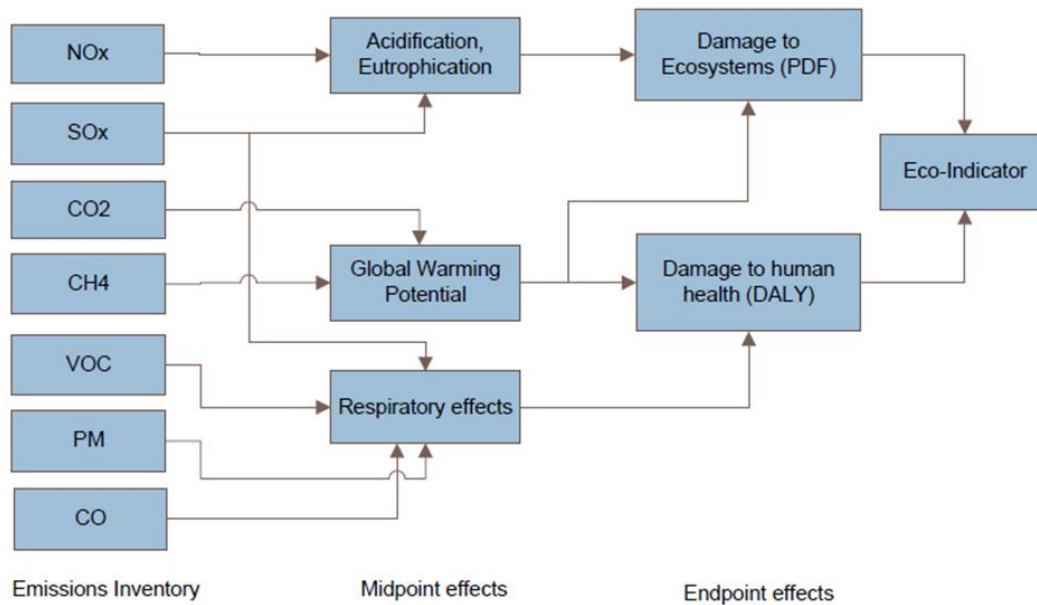
Για να κατανοηθεί η συνέπεια της μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στον τομέα της ναυτιλίας, που εν γένει είναι εφικτή λόγω της μερικής ή πλήρους υποκατάστασης των συμβατικών υγρών καυσίμων ναυτιλίας από το φυσικό αέριο θεωρείται σκόπιμη η αναφορά στις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων, τόσο στο οικοσύστημα όσο και την ανθρώπινη υγεία.

Ο χαρακτηρισμός του «φαινομένου του θερμοκηπίου» ως τέτοιου αναφέρεται στη συγκράτηση της υπέρυθρης (IR) ακτινοβολίας από συγκεκριμένα αέρια στην ατμόσφαιρα, πριν χαθεί στο διάστημα, με αποτέλεσμα, κατ’ αρχήν, την επιταχυνόμενη αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Οι σημαντικότερες από τις επιπτώσεις του φαινομένου περιλαμβάνουν την άνοδο της στάθμης των θαλασσών λόγω της τήξης των πάγων, την απώλεια της βιοποικιλότητας, την εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων και την αλλαγή του τοπικού κλίματος, την καταστροφή ορισμένων καλλιεργειών, την οξίνιση των ωκεανών (αύξηση της οξύτητας των θαλασσών με σοβαρές επιπτώσεις στη θαλάσσια βιοποικιλότητα), καθώς και την επιδείνωση του φορτίου των ατμοσφαιρικών ρύπων στις πυκνοκατοικημένες περιοχές. Στον υπολογισμό των αερίων του θερμοκηπίου υπεισέρχονται το CO₂, CH₄ και το N₂O που θεωρούνται οι κύριοι υπεύθυνοι ρύποι για το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Cheremisinoff, 2002).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση, που αντιστοιχεί στην εκπομπή μιας ποικιλίας τοξικών συστατικών αέριας ή σωματιδιακής φύσης, αποτελεί κύριο περιβαλλοντικό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization, WHO) ένα σημαντικό μέρος των περιστατικών εμφραγμάτων, καρδιακών ασθενειών, καρκίνων του πνεύμονα καθώς και χρόνιων και οξείων ασθενειών του αναπνευστικού συστήματος,

συμπεριλαμβανομένου του άσθματος, μπορεί να αποδοθεί στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Πιο συγκεκριμένα, τα οξειδία του αζώτου (NO_x) επιφέρουν δυσμενείς επιπτώσεις στο νευρικό σύστημα (NO), στους οφθαλμούς και στο αναπνευστικό σύστημα (NO_2). Το NO_2 αντιδρώντας με τους υδρατμούς των βρόγχων και των κυψελίδων του αναπνευστικού συστήματος επιφέροντας ερεθισμό. Το βασικό σύμπτωμα είναι το πνευμονικό οίδημα, που, όταν η συγκέντρωση του NO_2 υπερβαίνει τα 150 ppm, προκαλεί το θάνατο. Το δε μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένα άχρωμο, άοσμο και άγευστο αέριο που σε υψηλές συγκεντρώσεις καθίσταται θανατηφόρο. Η τοξική του δράση οφείλεται στη μεγάλη χημική συγγένεια που έχει με την αιμογλοβίνη (Hb) του αίματος. Η τελευταία δρα ως μεταφορέας του οξυγόνου από τους πνεύμονες στα κύτταρα του σώματος και του CO_2 από τα κύτταρα στους πνεύμονες. Συνεπώς, η άρουσία του CO στον εισπνεόμενο αέρα περιορίζει την οξυγόνωση των κυττάρων αντικαθιστώντας το οξυγόνο στην οξυαιμογλοβίνη ($\text{O}_2\text{-Hb}$) και σχηματίζοντας την καρβοξυαιμογλοβίνη (CO-Hb). Αναφορικά με τα σωματιδιακά αερολύματα ή, απλούστερα, με τα αιωρούμενα σωματίδια (particulate matter, PM) υπάρχουν πολλαπλοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στη δημόσια υγεία. Οι δυσμενείς επιπτώσεις κατηγοριοποιούνται σε καρδιαγγειακές, αναπνευστικές, γενετοξικές ή μεταλλαξιγόνες, κυρίως λόγω των τοξικών συστατικών που μπορούν να προσροφηθούν σε αυτά, της ικανότητάς τους να μεταφέρονται εύκολα από τόπο σε τόπο και να διεισδύουν, ιδίως τα λεπτότερα, βαθιά στο αναπνευστικό σύστημα. Επίσης, το διοξείδιο του θείου (SO_2) σε χαμηλές συγκεντρώσεις και σε μακροχρόνια βάση έχει παρατηρηθεί ότι επιφέρει αύξηση των περιστατικών αναπνευστικών παθήσεων, ενώ η ταυτόχρονη παρουσία σωματιδίων στην ατμόσφαιρα επιτείνει τα φαινόμενα, αυξάνοντας τη θνησιμότητα. Ακόμη, το SO_2 , όπως και το NO_2 , θεωρούνται υπεύθυνα για το φαινόμενο της όξινης βροχής, η οποία επιδρά καταστρεπτικά σε αρκετά είδη φυτών καθώς και σε οικοδομικά υλικά και ιστορικά μνημεία. Τέλος, οι πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds, VOCs), που μαζί με τα NO_x και το όζον συμμετέχουν στον σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους στην ατμόσφαιρα των αστικών κέντρων, επιφέρουν σοβαρά προβλήματα υγείας, όπως καρκίνο και συμμετέχουν στην καταστροφή του στρατοσφαιρικού όζοντος, ενώ ορισμένες όπως η φορμαλδεΰδη και το αιθυλένιο, θεωρούνται επιβλαβείς για τα φυτά (Cheremisinoff, 2002).

Τα παραπάνω αποτυπώνονται γραφικά στο Σχήμα 5.3.



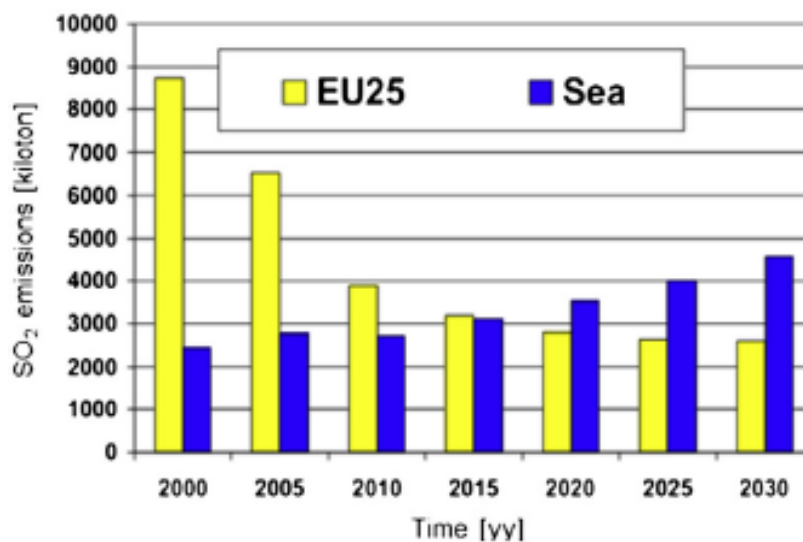
Σχήμα 5.3. Σύνδεση των εκπομπών με τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το οικοσύστημα (Chatzinikolaou & Ventikos, 2014).

Η προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και η ενθάρρυνση της ανάπτυξης των θαλάσσιων μεταφορών συνιστούν δύο σημαντικές προκλήσεις για τον τομέα της ναυτιλίας. Επί του παρόντος, και με δεδομένη την ανεπάρκεια των υποδομών διανομής LNG, για οικονομικούς λόγους προτιμάται η χρήση συμβατικών υγρών καυσίμων. Τα καύσιμα ναυτιλίας περιέχουν υψηλά επίπεδα ανθρακικού υπολείμματος, θείου και μετάλλων, χαρακτηρίζονται από υψηλό ιξώδες και μικρή πτητικότητα. Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων, η διαδικασία της καύσης τους σε ντηζελομηχανές μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων ατμοσφαιρικών εκπομπών, που, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να αντιστοιχούν σε οξείδια του αζώτου, οξείδια του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του άνθρακα (Acciario, 2014).

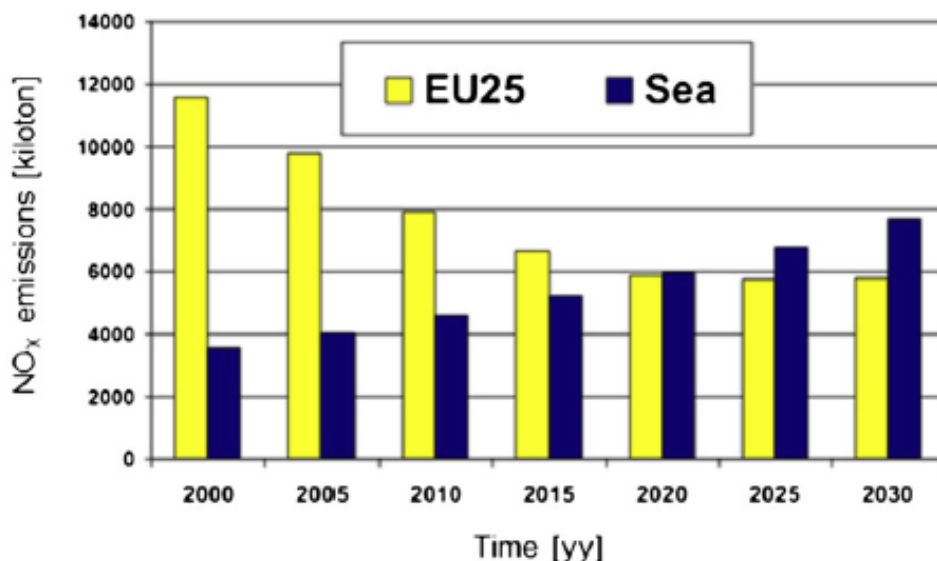
Για την ικανοποίηση των περιορισμών που έχουν τεθεί από τη MARPOL, μία λύση είναι η χρήση επεξεργασμένων καυσίμων. Ωστόσο, το κόστος της επεξεργασίας σε ειδικές μονάδες είναι γενικά απαγορευτικό και, για αυτό τον λόγο, μια καλή εναλλακτική είναι η αξιοποίηση του LNG. Τα τελευταία σαράντα έτη, όπως προαναφέρθηκε, το LNG έχει αξιοποιηθεί ως καύσιμο πρόωσης σε δεξαμενόπλοια LNG, αλλά οι σημερινές τάσεις, όπως και το αντικείμενο στο οποίο εστιάζει η σύγχρονη έρευνα αφορούν τη χρήση του LNG και σε άλλα σκάφη.

Οι ατμοσφαιρικές εκπομπές στα εμπορικά πλοία έχουν μελετηθεί ευρύτατα και τα αποτελέσματά τους έχουν παρουσιαστεί σε διάφορες ερευνητικές εργασίες (ενδεικτικά Eyring et

al., 2007 κ.ά.). Αυτό που ανησυχεί τη σχετική έρευνα είναι όχι μόνον το γεγονός ότι οι ρύποι της ναυτιλίας αντιστοιχούν στο 2-3% των ατμοσφαιρικών εκπομπών, αλλά και η συγκέντρωση αυτών σε σχετικά μικρές περιοχές, όπως στη Βαλτική Θάλασσα, που αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες περιοχές. Σε αυτές τις περιοχές οι νηζελομηχανές των πλοίων ευθύνονται για ένα διαρκώς αυξανόμενο ποσοστό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Acciario, 2014). Επιπλέον, με την αυξανόμενη κίνηση (από πλευράς διερχόμενου στόλου) και χωρίς την εφαρμογή των αυστηρών κριτηρίων, οι εκπομπές είναι ιδιαίτερα πιθανό να αποβούν ένα μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα κατά τα επόμενα έτη, αφού οι εκπομπές διοξειδίου του θείου και οξειδίων του αζώτου αναμένεται να υπερβούν τις εκπομπές των χερσαίων συστημάτων, κάτι που απεικονίζεται στα Σχήματα 5.4 και 5.5.



Σχήμα 5.4. Εκπομπές διοξειδίου του αζώτου (Burel et al., 2013).



Σχήμα 5.5. Εκπομπές οξειδίων του αζώτου (Burel et al., 2013).

Μόνο κατά τη διάρκεια των πρόσφατων ετών, έχουν υιοθετηθεί αυστηρότερα μέτρα από τον IMO, με στόχο τον περιορισμό των εκπομπών των οξειδίων του θείου και του αζώτου. Το Παράρτημα VI του MARPOL 73/78 αναθεωρήθηκε, έντεκα χρόνια μετά την σύνταξή του. Το Σχέδιο τροποποίησης του Παραρτήματος έλαβε την έγκριση εκ μέρους της Υποεπιτροπής Χύδην Υγρών και Αερίων του IMO τον Φεβρουάριο του 2008 (Andersson et al., 2016). Το Παράρτημα VI θέτει όρια εκπομπών στα οξείδια του αζώτου και τα οξείδια του θείου από τις καύσεις των πλοίων, απαγορεύοντας τις εκπομπές συστατικών που επιβαρύνουν το περιβάλλον καταστρέφοντας το στρατοσφαιρικό όζον. Επιπροσθέτως, τόσο ο IMO όσο και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν καθορίσει «προστατευόμενες» περιοχές που καλούνται Περιοχές Ελέγχου των Εκπομπών (Emission Control Areas, ECAs), όπου τα όρια των εκπομπών από ναυτιλιακές δραστηριότητες είναι περισσότερο αυστηρά. Οι εν λόγω περιοχές απεικονίζονται στο Σχήμα 5.6. Η MARPOL καθορίζει τα όρια εκπομπών οξειδίων του θείου και του αζώτου τόσο στις ζώνες ECAs όσο και στα διεθνή ύδατα. Ο Πίνακας 5.1 περιγράφει τους περιορισμούς που αφορούν το περιεχόμενο θείου στα καύσιμα και οι οποίοι έχουν θεσπιστεί από τη MARPOL, με γνώμονα τον στόχο σταθερού περιορισμού του περιεχόμενου θείου κατά τα επόμενα έτη. Ο Πίνακας 5.2 περιγράφει τους περιορισμούς που σχετίζονται με τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου ως συνάρτηση της μέγιστης ταχύτητας της μηχανής σε συνθήκες λειτουργίας. Οι σχετικές προδιαγραφές, που είναι γνωστές ως Tier III εφαρμόστηκαν το 2016 και στοχεύουν στη βαθμιαία

μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (ο στόχος ήταν 80% μέχρι το 2016). Τα όρια Tier I και Tier II ισχύουν σε διεθνές επίπεδο, ενώ τα όρια Tier III μόνον στις ζώνες ECAs.



Σχήμα 5.6. Ζώνες ECAs (Burel et al., 2013).

Πίνακας 5.1. Πρόγραμμα περιορισμού των εκπομπών οξειδίων του θείου (Burel et al., 2013).

| Ημερομηνία εφαρμογής | Διεθνές όριο (% κ.β.) | Ημερομηνία εφαρμογής | Όριο ECA (% κ.β.) |
|----------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
| Πριν την 1.1.2010 | 4.5 | Πριν την 1.7.2010 | 1.5 |
| Μετά την 1.1.2012 | 3.5 | Μετά την 1.7.2010 | 1.0 |
| Μετά την 1.1.2020 | 0.5 | Μετά την 1.1.2015 | 0.1 |

Πίνακας 5.2. Πρόγραμμα περιορισμού των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Με n συμβολίζονται οι στροφές της μηχανής σε rpm (Burel et al., 2013).

| Tier | Έτος εφαρμογής | Όριο εκπομπών NO _x (g/kWh) | | |
|----------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------|
| | | $n < 130$ | $130 \leq n \leq 2000$ | $n \geq 2000$ |
| Tier I | 2000 | 17.0 | $45 \times n^{-0.2}$ | 9.8 |
| Tier II | 2011 | 14.4 | $44 \times n^{-0.23}$ | 7.7 |
| Tier III | 2016 (στις ζώνες ECAs) | 3.4 | $9 \times n^{-0.2}$ | 1.96 |

Οι εκπομπές που εμπεριέχουν θείο είναι ευθέως ανάλογες στο περιεχόμενο του καυσίμου στο συγκεκριμένο χημικό στοιχείο. Για αυτόν τον λόγο, η πρωταρχική προσέγγιση προς την κατεύθυνση περιορισμού των εκπομπών οξειδίων του θείου είναι η θέσπιση ορίων για την περιεκτικότητά του στο καύσιμο. Για παράδειγμα, ο περιορισμός των επιπέδων θείου από 2.7% σε 0.5% αποβαίνει στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου κατά 80% περίπου. Επιπροσθέτως, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από τις μηχανές ναυτιλίας σχετίζεται με τις θεικές ενώσεις που περιέχονται στο καύσιμο, η μείωση της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο αφορά και τον περιορισμό των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων. Το γεγονός αυτό δεν σχετίζεται μόνον με την καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση του LNG, αλλά αξίζει να αναφερθεί ότι η χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο άλλων καυσίμων, όπως MDO και MGO, καθιστά εφικτή την αποδοτικότερη χρήση των συστημάτων αντιρρυπαντικής τεχνολογίας με στόχο τον προσανατολισμό τους στη μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Από τα προαναφερθέντα υγρά καύσιμα, το MDO χρησιμοποιείται επί του παρόντος στην πλεύση στις ζώνες ECAs με όριο 1% ως προς το περιεχόμενο θείο, ενώ το MGO σε ευρωπαϊκά λιμάνια όπου το αντίστοιχο όριο είναι 0.1%. Ωστόσο, οι χημικές διεργασίες που απαιτούνται για την παραγωγή των παραπάνω καυσίμων συνεπάγονται υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση και υψηλότερο κόστος, καθώς και μεγαλύτερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, σε σύγκριση με την παραγωγή του HFO. Για αυτόν τον λόγο αξιοποιούνται και άλλοι περιορισμοί σε σχέση με τη μείωση των οξειδίων του θείου. Μεταξύ αυτών, η αποθείωση με θαλασσινό νερό αντιστοιχεί σε

μια καλά θεμελιωμένη τεχνολογία ελέγχου που μπορεί να επιτύχει ποσοστά απομάκρυνσης που ανταποκρίνονται στους περιορισμούς της MARPOL.

Από την άλλη, η μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου μπορεί να επιτευχθεί με τροποποιήσεις της μηχανής ή/και με επεξεργασία των απαερίων της καύσης. Οι τροποποιήσεις των μηχανών περιλαμβάνουν την ανακυκλοφορία των απαερίων, εσωτερικές τροποποιήσεις της μηχανής, καθώς και άλλες τροποποιήσεις, ενώ η πιο κοινή επεξεργασία των απαερίων περιλαμβάνει τη χρήση επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (Selective Catalytic Reduction, SCR) στην οποία περιλαμβάνεται η επεξεργασία των απαερίων με αμμωνία ή ουρία σε μια καταλυτική διεργασία. Η εν λόγω τεχνική καθιστά εφικτό τον περιορισμό οξειδίων του αζώτου σε ποσοστά μεγαλύτερα του 80% (Burel et al., 2013).

Πιο συγκεκριμένα, η αξιοποίηση του LNG επιτρέπει σημαντική μείωση των εκπομπών των προαναφερθέντων ρύπων, του διοξειδίου του άνθρακα και των αιωρούμενων σωματιδίων, αφού σε σύγκριση με το HFO εμφανίζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου μειώνονται κατά περίπου 80-85%, λόγω της καθαρότερης καύσης που πραγματοποιείται στις μηχανές διπλού καυσίμου.
2. Οι εκπομπές οξειδίων του θείου σχεδόν μηδενίζονται, καθώς το LNG δεν περιέχει θείο.
3. Οι σωματιδιακές εκπομπές είναι πολύ μικρές.
4. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από την καύση περιορίζονται κατά 20-30% λόγω της μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε υδρογόνο των περιεχομένων ενώσεων, συγκριτικά με το HFO και το MDO.

Εν τούτοις, η περιβαλλοντική απόδοση των μηχανών που αξιοποιούν φυσικό αέριο μπορούν να επηρεαστούν από διαφυγή μεθανίου που δεν έχει υποστεί καύση, λόγω ύπαρξης κάποιας διαρροής. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, 1 kg μεθανίου έχει δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη ισοδύναμο με 25 kg CO₂ και, συνεπώς, αν οι συγκεκριμένες διαρροές δεν ελεγχθούν, τα περιβαλλοντικά οφέλη που συνεπάγεται η κατανάλωση του LNG περιορίζονται.

Μία σύγκριση μεταξύ των επιπέδων μείωσης των εκπομπών, που προκύπτουν από τη χρήση των υγρών καυσίμων σε συστήματα που διαθέτουν κατάλληλη αντιρρυπαντική τεχνολογία ή/και έχουν τροποποιηθεί, και τη χρήση του LNG αποτυπώνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3. Μείωσης των εκπομπών που προκύπτουν από τη χρήση των υγρών καυσίμων σε συστήματα που διαθέτουν κατάλληλη αντιρρυπαντική τεχνολογία και έχουν τροποποιηθεί, και τη χρήση του LNG (Burel et al., 2013).

| Τεχνολογία/πρακτική | Μείωση εκπομπών (%) | | | |
|--|---------------------|-----------------|------|-----------------|
| | SO _x | NO _x | PM | CO ₂ |
| Βασικές εσωτερικές τροποποιήσεις για δίχρονο κινητήρα, χαμηλή ταχύτητα | 0 | -20 | 0 | 0 |
| Προχωρημένες εσωτερικές τροποποιήσεις μηχανής | 0 | -30 | 0 | 0 |
| Άμεση εισαγωγή νερού | 0 | -50 | 0 | 0 |
| Κινητήρας υγρού αέρα | 0 | -70 | 0 | 0 |
| Ανακυκλοφορία απαερίων+πλυντρίδα | -93 | -35 | -63 | 0 |
| SCR, υγρό καύσιμο με 2.7% κ.β. θείο | 0 | -90 | 0 | 0 |
| Πλύση με θαλασσινό νερό | -75 | 0 | -25 | 0 |
| Αλλαγή καυσίμου (από 2.7% σε 1.5% περιεκτικότητα σε θείο) | -44 | 0 | -18 | 0 |
| Αλλαγή καυσίμου (από 2.7% σε >0.5% περιεκτικότητα σε θείο) | -81 | 0 | -20 | 0 |
| Ντήζελ ναυτιλίας με χαμηλή περιεκτικότητα (από 0.5% σε >0.1% περιεκτικότητα σε θείο) | -80 | 0 | 0 | 0 |
| LNG | -90 | -80 | -100 | -20 |

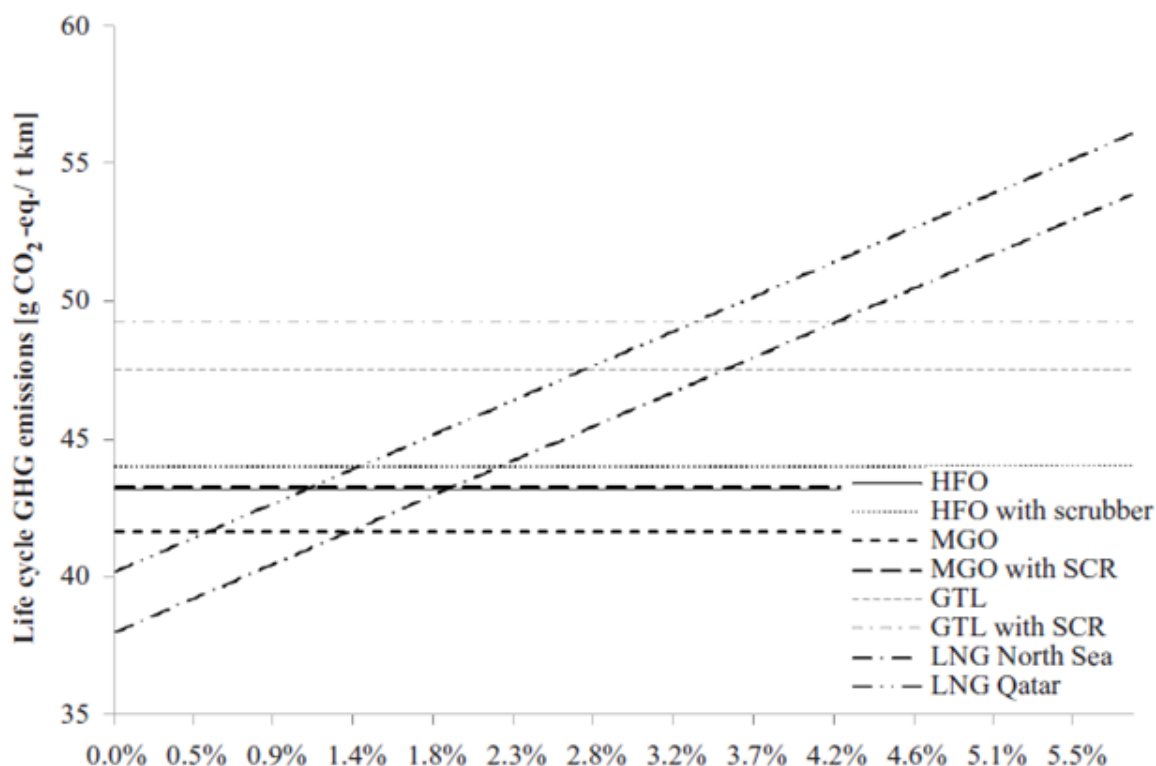
Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3, η χρήση του LNG συνεπάγεται περιορισμό των εκπομπών οξειδίων του θείου, οξειδίων του αζώτου και αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ η καύση του παράγει μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που σημαίνει ότι τα δαπανηρά συστήματα περιορισμού των εκπομπών που πρέπει να εφαρμόζονται στην περίπτωση χρήσης υγρών καυσίμων μπορούν να αποφευχθούν. Το περιβαλλοντικό όφελος μπορεί να συνδυαστεί με το μειωμένο κόστος του LNG, άρα και τις μικρότερες λειτουργικές δαπάνες, σε σχέση με τα υγρά καύσιμα ναυτιλίας, μια σχέση που φαίνεται ότι θα διατηρηθεί και στο μέλλον, καθώς τα εναπομείναντα αποθέματα πετρελαίου των οποίων η εκμετάλλευση μπορεί να πραγματοποιηθεί στο συμβατικό κόστος περιορίζονται συνεχώς, ενώ πρόσφατα έχουν γίνει εκμεταλλεύσιμα σημαντικά κοιτάσματα φυσικού αερίου, χάρη και στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ή τη βελτίωση παλαιότερων.

Με στόχο τον προσδιορισμό του οικολογικού αποτυπώματος του LNG, συγκριτικά με άλλα ορυκτά καύσιμα που αξιοποιούνται στη ναυτιλία, οι Bengtsson et al. (2011) προέβησαν σε συγκριτική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) για κάθε καύσιμο που αφορά την κίνηση ενός σκάφους Ro-Ro. Τα δεδομένα αφορούν την επεξεργασία φυσικού αερίου της Βόρειας Θάλασσας και χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω των διαφόρων περιβαλλοντικών δεικτών που μπορούν να εκτιμηθούν με τη χρήση τους, πέραν των GHGs. Θεωρούνται επίσης απώλειες μεθανίου της τάξης των 0.17% και καύση του διαφυγόντος αερίου (flaring) σε ποσοστό 0.25% του παραγόμενου LNG από τη διαδικασία της υγροποίησης. Στους υπολογισμούς εντάσσεται το σύνολο των διεργασιών και των επιμέρους διαδικασιών, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης του LNG στον τερματικό σταθμό πριν τη διανομή του. Η απόδοση της υγροποίησης λήφθηκε ίση με 92%, ενώ θεωρήθηκε η παραδοχή ότι 8.5% του φυσικού αερίου καταναλώνεται στα στάδια της υγροποίησης και της αποθήκευσης. Θεωρούνται δύο διαφορετικά σενάρια μεταφοράς του LNG, από τη Βόρειο Θάλασσα και το Κατάρ. Η περιβαλλοντική επίδοση του LNG συγκρίνεται με εκείνη του HFO, MGO και του συνθετικού ντήζελ από αέρια (gas to liquid, GTL), καθώς και με σενάρια χρήσης αντιρρυπαντικής τεχνολογίας κατά τη χρήση των παραπάνω καυσίμων.

Στον Πίνακα 5.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα της μελέτης για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη, την οξίνιση των ωκεανών και τον ευτροφισμό. Παρατηρείται σαφής υπεροχή του LNG έναντι των άλλων καυσίμων, ακόμη και στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν οι προβλεπόμενες από τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς αντιρρυπαντικές τεχνολογίες.

Πίνακας 5.4. Σύγκριση LNG με άλλα καύσιμα ναυτιλίας (Bengtsson et al., 2011).**Error! Not a valid link.**

Στο παρόν σημείο κρίνεται σκόπιμο να σχολιαστούν οι εκπομπές μεθανίου, ένας παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει δραστικά το συνολικό οικολογικό αποτύπωμα του LNG, καθώς το δυναμικό υπερθέρμανσης του μεθανίου είναι 25 φορές μεγαλύτερο εκείνου του διοξειδίου του άνθρακα. Οι Bengtsson et al. (2011) εκτιμούν ότι οι εκπομπές μεθανίου είναι σημαντικά υψηλότερες στην περίπτωση που χρησιμοποιείται LNG (περί τα 4 g CO₂ ανά λειτουργική μονάδα, σε σύγκριση με 1 g ή λιγότερο που αντιστοιχεί στις άλλες εξεταζόμενες εναλλακτικές). Οι εκπομπές προέρχονται κυρίως από τη διαφυγή μεθανίου από τη μηχανή, αλλά γενικά παρατηρούνται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, ενώ η ποσοτικοποίησή τους είναι αρκετά δύσκολη, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αβεβαιότητα αναφορικά με την εκτίμηση του συνολικού οικολογικού αποτυπώματος. Στο Σχήμα 5.7 περιγράφεται ενδεικτικά πώς η αύξηση των διαφυγόντων ποσοτήτων μεθανίου μπορεί να επηρεάσει το εκτιμώμενο δυναμικό υπερθέρμανσης. Όπως παρατηρείται, στην περίπτωση του LNG, η εξάρτηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας από το συγκεκριμένο ποσοστό είναι ισχυρή και, ως εκ τούτου, θα πρέπει να πραγματοποιείται η βέλτιστη διαχείριση του καυσίμου σε όλα τα στάδια της χρήσης, συμπεριλαμβανομένης της επίβλεψης και κατάλληλης συντήρησης του εξοπλισμού, ενώ χρειάζεται μεγαλύτερη έρευνα στην ποσοτικοποίηση των συγκεκριμένων διαρροών.



Σχήμα 5.7. Εξάρτηση αερίων θερμοκηπίου από τη διαρροή μεθανίου (Bengtsson et al., 2011).

Οι Burel et al. (2013) επιχείρησαν τον προσδιορισμό του καταλληλότερου είδους σκάφους που μπορούν, βάσει των περιβαλλοντικών περιορισμών, να ωφεληθούν οικονομικά από την εγκατάσταση συστήματος πρόωσης που αξιοποιεί LNG, με τη διενέργεια στατιστικής ανάλυσης και λαμβάνοντας υπ' όψιν τους την κίνηση των διαφόρων σκαφών στις ζώνες ECAs. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στα εξής είδη σκαφών:

1. Πλοία Ro-Ro, δεξαμενόπλοια και φορτηγά εμπορευματοκιβωτίων. Η ανάλυση της κίνησης των σκαφών αυτών δείχνει ότι η κίνηση των συγκεκριμένων κατηγοριών σε ζώνες ECA αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μέρος του χρόνου λειτουργίας τους.
2. Υποστηρικτικά πλοία μονάδων που είναι εγκατεστημένες στη θάλασσα, όπως υπεράκτιων εγκαταστάσεων γεώτρησης. Και σε αυτή την περίπτωση, ανάλυση της κίνησης των σκαφών αυτών δείχνει ότι η κίνηση των συγκεκριμένων κατηγοριών σε ζώνες ECA αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μέρος του χρόνου λειτουργίας τους. Πιο συγκεκριμένα, η κυβέρνηση της Νορβηγίας απαλλάσσει τα εν λόγω σκάφη από το τέλος εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, στην περίπτωση που η πρόωσή τους υποστηρίζεται από τη χρήση φυσικού αερίου.

3. Κρουαζιερόπλοια, τα οποία αν και για το μεγαλύτερο μέρος της χρονικής διάρκειας λειτουργίας τους δεν διέρχονται από ζώνες ECA, επιθυμούν να διαμορφώσουν ένα οικολογικό προφίλ και η συγκεκριμένη τάση αποτελεί το κύριο κίνητρο για την υιοθέτηση του LNG ως ενεργειακής πηγής που μπορεί να καταναλωθεί σε μηχανές διπλού καυσίμου.

Στον Πίνακα 5.5 φαίνεται ο χρόνος που αντιστοιχεί στην κίνηση των φορτηγών χύδην φορτίου, Ro-Ro, δεξαμενοπλοίων και κρουαζιεροπλοίων σε ζώνες ECA.

Πίνακας 5.5. Χρόνος που αντιστοιχεί στην κίνηση των φορτηγών χύδην φορτίου, Ro-Ro, δεξαμενοπλοίων και κρουαζιεροπλοίων σε ζώνες ECA (Burel et al., 2013).

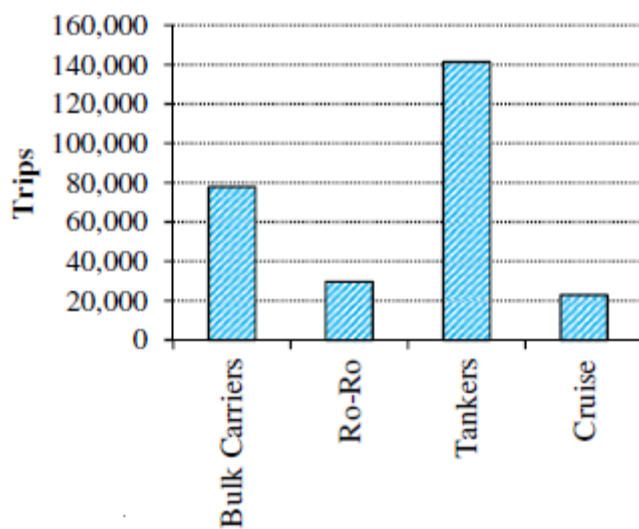
| Κατηγορία | Ποσοστό χρόνου σε ECA | | | |
|--------------------------------|-----------------------|--------|-------|------|
| | >80% | 40-80% | 5-40% | <5% |
| Φορτηγά χύδην φορτίου | | | | |
| Πολύ μικρά | 28.4 | 1.2 | 2.1 | 50.1 |
| Μικρά | 14.8 | 3.1 | 4.5 | 58.3 |
| Handysize | 11.6 | 1.6 | 7.0 | 69.8 |
| Handymax | 4.8 | 1.6 | 5.4 | 81.1 |
| Panamax | 5.7 | 1.7 | 7.5 | 78.8 |
| Capesize | 4.7 | 1.1 | 5.9 | 81.1 |
| Πολύ μεγάλα (για μεταλλεύματα) | 0.5 | 0.2 | 2.8 | 84.2 |
| Ro-Ro | | | | |
| Πολύ μικρά | 31.2 | 4.7 | 3.5 | 50.1 |
| Μικρά | 36.7 | 2.1 | 5 | 39.2 |

| | | | | |
|---------------------------------|------|-----|------|------|
| Μεσαία | 60.9 | 0.5 | 3.7 | 22.6 |
| Μεγάλα | 37.3 | 0.4 | 12.5 | 42.6 |
| Δεξαμενόπλοια | | | | |
| Πολύ μικρά | 26.0 | 0.8 | 1.5 | 59.3 |
| Μικρά | 22.2 | 1.5 | 3.9 | 56.3 |
| Handy | 18.5 | 2.0 | 9.5 | 59.0 |
| Panamax | 8.7 | 2.2 | 16.6 | 68.6 |
| Aframax | 18.2 | 2.6 | 13.6 | 57.4 |
| Suezmax | 19.0 | 4.1 | 12.8 | 62.3 |
| Πολύ μεγάλο πετρελαιοφόρο | 1.8 | 1.3 | 4.0 | 88.6 |
| Εξαιρετικά μεγάλο πετρελαιοφόρο | 3.5 | 4.7 | 9.3 | 80.2 |
| Κρουαζιερόπλοια | | | | |
| Μικρά | 16.4 | 1.4 | 2.8 | 54.5 |
| Μεσαία | 19.1 | 4.3 | 5.5 | 49.3 |
| Μεγάλα | 32.1 | 6.1 | 25.1 | 23.0 |
| Panamax | 16.3 | 4.9 | 26.3 | 29.4 |

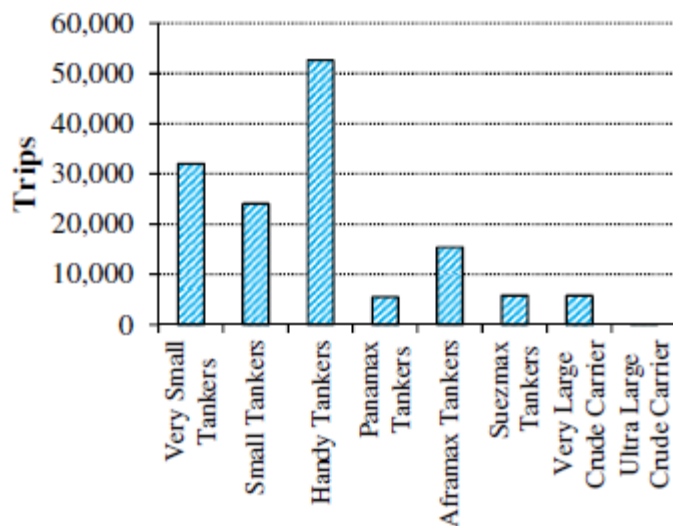
Με βάση τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.5, το ποσοστό των πλοίων που δαπανούν μεγάλο ποσοστό του χρόνου τους σε ζώνες ECA είναι τα πολύ μικρά φορτηγά χύδην φορτίου, τα μεσαία σκάφη Ro-Ro, τα πολύ μικρά δεξαμενόπλοια και τα μεγάλα κρουαζιερόπλοια. Εν τούτοις, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ότι αξιόλογο ποσοστό των πλοίων δαπανούν χρόνο μεγαλύτερο του 80% σε ζώνες ECA. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα

υπογραμμίζουν την εκτίμηση ότι υφίσταται μία δελεαστική αγορά για τη ναυπήγηση σκαφών και την κατασκευή των αντίστοιχων μηχανών που θα χρησιμοποιούν LNG για την πρόωσή τους, ιδίως σε χώρες όπου εφαρμόζονται ή πρόκειται να εφαρμοστούν πολιτικές περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται ο αριθμός των δρομολογίων που πραγματοποιούνται από τα δεξαμενόπλοια, τα Ro-Ro, τα φορτηγά χύδην φορτίου και τα κρουαζιερόπλοια για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα (σε ζώνες ECA). Όπως προκύπτει, ο αριθμός των δρομολογίων είναι μεγαλύτερος για τα δεξαμενόπλοια, ακολουθούν τα φορτηγά χύδην φορτίου, τα Ro-Ro και τα κρουαζιερόπλοια. Μεταξύ των επιμέρους κατηγοριών δεξαμενοπλοίων, τα περισσότερα δρομολόγια διενεργούνται από τα δεξαμενόπλοια τύπου Handysize (52,000) (Σχήμα 5.9) και για αυτόν τον λόγο η μελέτη των Burel et al. (2013) επικεντρώνεται στην λεπτομερέστερη εξέταση των πιθανών σεναρίων για τη βέλτιστη περιβαλλοντική και οικονομική απόδοση που διέπει τη λειτουργία του σκάφους με τη χρήση LNG, όπως θα αναλυθεί κάτωθι.



Σχήμα 5.8. Δρομολόγια για κάθε είδος πλοίου (Burel et al., 2013).



Σχήμα 5.9. Δρομολόγια για κάθε μέγεθος πλοίου (Burel et al., 2013).

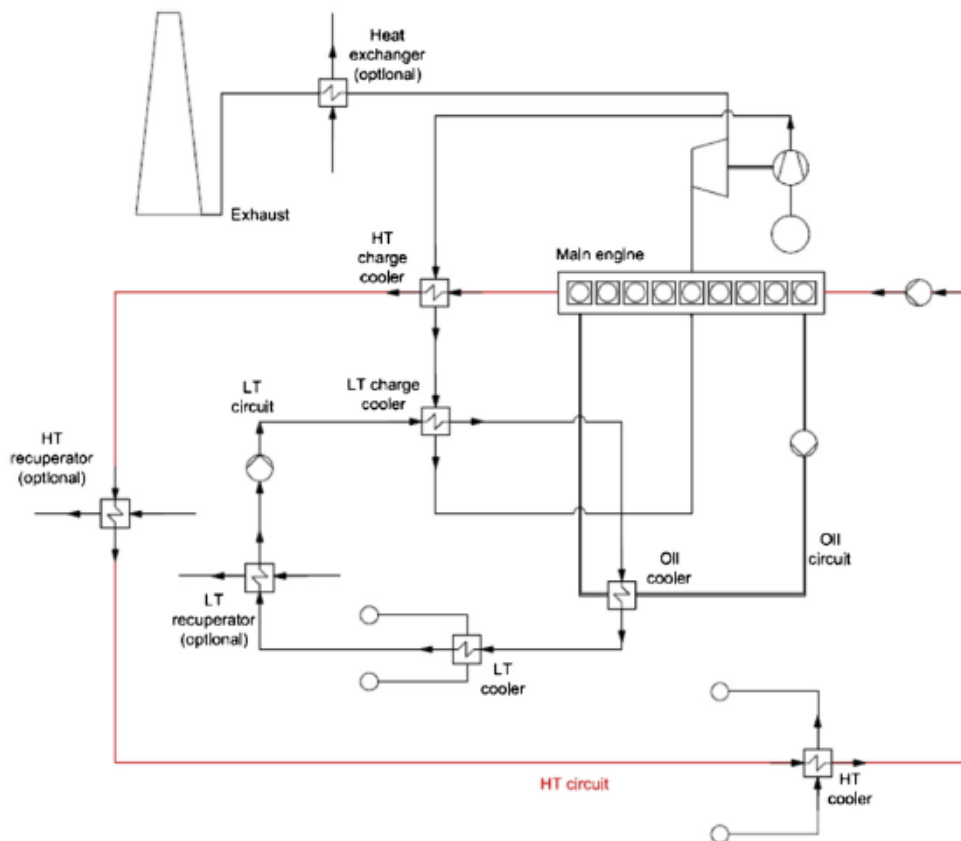
Είναι γεγονός ότι η παραγωγή καθαρότερων απαερίων καύσης καθιστά εφικτή την αποδοτικότερη χρήση τεχνολογιών ανάκτησης ενέργειας. Στις τελευταίες περιλαμβάνεται η αξιοποίηση λέβητα ανάκτησης θερμότητας και η χρήση οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle, ORC). Η δυνατότητα χρήσης κελίων καυσίμων είναι επίσης μία καινοτόμος προσέγγιση.

Παρακάτω εξετάζονται τα πιθανά σενάρια ενεργειακής ανάκτησης και οι συνακόλουθοι ρύποι, σε σχέση και με την οικονομικότητα κάθε σεναρίου. Το εξεταζόμενο δεξαμενόπλοιο είναι εφοδιασμένο με προωστήρια μηχανή διπλού καυσίμου σε συνδυασμό με σύστημα ελέγχου της ισχύος Power Take In/Power Take Off (PTI/PTO) και δύο λέβητες αερίου. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης θεωρείται ότι το πλοίο πραγματοποιεί δρομολόγιο από τη Μέση Ανατολή στην Ευρώπη (Σαουδική Αραβία-Γερμανία). Οι λέβητες αερίου θεωρείται ότι έχουν απόδοση ίση με 88%, ενώ δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η πιλοτική έγχυση υγρού καυσίμου, καθώς το τελευταίο αποτελεί περίπου το 1% της κατανάλωσης LNG. Η θερμική ισχύς που απαιτείται κατά την πλεύση εξαρτάται από την ταχύτητα, καθώς μεταβάλλεται το ποσοστό του LNG στον εξαερωτή.

Στο Σχήμα 5.10 περιγράφεται το διάγραμμα ροής λειτουργίας της κύριας μηχανής: το σύστημα ψύξης αντιστοιχεί σε ένα κύκλωμα υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature, HT) και σε ένα κύκλωμα χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature, LT). Το νερό του κυκλώματος HT διέρχεται μέσω των κελύφων και των κεφαλών των κυλίνδρων, καθώς και μέσω του πρώτου σταδίου αερόψυξης. Το νερό στο κύκλωμα LT ψύχει το δεύτερο στάδιο αερόψυξης και το

λιπαντικό έλαιο. Θεωρείται επίσης ότι η ανακτώμενη θερμότητα από το κύκλωμα ψύξης LT της κύριας μηχανής αξιοποιείται πάντοτε για την εξαέρωση του LNG. Οι περιπτώσεις ανάκτησης θερμότητας που εξετάστηκαν περιλαμβάνουν τα ακόλουθα σενάρια, για τα οποία προσδιορίζονται οι αντίστοιχες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η ενεργειακή κατανάλωση και η απόδοση του συστήματος:

1. Καθόλου ανάκτηση θερμότητας
2. Ανάκτηση θερμότητας με λέβητα ανάκτησης
3. Εφαρμογή ORC
4. Εφαρμογή ORC και ανάκτηση θερμότητας από τον συμπυκνωτή του ORC.



Σχήμα 5.10. Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του κυκλώματος ψύξης και του κυκλώματος των πατερίων της κύριας μηχανής πρόωσης (Burel et al., 2013).

Στο Σενάριο 1 λαμβάνεται υπ' όψιν μόνον η θερμότητα που ανακτάται από το κύκλωμα LT της κύριας μηχανής πρόωσης. Στη δεύτερη περίπτωση, η θερμότητα ανακτάται με τη βοήθεια ενός

λέβητα ανάκτησης, πρακτική που αξιοποιείται ευρέως στα δεξαμενόπλοια. Για τον προσδιορισμό των μεγεθών που ενδιαφέρουν, θεωρείται ότι η θερμοκρασία στην έξοδο των απαερίων είναι ίση με 120°C. Επιπλέον, σε αυτό το σενάριο λαμβάνεται υπ' όψιν το ενδεχόμενο ανάκτησης θερμότητας από το κύκλωμα HT της κύριας μηχανής πρόωσης. Το συνολικό ποσό της ανακτώμενης θερμότητας αξιοποιείται για τη θέρμανση του φορτίου, που θεωρείται ότι πρέπει να διατηρείται στους 65°C.

Στο τρίτο σενάριο εξετάζεται η εφαρμογή ORC. Ο τελευταίος συνιστά θερμοδυναμικό κύκλο παρόμοιο με τον κύκλο Rankine με εργαζόμενο ρευστό τον ατμό, αλλά στην περίπτωση αυτή το εργαζόμενο ρευστό αντιστοιχεί σε ένα οργανικό μείγμα. Σε σύγκριση με το νερό, το οργανικό μείγμα εμφανίζει ορισμένα θετικά χαρακτηριστικά, όπως η μεγαλύτερη μοριακή μάζα, η μικρότερη κρίσιμη θερμοκρασία, η μικρότερη κρίσιμη πίεση, η μικρότερη εντροπία συμπύκνωσης και η μικρότερη θερμοκρασία πήξης. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά καθιστούν δυνατή την ανάκτηση θερμότητας με χρήση χαμηλών θερμοκρασιών. Το θερμικό περιεχόμενο των απαερίων της καύσης μπορεί να αξιοποιηθεί ικανοποιητικά σε ένα σύστημα ORC του οποίου η λειτουργία συνεπάγεται την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τον περιορισμό του φορτίου της κύριας μηχανής μέσω του συστήματος Power Take In. Στο Σενάριο 3 η μέγιστη ισχύς του ORC είναι ίση με 700 kWe, ενώ λαμβάνεται υπ' όψιν η ανάκτηση θερμότητας από το κύκλωμα HT της κύριας μηχανής πρόωσης.

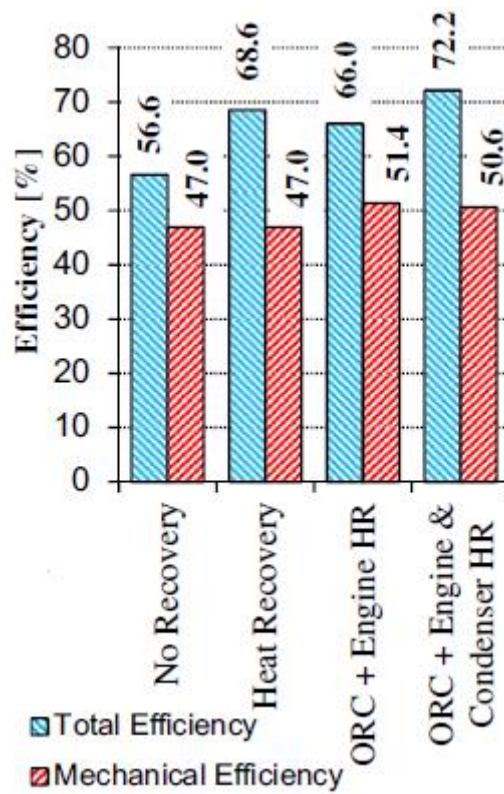
Τέλος, υφίσταται και η δυνατότητα αξιοποίησης της θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί από τον συμπυκνωτή ORC. Για αυτόν τον λόγο, η πίεση του συμπυκνωτή απαιτείται να είναι σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με το προηγούμενο Σενάριο. Αξιοποιείται δε και σε αυτή την περίπτωση η θερμότητα από το κύκλωμα HT της κύριας μηχανής πρόωσης.

Από την εφαρμογή των παραπάνω σεναρίων, προκύπτει, ως είναι εύλογο, το ότι η ανακτημένη θερμότητα και η ηλεκτρική ενέργεια μειώνονται καθώς περιορίζεται το φορτίο της μηχανής. Στα Σχήματα 5.11-5.13 φαίνεται η επίδραση των εναλλακτικών σεναρίων στην ενεργειακή απόδοση, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και την κατανάλωση LNG. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η συνολική ενεργειακή απόδοση περιλαμβάνει τόσο την ενέργεια που αξιοποιείται για τη θέρμανση όσο και για τη διατήρηση του φορτίου στην επιθυμητή θερμοκρασία. Η μηχανική απόδοση ορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής και της ηλεκτρικής ισχύος ως προς το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου.

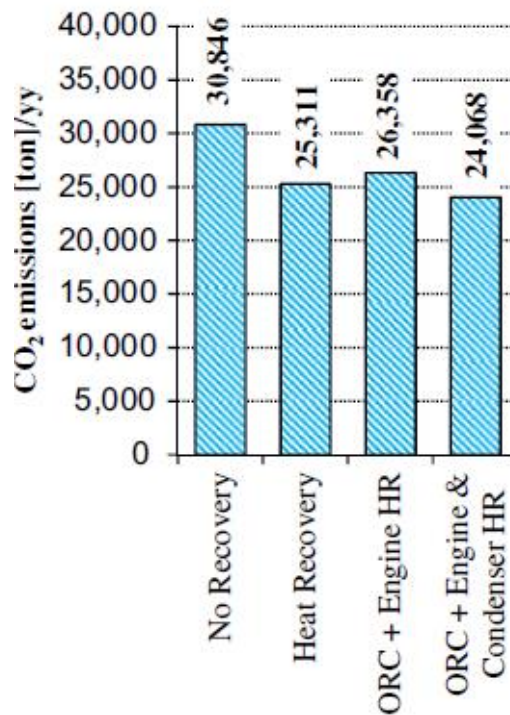
Στην περίπτωση που δεν υφίσταται σύστημα ανάκτησης θερμότητας, η ενεργειακή απόδοση του συστήματος πρόωσης, λαμβανομένου υπ' όψιν δρομολογίου δύο διαδρομών (round trip), είναι

της τάξης του 56.7%, ενώ η μηχανική απόδοση ανέρχεται σε 47%, οι δε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ισούνται με 30,850 τόνους σε ετήσια βάση, η δε κατανάλωση LNG ανέρχεται σε 11,220 τόνους ετησίως. Στη δεύτερη περίπτωση, η μηχανική απόδοση κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα όπως και στο σενάριο μηδενικής ανάκτησης θερμότητας, ενώ η συνολική απόδοση ανήλθε σε 68.6%. Στην τρίτη περίπτωση η μηχανική απόδοση αυξήθηκε στο 51.4%, αλλά η συνολική απόδοση μειώθηκε καθώς το μεγαλύτερο μέρος της θερμικής ισχύος δεν ανακτάται για τη θέρμανση του φορτίου. Στην τελευταία περίπτωση, παρατηρείται η υψηλότερη συνολική απόδοση (72.2%), ενώ η μηχανική απόδοση είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση (50.6%). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε αύξηση περίπου 5% σε σχέση με το τυπικό δεξαμενόπλοιο, η λειτουργία του οποίου προσιδιάζει στο δεύτερο σενάριο (χρήση λέβητα ανάκτησης θερμότητας). Στην περίπτωση όπου δεν απαιτείται η διατήρηση του φορτίου σε σταθερή θερμοκρασία, η εξοικονόμηση καυσίμου ανέρχεται στα επίπεδα του 9%.

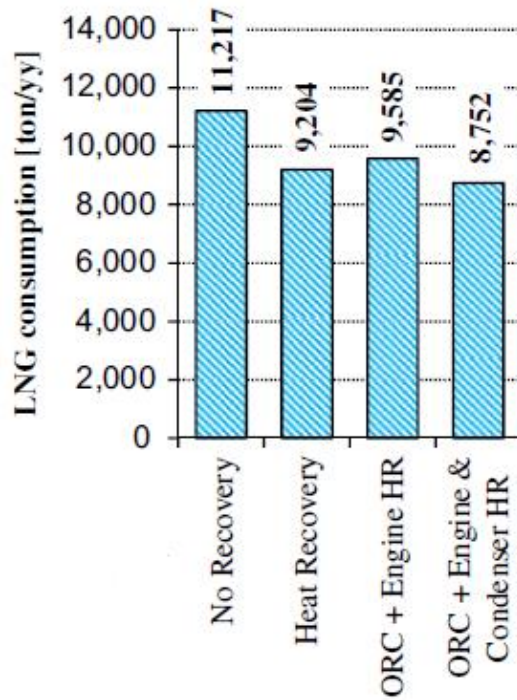
Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να αναφερθεί ότι ακόμη και στην περίπτωση που δεν είναι εγκατεστημένο σύστημα ανάκτησης θερμότητας, η περιβαλλοντική απόδοση του πλοίου είναι καλύτερη σε σχέση με το ίδιο σκάφος που καλύπτει τις ενεργειακές του ανάγκες με τη χρήση HFO, χωρίς πάλι να ανακτάται ενέργεια. Θεωρώντας την ίδια ενεργειακή απόδοση, κατώτερη θερμογόνο δύναμη του HFO της τάξης των 40.8 MJ/kg και έναν συντελεστή εκπομπών 3.1 kg CO₂/kg καυσίμου, η κατανάλωση του καυσίμου θα ανέρχεται σε 13,200 τόνους σε ετήσια βάση ενώ οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα θα ήσαν 41,100 τόνοι. Κατά συνέπεια, χάρη στην αξιοποίηση του LNG, είναι δυνατόν να επιτευχθεί περιορισμός των εκπομπών CO₂ κατά 25%, πέραν της μείωσης των εκπομπών οξειδίων αζώτου και θείου (Σχήματα 5.10-5.12).



Σχήμα 5.11. Ενεργειακή απόδοση για κάθε εξεταζόμενο σενάριο (Burel et al., 2013).



Σχήμα 5.12. Εκπομπές CO₂ για κάθε εξεταζόμενο σενάριο (Burel et al., 2013).



Σχήμα 5.13. Κατανάλωση LNG για κάθε εξεταζόμενο σενάριο (Burel et al., 2013).

Πέραν της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, θα πρέπει σε αυτή την περίπτωση να εξεταστεί και η οικονομική βιωσιμότητα της χρήσης του LNG. Για να εκτιμηθεί η τελευταία λαμβάνεται υπ' όψιν το κόστος εγκατάστασης του συστήματος πρόωσης, το λειτουργικό κόστος για την προμήθεια του καυσίμου, το κόστος συντήρησης. Ως χρόνος αποπληρωμής της βασικής επένδυσης (payback period) εκτιμώνται τα τρία έτη. Για το δεύτερο σενάριο, ως περίοδος αποπληρωμής προκύπτουν οι 51 μήνες, για το τρίτο 31 μήνες και για το τελευταίο 21 μήνες. Στην περίπτωση δε που εφαρμόζεται τέλος που αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα τα οικονομικά οφέλη βελτιώνονται σημαντικά.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα υποκατάστασης των συμβατικών υγρών καυσίμων από υγροποιημένο φυσικό αέριο. Το φυσικό αέριο θεωρείται ένα φιλικότερο από περιβαλλοντική άποψη καύσιμο σε σχέση με τα υγρά καύσιμα της ναυτιλίας. Ως κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει την ασφάλεια της τροφοδοσίας και την οικονομικότητα μιας τέτοιας επένδυσης είναι η δυνατότητα ανεφοδιασμού του σκάφους σε LNG. Για τον λόγο αυτό, η ύπαρξη κατάλληλων υποδομών, επαρκούς χωρητικότητας και ικανοποιητικής αξιοπιστίας, είναι θεμελιώδους σημασίας.

Η ναυτιλία ευθύνεται για σημαντικό μέρος ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως οξειδίων του θείου, οξειδίων του αζώτου, διοξειδίου του άνθρακα και αιωρούμενων σωματιδίων. Όπως προκύπτει από την τροποποίηση του Παραρτήματος VI της MARPOL, τα όρια εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων του τομέα της ναυτιλίας έχουν καταστεί αυστηρότερα. Για τον σκοπό αυτό, είναι αναγκαία η χρήση φιλικότερων προς το περιβάλλον καυσίμων. Μία εναλλακτική επιλογή είναι η καλύτερη επεξεργασία των κλασμάτων του αργού πετρελαίου, διαδικασία που συνεπάγεται σημαντική οικονομική επιβάρυνση. Μία οικονομικότερη εναλλακτική λύση είναι η χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου, σε κατάλληλες μηχανές, ήτοι σε μηχανές διπλού καυσίμου, οι οποίες μπορούν να μεταβούν από την κατανάλωση του φυσικού αερίου στη χρήση υγρού καυσίμου και αντιστρόφως.

Η λειτουργία ενός συστήματος πρόωσης που περιλαμβάνει μηχανή διπλού καυσίμου απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και έλεγχο της λειτουργίας, συνθήκες που διευκολύνει η εγκατάσταση και λειτουργία πλήρως αυτοματοποιημένων συστημάτων. Ιδιαίτερα επιβλαβής θεωρείται οποιαδήποτε διαρροή LNG σε οποιοδήποτε τμήμα του πλοίου. Για αυτόν τον λόγο απαιτείται και η εγκατάσταση κατάλληλων δεξαμενών αποθήκευσης.

Οι περιβαλλοντικές επιδόσεις των πλοίων που αξιοποιούν LNG είναι σημαντικά καλύτερες σε σχέση με τις επιδόσεις πλοίων που καταναλώνουν υγρά καύσιμα ναυτιλίας. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου σε σχέση με τη χρήση υγρών καυσίμων μειώνονται κατά περίπου 80-85%, λόγω της καθαρότερης καύσης που πραγματοποιείται στις μηχανές διπλού καυσίμου. Οι εκπομπές οξειδίων του θείου σχεδόν μηδενίζονται, καθώς το LNG δεν περιέχει θείο, οι σωματιδιακές εκπομπές είναι πολύ μικρές, ενώ οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από την καύση περιορίζονται κατά 20-30%.

Ωστόσο, για τα συνολικά οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση του LNG σε σχέση με την περιβαλλοντική επιβάρυνση που σχετίζεται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, θα πρέπει να

λαμβάνονται υπ' όψιν οι συνολικές εκπομπές, τόσο διοξειδίου του άνθρακα, όσο και μεθανίου, αερίου με δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη 25 φορές μεγαλύτερο από εκείνο του διοξειδίου του άνθρακα, ήτοι οι εκπομπές που αφορούν όλο τον κύκλο παραγωγής και κατανάλωσης του LNG. Πέραν τούτου, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι δεν υφίστανται διαρροές μεθανίου.

Σε κάθε περίπτωση, το LNG αναδεικνύεται ως μία οικονομικότερη και οικολογικότερη εναλλακτική επιλογή στον τομέα της ναυτιλίας και, όπως σημειώθηκε με την αναφορά σε χαρακτηριστικά παραδείγματα σκαφών που λειτουργούν καταναλώνοντας LNG, η ναυπήγηση σκαφών και η κατασκευή μηχανών διπλού καυσίμου συνιστούν μία ενδιαφέρουσα τάση που μπορεί να επιφέρει σημαντικά μακροπρόθεσμα περιβαλλοντικά οφέλη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Acciario, M., 2014. *Real option analysis for environmental compliance: LNG and emission control areas* Transport. Res. Part D: Transport. Environ. 28, 41-50.
- Alderton, Patrick, 2004. *Transport, Operations and Economics*. New York, NY: Adlard Coles Nautical.
- Amit, R., Shoemaker, P., 1993. *Managing Across Borders: The Transnational solution*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Andersson, K., Brynolf, S., Lindgren F., Wilewska-Bien, M. (επιμ.), 2016. *Shipping and the Environment: Improving Environmental Performance in Marine Transportation*. Berlin: Springer-Verlag.
- Bengtsson, S., Andersson, K., Fridell, E., 2011. *A comparative life cycle assessment of marine fuels: liquefied natural gas and three other fossil fuels*. Proc. Inst. Mech. Eng., Part M: J. Eng. Maritime Environ. 225(2), 97–110.
- Bose, B.K., 1997. *Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications*. New York, NY: IEEE Press.
- Boylston, J., 2012. *Evaluating the use of Liquefied Natural Gas in Washington State Ferries – Final Report*, Washington, DC.
- Brynolf, S., Magnusson, M., Fridell, E., Andersson, K. 2014. *Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels*. Transp. Res. Part D: Transp. Environ., 6–18.
- BP, 2015. *Natural gas production* [online] Available at: <<http://www.naturalgasintel.com/articles/102617-bp-shales-lift-us-to-no-1-global-natgas-oil-producer>> [Accessed Date 7 March 2018].
- Chatzinikolaou, S., Ventikos, N.P., 2014. *Applications of Life Cycle Assessment in Shipping*. Istanbul, INT-NAM. Conference Paper.
- Cheremisinoff, T.P., 2002. *Handbook of Air Pollution Prevention and Control*. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann.
- Cozzani, V., Rota, R., Tugnoli, A., Busini, V., Bubbico, R., Salzano, E., Uguccioni, G., 2011. *Safety of LNG Regasification Terminals: the Blue Book Approach*. Chemical Engineering Transactions 34, 1105-1110.

Dvornik, J., Dvornik, S., 2014. *Dual-Fuel-Electric Propulsion Machinery Concept on LNG Carriers*. Trans. Marit. Sci. 2, 137-148.

Gold, T., 1985. *The Origin of Natural Gas and Petroleum and the Prognosis for Future Supplies*. Annual Review of Energy 10, 53-77.

E-naftilia, 2015. *Τα 10 σημαντικότερα πλοία με καύσιμο LNG*. [online] Available at: <<http://www.e-naftilia.gr/ta-simantikotera-ploia-me-lng-gia-kausimo/>> [Accessed Date 25 March 2018].

Eyring, V., Corbett, J., Lee D.S., Winebrake, J.J., 2007. *Brief summary of the impact of ship emissions on atmospheric composition, climate, and human health. Document submitted to the Health and Environment sub-group of the International Maritime Organization*. London: IMO Reports.

Guo, B., Ghalamor, A., 2005. *Natural Gas Engineering Handbook*. Houston, TX: Gulf Publishing Company.

IMO, 2000. *International code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk: ICG code [M]*. London: IMO.

IMO, 2014. *Third IMO GHG Study 2014*. London: International Maritime Organization (IMO).

Kamarudin, A., 2012. *Greek Shipping: Navigating the Financial Storm*. Lehigh University Perspectives on Business and Economics.

Kuiken, K., 2012. *Diesel Engines for ship propulsion and power plants from 0 to 100,000 kW*. Groningen: Taget Global Energy Training.

Kunreuther, H.C., Ley, E.V. (επιμ.), 2012. *The Risk Analysis Controversy: An Institutional Perspective*. Berlin: Springer-Verlag.

Licari, F.A., Weimer, C.D., 2011. *Risk-based siting considerations for LNG terminals- Comparative perspectives of United States & Europe*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24, 736-752.

Jafarzadeh, S., Paltrinieri, N., Utne, I.B., Ellingsen, H., 2017. *LNG-fuelled fishing vessels: A systems engineering approach*. Transportation Research Part D 50, 202-222.

- MAN Diesel & Turbo, 2018. *All Exhibitions*. [online] Available at: <<https://www.mandieselturbo.com/press-media/Calendar/exhibitions-conferences>> [Accessed Date 18 March 2018].
- Marinetraffic, 2018. *Vessels*. [online] Available at: <www.marinetraffic.com> [Accessed Date 25 March 2018].
- Mokhatab, S., Mak, J.Y., Valappil, J.V., Wood, D.A., 2014. *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Oxford: Gulf Professional.
- Molland, A.F., 2008. *The Maritime Engineering Reference Book; A Guide to Ship Design, Construction and Operation*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Posplech, P., 2013. *Full Speed Ahead with Gas*. MarineNews,72.
- RAE, 2014. *2014 National Report to the European Commission*. Athens: RAE Reports.
- Satellitoday, 2017. *Tote Maritime Selects Orbcomm's VesselConnect for Remote Monitoring*. [online] Available at: <<https://www.satellitoday.com/telecom/2017/05/09/tote-maritime-selects-orbcomms-vesselconnect-remote-monitoring/>> [Accessed Date 9 April 2018]
- Seamanship International, 2006. *LNG Operational Practice*. Livingston: Witherbys Publishing.
- Shin, S., Lee, Y., Song, K., Jonnggeol, N., Park, S., Lee, Y., Lee, C.-J., Han, C., 2016. *Design and economic analysis of natural gas hydrate regasification process combined with LNG receiving terminal*. Chemical Engineering Research and Design 112, 64-77.
- Sifnaios, K., 2014. *Greek Natural Gas Market: From Birth to Maturity*. [online] Available at: <<http://www.international-bc online.org/uploads/>> [Accessed Date 19 November 2015].
- Skjong, R., Vanem, E., Oyvind, E., 2005. *Design, Operation and Regulation for Safety*. Hamburg: SAFEDOR Project Risk Evaluation Criteria (IP-516278).
- Schinas, O., Butler, M., 2016. *Feasibility and commercial considerations of LNG-fueled ships*. Ocean Engineering 122, 84-96.
- Soares, C.G., Santos, T.A. (eds.), 2015. *Maritime Technology and Engineering, Vol. 1*. Leiden: CRC Press/Balkema.
- Thomson, H., Corbett, J.J., Winebrake, J.J., 2015. *Natural gas as a marine fuel*. Energy Policy 153-167.
- Tusiani, M.D., Shearer, G., 2007. *LNG-A Nontechnical Guide*. Tulsa, OK: PennWell.

- Wärtsilä, 2018. *Wärtsilä 46DF*. [online] Available at: <<https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-46df>> [Accessed Date 9 April 2018]
- Whitmore, W.D., Baxter, V.K., Laska, S.L., 2009. *A critique of offshore liquefied natural gas (LNG) terminal policy*. Ocean & Coastal Management 52, 10-16.
- Woodward, J.L., Pitblado, R.M., 2010. *LNG Risk Based Safety: Modeling and Consequence Analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Zellner, W., Hindo, B., 2005. *Offshore technology; LNG: US moves offshore*. Petroleum Economist April 2005.
- Zellouf, Y., Bortannier, B., 2011. *First step in optimizing LNG storages for offshore terminals*. Journal of Natural Gas Science and Engineering 3, 582-590.
- Βασάλος, Ι., Λεμονίδου, Α., 2009. *Ενεργειακές πρώτες ύλες*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Βλαχογιάννης, Ι.Γ., Παπαχρήστος Δ.Α., Χαμηλοθώρης, Γ.Ε., 2009. *Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο. Αυτόματιςμοί πλοίων*. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.
- ΔΕΣΦΑ, 2013. Κανονισμοί. [online] Available at: <http://www.desfa.gr/?page_id=1224> [Accessed Date 8 March 2018].
- Κροκιδάς, Α., 1991. *Υγροποιημένο φυσικό αέριο LNG-H νέα πηγή ενέργειας στην Ελλάδα*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.