

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ**



**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ**

**στην  
ΝΑΥΤΙΛΙΑ**

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΔΙΠΛΟΥ  
ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ**

**Ευριπίδης – Χρήστος Ζησιμόπουλος**

**Διπλωματική Εργασία**

**που υποβλήθηκε στο Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών  
του Πανεπιστημίου Πειραιώς ως μέρος των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού  
Διπλώματος Ειδίκευσης στη Ναυτιλία**

**Πειραιάς  
Σεπτέμβριος 2017**

## ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / COPYRIGHT

«Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολοκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού, που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος, που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου».

## ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

«Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη ΓΣΕΣ του τμήματος Ναυτιλιακών Σπουδών Πανεπιστημίου Πειραιώς σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Ναυτιλία.

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

- Τζαννάτος Ερνέστος (Επιβλέπων)
- Τσελέντης Βασίλειος – Στυλιανός
- Σαμιώτης Γεώργιος

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα».

## Περιεχόμενα

---

Περιεχόμενα .....	3
Εικόνες.....	4
Πίνακες .....	6
Διαγράμματα.....	7
Περίληψη.....	8
1. Υπόβαθρο.....	10
2. Στρατηγικές Συμμόρφωσης με τους Κανονισμούς.....	17
3. Χαρακτηριστικά Πλοίων Καύσης LNG .....	27
4. Οικονομικοτεχνική μελέτη .....	60
5. Συμπεράσματα-Επίλογος.....	94
Βιβλιογραφία.....	97
Web Sites.....	99

## Εικόνες

---

Εικόνα 1 Κανονισμοί για την επιβολή ορίων περιεκτικότητας σε θείο, σύμφωνα με τις προθεσμίες που ορίζονται στο παράρτημα VI της MARPOL .....	13
Εικόνα 2 Απαιτήσεις Tier I-II-III για τις εκπομπές NOX .....	14
Εικόνα 3 Συνολική επισκόπηση όλων των επερχόμενων περιβαλλοντικών κανονισμών για τη βιομηχανία της ναυτιλίας .....	14
Εικόνα 4 Υφιστάμενες και πιθανές μελλοντικές περιοχές ECA's .....	16
Εικόνα 5 Μια τυπική σχεδίαση “SOX scrubber system” .....	18
Εικόνα 6 Σύγκριση εκπομπών NOX,SO2,CO2,PM των εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων .....	21
Εικόνα 7 Αποτελέσματα έρευνας μεταξύ πλοιοκτητών για την επιλογή συμμόρφωσης με τους περιορισμούς για SOx .....	23
Εικόνα 8 Τιμές καυσίμων Gasoline, Gas oil και Heavy fuel oil όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Ρότερνταμ .....	24
Εικόνα 9 Τιμές φυσικού αερίου σε ΗΠΑ, Μεγάλη Βρετανία, Γερμανία και Ιαπωνία ....	25
Εικόνα 10 Τιμή πώλησης του LNG στην Ιαπωνία, Κίνα, Ηνωμένο Βασίλειο και στην Ισπανία.....	26
Εικόνα 11 Rolls Royce Bergen C26:33 .....	27
Εικόνα 12 Wartsila 34DF.....	27
Εικόνα 13 Κύκλος Otto .....	28
Εικόνα 14 Αναλογία καυσίμου σε διάφορες καταστάσεις φόρτωσης .....	29
Εικόνα 15 Σύστημα έγχυσης καυσίμου χαμηλής πίεσης.....	30
Εικόνα 16 Κύκλος Diesel.....	31
Εικόνα 17 Σύστημα έγχυσης καυσίμου.....	32
Εικόνα 18 Κύκλος Otto/Miller .....	34
Εικόνες 19 Δεξαμενή LNG.....	38
Εικόνα 20 Δεξαμενή τύπου A.....	40
Εικόνες 21 Δεξαμενή LNG Τύπου B .....	40
Εικόνα 22 Δεξαμενή LNG τύπου C .....	41
Εικόνα 23 Δεξαμενή double skinned.....	42
Εικόνα 24 Δεξαμενή bilobe .....	42
Εικόνα 25 Μονάδα καύσης αερίου .....	46
Εικόνα 26 Γενική διάταξη πλοίου που χρησιμοποιεί LNG ως καύσιμο .....	49
Εικόνα 27 Η ελάχιστη απόσταση της δεξαμενής από τη γάστρα .....	50
Εικόνα 28 Ελάχιστες αποστάσεις των δεξαμενών .....	50
Εικόνα 29 Περιορισμοί στην τοποθέτηση των δεξαμενών.....	51

<b>Εικόνα 30 Τα όρια πλήρωσης για διάφορες πιέσεις της βαλβίδας αποσυμπίεσης.....</b>	<b>52</b>
<b>Εικόνα 31 Σχηματική αποτύπωση ενός συστήματος αερίου καυσίμου με δεξαμενή μόνωσης κενού και cold box .....</b>	<b>54</b>
<b>Εικόνα 32 Σχηματική αποτύπωση συστήματος αερίου καυσίμου με συμπιεστή .....</b>	<b>55</b>
<b>Εικόνα 33 Σχηματική αποτύπωση ενός υψηλής πίεσης συστήματος καυσίμου για δίχρονες μηχανές.....</b>	<b>56</b>
<b>Εικόνα 34 Διάταξη συστήματος μηχανής διπλού καυσίμου από LNG carrier .....</b>	<b>56</b>
<b>Εικόνα 35 Διάγραμμα απεικόνισης του engine room .....</b>	<b>57</b>
<b>Εικόνα 36 Τυπική διάταξη GVU room της Wärtsilä .....</b>	<b>58</b>
<b>Εικόνα 37 Σκαρίφημα Κύρια Μηχανή Διπλού Καυσίμου Τύπου:Wärtsilä 6X62DF .....</b>	<b>63</b>
<b>Εικόνα 38 Βοηθητική Μηχανή Τύπου:MAN 6L23/30DF .....</b>	<b>65</b>
<b>Εικόνα 39 Δεξαμενή LNG Τύπου C .....</b>	<b>66</b>
<b>Figure 40 Διαδρομή Gothenburg (Σουηδία)-Riga (Λετονία) .....</b>	<b>70</b>
<b>Εικόνα 41 Τιμές LNG ανά τον κόσμο για το μήνα Απρίλιο του 2017 .....</b>	<b>74</b>

---

## Πίνακες

---

Πίνακας 1 Υφιστάμενες περιοχές ECA.....	15
Πίνακας 2 Η αναλογία καυσίμου στις διάφορες φορτώσεις μηχανής.....	32
Πίνακας 3 Μείωση ρύπων σε σχέση με τους κινητήρες καύσης LNG .....	35
Πίνακας 4 Τύποι δεξαμενών LNG .....	37
Πίνακας 5 Κύρια Χαρακτηριστικά Bulk Carrier.....	61
Πίνακας 6 Κύρια Μηχανή Διπλού Καυσίμου Τύπου:Wärtsilä 6X62DF .....	62
Πίνακας 7 Μέσα για τον περιορισμό SOx και NOx.....	64
Πίνακας 8 Καταναλώσεις Κύριας Μηχανής και Βοηθητικών Μηχανών.....	70
Πίνακας 9 Διαδρομή Gothenburg-Riga-Gothenburg.....	71
Πίνακας 10 Η ζήτηση σε LNG και pilot fuel για την εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου ταξιδιού .....	72
Πίνακας 11 Η ζήτηση σε Diesel για την εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου ταξιδιού .....	73
Πίνακας 12 Τιμές Καυσίμων (\$/ton).....	74
Πίνακας 13 Τιμές Καυσίμων (€/ton).....	75
Πίνακας 14 Η ζήτηση σε MGO για την εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου ταξιδιού.....	75
Πίνακας 15 Κόστος Ταξιδιού για MGO .....	76
Πίνακας 16 Κόστος Ταξιδιού για LNG .....	76
Πίνακας 17 Επενδυτικό κόστος σεναρίου χρήσης MGO .....	77
Πίνακας 18 Επενδυτικό κόστος σεναρίου χρήσης LNG.....	77
Πίνακας 19 Υπολογισμός Επενδυτικού Κόστους Σεναρίων .....	78
Πίνακας 20 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου LNG .....	81
Πίνακας 21 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου MGO.....	81
Πίνακας 22 Υπολογισμός NPV-IRR .....	83
Πίνακας 23 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου LNG .....	85
Πίνακας 24 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου MGO.....	85
Πίνακας 25 Υπολογισμός NPV-IRR .....	87
Πίνακας 26 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου LNG .....	89
Πίνακας 27 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου MGO.....	89
Πίνακας 28 Υπολογισμός NPV-IRR .....	90

---

## Διαγράμματα

---

Διάγραμμα 1 Επενδυτικό Κόστος Σεναρίων .....	79
Διάγραμμα 2 Κόστος καυσίμου μεταξύ των δύο σεναρίων.....	82
Διάγραμμα 3 NPV-Time.....	84
Διάγραμμα 4 Κόστος καυσίμου μεταξύ των δύο σεναρίων.....	86
Διάγραμμα 5 NPV-Time.....	88
Διάγραμμα 6 Κόστος καυσίμου μεταξύ των δύο σεναρίων.....	89
Διάγραμμα 7 NPV-Time.....	91
Διάγραμμα 8 Διαφορά ετήσιου κόστους καυσίμου μεταξύ των δύο σεναρίων συναρτήση ποσοστού έκθεσης σε περιοχές ECA .....	92
Διάγραμμα 9 Διάστημα απόσβεσης σεναρίου LNG σε συνάρτηση με το ποσοστό έκθεσης σε περιοχές ECA .....	93

## Περίληψη

---

Η ναυτιλία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς στον κλάδο των μεταφορών τόσο στον εμπορικό κομμάτι όσο και στο επιβατικό. Παρ' όλα αυτά, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών αερίων ρύπων είναι τέτοιες που ήδη από τη δεκαετία του 90' θεσπίστηκαν και μέσα στην επόμενη δεκαετία τέθηκαν σε εφαρμογή αυστηρά μέτρα περιορισμού των εκπομπών αυτών. Για να είναι εφικτό τα μέτρα αυτά να εφαρμόζονται χωρίς παράλληλα να μειωθεί η δραστηριότητα της ναυτιλιακής βιομηχανίας, κρίνεται απαραίτητη η χρήση-καύση καυσίμων χαμηλών σε εκπομπές αερίων ρύπων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα εξετάσει ενδελεχώς τους υπάρχοντες κανονισμούς για τις εκπομπές αερίων ρύπων και τους ακριβείς περιορισμούς που υπόκεινται συγκεκριμένες περιοχές. Οι κανονισμοί αυτοί μοιραία οδηγούν στην εύρεση στρατηγικών συμμόρφωσης, δηλαδή εναλλακτικών επιλογών για την μείωση των εκπομπών. Οι επιλογές αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά, εστιάζοντας στην χρήση του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) ως καύσιμο για τα πλοία, τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σε σχέση με τις άλλες επιλογές αλλά και τις ελλείψεις που πρέπει να καλυφθούν τα επόμενα χρόνια ώστε να αποτελεί μια πλήρη επιλογή.

Γίνεται ακόμα εκτενής περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών ενός πλοίου καύσης LNG, παρουσιάζοντας τις κατηγορίες, τα ειδικά χαρακτηριστικά, το πλαίσιο λειτουργίας και τα προβλήματα που προκύπτουν σχετικά με την κύρια μηχανή, τις δεξαμενές και τα συστήματα λειτουργίας του πλοίου. Η παρούσα εργασία καταλήγει με μια οικονομικοτεχνική μελέτη μεταξύ δυο σεναρίων-στρατηγικών συμμόρφωσης με τους υπάρχοντες και επερχόμενους κανονισμούς. Το πρώτο σενάριο αφορά ένα πλοίο μεταφοράς ξηρού φορτίου (Bulk Carrier) και καύσης Marine Gas Oil ενώ το δεύτερο σενάριο αφορά τη μετασκευή αυτού του πλοίου και τον κατάλληλο εξοπλισμό του για καύση διπλού καυσίμου (LNG-HFO). Στο τεχνικό σκέλος γίνεται μια πλήρης περιγραφή των συνθηκών της μετασκευής, επιλογή εξοπλισμού με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τέτοια ώστε να είναι εφικτή η εφαρμογή του και η εύρυθμη λειτουργία του Bulk Carrier που επιλέξαμε αρχικά.



Η διπλωματική εργασία καταλήγει με την οικονομική αποτίμηση των δύο σεναρίων. Συγκεντρώνουμε όλα τα οικονομικά δεδομένα παρουσιάζοντας τα δύο επενδυτικά σενάρια και με βάση το κόστος της εκάστοτε αρχικής επένδυσης αλλά και τα λειτουργικά έξοδα κάθε σεναρίου καταλήγουμε στην επιλογή μιας συμφέρουσας επενδυτικής πρότασης. Χρησιμοποιούμε τόσο το κριτήριο του Payback Period (PBP) για να υπολογίσουμε τον ακριβή χρόνο απόσβεσης της επένδυσης μας, όσο και εκείνα του Net Present Value (NPV) και Internal Rate of Return (IRR) με σκοπό να συνυπολογίσουμε την αξία του χρήματος και να καταλήξουμε σε ασφαλέστερα συμπεράσματα για το αν η επένδυση είναι συμφέρουσα ή ζημιογόνα.

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι μετά από την τεχνοοικονομική μελέτη να απαντήσουμε στο ερώτημα αν η μετασκευή ενός συμβατικού πλοίου σε πλοίο καύσης LNG είναι τεχνικά και οικονομικά βιώσιμη και ανταγωνιστική σε σχέση με άλλες επιλογές.

**Key Words:**

LNG

Τεχνοοικονομική Μελέτη

Μετασκευή

Επενδυτικό Σενάριο

ECA

# 1. Υπόβαθρο

---

## 1.1. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις και Κανονισμοί

Η ναυτιλία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες του παγκόσμιου εμπορίου και αναγνωρίζεται ευρέως ως ενεργειακά αποδοτικότερος και φιλικότερος προς το περιβάλλον, σε σύγκριση πάντα με τους άλλους τρόπους μεταφοράς. Ωστόσο, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των δραστηριοτήτων των θαλάσσιων μεταφορών συνεχίζει να προβληματίζει. Εκπομπές αερίων ρύπων από τα πλοία, όπως τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG's), όζον και πρόδρομες ουσίες αερολυμάτων, οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>) και πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στις κλιματικές αλλαγές. Ιδιαίτερα οι εκπομπές SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub>, οι οποίες σχετίζονται με το καύσιμο, είναι οι κύριες αιτίες για την αύξηση των επιπέδων οξύτητας του εδάφους και του νερού αφού μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε δραστικά οξέα. Επομένως οι εκπομπές αερίων ρύπων από τη ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελούν έναν σημαντικό μέρος από τις παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων με συνεισφορά κατά το έτος 2007 περίπου 15%, 4-9% και 2,7% σε NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>, αντιστοίχως. Αξίζει να αναφέρουμε ότι μεταξύ του 1990 και του 2007, οι εκπομπές βασικών ρύπων (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM) και αερίων του θερμοκηπίου (GHGs) (κυρίως CO<sub>2</sub>) από την παγκόσμια ναυτιλία αυξήθηκαν από 585 σε 1096 εκατ. τόνους (5). Η πενταετία από το 2007 μέχρι το 2012 μας έδειξε ότι οι αντίστοιχες εκπομπές ρύπων που προκαλούνται από την παγκόσμια ναυτιλία έχουν ένα μέσο όρο που προσεγγίζει τα 1036 εκατ. τόνους, πιστοποιώντας αφενός ότι σταμάτησε αυτή η αυξητική πορεία που υπήρχε, αφετέρου ότι υπήρξε έστω και μια ελαφρά πτώση.(20)

Το 2005 οι εκπομπές σε CO<sub>2</sub> των υπολοίπων αερίων του Θερμοκηπίου από την ναυτιλία στη περιοχή της Μεσογείου υπολογίστηκαν κοντά στα 90 εκατ. τόνους. Πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι στην Μεσόγειο θάλασσα παρουσιάζεται περισσότερο από το 50% του συνόλου των εκπομπών από πλοία σε σύγκριση με τις άλλες ευρωπαϊκές θάλασσες (εντός της περιοχής European Monitoring and Evaluation Programme) (13)

Το 2008, στην Ελλάδα, οι ρύποι με βάση την κατανάλωση καυσίμων, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> και PM από τη ναυτιλία ήταν 13εκατ. τόνους περίπου, αύξηση 400% σε σύγκριση με το 1984 που ανήλθε σε περίπου 3,5 εκατ. τόνους. Συγκεκριμένα οι εκπομπές CO<sub>2</sub> υπολογίστηκαν σε περίπου 12,5 εκατ. τόνους, ενώ τα υπόλοιπα 0,5 εκατ. τόνους εκπομπών ανήκαν στα GHGs. Αναφορικά με την απογραφή των εκπομπών από πλοία εντός των ελληνικών θαλασσών υπολογίστηκε σε 7,4 εκατ. τόνους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Ελλάδα την ίδια χρονιά συνέβαλε στην ευρωπαϊκή και μεσογειακή απογραφή των εκπομπών ρύπων από τη ναυτιλία με 7,3% και 14,1%, αντίστοιχα. [21]

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλίας μπορούν να υποδιαιρεθούν σε τέσσερις κατηγορίες, όπως υποστηρίζεται από το Clean Shipping Project. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- εκπομπές SO<sub>x</sub> και PM
- εκπομπές NO<sub>x</sub>
- εκπομπές CO<sub>2</sub>
- παραγωγή αποβλήτων (στερεών και υγρών)

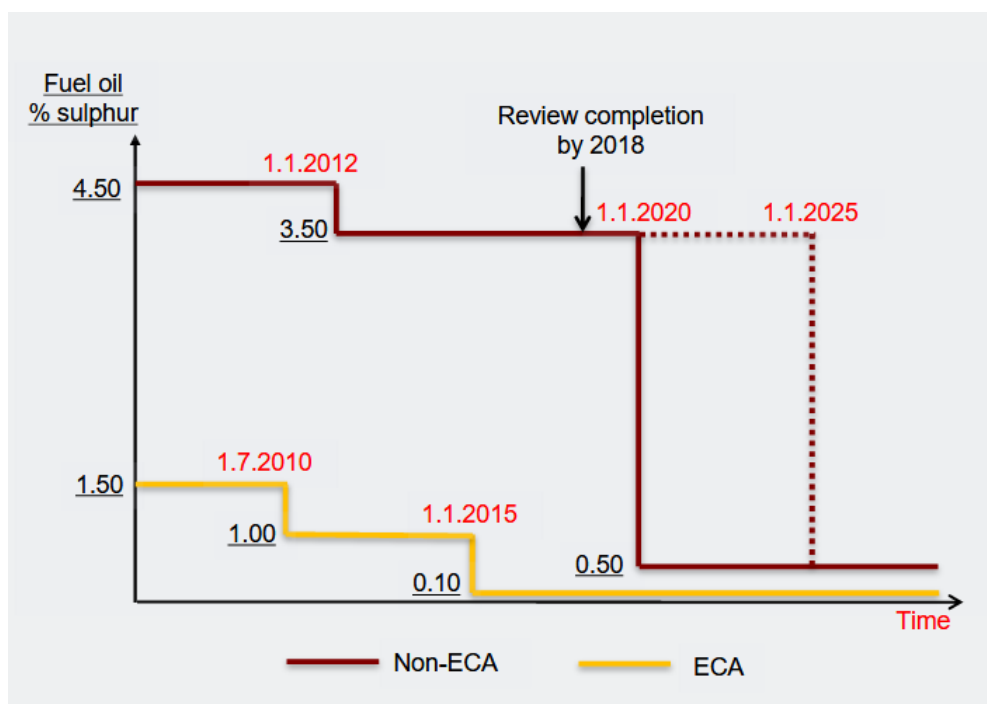
Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται αυξημένο ενδιαφέρον τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό επίπεδο σε σχέση με την περιβαλλοντική ρύπανση, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη συνειδητοποίηση της πραγματικής επιβάρυνσης από τη ρύπανση που προέρχεται από τη ναυτιλία, έχει οδηγήσει σε έντονη ανάπτυξη κανονισμών τόσο σε διεθνές όσο και εθνικό επίπεδο. Παραδοσιακά, η δράση της ναυτιλίας σχετικά με τις εκπομπές καυσαερίων στην ατμόσφαιρα και κυρίως των ρύπων που σχετίζονται σε τοπικό επίπεδο όπως εκπομπές SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και PM αποτελούσε το επίκεντρο σε διάφορα περιβαλλοντικά ζητήματα. Η εισαγωγή σε παγκόσμιο επίπεδο των Περιοχών Ελέγχου των Εκπομπών (ECAs) (αναφορά παρακάτω) είναι μια προσπάθεια για να αντιμετωπιστεί αυτό το θέμα και να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κλάδου της ναυτιλίας.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση των θαλάσσιων μεταφορών είναι υψηλά τόσο στην παγκόσμια όσο και στην ευρωπαϊκή ατζέντα. Συμφωνίες και συμβάσεις πραγματοποιούνται σε Διεθνές επίπεδο αλλά και σε περιφερειακή βάση (Ε.Ε) και αρκετές οργανώσεις ασχολούνται με τη ναυτιλία με ποικίλους τρόπους. Ο IMO είναι ένας από τους αρχαιότερους και σημαντικότερους διεθνής οργανισμούς που διέπουν την ναυτιλιακή βιομηχανία και έχει έδρα στο Λονδίνο. Ο IMO είναι υπεύθυνος τόσο για τη βελτίωση της ασφάλειας στη θάλασσα όσο και για τη διασφάλιση του

περιβάλλοντος, την προστασία της ναυτιλίας αλλά και την ανάπτυξη διεθνών κανονισμών γύρω από τη ναυτιλία με βάση τους οποίους πρέπει να συμμορφώνονται τα ναυτιλιακά κράτη.

Σύμφωνα με την MARPOL 73/78, την κύρια Διεθνή Σύμβαση για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία, η ατμοσφαιρική ρύπανση ρυθμίζεται στο Παράρτημα VI που αναφέρεται στους κανονισμούς και έχει τεθεί σε ισχύ από το 2005. Περισσότερα και αυστηρότερα μέτρα έχουν υιοθετηθεί από τον IMO σε σχέση με τα SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub> τα οποία εισάγονται με το αναθεωρημένο παράρτημα VI της MARPOL.

Η Ε.Ε. μέσω της Λευκής Βίβλου για τις μεταφορές έχει θέσει ως στόχο τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον 40% μέχρι το 2050 (σε σύγκριση με το 2005) σε απόλυτες τιμές για τον τομέα της ναυτιλίας. Ακόμα αναφέρει ότι η βιομηχανία της ναυτιλίας θα πρέπει να συνεισφέρει επίσης στη μείωση των τοπικών και παγκόσμιων εκπομπών ρύπων. Η νομοθεσία της Ε.Ε. έχει ευθυγραμμιστεί με τις απαιτήσεις του IMO με την οδηγία 2012/33/EU, η οποία τροποποίησε την οδηγία 1999/32/EC σχετικά με την περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων. Η οδηγία δεν περιέχει διατάξεις που να ρυθμίζουν τις εκπομπές των πλοίων για NO<sub>x</sub> ή PM. Επίσης έχουν ήδη εισαχθεί, μεταξύ άλλων, αυστηρότερα όρια περιεκτικότητας των ναυτιλιακών καυσίμων σε θείο που από 1.00% μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2014 έφτασαν 0.10% ήδη από την 1η Ιανουαρίου 2015, καθώς και στις θαλάσσιες περιοχές εκτός ορίων SECAs που από 3.50 % του ισχύοντος κανονισμού θα φτάσει το 0.50% από την 1η Ιανουαρίου 2020 ή, ενδεχομένως, μέχρι το 2025. Στην Εικόνα 1 παρατηρούμε τα όρια περιεκτικότητας σε θείο με τις αντίστοιχες προθεσμίες τόσο σε περιοχές SECA's όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο.



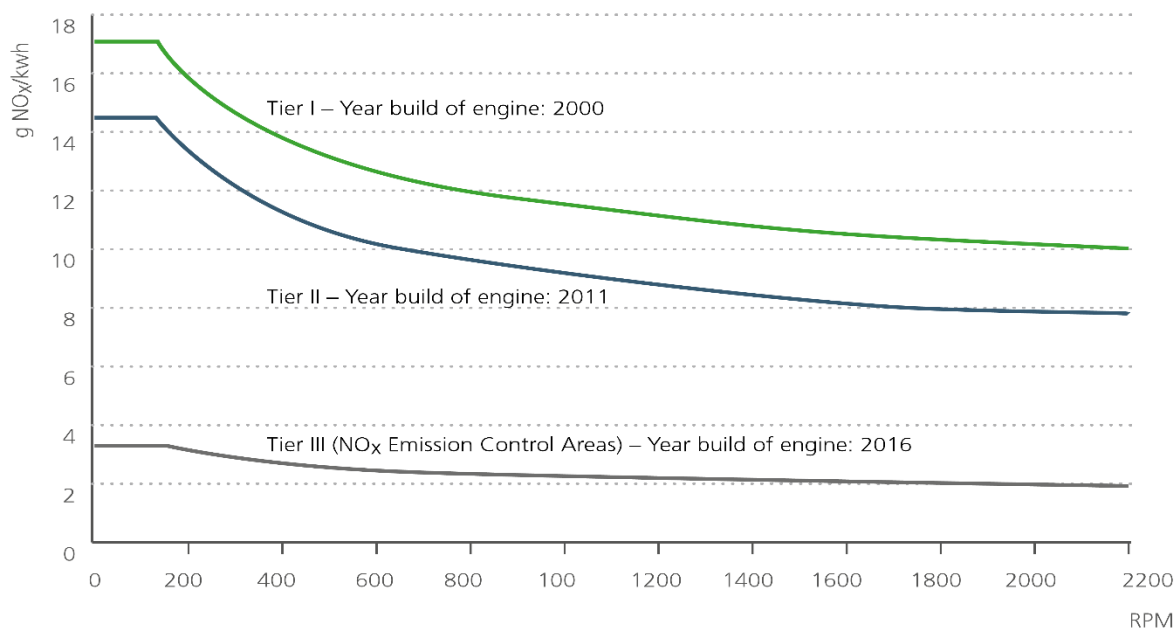
**Εικόνα 1 Κανονισμοί για την επιβολή ορίων περιεκτικότητας σε θείο, σύμφωνα με τις προθεσμίες που ορίζονται στο παράρτημα VI της MARPOL**

(Πηγή: IMO, 2016, MARPOL Annex VI – an update of international regulatory developments for prevention of air pollution and the energy efficiency of ships)

Εκτός από τους νέους κανονισμούς του IMO για τις εκπομπές θείου υπάρχουν πολλά άλλα προγράμματα που αναφέρονται στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του κλάδου της ναυτιλίας. Ορισμένα από αυτά αναφέρονται παρακάτω.

- Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Επίδοσης (EEDI)<sup>1</sup>, αποτελεί μια διεθνή οδηγία που ρυθμίζει την ενεργειακή απόδοση (νέα πλοία)
- Σχέδιο Διαχείρισης της Ενεργειακής Επίδοσης Πλοίου (SEEMP), αποτελεί μια διεθνή οδηγία για την ενεργειακή αποδοτικότητα (όλα τα πλοία)
- Κανονισμοί των Tier I, Tier II και Tier III για τις εκπομπές NO<sub>x</sub> από τους ναυτικούς κινητήρες, όπως μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 4.

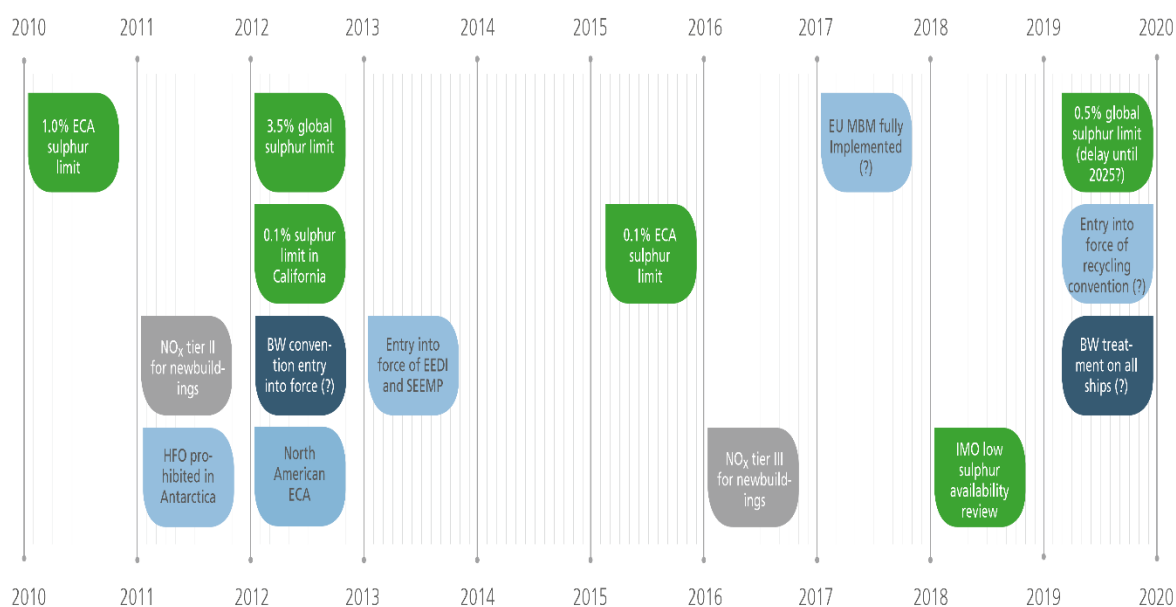
<sup>1</sup> Οι πρώτες επίσημες ρυθμίσεις για το CO<sub>2</sub> εγκρίθηκαν από τον IMO το 2011. Αυτές περιλαμβάνουν τον Σχεδιαστικό Δείκτη Ενεργειακής Επίδοσης (EEDI) και το Σχέδιο Διαχείρισης της Ενεργειακής Επίδοσης Πλοίου (SEEMP).



**Εικόνα 2 Απαιτήσεις Tier I-II-III για τις εκπομπές NOX**

(Πηγή: DNV, Shipping 2020)

Μία συνολική επισκόπηση όλων των επερχόμενων κανονισμών που αποβλέπουν στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της βιομηχανία της ναυτιλίας μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 3



**Εικόνα 3 Συνολική επισκόπηση όλων των επερχόμενων περιβαλλοντικών κανονισμών για τη βιομηχανία της ναυτιλίας**

(Πηγή: DNV, Shipping 2020)

## 1.2. Περιοχές Ελέγχου των Εκπομπών (ECAs)

Αυστηρότερες απαιτήσεις για τις εκπομπές, από αυτές που απαιτούνται σε παγκόσμιο επίπεδο, ρυθμίζονται σε ειδικά καθορισμένες γεωγραφικές περιοχές. Μια Περιοχή Ελέγχου των Εκπομπών (ECA) μπορεί να οριστεί για εκπομπές SO<sub>x</sub> ή NO<sub>x</sub>, ή και των δύο τύπων εκπομπών των πλοίων.

Από τον Αύγουστο του 2012, έχει τεθεί σε ισχύ η Περιοχή Ελέγχου Εκπομπών (ECA's) (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και PM) στη Βόρεια Αμερική, η οποία περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των ακτών των Η.Π.Α και του Καναδά καθώς και τις ακτές της Χαβάης. Το εύρος της Περιοχής Ελέγχου Εκπομπών είναι 200 ναυτικά μίλα από τις ακτές. Τον Ιανουάριο του 2014 τέθηκαν σε ισχύ οι περιοχές ECA's στην Καραϊβικής (US Caribbean ECA) καλύπτοντας και το Πουέρτο Ρίκο και οι Αμερικανικές Παρθένοι Νήσοι (US Virgin Islands).

Η Βαλτική Θάλασσα, η Βόρεια Θάλασσα και η Μάγγη έχουν ορισθεί ως Περιοχή Ελέγχου των Εκπομπών (ECA) με σκοπό τη μείωση των εκπομπών SO<sub>x</sub>, για αυτό και ονομάζονται Περιοχές Ελέγχου των Εκπομπών του Θείου, (SECA). Η Βαλτική Θάλασσα ως περιοχή (SECA) έχει τεθεί σε ισχύ από το 2006, ενώ η Βόρεια Θάλασσα και η Μάγγη τέθηκαν σε ισχύ το 2007.

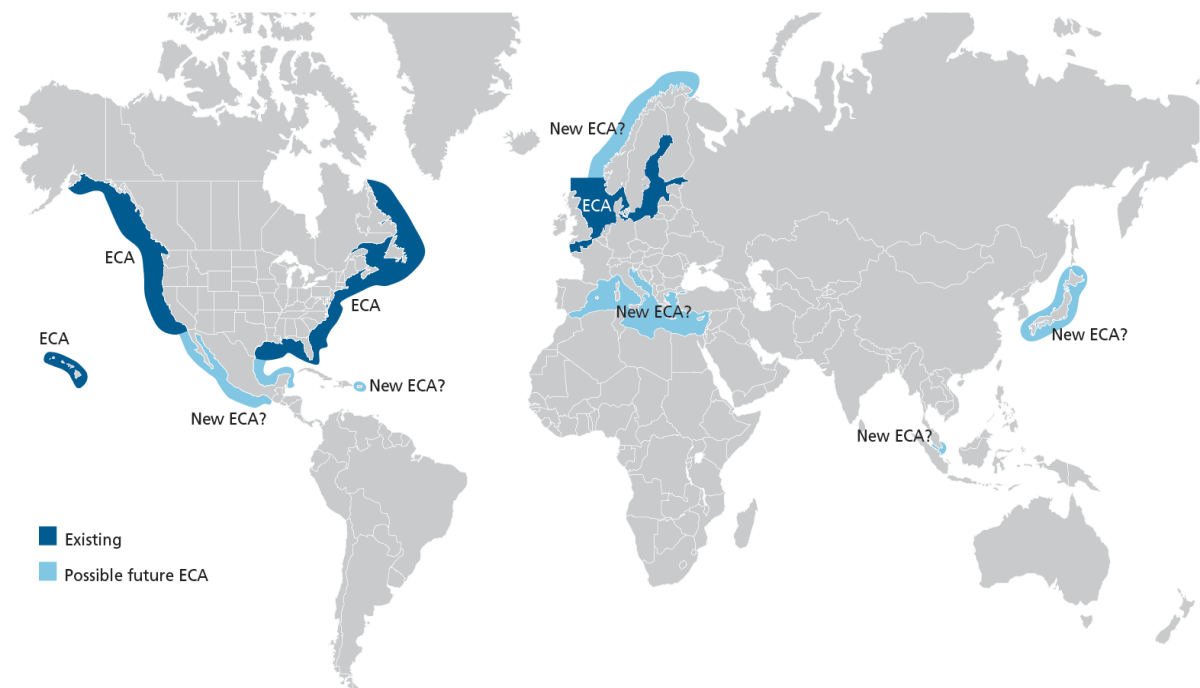
Στον Πίνακα 1 μπορούμε να δούμε συγκεντρωτικά τις περιοχές οι οποίες έχουν ορισθεί ως ECA's καθώς και τις ημερομηνίες που τέθηκαν ή θα τεθούν σε εφαρμογή.

**Πίνακας 1Υφιστάμενες περιοχές ECA**

(Πηγή: <http://blog.clean-ships.com/2017/03/09/exhaust-emissions-from-ships-and-international-regulations/>)

<b>Current ECA</b>	<b>Regulated Emissions</b>	<b>In Effect Since</b>
Baltic Sea	SO <sub>x</sub>	19 May 2006
North Sea	SO <sub>x</sub>	22 Nov 2007
North American ECA	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub>	1 Aug 2012
United States Caribbean Sea ECA	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub>	1 Jan 2014

Η μεγαλύτερη ευρωπαϊκή θάλασσα που δεν έχει οριστεί ως περιοχή SECA είναι η Μεσόγειος. Η αναμενόμενη αύξηση της κυκλοφορίας στη Μεσόγειο και η συνακόλουθη αύξηση των εκπομπών αερίων από τα πλοία την καθιστά ιδανικό υποψήφιο για τεθεί σε κανονισμούς SECA. Το πρόγραμμα SAFEMED που χρηματοδοτείται από την ευρωπαϊκή ένωση ασχολείται με τις προετοιμασίες που απαιτούνται για την υποβολή της αίτησης στον IMO με σκοπό η Μεσόγειος να καθοριστεί ως περιοχή SECA. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται οι υφιστάμενες και υπό ένταξη περιοχές ECA's.



**Εικόνα 4 Υφιστάμενες και πιθανές μελλοντικές περιοχές ECA's**

(Πηγή: DNV, <http://blogs.dnv.com/lng/2011/02/lng-for-greener-shipping-in-north-america/>)



## **2. Στρατηγικές Συμμόρφωσης με τους Κανονισμούς**

Δύο είναι οι εναλλακτικές λύσεις, εκτός από τη χρησιμοποίηση του LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο, ούτως ώστε να γίνει πλήρης συμμόρφωση με τους νέους κανονισμούς στο άμεσο μέλλον. Είτε τα πλοία που καταναλώνουν Heavy Fuel Oil (HFO) να προσθέσουν σύστημα αποθείωσης καυσαερίων, που είναι γνωστό ως Scrubber, και οδηγεί στην μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου, είτε η χρησιμοποίηση καυσίμου με αμελητέα σχεδόν περιεκτικότητα σε SO<sub>x</sub>, όπως είναι το Marine Gas Oil (MGO). Είναι προφανές ότι όλες οι εναλλακτικές θα επιβαρύνουν με πρόσθετα έξοδα τους πλοιοκτήτες.

Το σημαντικότερο στοιχείο για την επιλογή κάποιας από τις εναλλακτικές είναι η διαμόρφωση των τιμών των καυσίμων τα επόμενα χρόνια. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που θα επηρεάσουν μια τέτοια επιλογή όπως το επενδυτικό αλλά και το λειτουργικό κόστος.

### **2.1. Χρήση HFO με Scrubber**

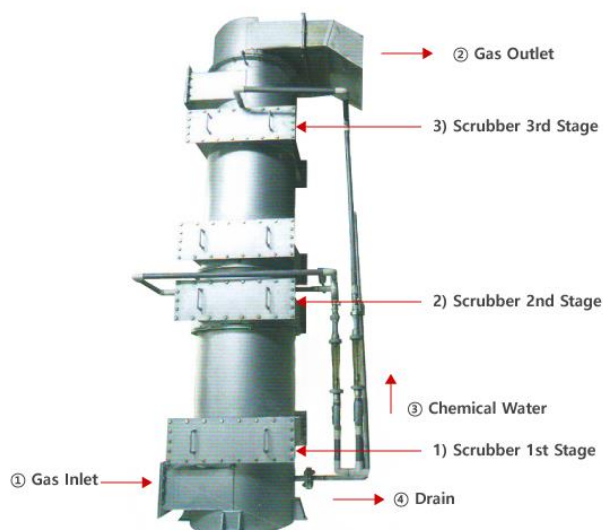
Η χρησιμοποίηση scrubber για την αφαίρεση των SO<sub>x</sub> και PM με την ενσωμάτωση είτε συστήματος Selective Catalytic Reduction (SCR) είτε Exhaust Gas Recirculation (EGR) για την μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η χρήση ενός τέτοιου συνδυασμού καλύπτει εξολοκλήρου τις απαιτήσεις τόσο σε περιοχές SECA όσο και τις απαιτήσεις Tier III σε περιοχές ECA's.

Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης “scrubber” είναι ότι δεν απαιτεί την αναβάθμιση ή οποιαδήποτε εξέλιξη της μηχανής. Ο πλοιοκτήτης έχει τη δυνατότητα να εμείνει στην καύση του βαρέως καυσίμου HFO, διατηρώντας έτσι τα λειτουργικά του κόστη σε χαμηλά επίπεδα, εκμεταλλευόμενος παράλληλα την ύπαρξη διευρυμένου δικτύου παροχής καυσίμου. Παρ' όλα αυτά το συγκεκριμένο καύσιμο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, σημείο στο οποίο συναντάται η χρηστικότητα του “scrubber”, καθώς συμβάλει δραστικά στην μείωση εκπομπών SO<sub>x</sub> ενώ επιτυγχάνεται επίσης σημαντική μείωση των PM, γεγονός που πιστοποιείται έπειτα από κατάλληλες μετρήσεις.

Σημαντικό μειονέκτημα στη χρήση της τεχνολογίας scrubber είναι η έλλειψη κατάλληλων υποδομών στα λιμάνια, ικανών να διαχειριστούν τα απόβλητα τα οποία

παράγονται κατά τη λειτουργία του. Η έλλειψη των υποδομών αυτών σε συνδυασμό με την πλήρη απουσία κανονισμών σχετικών με την ευθηνή του λιμένα για την συλλογή και εν συνεχεία την κατάλληλη καταστροφή των αποβλήτων οδήγησε τον IMO, τον Ιούλιο του 2011, να εκδώσει ψήφισμα με το οποίο παρείχε τις κατευθυντήριες γραμμές για τις εγκαταστάσεις υποδοχής κάτω από το παράρτημα VI της MARPOL. (4) Ο μοναδικός τρόπος ώστε να μην δημιουργούνται αντικίνητρα για την μη ασφαλή παράδοση των αποβλήτων στην ξηρά λόγω αδικαιολόγητης καθυστέρησης ή υπέρογκου κόστους, είναι η δημιουργία ενός συστήματος τελών για την παραλαβή των απορριμμάτων.(6)

Παρά τις ευνοϊκές επιπτώσεις του scrubber αναφορικά με τις εκπομπές θείου και PM, η χρήση του δεν επηρεάζει το ποσοστό των εκπομπών CO<sub>2</sub>, καταχωρώντας το ως βασικό μειωνέκτημα μαζί με το γεγονός ότι κάθε scrubber που χρησιμοποιείται για την εκπλήρωση των απαιτήσεων του IMO πρέπει να είναι πιστοποιημένο από τον ίδιο τον οργανισμό. Επίσης, το scrubber σαν εξοπλιστικό σύστημα είναι αρκετά ογκώδες με αποτέλεσμα να επηρεάζει σε κάποιες περιπτώσεις τη μεταφορική ικανότητα του πλοίου. Η ύπαρξη υψηλής διαθεσιμότητας του εξοπλισμού, παρ όλα αυτά, είναι σημαντική. Στην Εικόνα 5 παρατηρούμε μια τυπική διάταξη εξοπλισμού scrubber όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε τις φυσικές διαστάσεις του.



**Εικόνα 5 Μια τυπική σχεδίαση “SOX scrubber system”**

(Πηγή: <http://www.ikwangsung.com/scr-scrubber/scrubber-system/>)

## 2.2. Χρήση Marine Gas Oil (MGO)

Τα ναυτιλιακά καύσιμα που χρησιμοποιούν τα εμπορικά πλοία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα υπολείμματα αποστάξεως και τα προϊόντα κλασματικής απόσταξης. Από υπολείμματα αποστάξεως προέρχονται τα καύσιμα που συχνά αναφέρονται ως βαρύ Μαζούτ (HFO), και αυτό γιατί λόγω του υψηλού ιξώδους και της μεγάλης περιεκτικότητας σε θείο, είναι βαρύτερα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Εκείνα πάλι που ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία χωρίζονται εκ νέου σε δύο υποκατηγορίες, Marine Gas Oil (MGO) και Marine Diesel Oil (MDO). Όταν υπάρχει ανάμειξη του καυσίμου που προέρχεται από υπολείμματα αποστάξεως με καύσιμο προερχόμενο από κλασματική απόσταξη, το νέο καύσιμο που προκύπτει ονομάζεται ενδιάμεσο καύσιμο (IFO).

Μετά την εκτενή αναφορά σε προηγούμενη παράγραφο γίνεται κατανοητό ότι μπορεί να χρησιμοποιείται HFO και με την κατάλληλη επεξεργασία, είτε αυτή γίνεται πάνω στο πλοίο με τη βοήθεια scrubber είτε ακόμα γίνει πολύ νωρίτερα σε κάποιο διυλιστήριο, να πέφτει η περιεκτικότητά του σε θείο στο 0,1%. Πρακτικά όμως η πιο βιώσιμη λύση, κατά την επιλογή καυσίμου πετρελαίου για τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς SECA, είναι η χρήση καυσίμου MGO. Εάν τα διυλιστήρια έχουν πλεόνασμα σε HFO είναι πιθανό να παράγουν, μέσα από διεργασίες όπως τυρόλυσης, MGO.

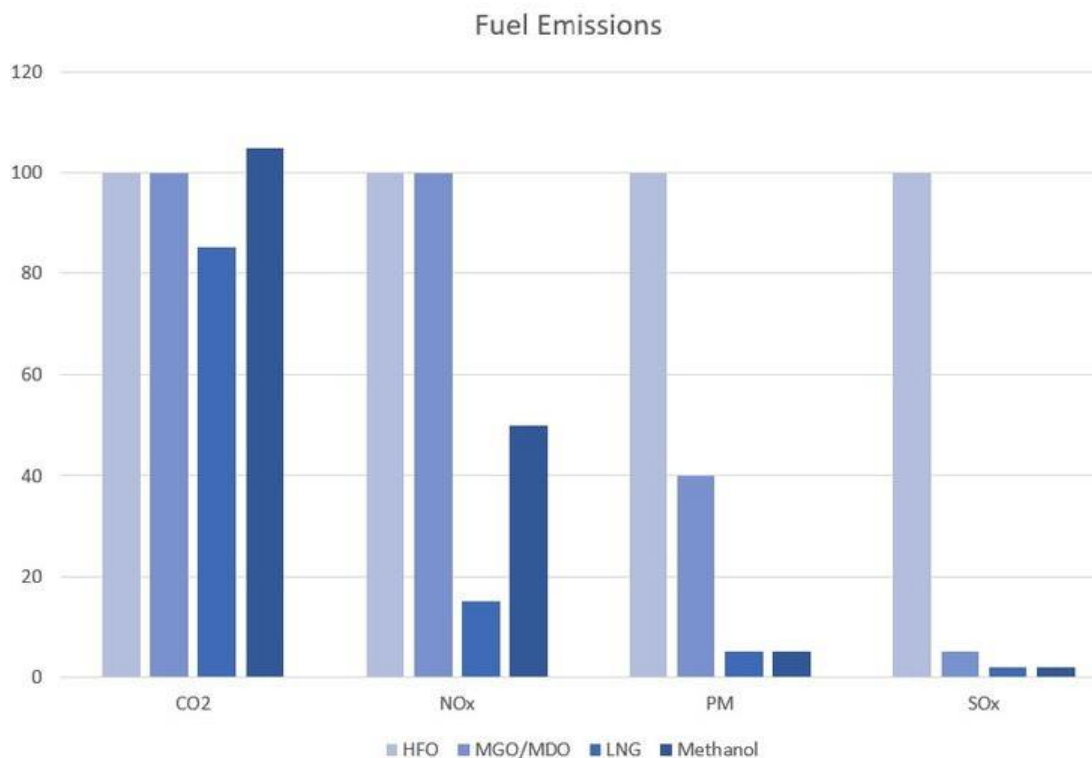
Το MGO με περιεκτικότητα σε θείο χαμηλότερο από 0,1%, είναι άμεσα διαθέσιμο και οι ιδιότητές του είναι παραπλήσιες και ως καύσιμο ντίζελ, που χρησιμοποιείται για υψηλής ταχύτητας κινητήρων ντίζελ. Το χαμηλό ιξώδες του MGO, σε σύγκριση πάντα με τα MDO και HFO, μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να απαιτεί την ψύξη του με σκοπό να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα ιξώδους και να είναι σε πλήρη αντιστοιχία με τα κριτήρια του δίχρονου συνήθως κινητήρα ντίζελ. Με τον τρόπο αυτό προλαμβάνονται φθορές των αντλιών καυσίμων και άλλων εξοπλισμών. Το ιξώδες δεν πρέπει να είναι χαμηλότερο από 2cSt, όταν το ιξώδες του νερού στους 20°C είναι περίπου 1cSt., στην είσοδο του κινητήρα ενώ ιδανικά πρέπει να κυμαίνεται πάνω από 3cSt. Η εναλλαγή από προ θερμασμένο HFO (80-150°C) σε ψυχόμενο MGO (max 35°C) κατά την είσοδο σε περιοχή SECA πρέπει να πραγματοποιείται με την απαραίτητη προσοχή στο πραγματικό ιξώδες καυσίμων ειδικότερα στους συμβατικούς κινητήρες με απουσία συστήματος έγχυσης κοινού

συλλέκτη (Common Rail Systems). Η αλλαγή από λάδι λίπανσης σε λάδι άλλης ποιότητας ενδέχεται να είναι ακόμα και απαραίτητη για μακροπρόθεσμη χρήση του MGO.

Με το MGO επιτυγχάνεται δραστική μείωση των εκπομπών SO<sub>x</sub> και PM. Οι εκπομπές των NO<sub>x</sub> και GHG παραμένουν στο ίδιο επίπεδο όπως κατά τη χρήση HFO. Όπως και στην περίπτωση scrubber, για πλήρη συμμόρφωση με τους κανονισμούς αναφορικά με τις εκπομπές NO<sub>x</sub> σύμφωνα με το Tier III, θεωρείται απαραίτητη η χρήση συστημάτων SCR και EGR. Παρόλο το γεγονός ότι η τιμή του MGO είναι σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη του HFO, πλεονεκτεί έναντι των υπολοίπων εναλλακτικών στο γεγονός ότι η χρήση του δεν απαιτεί καμία μετασκευή κινητήρα ή αντικατάσταση των δεξαμενών. Παράλληλα λοιπόν το κεφάλαιο που απαιτείται για την υιοθέτηση αυτής της εναλλακτικής είναι από ελάχιστο έως μηδενικό.

### 2.3. Χρήση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG)

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούν το LNG ως καύσιμο έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν μια αξιόπιστη λύση καθώς επίσης το LNG αποτελεί ένα φιλικό προς το περιβάλλον καύσιμο με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο. Οι εκπομπές καυσαερίων, όπως SO<sub>x</sub> και PM από τη χρήση LNG είναι αμελητέες. Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> μπορεί να μειωθούν κατά περίπου 80-90% για τετράχρονους κινητήρες Otto και 10-20% για τους δίχρονους κινητήρες. Ακόμα το LNG περιέχει λιγότερο άνθρακα από τα άλλα καύσιμα, μειώνοντας τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά περίπου 20%. Στην Εικόνα 8 μπορούμε να δούμε τα σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει τα καύσιμα LNG σε σχέση με τις άλλες εναλλακτικές λύσεις.



Εικονα 6 Σύγκριση εκπομπών NO<sub>x</sub>,SO<sub>2</sub>,CO<sub>2</sub>,PM των εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων

(Πηγή: [www.pinterest.com](http://www.pinterest.com))

Το LNG είναι το φυσικό αέριο και αποθηκεύεται σε υγρή μορφή σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία  $-162^{\circ}\text{C}$ . Το κύριο συστατικό είναι το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και άλλους υδρογονάνθρακες (αιθάνιο  $\text{C}_2\text{H}_6$ , προπάνιο  $\text{C}_3\text{H}_8$ , βουτάνιο  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), καθώς και σε μικρές ποσότητες άλλες ουσίες (άζωτο  $\text{N}_2$ , υδρόθειο  $\text{H}_2\text{S}$ , διοξείδιο του άνθρακα, κ.α.). Η ακριβής σύσταση του κυμαίνεται ανάλογα με τις γεωγραφικές περιοχές στις οποίες εντοπίζεται. Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας, το LNG θα πρέπει να αποθηκεύεται σε κρυογενικές δεξαμενές. Το LNG έχει υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης και επομένως χρειάζεται μια πρόσθετη πηγή ανάφλεξης, δηλαδή ένα “pilot fuel”. Το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και έχει μικρό εύρος αναφλεξιμότητας. Μπορεί να καεί σε δίχρονους κινητήρες αερίου ή σε τετράχρονους κινητήρες Otto.

Ωστόσο, το μεθάνιο αποτελεί ένα επιθετικό αέριο του θερμοκηπίου με σημαντικά περιβαλλοντικά μειονεκτήματα, λόγω του φαινομένου “methane slip” που παρουσιάζεται μόνο από τους τετράχρονους διπλού καυσίμου κινητήρες Otto. Η τεχνολογική ανάπτυξη προχωράει σε αυτόν τον τομέα και οι κατασκευαστές

κινητήρων ισχυρίζονται ότι το ζήτημα “methane slip” θα μειωθεί σημαντικά στο μέλλον.

Σύμφωνα με το τελικό Έγγραφο Εργασίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, SWD (2013), η χρήση του LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο αποτελεί την πιο πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση τόσο σε βραχυπρόθεσμο όσο και σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα, τουλάχιστον για τις θαλάσσιες μεταφορές μικρών αποστάσεων αλλά και για θαλάσσιες δραστηριότητες εκτός των μεταφορών, π.χ. αλιείας και υπεράκτιες υπηρεσίες.

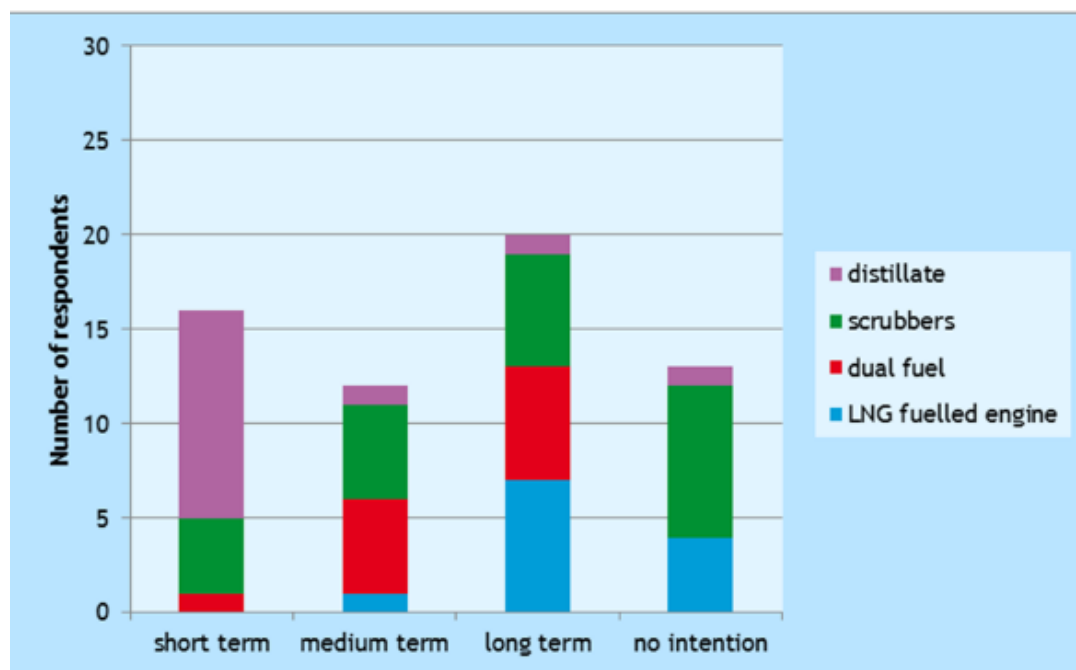
#### 2.4. Διαφορά κόστους μεταξύ εναλλακτικών λύσεων καυσίμων

Προκειμένου ο πλοιοκτήτης να συνεχίσει να χρησιμοποιεί HFO στα πλοία του, σε συνδυασμό με την αγορά και εγκατάσταση scrubber, θα επιβαρυνθεί με σημαντικό κόστος τόσο για την απόκτηση της τεχνολογίας scrubber όσο και για τον υπόλοιπο εξοπλισμό που θεωρείται απαραίτητος. Δεν συμβαίνει το ίδιο με τα λειτουργικά κόστη που επηρεάζονται ελαφρά λόγω μιας μικρής αύξησης στην κατανάλωσης καυσίμων καθώς και από τις αναγκαίες χημικές διεργασίες. Είναι προφανές ότι οι δαπάνες για την κατασκευή νεότευκτου πλοίου διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από εκείνες για την μετασκευή σε ένα ήδη υπάρχον.

Στην άλλη περίπτωση κατά τη χρήση του MGO παρατηρείται σημαντική αύξηση του λειτουργικού κόστους, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, που οφείλεται στη διαφορά της τιμής μεταξύ του HFO και του MGO. Πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δεν χρειάζονται επιπλέον επενδύσεις ή αλλαγές στο πλοίο προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το MGO. Το ίδιο συμβαίνει και με τις υποδομές ανεφοδιασμού καθώς οι ήδη υπάρχουσες μπορούν να εξυπηρετήσουν σε μεγάλο βαθμό τα πλοία που θα επιλέγουν να χρησιμοποιούν το χαμηλού ιξώδους ναυτιλιακό καύσιμο.

Αναφορικά με τη χρήση του LNG, είναι κατανοητό ότι για μετασκευή ενός συμβατικού πλοίου απαιτούνται σημαντικές αλλαγές, με μεγαλύτερες εκείνες της αλλαγής κινητήρα (από καύσης HFO σε διπλού καυσίμου) και δεξαμενών. Παρ όλα αυτά, ακόμα και η κατασκευή νέου πλοίου καύσης LNG είναι ιδιαίτερα ακριβή. Στον αντίποδα, μια επένδυση σε πλοίο με μηχανή διπλού καυσίμου ή αποκλειστικής

καύσης LNG στηρίζεται στη χαμηλή τιμή του LNG. Η διαχρονικά χαμηλότερη τιμή του υγροποιημένου φυσικού αερίου σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα είναι αυτή που καθιστά την επένδυση οικονομικά βιώσιμη. Αυτό το γεγονός πιστοποιείται και από έρευνα του Lloyds Register μεταξύ των πλοιοκτητών για τις επιλογές συμμόρφωσης με τους κανονισμούς, σύμφωνα με την οποία η χρήση LNG ως μέσο κίνησης για τα πλοία αποτελεί την πιο αξιόπιστη και ενδεδειγμένη λύση για μακροπρόθεσμες επενδύσεις. Συνοπτικά τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



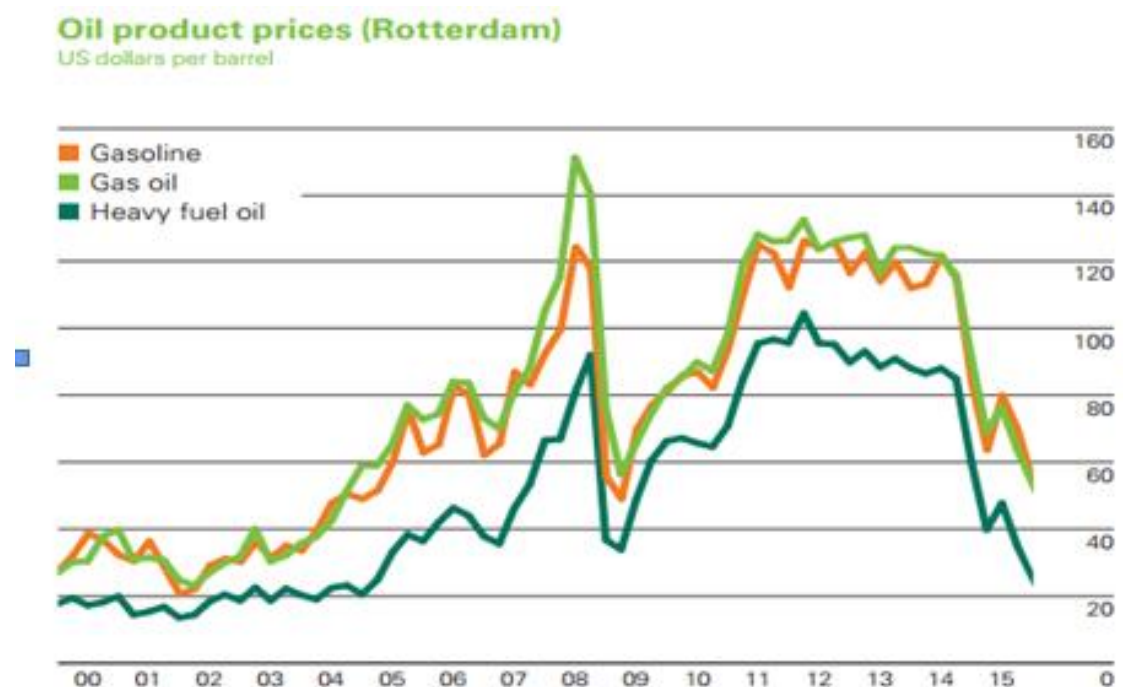
Εικόνα 7 Αποτελέσματα έρευνας μεταξύ πλοιοκτητών για την επιλογή συμμόρφωσης με τους περιορισμούς για SOx.

(Πηγή: Lloyd's Register, August 2012. LNG-fuelled deep sea shipping: The outlook for LNG bunker and LNG-fuelled newbuild demand up to 2025.)

## 2.5. Ιστορικές Τιμές και οι Σχέσεις των Τιμών του HFO,LNG και MGO

Οι τιμές παράδοσης των ναυτιλιακών καυσίμων ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με τις γεωγραφικές περιοχές στις οποίες πραγματοποιείτε ο ανεφοδιασμός. Τα πετρελαιοειδή προϊόντα είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τη αγορά του αργού πετρελαίου. Την δεκαετία μεταξύ 2003 και 2013 παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση

στις τιμές των πετρελαιοειδών, που την επόμενη ζετία μετατράπηκε σε τεράστια πτώση. Στην Εικόνα 8 μπορούμε να δούμε τις τιμές των καυσίμων Gasoline, Gas oil και Heavy fuel oil όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Ρότερνταμ από το 1994 μέχρι το 2016.

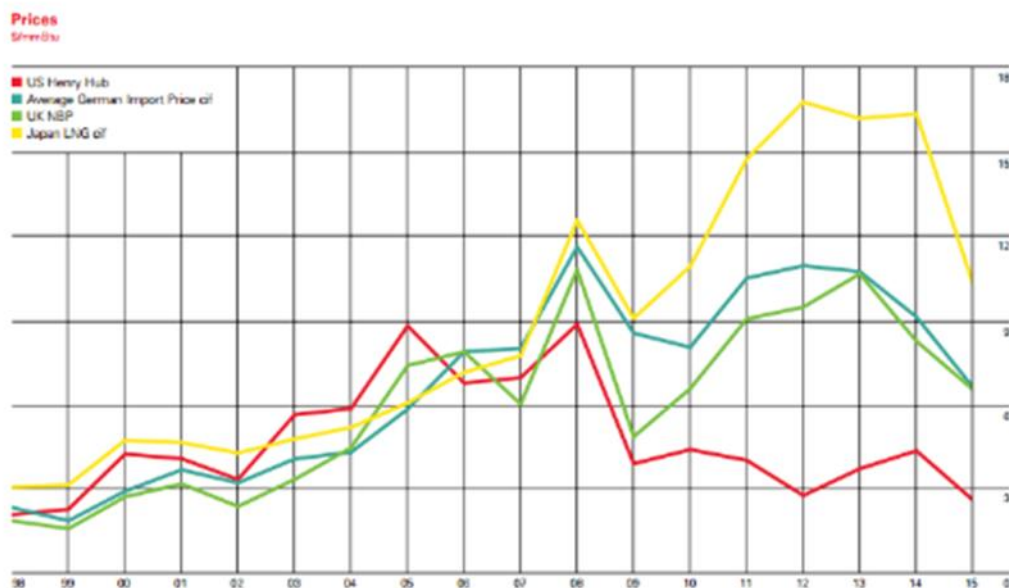


Εικόνα 8 Τιμές καυσίμων Gasoline, Gas oil και Heavy fuel oil όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Ρότερνταμ

(Πηγή: BP, 2016, Statistical Review of World Energy)

Παρατηρούμε ότι τιμές των ναυτιλιακών καυσίμων Heavy fuel oil και Gas oil από το 2009 μέχρι τα μέσα του 2013 παρουσίασαν σημαντική αύξηση και συγκεκριμένα από περίπου 40 \$/βαρέλι σε 95 \$/βαρέλι και από 60\$/βαρέλι σε 120\$/βαρέλι αντίστοιχα. Από τα μέσα του 2013 μέχρι και σήμερα παρατηρούμε πτώση στις τιμές των πετρελαιοειδών με το HFO να φτάνει κοντά στα 20\$/βαρέλι και το MGO να πέφτει κάτω από τα όρια του 2009. Στη Εικόνα 9 παρατηρούμε τη διακύμανση του φυσικού αερίου σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές.



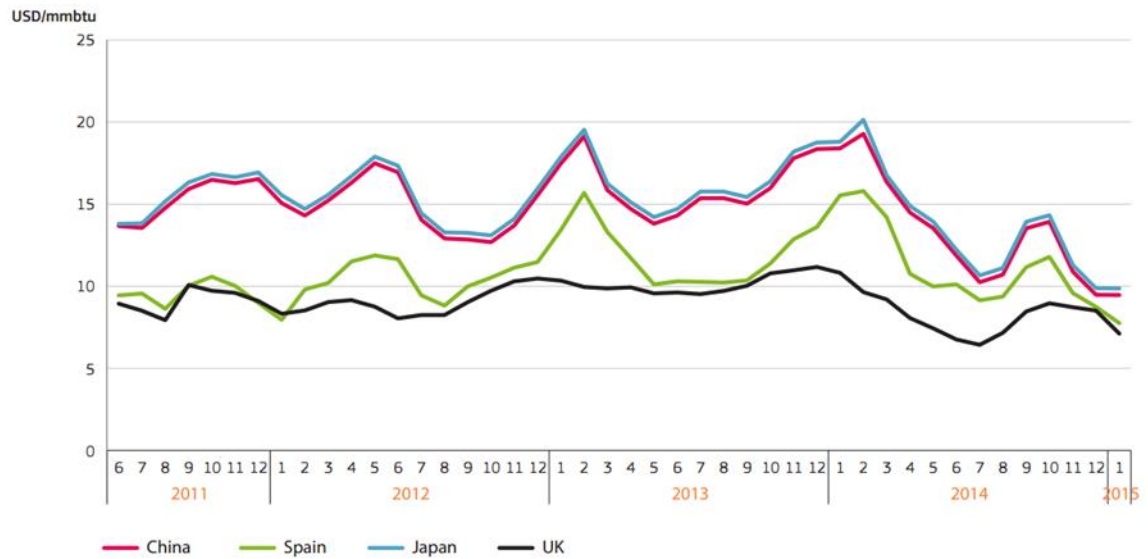


**Εικόνα 9 Τιμές φυσικού αερίου σε ΗΠΑ, Μεγάλη Βρετανία, Γερμανία και Ιαπωνία**

(Πηγή: BP, 2016, Statistical Review of World Energy)

Παρατηρούμε ότι τα τελευταία χρόνια και κυρίως μετά το 2007 υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις τιμές του φυσικού αερίου ανά γεωγραφική περιοχή. Ωστόσο παραμένει φθηνότερη πηγή ενέργειας σε σχέση με τα πετρελαιοειδή καύσιμα. Για να καταστεί αυτό κατανοητό πρέπει να αναφέρουμε ότι  $1\$/\text{barrel} \approx 5,825\$/\text{MmBtu}$ . Αντιλαμβανόμαστε ότι η διαφορά στην τιμή μεταξύ των καυσίμων έχει εξομαλυνθεί τα τελευταία 3 χρόνια κυρίως λόγω της τεράστιας μείωσης στις τιμές των πετρελαιοειδών,

Στην Εικόνα 10 που παρατίθεται παρακάτω παρατηρούμε ότι στο Ηνωμένο Βασίλειο παρουσιάζεται η φθηνότερη τιμή του LNG η οποία κυμαίνεται 6-9 \$/MmBtu από το 2011 μέχρι τον Ιανουάριο του 2015. Για την ίδια περίοδο στην Ισπανία κυμαινόταν μεταξύ 7-17\$/MmBtu ενώ η Ιαπωνία και η Κίνα προμηθεύονταν το LNG με 10-20\$/MmBtu. Η έκρηξη στο πυρηνικό εργοστάσιο της Φουκουσίμα αποτέλεσε σημείο αναφοράς στη διακύμανση των τιμών του LNG στην Ευρώπη καθώς η ζήτηση στην Ιαπωνία αυξήθηκε ραγδαία. Η Ιαπωνία μέχρι σήμερα, λόγω της ανεπτυγμένης οικονομίας της, μπορεί να συνεχίσει να πληρώνει αυτή την άνοδο των τιμών.



Note: Landed prices for LNG.

Source: Thomson-Reuters Waterborne

**Εικόνα 10 Τιμή πώλησης του LNG στην Ιαπωνία, Κίνα, Ηνωμένο Βασίλειο και στην Ισπανία**

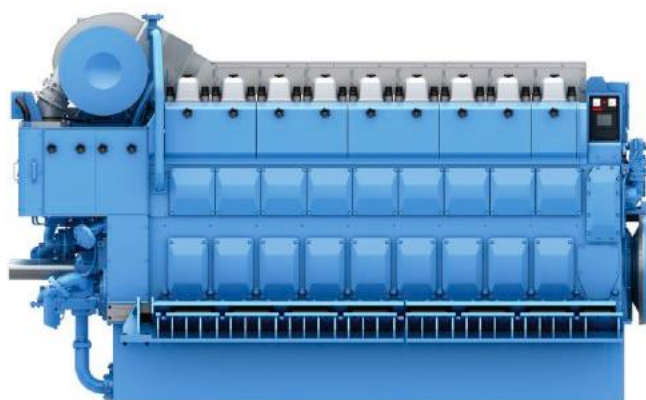
(Πηγή: European Commission, 2015, Quarterly Report Energy on European Gas Markets: Market Observatory for Energy, DG Energy Volume 7, issue 4, fourth quarter 2014)

### 3. Χαρακτηριστικά Πλοίων Καύσης LNG

---

#### 3.1. Επιλογή κινητήρων/κύριων μηχανών που χρησιμοποιούν το LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο

Η πρώτη μηχανή διπλού καυσίμου (dual-fuel engine) παραδόθηκε πριν από περίπου 12 χρόνια (GDF SUEZ GLOBAL ENERGY). Είναι λοιπόν κατανοητό ότι η τεχνολογία αυτή έχει εισαχθεί πολύ πρόσφατα στον τομέα της ναυτιλίας. Η πρώτη ουσιαστική προσέγγιση έγινε μέσω της εγκατάστασης μηχανών διπλού καυσίμου σε πλοία μεταφοράς LNG ενώ παράλληλα εγκαταστάθηκαν μηχανές καύσης φυσικού αερίου σε ferry και περιπολικά πλοία στα παράκτια της Νορβηγίας.



**Εικόνα 11 Rolls Royce Bergen C26:33**

(Πηγή: Rolls-Royce, 2012. Gas Engines Bergen C 26:33L-lean-burn gas engine, Marine)



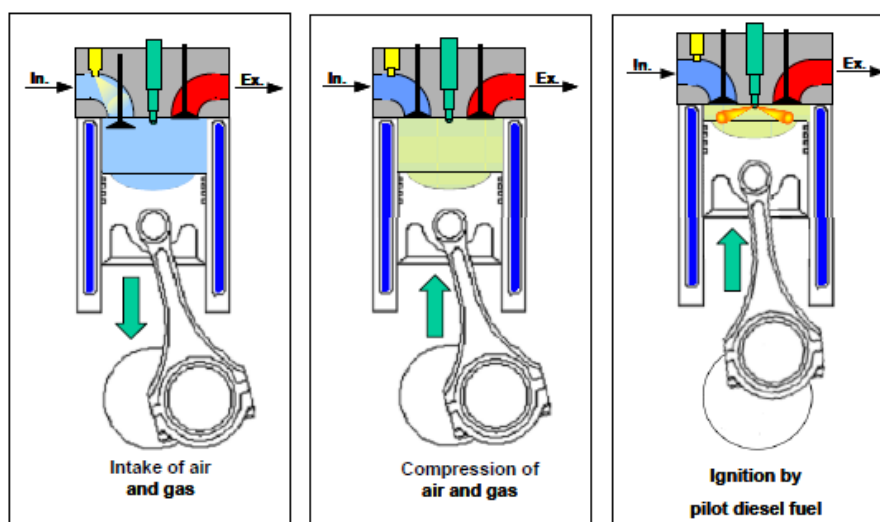
**Εικόνα 12 Wartsila 34DF**

(Πηγή:<http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-34df>)

Στην περίπτωση που ένα πλοίο έχει συμβατική μηχανή τύπου MC-C (Camshaft controlled) τότε μπορεί να υποστεί μετατροπή σε ME-GI (Electronically controlled, Gas Injection). Σε αντίθετη περίπτωση κρίνεται απαραίτητο να αντικατασταθεί από μια καινούρια μηχανή διπλού καυσίμου.

Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι μηχανών που συνάδουν με τη χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου σαν ναυτιλιακό καύσιμο. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μηχανές διπλού καυσίμου, οι οποίες λειτουργούν τόσο με πετρέλαιο όσο και με LNG. Αυτού του τύπου οι μηχανές μπορεί να είναι είτε δίχρονες είτε τετράχρονες. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι μηχανές οι οποίες χρησιμοποιούν μόνο ένα καύσιμο για τη λειτουργία τους, και αυτό βρίσκεται σε αέρια μορφή.

### 3.1.1. Τετράχρονοι κινητήρες διπλού καυσίμου (Circle Otto)



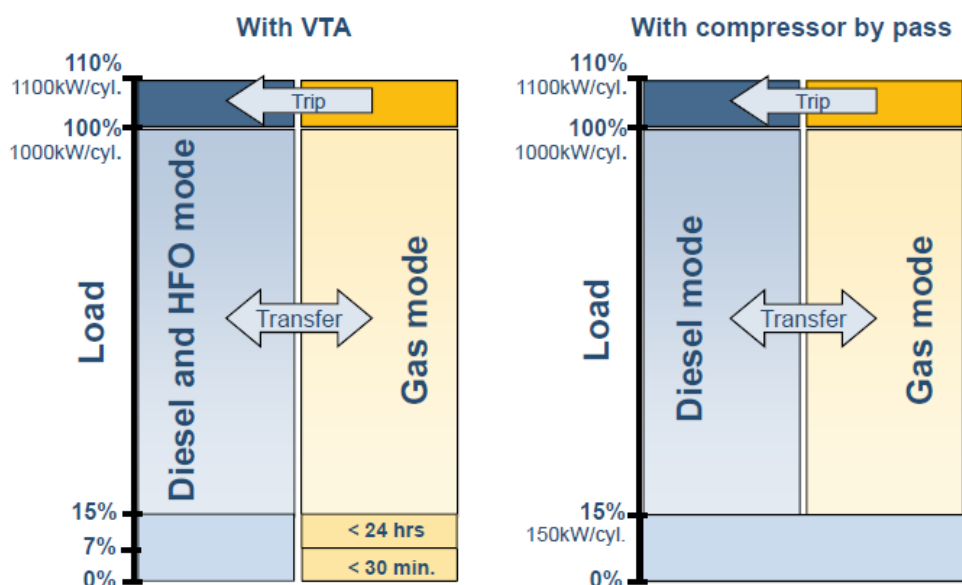
Εικόνα 13 Κύκλος Otto

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

Οι μηχανές διπλού καυσίμου αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται κυρίως σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου καθώς εκμεταλλεύονται την εξάτμιση του υγροποιημένου αερίου. Το LNG χρησιμοποιείται κυρίως όταν το πλοίο βρίσκεται σε περιοχές SECA ενώ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις γίνεται χρήση του πετρελαίου. Η αρχή λειτουργίας του κινητήρα κατά τη χρήση LNG βασίζεται στον κύκλο Otto ενώ κατά τη λειτουργία με καύσιμο πετρελαίου βασίζεται στον κύκλο DIESEL. Η πηγή ανάφλεξης κατά τη λειτουργία με LNG είναι μια μικρή ποσότητα καυσίμου, πετρελαίου, το οποίο ονομάζεται "pilot fuel" και αποτελεί περί το 1% του MCR fuel

η οποία σε πρώτη φάση διαχέεται και έπειτα αναφλέγεται από την θερμότητα που παράγεται λόγω συμπίεσης. Η καύση του πετρελαίου αποτελεί στην ουσία την πηγή ανάφλεξης για το αέριο που εγχέεται σε χαμηλή πίεση.

Στην παρακάτω εικόνα μπορούμε να παρατηρήσουμε στις διάφορες καταστάσεις φόρτωσης της μηχανής, ποια είναι η αναλογία του καυσίμου στις μηχανές DF (dual fuel) χαμηλής πίεσης.



Εικόνα 14 Αναλογία καυσίμου σε διάφορες καταστάσεις φόρτωσης

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

Ο κύκλος Otto χρειάζεται αέριο καύσιμο χαμηλής πίεσεως. Σε μηχανές λειτουργίας Otto παρατηρείται το φαινόμενο "methane slip".

Οι διαρροές του άκαυστου μεθανίου, που στην ουσία αποτελούν το φαινόμενο που αναφέρθηκε, χωρίζονται σε δυο κατηγορίες:

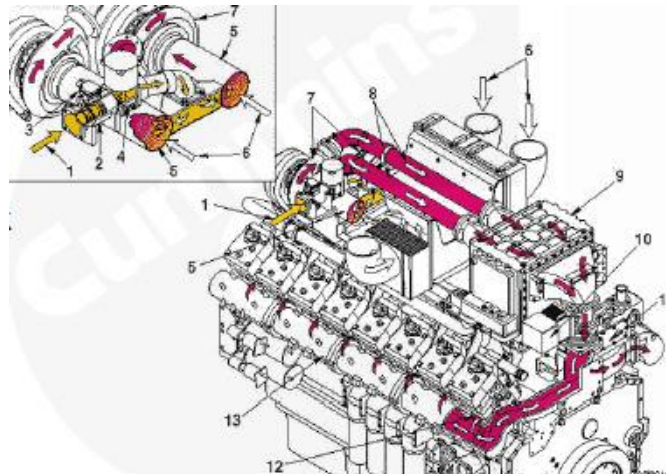
- Εκπομπές κατά τη γενικότερη λειτουργία
- Εκπομπές του κινητήρα

Στην πρώτη κατηγορία παρατηρείται ότι το μεθάνιο εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα είτε κατά τη διάρκεια ανεφοδιασμών είτε ακόμα και κατά τη διάρκεια που το φυσικό αέριο παραμένει αποθηκευμένο σε χερσαίες δεξαμενές. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται κυρίως στο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου των κινητήρων να «επιτρέπουν» ατελή καύση του μεθανίου στη μηχανή. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εκπομπές μεθανίου επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου 25 φορές περισσότερο σε σχέση με τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αποτέλεσμα αυτού

είναι μόλις λίγα γραμμάρια εκπεμπόμενου μεθανίου ανά κιλοβατώρα να επιβαρύνουν κατά 10-15% τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ενός πλοίου που καίει LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο. Έχουν γίνει αναφορές για εκπομπές μεθανίου από 4-8 g / kWh που αφορούν κινητήρες διπλού καυσίμου επιβαλλόμενης ανάφλεξης και χαμηλής πίεσης. Το φαινόμενο του methane slip δεν συμβαίνει σε κινητήρες με diesel κύκλο λειτουργίας, παρα μόνο σε κινητήρες που «υπακούουν» σε Otto κύκλο και συνήθως συναντάται σε υψηλότερο βαθμό σε μηχανές χαμηλής φόρτωσης. Σ αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι οι κατασκευαστές κινητήρων δουλεύουν αδιάκοπα στην κατεύθυνση της εξάλειψης του φαινομένου methane slip με σκοπό να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG emissions) κατά τη χρήση του LNG.

Οι μηχανές κύκλου Otto συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του IMO αναφορικά με τα οξείδια του αζώτου (Tier III) και χρησιμοποιούν συστήματα χαμηλής πίεσεως όπως:

- Pre-mixed



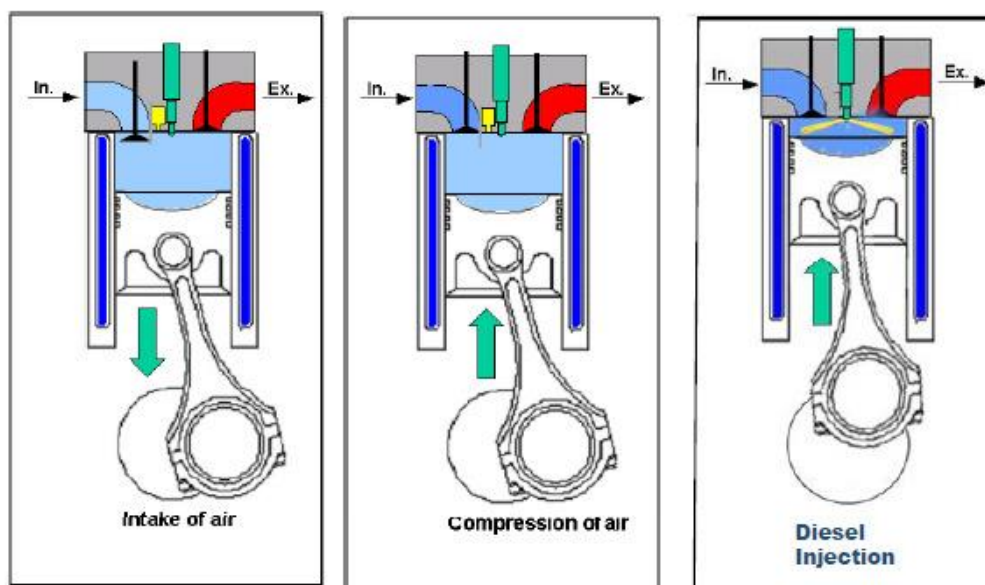
**Εικόνα 15 Σύστημα έγχυσης καυσίμου χαμηλής πίεσης**

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

- Port injection
- Lean burn
- Pilot injection
- Spark ignition
- Micro pilot

### 3.1.2. Δίχρονοι κινητήρες διπλού καυσίμου (Diesel)

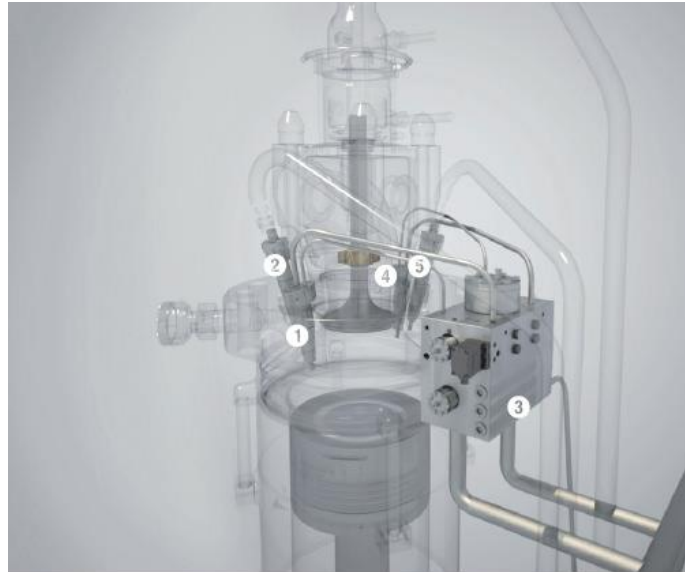
Σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας του συγκεκριμένου κινητήρα, εφαρμόζεται έγχυση αερίου υψηλής πίεσης, προσεγγιστικά κοντά στα 300 bar, μαζί φυσικά με το pilot fuel που φτάνει το 5% MCR fuel. Η χρήση pilot fuel γίνεται ώστε να γίνει πρώτα η ανάφλεξη αυτού και σαν αποτέλεσμα αυτής της ανάφλεξης να προκληθεί ανάφλεξη του αερίου. Ο κινητήρας αυτός μπορεί να καίει είτε αποκλειστικά πετρέλαιο είτε μείγμα πετρελαίου και αερίου.



Εικόνα 16 Κύκλος Diesel

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

Σ' αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι το φαινόμενο του "methane slip" είναι σχεδόν αμελητέο. Στο κύκλο Diesel οι μηχανές χρειάζονται αέριο υψηλής πίεσης, και το μόνο σύστημα που το υποστηρίζει είναι το σύστημα άμεσης έγχυσης.



1. Gas injection valve, 2. Fuel valve, 3. Gas control block (GCB), 4. Sealing oil, 5. Pilot oil i.e. HFP or DO

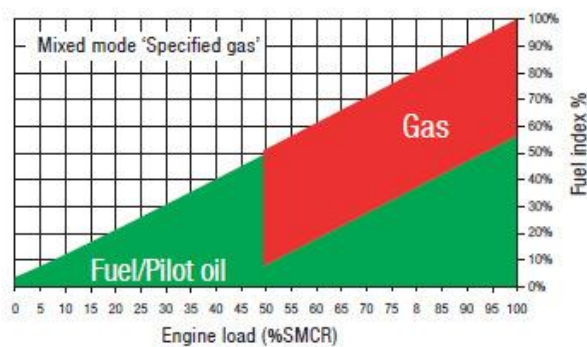
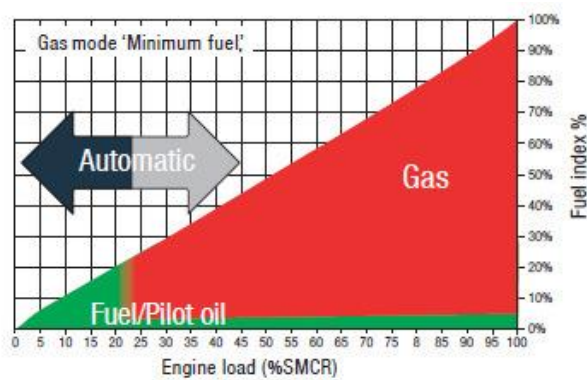
### Εικόνα 17 Σύστημα έγχυσης καυσίμου

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφεται η αναλογία καυσίμου σε διάφορες φορτώσεις μηχανής σε μηχανές διπλού καυσίμου υψηλής πίεσης.

### Πίνακας 2 Η αναλογία καυσίμου στις διάφορες φορτώσεις μηχανής

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)





### 3.1.3. Χαρακτηριστικά των μηχανών διπλού καυσίμου (χαμηλής πίεσης-υψηλής πίεσης)

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μηχανών διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσης είναι:

- Παροχή αερίου χαμηλής πίεσεως (4-5 bar)
- Υψηλή ενεργειακή απόδοση σε πλήρη φόρτιση
- Χαμηλή ενεργειακή απόδοση σε χαμηλή φόρτιση
- Χαμηλές εκπομπές NO<sub>x</sub>, γεγονός που σημαίνει πλήρη συμμόρφωση με το IMO tire III
- Το φαινόμενο methane slip αποτελεί μια πρόκληση καθώς είναι λιγοστές οι πιθανότητες για πλήρη έλεγχο της διαδικασίας καύσης λόγω της καύσης του pilot fuel
- Παρατηρείται ευαισθησία αναφορικά με την ποιότητα του αερίου
- Το φαινόμενο methane slip εντείνεται σε καταστάσεις χαμηλής φόρτισης
- Πιο αργή εκκίνηση της διαδικασίας φόρτισης της μηχανής σε σχέση με τον κινητήρα καύσης diesel λόγω καύσης του pilot fuel καθώς και ύπαρξης φαινομένου “engine knock”
- Ελαστικότητα στο μίγμα του καυσίμου

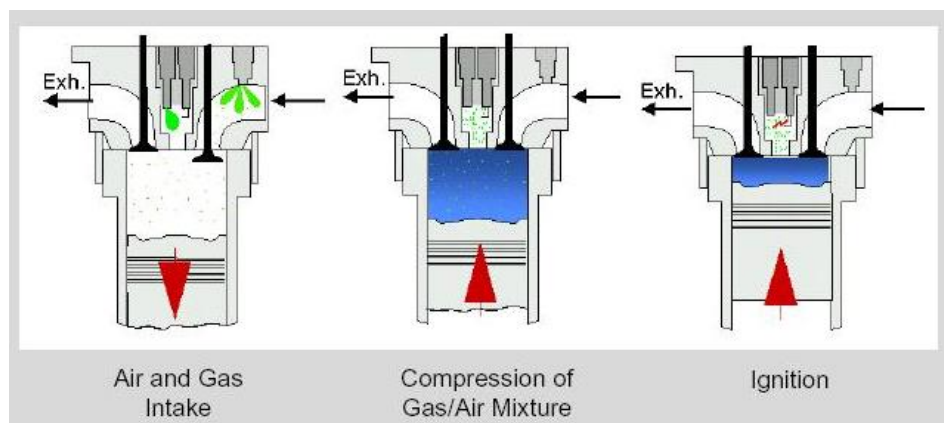
Τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά μηχανών διπλού καυσίμου υψηλής πίεσης είναι τα ακόλουθα:

- Παροχή αερίου υψηλής πίεσης (300 -350 bar) σε τετράχρονους και δίχρονους κινητήρες. Διατηρείται η απόδοση κινητήρα καύσης diesel. Δυνατότητα για βελτιώσεις στην κατανάλωση καυσίμου
- Δεν παρατηρείται το φαινόμενο methane slip ενώ παράλληλα υπάρχει μείωση των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) κατά 30% σε σχέση με τις μηχανές καύσης HFO
- Μείωση εκπομπών NO<sub>x</sub> κατά 40% (Τετράχρονοι κινητήρες)
- Δεν παρατηρείται ευαισθησία αναφορικά με την ποιότητα του αερίου
- Η άντληση του LNG σε 350 bar πίεση και η θέρμανσή του αποτελεί μια διαδικασία με χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις
- Η έναρξη της διαδικασίας φόρτισης είναι ίδια με της μηχανής καύσης diesel
- Ελαστικότητα στο μίγμα του καυσίμου

- Θεωρούνται κατάλληλες και χρησιμοποιούνται ως επι το πλείστον για μετατροπή ήδη υπαρχόντων κινητήρων

### 3.1.4. Κινητήρες φυσικού αερίου (Single Fuel Gas Engines)

Ο κύκλος Otto / Miller αποτελεί τη βάση για τη λειτουργία κινητήρων με την αποκλειστική χρήση του φυσικού αερίου ως καύσιμο. Σε αυτή τη περίπτωση εφαρμόζεται η τεχνολογία καύσης φτωχού μείγματος σε κύκλο ανάφλεξης με σπινθήρα. Το ρόλο του pilot fuel, αναλαμβάνει ένα πλούσιο μείγμα αερίου/αέρα το οποίο αναφλέγεται στον προθάλαμο καύσης δημιουργώντας έτσι πηγή ανάφλεξης για το φτωχό μείγμα που βρίσκεται στον κύλινδρο. Αποτέλεσμα χρήσης κινητήρων αυτής της τεχνολογίας είναι η διατήρηση της υψηλής απόδοσης, που αποτελεί πάντα το ζητούμενο, σε συνδυασμό με τη πλήρη συμμόρφωση με τους κανονισμούς του IMO για τα NOx.



**Εικόνα 18 Κύκλος Otto/Miller**

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να παρατηρήσουμε την επίδραση των κινητήρων καύσης LNG στις εκπομπές αερίων ρύπων. Έτσι λοιπόν ένας κινητήρας καύσης LNG σαν αποκλειστικό καύσιμο απελευθερώνει 85% λιγότερα οξειδία του αζώτου, σε σχέση πάντα με τους κοινούς κινητήρες καύσης HFO. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται και στις μεσόστροφες μηχανές διπλού καυσίμου σε αντίθεση με τις αργόστροφες όπου υπάρχει μεν μείωση εκπομπών οξειδίων του αζώτου, αλλά πολύ χαμηλότερη, φτάνοντας το 24%. Σχετική συμπίεση των τριών κινητήρων

παρατηρείται στις επόμενες δύο κατηγορίες εκπομπών αερίων. Συγκεκριμένα, η χρήση των τεχνολογιών αυτών οδηγεί σχεδόν στην εξάλειψη των εκπομπών οξειδίων του θείου, ενώ αναφορικά με το διοξείδιο του άνθρακα παρατηρείται μια μείωση της τάξεως του 20%-23% ανάλογα με τον κινητήρα.

**Πίνακας 3 Μείωση ρύπων σε σχέση με τους κινητήρες καύσης LNG**

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

	Single fuel spark ignition	Dual fuel medium speed	Dual fuel slow speed
NOx	↓ -85%	↓ -85%	↓ -24%
SOx	↓ -99%	↓ -95%	↓ -92%
CO <sub>2</sub>	↓ -20%	↓ -20%	↓ -23%
Efficiency	~ 40-48%	~ 45%	~ 50-55%

### 3.2. Δεξαμενές LNG

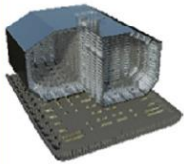




Η τεχνολογία δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων είναι ευέλικτη προσδίδοντας έτσι αρκετές επιλογές αναφορικά με τους τύπους των δεξαμενών. Οι δεξαμενές με τις οποίες θα ασχοληθούμε είναι διπλών τοιχωμάτων, γεγονός που τις κάνει αποτελεσματικότερες ως προς τη μόνωση για την καλύτερη αποθήκευση του καυσίμου. Το LNG αποθηκεύεται σε δεξαμενές με τη συμπεριφορά ενός κρύου υγρού καυσίμου στο σημείο βρασμού του. Παρ όλα αυτά, όσο αποτελεσματική και αν είναι η δεξαμενή δεν καταφέρνει να κρατάει το LNG σε υγρή μορφή από μόνη της. Λόγω της μεταφοράς θερμότητας, η πίεση στη δεξαμενή αυξάνεται ενώ το LNG εξατμίζεται. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, το αέριο που συγκεντρώνεται κρίνεται απαραίτητο να απελευθερωθεί από τη δεξαμενή με σκοπό να υπάρχει διαρκώς ένας έλεγχος της πίεσης στο εσωτερικό της δεξαμενής. Λόγω του γεγονότος ότι η εξάτμιση του LNG δεν μπορεί να μειωθεί, χρησιμοποιούνται ειδικές δεξαμενές υπό πίεση για την αποθήκευση του LNG, περιορίζοντας έτσι την ανάγκη εξαερισμού. Οι δεξαμενές αυτές είναι ανθεκτικότερες σε υψηλότερη εσωτερική πίεση με αποτέλεσμα να επιμηκύνονται τα διαστήματα μεταξύ των εξαερισμών. Στην περίπτωση των πλοίων που κινούνται με LNG ως καύσιμο, δεν είναι αναγκαίος ο εξαερισμός που

περιγράψαμε παραπάνω καθώς συνήθως το καύσιμο απελευθερώνεται σταθερά από τη δεξαμενή προς τη μηχανή με αποτέλεσμα η πίεση να διατηρείται πάντα κάτω από τα επίπεδα ανάγκης άμεσης απελευθέρωσης του αερίου. Η διαδικασία εξαέρωσης θεωρείται αναγκαία μόνο όταν το πλοίο είναι ανενεργό για μακρά περίοδο. Υπό αυτή την έννοια, σύμφωνα με το φαινόμενο της αυτόματης ψύξης, το LNG έχει τη δυνατότητα να μείνει σε σταθερή θερμοκρασία όσο η πίεση στη δεξαμενή είναι σταθερή. Τα αέρια που εξατμίζονται μπορούν να υγροποιηθούν εκ νέου και να επιστρέψουν στη δεξαμενή ή να χρησιμοποιηθούν ακόμα και από τις βοηθητικές μηχανές. Παρακάτω θα έχουμε τη δυνατότητα να αναλύσουμε το φαινόμενο της χρησιμοποίησης του εξατμιζόμενου καυσίμου μέσω της επανυγροποίησής του τόσο στις δεξαμενές αποθήκευσης LNG στο πλοίο όσο και στις αντίστοιχες δεξαμενές στο έδαφος.

Ο διαχωρισμός των δεξαμενών γίνεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με βάση τη μορφή τους. Υπάρχουν πέντε βασικές μορφές για τις δεξαμενές LNG όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Κάθε ένας από τους τύπους αυτούς έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και όπως είναι λογικό, η επιλογή του κατάλληλου τύπου γίνεται μέσα από μια σειρά περιορισμών σχετικών με το πλοίο και τα χαρακτηριστικά (π.χ. κύριες διαστάσεις, κατανάλωση κτλ.). Οι δεξαμενές LNG μπορούν να βρίσκονται είτε στο κατάστρωμα είτε στο εσωτερικό του πλοίου σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο δεξαμενών. Οι πιο συνηθισμένες δεξαμενές είναι κυλινδρικές με μόνωση κενού. Όλα τα υπάρχοντα πλοία χρησιμοποιούν δεξαμενές υπό πίεση Type C (25).

**Πίνακας 4 Τύποι δεξαμενών LNG**

(Πηγή:Unseki, T., 2013)

Tank type	Prismatic tank	Spherical tank	Cylindrical tank		Tank truck
					
IMO type	B	B or C	C		
Heat insulation	External		External	Vacuum	Vacuum
Max. pressure	0.7 bar	1 bar	10 Bar		10 Bar
Space efficiency	High	Low	Medium		Low/Medium
Gas delivery	Pumping Out		Pressure Built-Up Type		
Design cost	High	Medium	Low	Low	-
BOG treatment	Necessary		Not Necessary		
Suitable cap.	>5,000m <sup>3</sup>	>5,000m <sup>3</sup>	30-1,000m <sup>3</sup>	30-1,000m <sup>3</sup>	<100m <sup>3</sup>
Cost	High	High	Medium	Medium	Low/Medium

Τα σημεία εκείνα που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή αναφορικά με την αποθήκευση του φυσικού αερίου είναι:

- Για την διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας απαιτείται:
  - Πρόβλεψη αναφορικά με την συστολή της δεξαμενής
  - Χρησιμοποίηση κατάλληλων υλικών κατασκευής όπως είναι το ανοξείδωτο χάλυβα και το αλουμίνιο
  - Κατάλληλη μόνωση
- Εύκολη ανάφλεξη και χαμηλότερο βάρος όταν είναι πιο ζεστό σε σχέση με τον αέρα που συνεπάγεται υψηλές απαιτήσεις για κατάλληλα μέτρα ασφαλείας
- Η τοποθέτηση των δεξαμενών μέσα στο πλοίο

Δεξαμενές μεγάλης χωρητικότητας

Η παρούσα προσέγγιση των κανονισμών βασίζεται στις λεγόμενες “self-supporting tanks” όπως ακριβώς ορίζονται από το IGC code του IMO: δεξαμενές τύπου A (σχεδιάζονται σύμφωνα με την κατασκευή του πλοίου) και τύπου B (πρισματικές ή σφαιρικές) δεξαμενές είναι γενικά κατάλληλες για δεξαμενές αποθήκευσης αερίου καυσίμου αλλά οι απαιτήσεις τους σχετικά με την διατήρηση της πίεσης και των

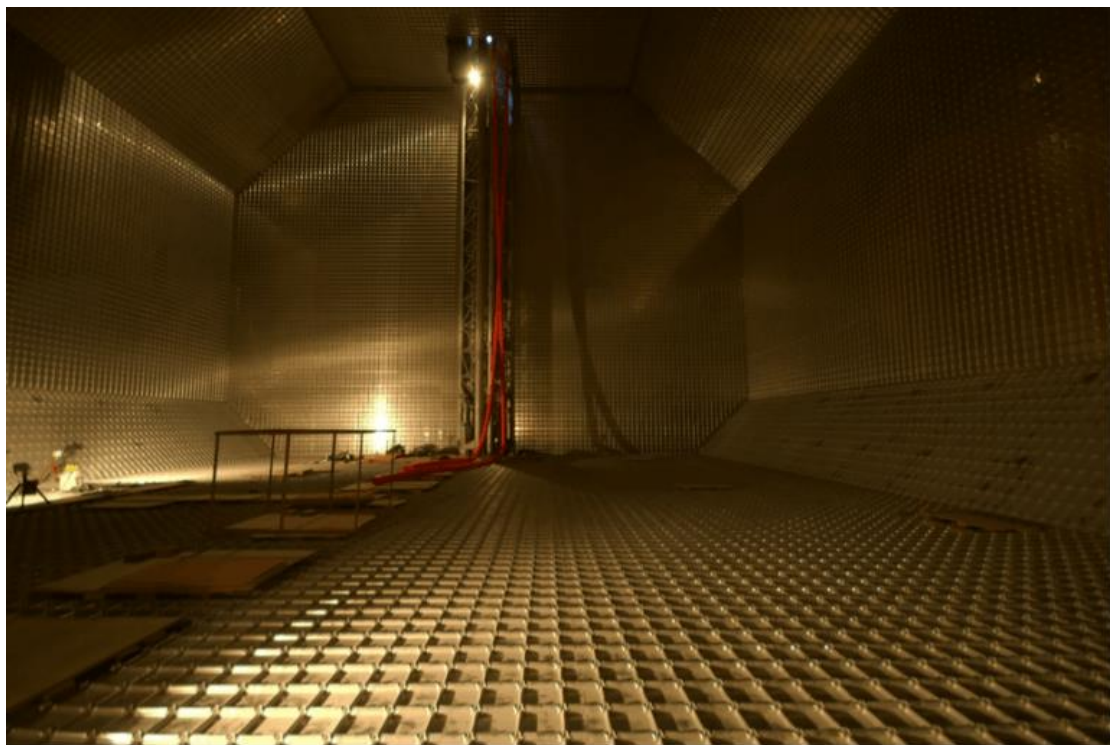
δευτερογενών φραγμάτων (secondary barrier) δημιουργούν προβλήματα που δεν έχουν ακόμα βρει λύση τεχνικά και εμπορικά. Πιθανότατα μελλοντικά όπου θα υπάρχει η δυνατότητα μεγαλύτερης αυτονομίας και άρα χρησιμοποίησης δεξαμενών αποθήκευσης LNG ,για αποκλειστική χρήση ως καύσιμο, μεγαλύτερης χωρητικότητας, να λυθούν τέτοιου είδους προβλήματα

Υπό αυτή την έννοια και λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, οι δεξαμενές τύπου C (δεξαμενές πίεσης) φαντάζουν ως η ενδεδειγμένη λύση για την αποθήκευση του συγκεκριμένου καυσίμου.

Σ αυτό το σημείο μπορεί να εξεταστεί ο δεύτερος τρόπος διαχωρισμού των δεξαμενών όπως φαίνεται παρακάτω. Σύμφωνα με αυτό το δεύτερο τρόπο υπάρχουν δύο ειδών δεξαμενές αποθήκευσης αερίου πάνω στο πλοίο:

- Οι δεξαμενές με μεμβράνη (Membrane Tanks)
- Οι ανεξάρτητες δεξαμενές (Independent Tanks)

### 3.2.1. Δεξαμενές με μεμβράνη



**Εικόνες 19 Δεξαμενή LNG**

(Πηγή: <http://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/>)

Οι δεξαμενές αυτές χρησιμοποιούν όλο το διαθέσιμο χώρο αποτελεσματικά αλλά απαιτούν την ύπαρξη δευτερογενών φραγμάτων ως μέτρων ασφάλειας σε περίπτωση διαρροής αερίου. Κατόπιν είναι ενισχυμένες με σύστημα ψεκασμού αζώτου καθώς και με ειδικό ανιχνευτή αερίου για όλες τις μονωμένες περιοχές.

#### **Πλεονεκτήματα των δεξαμενών με μεμβράνη:**

- Μεγάλη χωρητικότητα LNG
- Αποτελεί δοκιμασμένη τεχνολογία
- Ο χρόνος παράδοσης είναι πλήρως εναρμονισμένος με το χρονοδιάγραμμα του έργου μας

#### **Μειονεκτήματα των δεξαμενών με μεμβράνη:**

- Υψηλότερα ποσοστά BOG (Boil-off Gas) σε σχέση με τις δεξαμενές μόνωσης κενού, τύπου C, για συγκεκριμένη χωρητικότητα δεξαμενών.
- Άγνωστη ακόμα η συγκεκριμένη τεχνολογία για τις εσωτερικές πλωτές μεταφορές

### **3.2.2. Ανεξάρτητες Δεξαμενές**

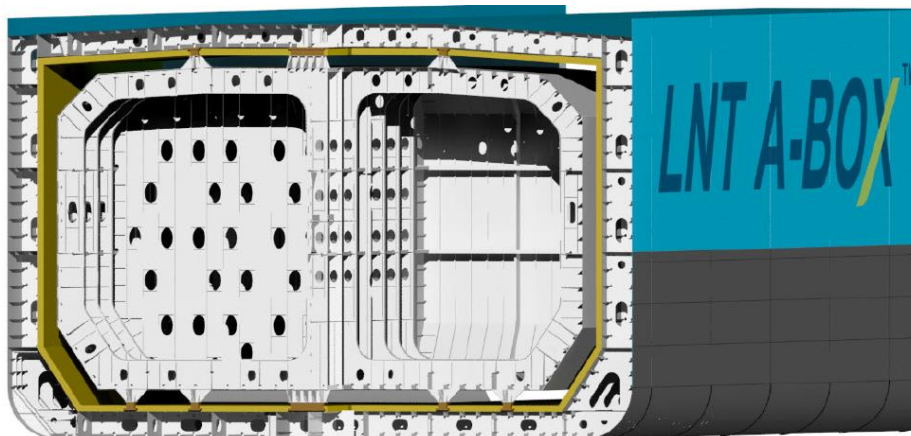
Υπάρχουν τρεις τύποι ανεξάρτητων δεξαμενών:

- Τύπος A
- Τύπος B
- Τύπος C

#### **Δεξαμενή τύπου A**

Η χρήση του συγκεκριμένου τύπου δεξαμενών είναι κατάλληλη για μεγάλες ποσότητες LNG. Είναι ατμοσφαιρικές δεξαμενές, εύκολα προσαρμόσιμες στο σχήμα της γάστρας του πλοίου και το κυριότερο πλεονέκτημά τους είναι το γεγονός ότι παρέχουν πολύ χώρο. Παρ όλα αυτά δεν χρησιμοποιούνται από πλοία καύσης LNG για την αποθήκευση του καυσίμου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι απαραίτητη η χρήση δευτερογενούς φράγματος για να αποτρέψει την πιθανότητα απελευθέρωσης

υγροποιημένου φυσικού αερίου κατά τη διάρκεια ατυχήματος. Ένα ακόμα τροχοπέδη στην χρήση αυτών των δεξαμενών είναι η ιδιαίτερα υψηλή τιμή τους.

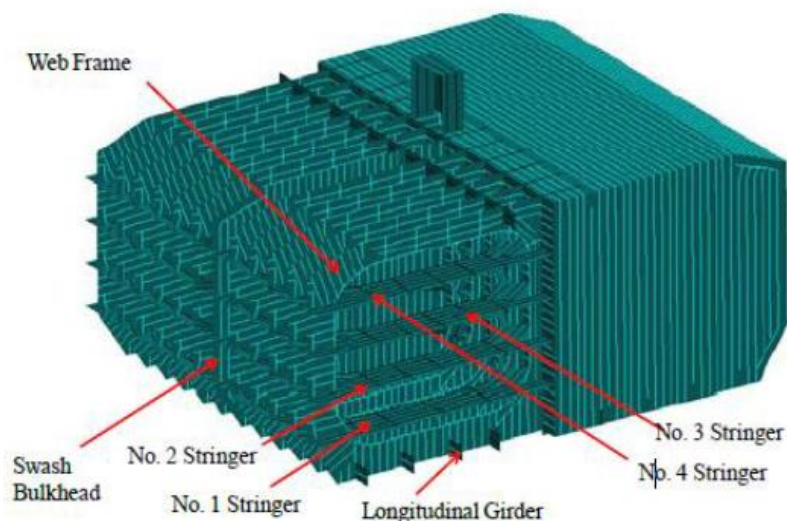


Εικόνα 20 Δεξαμενή τύπου A

(Πηγή: <http://blogs.dnvgl.com/>)

### Δεξαμενή τύπου B

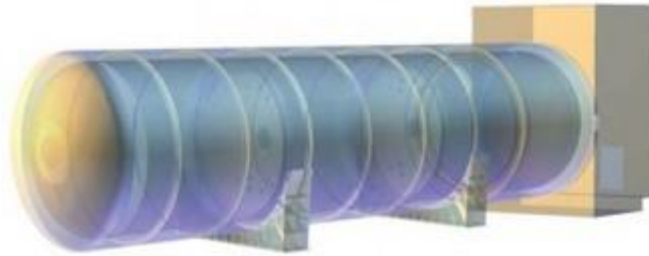
Όταν απαιτείται μεγάλη χωρητικότητα θεωρείται απαραίτητη η χρήση δεξαμενών αυτού του τύπου. Σύμφωνα με τον IGC Code, η δεξαμενή θα πρέπει να είναι έτσι τοποθετημένη ούτως ώστε να είναι εφικτή η παροχή αδρανούς αερίου, να υπάρχει δευτερογενές φράγμα καθώς και να παρέχεται επαρκής προστασία στη μεταλλική κατασκευή σε περίπτωση ατυχήματος που θα έχει σαν συνέπεια την διαρροή LNG. Το πεπιεσμένο αδρανές αέριο αποτελείται από ξηρό αέρα και αδρανές αέριο.



Εικόνες 21 Δεξαμενή LNG Τύπου B



## Δεξαμενή τύπου C



*Εικόνα 22 Δεξαμενή LNG τύπου C*

(Πηγή: <http://www.lngworldnews.com/inoxcva-gets-lng-storage-tanks-deal/>)

Η δεξαμενή τύπου C είναι η πιο συχνή στη χρήση δεξαμενή, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους. Το γεγονός αυτό είναι λογικό αφού κατασκευάζονται για χαμηλή χωρητικότητα. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η υψηλή πίεση του αερίου που φτάνει τα 5 bar, ενώ η υψηλότερη δυνατή πίεση που μπορεί να φτάσει αγγίζει τα 20 bar. Οι υψηλές πιέσεις επιτρέπουν στο καύσιμο να διαχέεται απευθείας στις μηχανές χωρίς την χρήση αντλιών

### **Πλεονεκτήματα δεξαμενών τύπου C:**

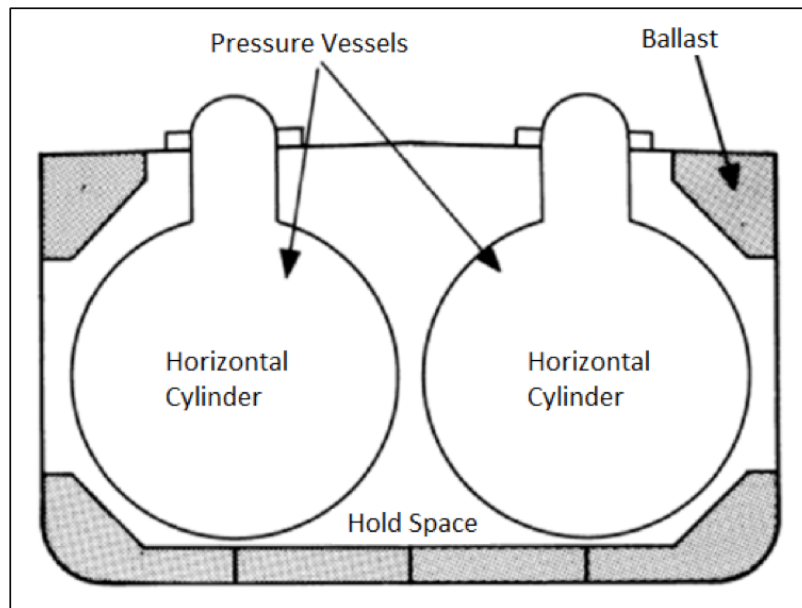
- Συγκεκριμένες δεξαμενές, πολυετής χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας
- Αναπτύσσεται πίεση ακόμα και σε μηδενική κατανάλωση
- Υψηλός ρυθμός ανεφοδιασμού
- Εύκολη εγκατάσταση

### **Μειονεκτήματα δεξαμενών τύπου C:**

- Απαιτήσεις χώρου (25)

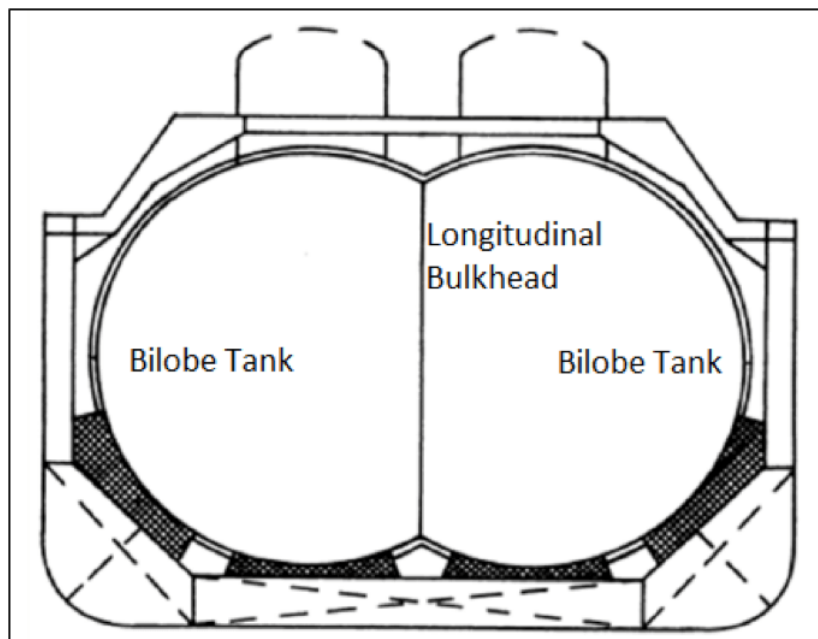
Υπάρχουν δύο τύποι δεξαμενών:

- Οι double skinned cylinders χωρητικότητας 10-10.000 m<sup>3</sup>
- Οι bilobe χωρητικότητας 100-20.000 m<sup>3</sup> (Τοποθετούνται είτε στο εσωτερικό του πλοίου είτε στο κατάστρωμα αυτού)



Εικόνα 23 Δεξαμενή double skinned

(Πηγή : <http://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/>)



Εικόνα 24 Δεξαμενή bilobe

(Πηγή: <http://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/>)

### 3.2.3. Διαχείριση του φαινομένου Boil-off Gas

Ένα σημαντικό στοιχείο για τον έλεγχο των εκπομπών μεθανίου είναι η διαχείριση του φαινομένου boil-off gas (BOG) του ήδη ψυγμένου υγροποιημένου φυσικού αερίου. Σε ατμοσφαιρική πίεση το φυσικό αέριο θα πρέπει να διατηρείται κάτω από τους  $-162^{\circ}\text{C}$  προκειμένου να βρίσκεται σε υγρή μορφή. Έτσι αποθηκεύεται και μεταφέρεται διαμέσου της εφοδιαστικής αλυσίδας σε ειδικά σχεδιασμένα και καλά μονωμένα containers. Παρ όλη την καλή μόνωση που μπορεί να υπάρχει, μέρος της θερμότητας καταφέρνει να παρεισφρήσει συνεχώς μέσα στο container. Καθώς η θερμότητα απορροφάτε, το υγροποιημένο φυσικό αέριο εξατμίζεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πίεση στο εσωτερικό της δεξαμενής αποθήκευσης. Ο ρυθμός εξάτμισης του LNG εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος, τη μέθοδο και τα υλικά κατασκευής της δεξαμενής αποθήκευσης.(8)

Για πολύ μεγάλες δεξαμενές ο ρυθμός εξάτμισης δεν ξεπερνά το 0.1 της εκατό του αποθηκευμένου LNG ημερησίως. Στον αντίποδα, για μικρότερες δεξαμενές ο ρυθμός αυτός αυξάνεται αγγίζοντας το 0.25 της εκατό την ημέρα.

Οι δεξαμενές αποθήκευσης LNG είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να δίνουν διέξοδο σε μέρος του ατμοποιημένου καυσίμου όταν η πίεση της δεξαμενής ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο όριο. Η διαδικασία αυτή είναι ωφέλιμη καθώς δεν αποσυμπιέζει μόνο τη δεξαμενή αλλά συμβάλει και στην απομάκρυνση μέρους της θερμότητας που έχει παρεισφρήσει. Αρκετές δεξαμενές LNG είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε ένα εύρος κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση και μπαίνουν σε μια διαδικασία εξαέρωσης όταν η πίεση ξεπεράσει τα 0.69 bar. Αν το LNG πρέπει να αποθηκευτεί για μακρά περίοδο, χρησιμοποιούνται συνήθως δεξαμενές υπό πίεση τύπου C ούτως ώστε να αυξηθεί ο χρόνος χωρίς να χρειαστεί εξαέρωση. Η χρήση μιας υπό πίεση δεξαμενής δεν μειώνει από μόνη της τον ρυθμό εξάτμισης του LNG αλλά αυξάνει τον χρόνο μεταξύ των εξαερώσεων καθώς μπορεί να υπομένει υψηλότερες εσωτερικές πιέσεις. Υπάρχουν πολλά τέτοια παραδείγματα, χαρακτηριστικό είναι ότι ένας κατασκευαστής προσφέρει δεξαμενές LNG που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του καυσίμου μέσω container, με μέγιστη πίεση λειτουργίας από 148 έως 345 λίβρες ανά τετραγωνική ίντσα (10.2 bar – 23.8 bar). Τόσο οι δεξαμενές με την χαμηλή πίεση όσο και εκείνες με την υψηλότερη έχουν μια επιγραφή ότι ο ρυθμός εξάτμισης φτάνει τα 0.25% ημερησίως αλλά στην πράξη η δεξαμενή με όριο πίεσης τα 10.2 bar μπορεί

να διατηρήσει το LNG χωρίς εξαέρωση για 52 μέρες την ίδια ώρα που η δεξαμενή με όριο τα 23.8 bar μπορεί να κάνει το ίδιο για 75 μέρες.

Η χρήση των υπό πίεση δεξαμενών δεν μειώνουν απαραίτητα τη συνολική ποσότητα του BOG που εξαερώνεται καθώς το LNG μεταφέρεται μέσω της εφοδιαστικής αλυσίδας αλλά στην πραγματικότητα επηρεάζουν το πότε και πώς θα γίνει η εξαέρωση. Καθώς η θερμότητα παρεισφρεί στο εσωτερικό της υπό πίεση δεξαμενής LNG και η πίεση της δεξαμενής αυξάνεται, συμβαίνει το ίδιο και με τη θερμοκρασία του υγρού. Αν το LNG αργότερα μεταφερθεί σε κάποια άλλη ατμοσφαιρικής πίεσεως δεξαμενή (σε χαμηλότερη θερμοκρασία) η παραπάνω θερμότητα θα δημιουργήσει οδηγήσει στην εξάτμιση του LNG και στην ανάγκη για εξαέρωση, γεγονός που χαρακτηρίζεται ως “flash loss”.

Το φαινόμενο του BOG δημιουργείται επίσης όταν μεταφέρεται LNG από μια δεξαμενή αποθήκευσης σε μια άλλη καθώς οι ατμοί στην άδεια δεξαμενή αφήνουν τη θέση τους στο υγρό, και όταν γεμίζουν άδειες δεξαμενές καθώς οι σωληνώσεις και ο εξοπλισμός χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά, ακόμα και οι δεξαμενές που καταλήγει το LNG, οφείλουν να είναι ήδη σε χαμηλές θερμοκρασίες ούτως ώστε να αποφεύγεται η εξάτμιση και η ανάγκη για εξαέρωση. Μετά την ολοκλήρωση της μεταφοράς όλος ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι απαραίτητο να καθαριστεί από τα υγρά αλλά και τα αέρια που δεν φτάσανε στη δεξαμενή. Σε ένα ολοκληρωμένο κύκλο του LNG κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού, η ποσότητα BOG που δημιουργείται είναι μια συνάρτηση του πόσο μακριά ταξιδεύει το LNG στην εφοδιαστική αλυσίδα, το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά κατασκευής των container που χρησιμοποιούνται καθώς και ο αριθμός αλλά και οι μέθοδοι μεταφοράς LNG από ένα container αποθήκευσης σε ένα άλλο. Όπως γίνεται κατανοητό, όσο νωρίτερα γίνει ανεφοδιασμός LNG πριν τη χρήση αλλά και όσο περισσότερες φορές μεταφερθεί το καύσιμο από ένα όχημα αποθήκευσης σε ένα άλλο, τόσο μεγαλύτερες ποσότητες BOG δημιουργούνται.(23)

Υπάρχουν τέσσερεις κύριες μέθοδοι για την αντιμετώπιση του φαινομένου που μελετάμε στην παρούσα παράγραφο, δηλαδή του Boil off Gas που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης και χρήσης του LNG:

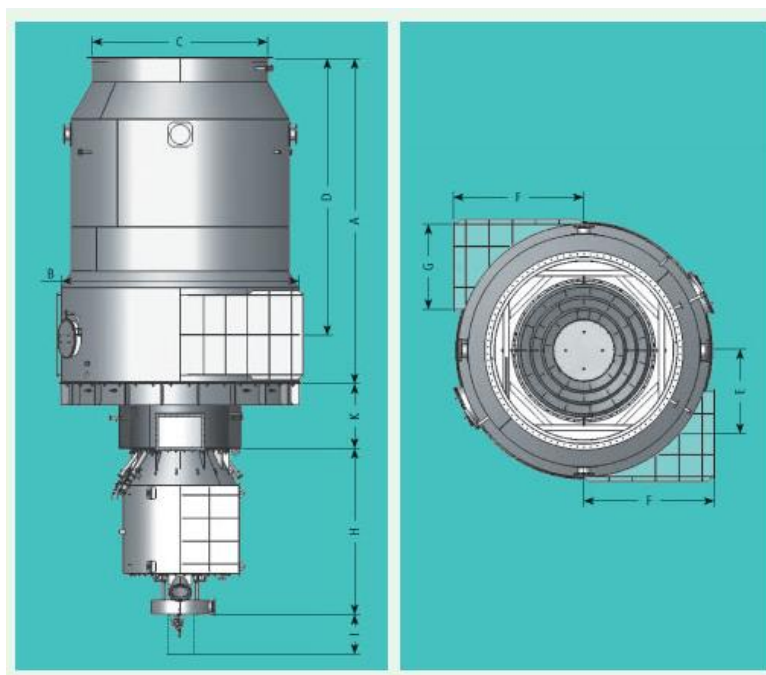
1. Η απελευθέρωση του στην ατμόσφαιρα
2. Η καύση
3. Η συλλογή και εκμετάλλευσή του ως αέριο καύσιμο

#### 4. Η συλλογή και επανυγροποίησή του

Η συλλογή του BOG μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Για τα πλοία εκείνα που αποθηκεύουν LNG για τις ανάγκες πρόωσης το BOG δημιουργείται διαρκώς στις δεξαμενές καυσίμου καθώς παρειασφρξει θερμότητα αλλά τόσο το υγρό όσο και τα αέρια που δημιουργούνται απελευθερώνονται σταθερά από τις δεξαμενές και χρησιμοποιούνται για την κίνηση των μηχανών. Για τα πλοία εκείνα που χρησιμοποιούνται καθημερινά, η εσωτερική πίεση των δεξαμενών καυσίμου μπορεί γενικά να διατηρείται κάτω από το όριο της ανάγκης για εξαέρωση, οπότε δεν έχουμε απελευθέρωση εξατμιζόμενου LNG σ αυτή την περίπτωση. Το BOG γενικά οδηγείται σε εξαέρωση από το σύστημα των καυσίμων όταν τα πλοία είναι ακινητοποιημένα για παρατεταμένη χρονική περίοδο.

Με τον ίδιο τρόπο κάποια πλοία μεταφοράς LNG που καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιούν το ατμοποιημένο φυσικό αέριο που δημιουργείται στις δεξαμενές μεταφοράς για να δώσουν κίνηση προωστικές μηχανές του πλοίου που λειτουργούν με τουρμπίνες ατμού. Λόγω του γεγονότος ότι οι συνολικές απαιτήσεις για καύσιμο είναι συνήθως μεγαλύτερες από το ρυθμό δημιουργίας BOG, αυτού του είδους τα πλοία έχουν τη δυνατότητα να ολοκληρώνουν τα ταξίδια τους χωρίς να απελευθερώνουν ατμοποιημένο καύσιμο στην ατμόσφαιρα. Πρόσφατα μάλιστα νέα πλοία μεταφοράς LNG κατασκευάστηκαν με μηχανές καύσης βαρέως πετρελαίου με στόχο να αυξήσουν τις ποσότητες LNG που θα παραδίδουν. Για να επιτευχθεί αυτό και γενικότερα να αποφευχθεί πλήρως το φαινόμενο της εξαέρωσης του BOG, τα πλοία αυτά εξοπλίζονται με 'εργοστάσια'-χώρους επανυγροποίησης όπου συγκεντρώνουν το αέριο, το ψύχουν στους  $-162^{\circ}\text{C}$  ούτως ώστε να μετατραπεί ξανά σε υγρή μορφή και εν συνεχεία το επαναφέρουν πίσω στις δεξαμενές των εμπορευμάτων (18).

Στην περίπτωση που το εξατμιζόμενο αέριο δεν μπορεί ούτε να υγροποιηθεί εκ νέου ούτε και να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, τότε χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι εκμετάλλευσής του. Μια από αυτές είναι η εγκατάσταση μονάδας καύσης αερίου η θερμικής οξείδωσης. Οι μονάδες αυτές επιτρέπουν την ασφαλή μεταφορά του υγροποιημένου φυσικού αερίου μέσω της κατάλληλης διαχείρισης του ατμοποιημένου καυσίμου.



**Εικόνα 25 Μονάδα καύσης αερίου**

(Πηγή: [http://www.saacke.de/marinesystems/en/products/technical-data/technical-data.php?we\\_objectID=1038](http://www.saacke.de/marinesystems/en/products/technical-data/technical-data.php?we_objectID=1038))

Οι σταθμοί εισαγωγής LNG πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες BOG που δημιουργούνται κατά την εκφόρτωση του LNG από τα πλοία μεταφοράς καθώς και από την μακροχρόνια αποθήκευση LNG σε δεξαμενές. Ο βασικότερος λόγος ύπαρξης αυτών των σταθμών είναι η παροχή φυσικού αερίου στο δίκτυο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κύρια δραστηριότητά τους να είναι η συλλογή και συμπίεση του ατμοποιημένου καυσίμου και εν συνεχεία η διοχέτευσή του στο δίκτυο σωληνώσεων φυσικού αερίου. Σε κάποιες περιπτώσεις προχωρούν και στην υγροποίηση μέρους του BOG και επανένταξη του στις δεξαμενές αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου, με συνέπεια να μην ακολουθούν την ανωτέρω διαδικασία, αν βέβαια κάτι τέτοιο είναι οικονομικά συμφέρων. Οι σταθμοί εισαγωγής LNG διατηρούν συνήθως και ένα σύστημα καύσης μέσα στο μηχανισμό διαχείρισης του ατμοποιημένου καυσίμου σε περίπτωση που το τελευταίο υπερβεί στιγμιαία τη χωρητικότητα σε συμπιεσμένο αέριο η υγροποιημένο καύσιμο του συστήματος.

Με τον ίδιο τρόπο κατά τη δημιουργία BOG στη διάρκεια φόρτωσης η εκφόρτωσης από φορτηγά που μεταφέρουν LNG από σταθμούς εισαγωγής η από εργοστάσια υγροποίησης σε χώρους αποθήκευσης ναυτιλιακού καυσίμου, η μεταφορά γίνεται μέσω χαμηλής πίεσης σωληνώσεις με σκοπό τη διοχέτευση προς τους καταναλωτές, σε μια προσπάθεια να αποφευχθεί πλήρως η απελευθέρωση του στην ατμόσφαιρα.

Τα εργοστάσια υγροποίησης του φυσικού αερίου μπορούν επίσης να συλλέγουν το BOG να το συμπιέζουν και να το ανακατευθύνουν στην διαδικασία υγροποίησης ούτως ώστε να περιορίζουν τη ποσότητα μεθανίου που είτε απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα είτε καίγεται. Από την άλλη, η διαχείριση του BOG σε απομακρυσμένους χώρους ανεφοδιασμού είναι συνήθως πιο δύσκολη καθώς αυτές οι περιοχές είναι σχεδόν αδύνατον να συνδεθούν με δίκτυο σωληνώσεων. Υπό αυτό το πρίσμα, η επανυγροποίηση του εξατμισμένου καυσίμου είναι μια λύση για την διαχείρισή του. Παρ όλα αυτά, η λύση που προαναφέρθηκε, δεν είναι η ενδεδειγμένη στις περισσότερες των περιπτώσεων καθώς είτε έχουμε μικρές ποσότητες εξατμιζόμενου καυσίμου είτε η παραγωγή των ποσοτήτων αυτών δεν είναι μόνιμη και συνεχόμενη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να καθιστά την διαδικασία της επανυγροποίησης οικονομικά ασύμφορη. Ως τελευταία λύση για τις περιοχές αυτές προτείνεται η πλήρης καύση του BOG ώστε να αποφευχθεί η απελευθέρωση μεθανίου στην ατμόσφαιρα.

Σε μια εναλλακτική προσέγγιση, μια επιλογή θα μπορούσε να αποτελέσει η μεταφορά των σταθμών ανεφοδιασμού LNG σε άλλους σταθμούς διαχείρισης φυσικού αερίου που χρησιμοποιείται από οδικά οχήματα. Σύμφωνα με το σενάριο αυτό το BOG που δημιουργείται από τις δεξαμενές LNG καθώς και κατά τη διάρκεια των ανεφοδιασμών μπορεί να συμπιεστεί και να αποθηκευτεί σε χερσαίες δεξαμενές με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σε οχήματα που λειτουργούν με συμπιεσμένο φυσικό αέριο.

Για ένα container μεταφορικής ικανότητας 16.300 TEU, εξοπλισμένο με δύο δεξαμενές μεμβράνης με δυνατότητα ανεφοδιασμού ποσότητας έως και 11.000 κυβικών μέτρων (θεωρείται αρκετό ώστε δώσει στο πλοίο αυτονομία έως και 15.000 ναυτικών μιλίων) μια μεγάλη πρόκληση θεωρείται η διαχείριση του εξατμιζόμενου καυσίμου, με άλλα λόγια του φαινομένου BOG που εξετάζουμε, από τις δεξαμενές αποθήκευσης LNG. Η πίεση που δημιουργείται μέσα στο σύστημα των δεξαμενών, που είναι σχεδιασμένο για να αντέχει μέχρι 700 mbarg, θα πρέπει να περιορίζεται χωρίς την απελευθέρωση αερίου στην ατμόσφαιρα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση του BOG τόσο ως κινητήριος δύναμη για τις βοηθητικές μηχανές όσο και για τα boiler. Αυτή είναι μια πρακτική που αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια, όπως αναφέρθηκε παραπάνω για τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου.

Σε μεγάλο βαθμό οι ενεργειακές απαιτήσεις ξεπερνούν τις ποσότητες εξατμιζόμενου καυσίμου από τις δεξαμενές, με συνέπεια το σύστημα να πρέπει να εξατμίζει επιπρόσθετες ποσότητες LNG ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες για καύσιμο ενώ παράλληλα είναι απαραίτητο να συντηρείται μια χαμηλή πίεση λειτουργίας στο εσωτερικό των δεξαμενών (συνήθως από 50 μέχρι 300 mbarg). Όταν το πλοίο είναι ανενεργό (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση που είναι σε αγκυροβόλι) και οι απαιτήσεις για ενέργεια είναι χαμηλές, αυξάνεται η πίεση του αερίου στο εσωτερικό των δεξαμενών. Όταν η πίεση στο εσωτερικό των δεξαμενών ξεπερνάει το προκαθορισμένο όριο, μια περίπτωση που δεν προβλέπεται στο προφίλ λειτουργίας προκαθορίστηκε για το πλοίο, το επιπλέον εξατμιζόμενο καύσιμο οδηγείται στο boiler, που λειτουργεί σαν μονάδα καύσης. Για την περίπτωση κανονικής λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένου και της περίπτωσης που το πλοίο είναι ανενεργό, ένα σύστημα μεμβρανών Mark III Flex μπορεί να χρησιμοποιηθεί, το οποίο παρέχει 50% περισσότερο χρόνο μέχρι η πίεση να φτάσει στο ανώτατο όριο, σε σχέση πάντα με άλλου τύπου μεμβράνες όπως το Standard Mark III Systems, κυρίως λόγω του αυξημένου πάχους αφρώδους μονωτικού (φτάνει τα 400 mm έναντι 270 mm του standar type)

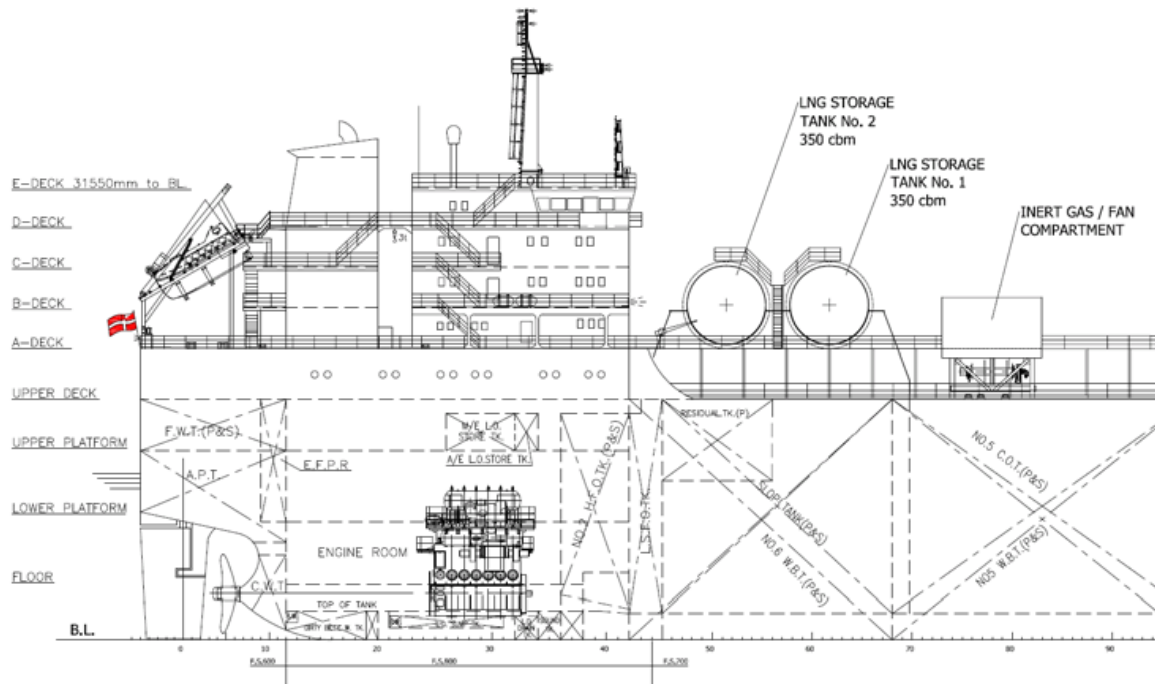
#### 3.2.4. Τοποθέτηση των δεξαμενών LNG στο πλοίο

Μεταξύ των δύο πιθανών επιλογών, πάνω η κάτω από το κατάστρωμα, για την τοποθέτηση των δεξαμενών LNG στο πλοίο, η επιλογή της τοποθέτησης πάνω στο κατάστρωμα είναι και λιγότερο σύνθετη αλλά και λιγότερο ακριβή. Η τοποθέτηση κάτω από το κατάστρωμα απαιτεί διαχωρισμό ζωνών σε σχέση με τους υπόλοιπους χώρους του πλοίου, εγγυήσεις αναφορικά με την πιθανότητα έκρηξης, ενδεδειγμένο σύστημα εξαέρωσης και γενικότερα μεγαλύτερο αριθμό ελέγχων. Οι δεξαμενές αποθήκευσης LNG δεν μπορεί να τοποθετηθούν εκεί που βρίσκονται οι αντίστοιχες του πετρελαίου κυρίως διότι οι απαιτήσεις αναφορικά με τον χώρο είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με εκείνες του πετρελαίου. Από την άλλη μεριά, η τοποθέτηση πάνω στο κατάστρωμα, δημιουργεί μεγαλύτερο “sloshing” καθώς και περισσότερη κατασκευαστική καταπόνηση. Η τοποθέτηση κατά μήκος του πλοίου μπορεί να έχει άμεσες επιπτώσεις στο εμπόρευμα του πλοίου.

Οι δεξαμενές που θα τοποθετηθούν στο κατάστρωμα έχουν τους κάτωθι περιορισμούς:



- Να έχει B/5 απόσταση από τη γάστρα. Στα πλοία που δεν μεταφέρουν επιβάτες, οι δεξαμενές μπορούν να τοποθετούνται ακόμα πιο κοντά στην άκρη του καταστρώματος. Αυτό εξαρτάται από το μέγεθος της δεξαμενής και κυμαίνεται μεταξύ 0.8 και 2 μέτρων αλλά ποτέ λιγότερο από 800 χιλιοστά.
- Να τοποθετούνται σε μέρος που υπάρχει επαρκής φυσικός εξαερισμός.

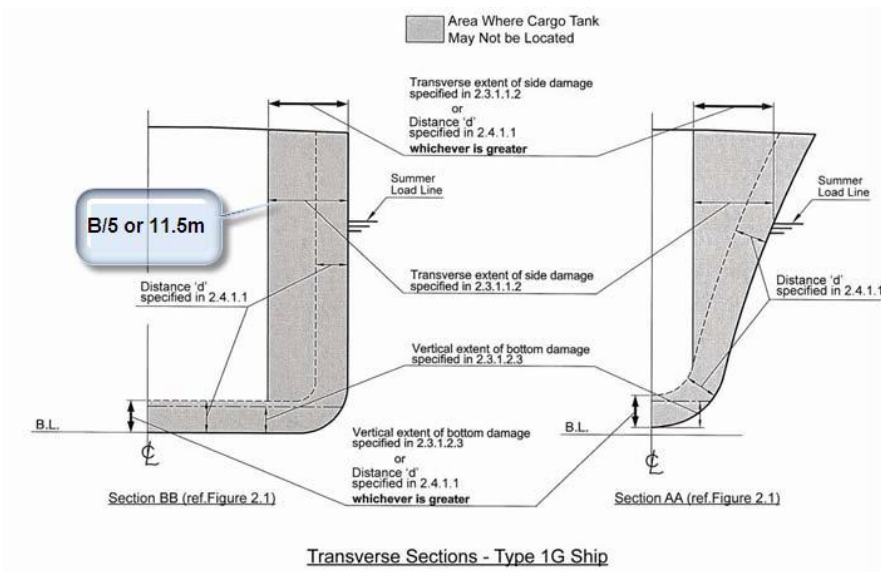


Εικόνα 26 Γενική διάταξη πλοίου που χρησιμοποιεί LNG ως καύσιμο

(Πηγή: Green Ship of the Future)

Οι δεξαμενές που τοποθετούνται εσωτερικά (κάτω από το κατάστρωμα) πρέπει να ακολουθούν τους ακόλουθους κανονισμούς:

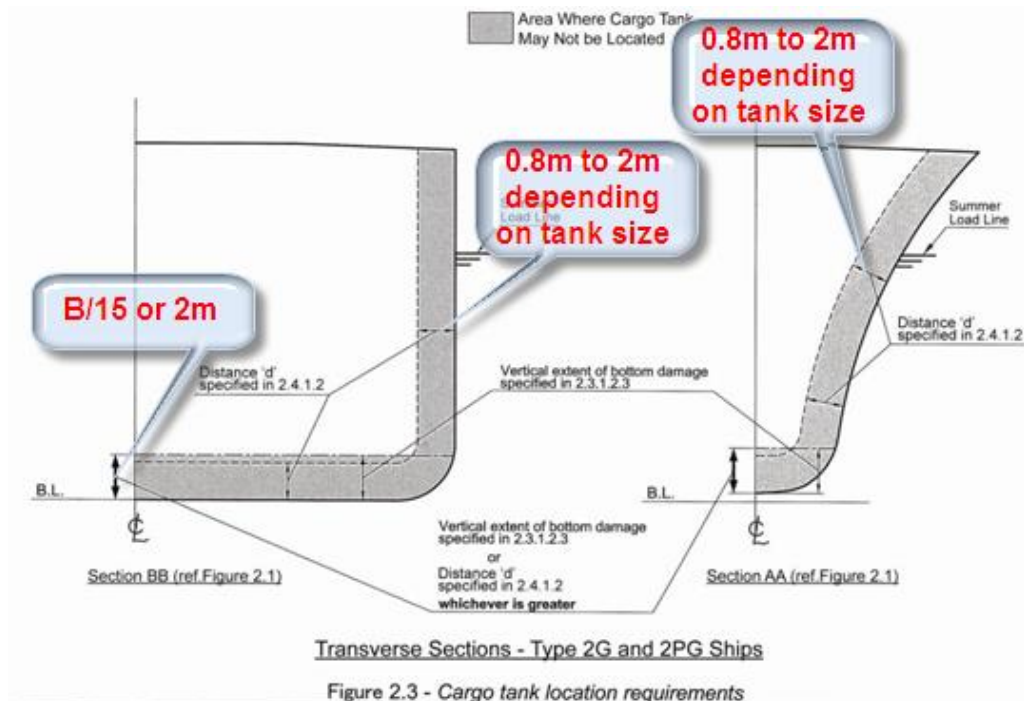
- Μέγιστη πίεση αέρος 10 bar
- Να είναι τοποθετημένες μεταξύ B/5 ή 11.5 m από τη γάστρα όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



**Εικόνα 27 Η ελάχιστη απόσταση της δεξαμενής από τη γάστρα**

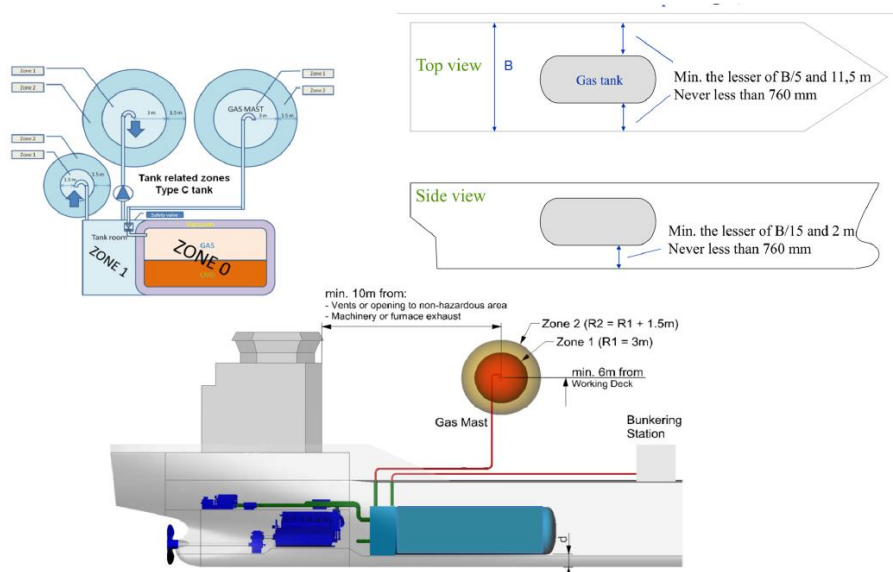
(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

- Να έχουν  $B/15$  απόσταση ή 2 m καθ' ύψος από την τρόπιδα. Σε πλοία που δεν έχουν επιβάτες οι δεξαμενές μπορούν να τοποθετούνται πιο κοντά στην άκρη του καταστρώματος. Αυτό εξαρτάται από το μέγεθος της δεξαμενής και κυμαίνεται μεταξύ 0.8 και 2 μέτρων αλλά ποτέ λιγότερο από 800 χιλιοστά.



**Εικόνα 28 Ελάχιστες αποστάσεις των δεξαμενών**

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)



**Εικόνα 29 Περιορισμοί στην τοποθέτηση των δεξαμενών**

(Πηγή: Meyer Turku, 2015, LNG Machinery)

Η ακτοφυλακή των ΗΠΑ δεν επιτρέπει την προσέγγιση των χωρικών της υδάτων από πλοία με δεξαμενές κάτω από χώρους ενδιαίτησης και πλοίων μονού κύτους που μεταφέρουν σωληνώσεις μεταφοράς για το φυσικό αέριο ή το LNG.

### 3.2.5. Περιορισμοί πληρότητας των δεξαμενών

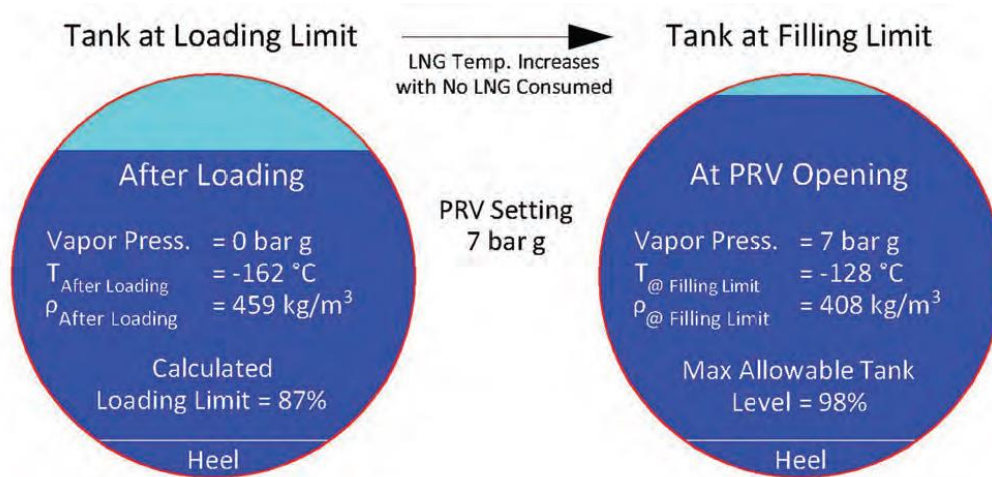
Εκτός του γεγονότος ότι οι δεξαμενές LNG απαιτούν περισσότερο όγκο λόγω της χαμηλής πυκνότητας του καυσίμου, του σχήματος της δεξαμενής καθώς και της μόνωσης, είναι απαραίτητο να φυλάσσεται μέρος του όγκου για τις επεκτάσεις και τα υπολείμματα του LNG μέσα στην άδεια δεξαμενή ώστε να την διατηρούν κρύα. Η βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης της δεξαμενής οδηγεί την τοποθέτηση του ορίου στο επίπεδο φόρτωσης. Ο λόγος είναι ότι μειώνεται με ταχύτητα η πυκνότητα του LNG καθώς απορροφάτε θερμότητα με συνέπεια να αυξάνονται θερμοκρασία και πίεση κορεσμού. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία και η αντίστοιχη πίεση κορεσμού, τόσο χαμηλότερη είναι η πυκνότητα.

Με βάση τους κανονισμούς του IMO, η δεξαμενή LNG επιτρέπεται να έχει πληρότητα έως και 98%. Ο ανεφοδιασμός μιας δεξαμενής με LNG στους  $-162^{\circ}\text{C}$ , όταν είναι κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση, προσεγγίζει τις καλύτερες συνθήκες ανεφοδιασμού λόγω του ότι σ αυτές τις συνθήκες το καύσιμο παραμένει στην

δεξαμενή τον περισσότερο δυνατό χρόνο προτού η θερμότητα εισχωρήσει στη δεξαμενή και αναγκάσει σε λειτουργία την βαλβίδα αποσυμπίεσης. Κατά τη διαδικασία ανεφοδιασμού η πυκνότητα του LNG είναι στις υψηλότερες τιμές της.

Καθώς η μάζα του LNG παραμένει η ίδια την ώρα που η πίεσή του αυξάνεται και η πυκνότητά του μειώνεται, η αναλογία των πυκνοτήτων μεταξύ του LNG κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού και όταν φτάσει το 98% της δεξαμενής που είναι και το όριο πληρότητας καθορίζει το όριο στο οποίο μπορεί να φορτωθεί η δεξαμενή κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού (loading limit).

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι όσο ψηλότερα βρίσκεται η βαλβίδα αποσυμπίεσης, τόσο πιο χαμηλά είναι το επίπεδο επιτρεπόμενης πληρότητας της δεξαμενής. Παρ όλα αυτά, όσο ψηλότερα βρίσκεται η συγκεκριμένη βαλβίδα, τόσο περισσότερο καιρό μπορεί να διατηρηθεί το LNG στη δεξαμενή. Εκτός του ορίου πλήρωσης της δεξαμενής, ο χρήσιμος όγκος της μειώνεται εκ νέου καθώς σύμφωνα με μια συνήθη πρακτική χρησιμοποιείται περίπου 5% του συνολικού όγκου της δεξαμενής ώστε να παραμείνει LNG στο κατώτερο τμήμα της, ούτως ώστε να διατηρεί σε χαμηλές θερμοκρασίες τη δεξαμενή εν όψη του επόμενου ανεφοδιασμού. Η ψύξη μιας άδειας δεξαμενής αμέσως πριν τον ανεφοδιασμό της με LNG είναι μια χρονοβόρα διαδικασία η οποία συνήθως αποφεύγεται.



**Εικόνα 30 Τα όρια πλήρωσης για διάφορες πιέσεις της βαλβίδας αποσυμπίεσης**

(Πηγή: <https://www.marinelink.com/news/commercial-impact-design382007>)

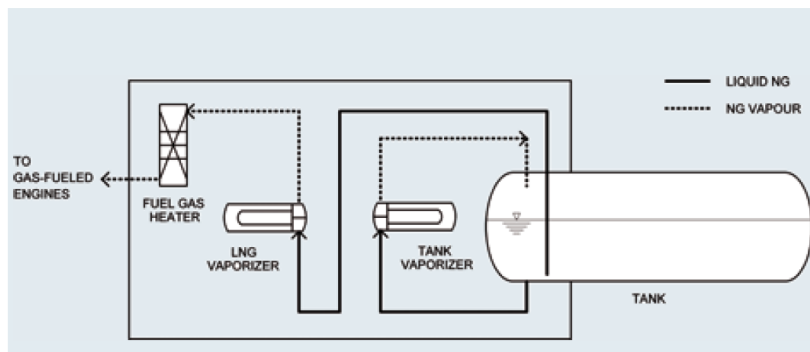
Το συμπέρασμα είναι ότι ο όγκος της δεξαμενής τύπου C που χρησιμοποιείται από LNG προσεγγίζει το 80-85% ανάλογα με τις ρυθμίσεις της βαλβίδας ανακούφισης. Συνεπώς όλοι οι υπολογισμοί για το πλοίο θα πρέπει να γίνονται με βάση αυτή τη πληρότητα και όχι με βάση τα όρια φόρτωσης καυσίμου της δεξαμενής.

Εκτός από την οπτική της ναυπηγικής, υπάρχουν πολλά στοιχεία προς έρευνα σχετικά με το LNG σαν ναυτιλιακό καύσιμο και ακόμα περισσότερα εκείνα που σχετίζονται με την αποθήκευση του LNG. Η επιλογή της μηχανής, ο ανεφοδιασμός, η συντήρηση, η λειτουργία και η εκπαίδευση είναι απαραίτητο να συνυπολογιστούν καθώς το κάθε ένα συμβάλει στην πολυπλοκότητα ως προς τη μετάβαση στην εκτεταμένη χρήση του LNG σαν ναυτιλιακό καύσιμο.

### 3.3. Συστήματα λειτουργίας

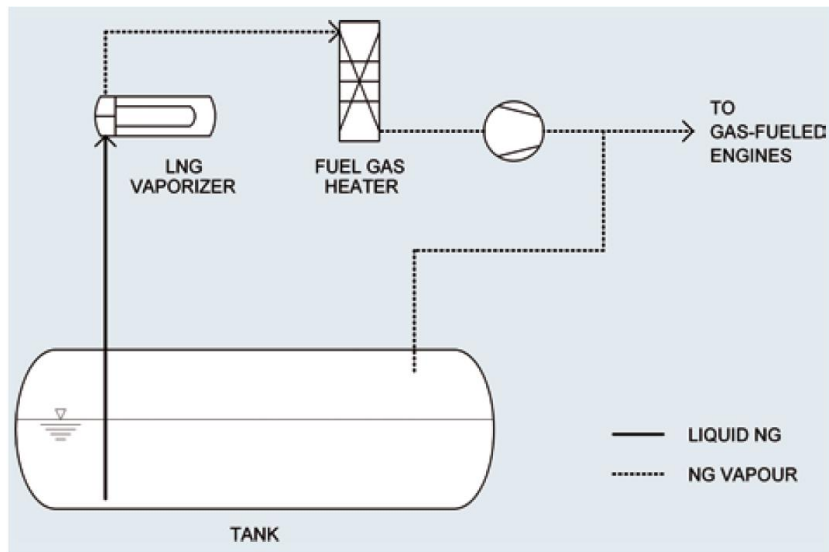
Ανάλογα με τις παραμέτρους της σχεδίασης, όπως το μέγεθος του αποθηκευτικού χώρου, ο αριθμός των δεξαμενών, η κατανάλωση και η διάταξη της μηχανής, το απαιτούμενο ποσοστό ανεφοδιασμού καυσίμων και η διάταξη των εξαρτημάτων του συστήματος, είναι διαθέσιμα ειδικά προσαρμοσμένες λύσεις για συστήματα αερίου καυσίμου LNG. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι για αποθηκευτικούς χώρους με μεγαλύτερο όγκο η επίπτωση στο κόστος της λειτουργίας δεξαμενών υψηλής πίεσης γίνεται σημαντική. Τα συστήματα αυτά θα πρέπει κατά προτίμηση να είναι εξοπλισμένα με συστήματα αύξησης μηχανικής πίεσης (αντλίες, συμπιεστές) αντί της διατήρησης ολόκληρης της δεξαμενής στο επίπεδο της πίεσης τροφοδοσίας. Μικρότερες δεξαμενές μπορούν να συμπιεστούν στο απαιτούμενο επίπεδο πίεσης τροφοδοσίας του αερίου. Το κόστος σχεδίασης δεξαμενών υψηλότερης πίεσης είναι σχετικά μικρό και έχουν το πλεονέκτημα της απλής λειτουργίας. Κατά τη χρήση δεξαμενών μόνωσης κενού, χρησιμοποιείται μια έξοδος στο πυθμένα που τροφοδοτεί έναν εξατμιστήρα δεξαμενής πιεζόμενο μόνο από την πυκνότητα, όπως ακριβώς φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Συνήθως η πίεση λειτουργίας είναι 7 bar g. Λόγω της πίεσης της δεξαμενής το LNG οδηγείται στον εξατμιστή LNG. Σ αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους ασφαλείας, όλες οι διασυνδέσεις της δεξαμενής και ο εξατμιστής της δεξαμενής βρίσκονται σε ένα «κρύο κουτί» (cold box). Ένας καυστήρας αερίου καυσίμου λειτουργεί με σκοπό να παρέχει το αέριο πλέον καύσιμο στη σωστή θερμοκρασία μέσω της κύριας βαλβίδας αερίου καυσίμου (fuel gas master valve) στη μονάδα βαλβίδας αερίου (gas valve unit-GVU). Το GVU μειώνει την

πίεση στην απαιτούμενη τιμή για τη μηχανή και είναι συνήθως μέρος των παροχών του κατασκευαστή της μηχανής.



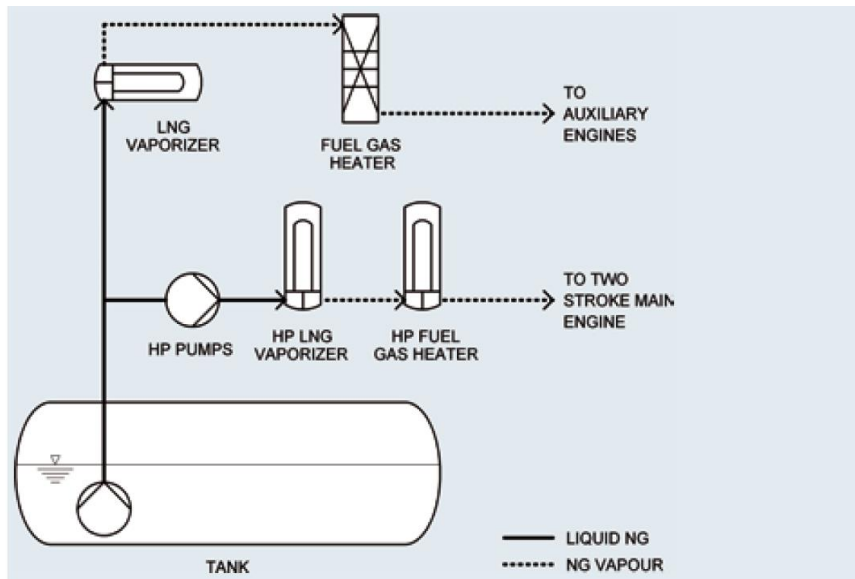
Εικόνα 31 Σχηματική αποτύπωση ενός συστήματος αερίου καυσίμου με δεξαμενή μόνωσης κενού και cold box

Μια επιλογή για αυτό το απλό σύστημα είναι η χρήση μιας αντλίας στη δεξαμενή για να τροφοδοτεί τον εξατμιστή της δεξαμενής ώστε να αποφεύγεται η έξοδος στον πυθμένα. Παρ' όλα αυτά, η παραπάνω πρακτική χρησιμοποιείται μόνο σε δεξαμενές τύπου C μονού κελύφους με μονωτικό αφρό. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η χρήση μεγαλύτερων δεξαμενών υψηλής σχεδιαστικής πίεσης αυξάνει το κόστος. Συμπεριλαμβάνοντας ένα συμπιεστή σε σχήμα βίδας, προκειμένου να πιέσει το αέριο καύσιμο, μια λύση είναι να μειώσει την πίεση σχεδίασης από 10 barg σε 4 barg. Η εξάτμιση έτσι θα γίνεται σε πίεση χαμηλότερου επιπέδου, μια μικρή ποσότητα πιεσμένου αερίου θα γυρνάει στη δεξαμενή για να σπρώχνει στην ουσία το υγρό καύσιμο στον εξατμιστή. Το σύστημα συμπίεσης επιτρέπει επιπλέον λειτουργίες όπως η παροχή αερίου καυσίμου από την δεξαμενή εξάτμισης, τη θέρμανσή του συστήματος σωληνώσεων και των δεξαμενών με ζεστό αέριο και την αύξηση του ποσοστού φόρτωσης χωρίς την επιστροφή ατμού μέσω απορροφητήρα για BOG.



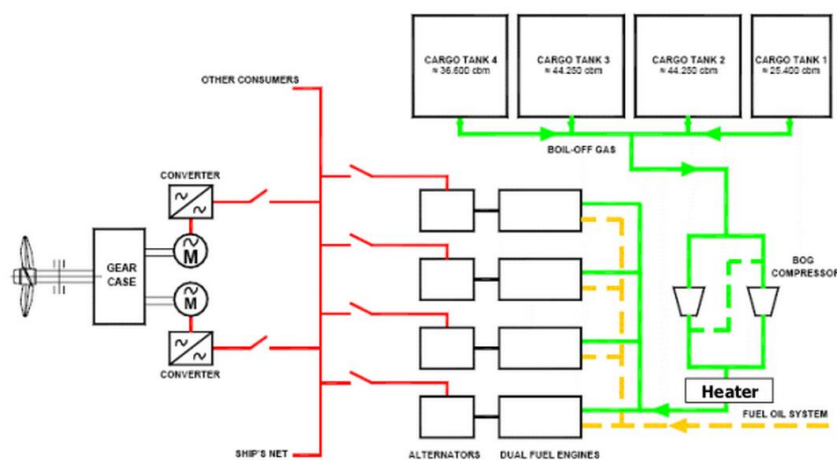
Εικόνα 32 Σχηματική αποτύπωση συστήματος αερίου καυσίμου με συμπιεστή

Οι δίχρονες μηχανές χρειάζονται μια άλλη ειδική ρύθμιση του συστήματος λόγω της υψηλής πίεσης της έγχυσης που προσεγγίζει τα 300 bar g, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Στα πλοία μεταφοράς LNG επιτυγχάνεται με τη χρήση συμπιεστή του BOG αλλά για τα υπόλοιπα πλοία αυτό θα μπορούσε απλά να είναι μια βιώσιμη λύση σε κάποιες συγκεκριμένες περιπτώσεις λόγω υψηλού CAPEX, ενεργειακών απαιτήσεων, του μεγέθους και του βάρους τέτοιου εξοπλισμού. Αντλίες και εξατμιστής υψηλής πίεσης καθώς και συσκευή παροχής θερμότητας είναι οι καταλληλότερες εναλλακτικές προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο πίεσης. Οι δεξαμενές είναι συνήθως εξοπλισμένες με μικρές αντλίες ή ψεκαστήρες πίεσης για να τροφοδοτούν το σύστημα υψηλής πίεσης.



Εικόνα 33 Σχηματική αποτύπωση ενός υψηλής πίεσης συστήματος καυσίμου για δίχρονης μηχανές

Σ αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να παρουσιαστεί το πλήρες σύστημα από ένα LNG carrier εξοπλισμένο με μηχανές διπλού καυσίμου. Οι αρχές λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος φαίνονται καθαρά στο παρακάτω γράφημα. Το εξατμισμένο καύσιμο συμπιέζεται στα 5.5 bar από ειδικό συμπιεστή και αργότερα θερμαίνεται στους 30°C. Το αέριο οδηγείται μετά μέσω σωληνώσεων στις μηχανές, όπου εγχέεται εντός του αέρα εισαγωγής πριν από την είσοδο του αέρα στους κυλίνδρους. Η ανάφλεξη γίνεται με την έγχυση του pilot fuel.



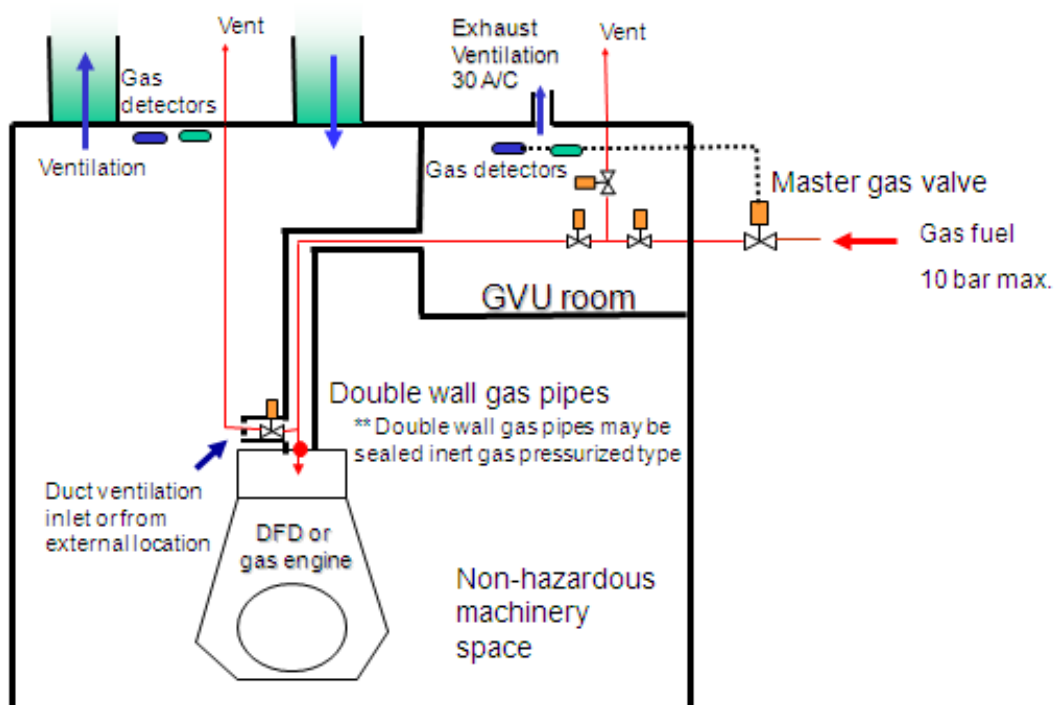
Εικόνα 34 Διάταξη συστήματος μηχανής διπλού καυσίμου από LNG carrier

(Πηγή: <http://www.marinediesels.info/>)



### 3.4. Κινητήρες, Δεξαμενές, Διάταξη Συστημάτων Ασφαλείας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε τις κυριότερες αλλαγές που πρέπει να γίνουν προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το LNG σαν καύσιμο έναντι του HFO.



Εικόνα 35 Διάγραμμα απεικόνισης του engine room

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

Το διάγραμμα που παρατέθηκε, απεικονίζει τα κύρια μέρη του engine room από ένα πλοίο που χρησιμοποιεί LNG σαν καύσιμο. Είναι εύκολο να παρατηρήσουμε τους αγωγούς εξαερισμού, τα κανάλια ροής αέρα μέσα στο μηχανοστάσιο, τους ανιχνευτές φωτιάς και αερίου καθώς και τις σωληνώσεις με διπλά τοιχώματα. Σε αυτούς τους σωλήνες, υπάρχει χώρος που περιέχει πεπιεσμένο αδρανές αέριο σε πίεση υψηλότερη από αυτή του αερίου. Σε περίπτωση απώλειας της πίεσης του αδρανούς αερίου λόγω διαρροής αερίου, ενεργοποιείται το σύστημα ασφαλείας. Στο διάγραμμα επίσης διακρίνεται το GVU (Gas Valve Unit). Το GVU είναι μια μονάδα που βρίσκεται μεταξύ του συστήματος αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου και του κινητήρα διπλού καυσίμου (DF). Το GVU είναι σημαντικό τμήμα της συνολικής εγκατάστασης καθώς δεν ρυθμίζει απλά την πίεση του αερίου αλλά εξασφαλίζει έγκαιρα και υπεύθυνα την απενεργοποίηση του συστήματος παροχής αερίου.



**Εικόνα 36** Τυπική διάταξη GUV room της Wärtsilä

(Πηγή: ABS, LNG Powered Vessels)

Για αυτή τη διαδικασία μία σειρά από βαλβίδες "block and bleed" είναι απαραίτητες και αποτελούνται από δύο βαλβίδες άμεσης απενεργοποίησης και μια βαλβίδα εξαερισμού

Το καύσιμο φτάνει στο GUV room διαμέσου της παροχής αερίου καυσίμου από τις δεξαμενές (Fuel Gas Supply System). Το FGS system πρέπει να είναι κατασκευασμένο σύμφωνα με τα πρότυπα ασφαλείας ώστε να παρέχει το καύσιμο στην κατάλληλη πίεση και θερμοκρασία.

Αν θέλαμε να δώσουμε σε σημεία τα σημαντικότερα στοιχεία ενός μηχανοστασίου, θα παραθέταμε τα παρακάτω:

### **Engine Room**

- Το μηχανοστάσιο έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με κριτήριο την ασφάλεια
- Το LNG παρέχεται μέσω σωληνώσεων διπλών τοιχωμάτων, αεριζόμενες με φρέσκο αέρα

- Ύπαρξη συστήματος αδρανοποίησης για λόγους συντήρησης και έκτακτης ανάγκης με N<sub>2</sub>
- Ύπαρξη εξαερισμού στο μηχανοστάσιο
- Πρόβλεψη για πυρόσβεση

### **Fuel Gas Supply System**

#### **Από δεξαμενή σε δεξαμενή ('cold box') σε υγρή μορφή**

- Η μετατροπή του LNG σε αέριο με προσφορά θερμότητας γίνεται από το κύκλωμα LT (LT-circuit)
- Θερμότητα από το AC-system, ανάκτηση χαμηλής θερμοκρασίας (cold recovery)

#### **Από τη δεξαμενή στο GVUs σε αέρια μορφή**

- Διπλά τοιχώματα από τη δεξαμενή στο Gas Valve
- Μονάδες (GVU)
- Στη δεξαμενή γίνεται έλεγχος και ρυθμίζεται η πίεση
- Ρύθμιση και της θερμοκρασίας

#### **Από το GVUs στις μηχανές και στα boiler**

- Η μέγιστη απόσταση μεταξύ GVU και κινητήρων είναι 10 μέτρα
- Το GVU ρυθμίζει την πίεση του αερίου στην μηχανή σύμφωνα με τη φόρτωση της μηχανής
- Το GVU ρυθμίζει την πίεση του αερίου στο boiler

## 4. Οικονομικοτεχνική μελέτη

---

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι η τεχνική και η οικονομική ανάλυση ενός πλοίου τύπου Bulk Carrier που χρησιμοποιεί μηχανή διπλού καυσίμου ώστε να είναι πλήρως εναρμονισμένο με τους κανονισμούς για την εκπομπή αερίων ρύπων όπως αυτοί έχουν περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Οι νηογνώμονες έχουν εισάγει κανονισμούς βασισμένους στο «Interim Guidelines on Safety for Natural Gas-Fuelled Engine Installations in Ships» σχετικά με τη σχεδίαση και τη λειτουργία των πλοίων που χρησιμοποιούν το LNG σαν ναυτιλιακό καύσιμο. Το «Rules and Regulations for the Classification of Natural Gas Fuelled Ships» του Lloyd's Register πρωτοεισήχθη τον Ιούλιο του 2012 ενώ μπήκε σε εφαρμογή σχεδόν 2 χρόνια αργότερα, τον Ιανουάριο του 2014 (10). Οι κανονισμοί αυτοί αναφέρονται συγκεκριμένα στα πλοία καύσης LNG και σε καμία περίπτωση σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου ή πλοία που χρησιμοποιούν άλλου τύπου καύσιμα. Παρέχουν επιπρόσθετες απαιτήσεις σχετικές με τη χρήση και την αποθήκευση του φυσικού αερίου σαν καύσιμο, επικεντρώνοντας την προσοχή στην αποφυγή οποιασδήποτε αστοχίας με σκοπό την εξασφάλιση της ασφαλούς σχεδίασης και λειτουργίας του πλοίου.

Για την επίτευξη της παρούσας μελέτης θα θεωρήσουμε ένα ήδη υπάρχον πλοίο, τύπου Bulk Carriers και συγκεκριμένα Post Panamax, που καταναλώνει HFO για τις ανάγκες κίνησης. Το πλοίο αυτό θα υποστεί μετασκευή ούτως ώστε να εξεταστεί από τεχνικής και οικονομικής απόψεως και να συγκριθεί με αυτό το τρόπο με το ήδη υπάρχον ως προς την λειτουργία τους. Κρίνεται επιτακτικό το πλοίο αυτό να δραστηριοποιείται στην Βαλτική, θαλάσσια περιοχή η οποία χαρακτηρίζεται ως ECA, και στην οποία υπάρχει πλήθος σταθμών ανεφοδιασμού LNG, επιτρέποντας έτσι την επί του πρακτέου λειτουργία του εν λόγω μετασκευασμένου πλοίου. Χωρίς καμία αμφιβολία, η παρούσα μελέτη θα παραθέσει αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άμεση εφαρμογή και όχι μόνο για σκοπούς έρευνας και επιστημονικής διατριβής.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του προαναφερθέντος πλοίου, παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα

Πίνακας 5 Κύρια Χαρακτηριστικά Bulk Carrier

<b>Κύρια χαρακτηριστικά</b>	
<b>Ολικό Μήκος (LOA)</b>	239.99 (m)
<b>Μέγιστο Πλάτος (B)</b>	38 (m)
<b>Βύθισμα (T)</b>	14.4 (m)
<b>Κοίλο (D)</b>	19.98 (m)
<b>Νεκρό Βάρος (DWT)</b>	98.681 (tons)
<b>Κύρια Μηχανή (M/E)</b>	Mitsui MAN B&W 6S60MC-C MARK VII
<b>Απόδοση (Output)</b>	14280 KW x 105 rpm
<b>Κατανάλωση (SFOC)</b>	172 g/KWh
<b>Ταχύτητα Υπηρεσίας (Service Speed)</b>	14.5 knots
<b>Ηλεκτρομηχανές (Auxiliary Engines)</b>	3 x 640 KW

Σε περασμένα κεφάλαια αναλύσαμε διεξοδικά τις τεχνικές διαφορές που έχει ένα πλοίο που χρησιμοποιεί το υγροποιημένο φυσικό αέριο ως μέσο κίνησης σε σχέση με ένα συμβατικό πλοίο. Στο παρόν κεφάλαιο θα σταθούμε στις μετατροπές που θα χρειαστούν στην περίπτωση της μετασκευής του και σαν αποτέλεσμα αυτών των μετατροπών θα προχωρήσουμε σε μια οικονομική ανάλυση των νέων δεδομένων τόσο ως προς το επενδυτικό κόστος όσο και αναφορικά με το κόστος λειτουργίας του μετασκευασμένου πλοίου. Προφανώς μετά από κάθε οικονομική ανάλυση, στόχος είναι η τελική αποτίμηση της επένδυσης.

#### 4.1. Τεχνικές Μετατροπές

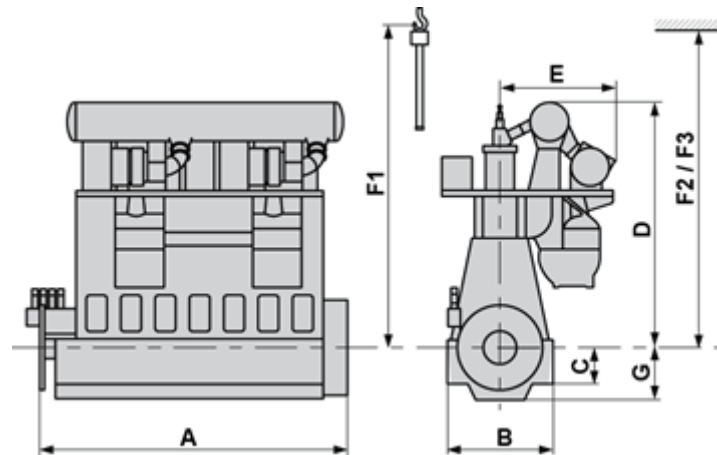
Προκειμένου να προχωρήσουμε στη μετασκευή ενός συμβατικού πλοίου σε πλοίο καύσης υγροποιημένου φυσικού αερίου, κρίνεται απαραίτητο να προβούμε σε μια σειρά τεχνικών αλλαγών ιδιαιτέρως σημαντικών για την επιτυχή κατάληξη του συγκεκριμένου εγχειρήματος. Παρ όλα αυτά, σήμα κατατεθέν μιας τέτοιας μετασκευής δεν θα μπορούσε να είναι άλλο από την αντικατάσταση της συμβατικής κύριας μηχανής με μια μηχανή διπλού καυσίμου.

Πιο συγκεκριμένα, η κύρια μηχανή που χρησιμοποιείται πριν από τη μετασκευή είναι Mitsui MAN B&W 6S60MC-C MARK VII, κάτι που σημαίνει ότι αναφερόμαστε σε δίχρονη αργόστροφη εξακύλινδρη κύρια μηχανή καύσης HFO. Η νέα κύρια μηχανή που θα χρησιμοποιηθεί θα είναι επίσης δίχρονη, αργόστροφη και εξακύλινδρη με την διαφορά ότι θα είναι διπλού καυσίμου (dual fuel) και κατασκευαστής είναι η Wärtsilä. Ο τύπος της νέας μηχανής είναι Wärtsilä 6X62DF και συγκεντρώνει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 6 Κύρια Μηχανή Διπλού Καυσίμου Τύπου: Wärtsilä 6X62DF

<b>Wärtsilä 6X62DF</b>			
<b>Απόδοση (Output MCR)</b>		14310 KW x 103 rpm	
<b>Κατανάλωση</b>			
<b>BSEC (gas mode)</b>		7166 KJ/KWh	
<b>BSGC gas (gas mode)</b>		142.5 g/KWh	
<b>BSPC pilot fuel (gas mode)</b>		1 g/KWh	
<b>BSFC (diesel mode)</b>		180 g/KWh	
<b>Διαστάσεις</b>			
<b>A (length)</b>	8110 mm		
<b>B</b>	4200 mm	<b>F1</b>	11775 mm
<b>C</b>	1360 mm	<b>F2</b>	11775 mm
<b>D</b>	9580 mm	<b>F3</b>	10950 mm
<b>E</b>	3915 mm	<b>G</b>	2110 mm

Στην εικόνα που ακολουθεί παρατηρούμε ένα σκαρίφημα της νέας μηχανής συμπεριλαμβανομένων των διαστάσεών της.



Εικόνα 37 Σκαρίφημα Κύριας Μηχανής Διπλού Καυσίμου Τύπου: Wärtsilä 6X62DF

(Πηγή: <https://www.wingd.com/en/products/w-x62df/>)

Το συγκεκριμένο μοντέλο μηχανής, είναι μηχανή διπλού καυσίμου. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι μηχανές διπλού καυσίμου κυριαρχούν στην εμπορική ναυτιλία για πλοία κίνησης με φυσικό αέριο. Χρησιμοποιούν τον κύκλο του Όττο και έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα της ευελιξίας στη χρήση οποιουδήποτε από τα δύο καύσιμα, ανάλογα με τις θαλάσσιες περιοχές πλεύσης και της διακύμανσης της αγοράς. Είναι μηχανή που λειτουργεί με κύριο καύσιμο το φυσικό αέριο αλλά σε περίπτωση μη αναμενόμενης “αστοχίας” ή μεταβολής της θαλάσσιας πορείας γίνεται αλλαγή σε υγρό καύσιμο. Η αλλαγή αυτή από αέριο σε υγρό καύσιμο γίνεται αυτόματα με την πίεση ενός κουμπιού χωρίς να μεταβάλλεται η φόρτιση της μηχανής ή η ταχύτητα του πλοίου.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία για την κατασκευή κύριας μηχανής αναπτύχθηκε για να αποτελέσει μια καλή απάντηση στις απαιτήσεις της αγοράς για μια αξιόπιστη και αποτελεσματική λύσης για την πρόωση με αέριο καύσιμο. Η τεχνολογία είναι βασισμένη σε μια λογική χαμηλής πίεσεως αερίου. Το σύστημα αυτό έχει μια αρκετά ανταγωνιστική τιμή και παράλληλα ικανοποιεί τις απαιτήσεις για εκπομπές αερίων ρύπων σύμφωνα με το Tier III, χωρίς μάλιστα τη χρήση οποιουδήποτε επιπρόσθετου συστήματος κατεργασίας αερίων ρύπων (21). Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι η μηχανή έχει μια σταθερή λειτουργία ανεξαρτήτως φόρτωσης, δίνει τη δυνατότητα της συνεχούς χρήσης αερίου χωρίς να είναι απαραίτητη η μεταβολή σε υγρό καύσιμο, ακόμα και σε χαμηλά επίπεδα φόρτωσης της μηχανής. Το αντίθετο συμβαίνει μόνο κατά την έναρξη λειτουργίας της μηχανής διπλού καυσίμου ή πριν τον τερματισμό

της λειτουργίας της, όπου μπαίνει σε διαδικασία χρήσης diesel για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος ασφαλείας. Επίσης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μηχανές διπλού καυσίμου, η νέα γενιά μηχανών διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσεως κάνει χρήση πολύ μικρής ποσότητας pilot fuel, κάτω από 1%, με άμεσα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω.

Προκειμένου να επιτευχθεί σύγκλιση με τις απαιτήσεις τόσο του IMO για το Tier III σύμφωνα με τα επίπεδα του NO<sub>x</sub> που πρέπει να διατηρηθούν όσο και για τις ανάγκες για περιορισμό του SO<sub>x</sub> σε επιτρεπτά επίπεδα, προσφέρεται μια μεγάλη ποικιλία από πιθανές λύσεις, με τον μεγάλο όγκο των λύσεων αυτών να συγκεντρώνεται στην επιλογή καυσίμου και συστήματος καυσίμου, σε προηγμένες ρυθμίσεις καθώς και την προσθήκη συστημάτων καθαρισμού καυσίμου πριν τη καύση ή καυσαερίων μετά από αυτή. Η μετατροπή από υγρό καύσιμο σε αέριο αποτελεί μια εξαιρετική λύση αντιμετώπισης των δύο περιβαλλοντικών προκλήσεων που τέθηκαν παραπάνω. Σε αντίθετη περίπτωση, κατά τη χρήση δηλαδή υγρού καυσίμου, κρίνεται απαραίτητη η εγκατάσταση άλλων μέσων όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7 Μέσα για τον περιορισμό SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub>

<b>Liquid Fuel Case</b>		
<b>Pollutans</b>	<b>Option A</b>	<b>Option B</b>
<b>SO<sub>x</sub></b>	Low-Sulphur Fuel	Scrubber
<b>NO<sub>x</sub></b>	SCR	Engine Internal Measures

Σύμφωνα πάντα με τα χαρακτηριστικά του πλοίου που παίρνουμε ως σημείο αναφοράς, χρησιμοποιούνται 3 ηλεκτρομηχανές με απόδοση 640 KW η κάθε μια. Προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες του μετασκευασμένου πλοίου αλλά παράλληλα να μην υπερβαίνει τα όρια στις εκπομπές επιβλαβών ρύπων, θα αντικατασταθούν οι υπάρχουσες ηλεκτρομηχανές, με νέες καύσης διπλού καυσίμου.





**Εικόνα 38 Βοηθητική Μηχανή Τύπου:MAN 6L23/30DF**

(Πηγή: MAN Diesel & Turbo,(2016). MAN 23/30 DF GenSet)

Ο τύπος των συγκεκριμένων ηλεκτρομηχανών, που θα είναι επίσης 3 στον αριθμό, είναι MAN 6L23/30DF.(14)

Οι συγκεκριμένες ηλεκτρομηχανές έχουν απόδοση 750 KW έκαστη. Η βασική διαφορά της συγκεκριμένης ηλεκτρομηχανής με τις συμβατικές είναι ότι κατά τη λειτουργία της με αέριο, καλύπτει τον IMO TIER III σε αντίθεση με τις υπόλοιπες που καλύπτουν μέχρι και τα κριτήρια που έχουν τεθεί στο IMO TIER II, και προκειμένου να καλύψουν το TIER III είναι απαραίτητη η προσθήκη επιπλέον μηχανισμού (SCR).

Μία ακόμα προσθήκη που είναι απαραίτητη κατά τη μετασκευή ενός πλοίου σε διπλού καυσίμου και στην οποία αναφερθήκαμε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι η εγκατάσταση δεξαμενών αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου. Οι δεξαμενές που επιλέγονται στην περίπτωση αυτού του πλοίου είναι κυλινδρικές δεξαμενές τύπου C. Οι συγκεκριμένες δεξαμενές λειτουργούν σε υψηλή πίεση ενώ την ίδια ώρα είναι μονωμένες με κενό. Η ανάγκη για προστασία σε περίπτωση διαρροών έχει σαν αποτέλεσμα οι συγκεκριμένες δεξαμενές να είναι εξοπλισμένες με διπλό τοίχωμα. Η χωρητικότητα της δεξαμενής LNG αυτού του τύπου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το διαθέσιμο χώρο που υπάρχει πάνω στο πλοίο, τις ανάγκες για LNG του πλοίου, την απαιτούμενη αυτονομία και το κλιμακούμενα αυξανόμενο κόστος της εγκατάστασης τέτοιων δεξαμενών.



Εικόνα 39 Δεξαμενή LNG Τύπου C

(Πηγή:[http://articles.maritimepropulsion.com/image.axd?picture=2012%2f5%2fMAN\\_Gas+tank+lifted+copy.jpg](http://articles.maritimepropulsion.com/image.axd?picture=2012%2f5%2fMAN_Gas+tank+lifted+copy.jpg))

Σε αυτό το τύπο πλοίου, δεν είναι δυνατή η τοποθέτηση της δεξαμενής στο εσωτερικό του πλοίου. Σαν αποτέλεσμα αυτού, μια δεξαμενή χωρητικότητας 600 m<sup>3</sup> θα τοποθετηθεί στο κατάστρωμα του πλοίου, χωρίς με αυτό το τρόπο να καταλαμβάνει χώρο από το φορτίο του πλοίου. Παράλληλα λαμβάνονται υπόψην όλοι οι περιορισμοί που έχουν αναφερθεί για την τοποθέτηση δεξαμενών LNG πάνω στο πλοίο, όπως καταγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι λοιπόν η τοποθέτηση της δεξαμενής στο κατάστρωμα επιλύει άμεσα το πρόβλημα του καλού εξαερισμού, ενώ επιπρόσθετα βρίσκεται μακριά από το accommodation του πλοίου αλλά και από το μηχανοστάσιο για λόγους ασφαλείας. Επίσης για λόγους ευστάθειας τοποθετείται το δυνατόν κοντύτερα στην διαμήκη του πλοίου, κάθετα σε αυτήν, μεταξύ των περιβλημάτων των κοιτών 7 και 6, έχοντας 1m απόσταση από κάθε περίβλημα. Με βάση τα παραπάνω πληρεί τον περιορισμό για ελάχιστη απόσταση της δεξαμενής από το πλάι του πλοίου η οποία φτάνει τα 800 χιλιοστά για πλοίο που δεν μεταφέρει επιβάτες. Περιλαμβάνεται ακόμα το tank connection space, μέσα στο οποίο είναι εγκατεστημένος όλος ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται μεταξύ της δεξαμενής και των Pressure Built-up Evaporator και Main Gas Evaporator (σωληνώσεις, φλάτζες, βαλβίδες), το οποίο είναι τοποθετημένο στη δεξαμενή σύμφωνα πάντα με τους αντίστοιχους κανονισμούς.

Ακολούθως της τοποθέτησης της δεξαμενής είναι σημαντικό να αναφερθούν κάποια στοιχεία αναφορικά με τον ανεφοδιασμό του υγροποιημένου φυσικού αερίου στο πλοίο. Κατά τον ανεφοδιασμό δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον έλεγχο της ροής του

LNG από το εξωγενές σύστημα ανεφοδιασμού στην δεξαμενή που είναι τοποθετημένη στο κατάστρωμα μέσω μονομένων σωλήνων. Σύμφωνα με τους κανονισμούς τόσο του IMO όσο και των κλάσεων, το σημείο ανεφοδιασμού βρίσκεται στο κατάστρωμα, και δεν χρησιμοποιείται για κανένα άλλο σκοπό παρά μόνο για τον ανεφοδιασμό. Το μεγάλο πλεονέκτημα στην περίπτωση αυτή είναι ότι υπάρχει φυσική εξαέρωση και είναι πλήρως προστατευμένη και διαχωρισμένη περιοχή από το accommodation και άλλες περιοχές του πλοίου στις οποίες γίνονται εργασίες. Το σημείο-σταθμός ανεφοδιασμού είναι εφοδιασμένο με τα απαραίτητα εξαρτήματα για τη πραγματοποίηση της διαδικασίας του ανεφοδιασμού αλλά και για την προστασία της διαδικασίας αυτής. Μία χειροκίνητη stop valve και μια shutdown valve με δυνατότητα χειρισμού από απόσταση εγκαθίστανται σε κάθε μια εκ των σωλήνων ανεφοδιασμού κοντά στο σημείο παροχής για περιπτώσεις ανάγκης. Είναι ακόμα άξιο αναφοράς ότι το σύστημα σωληνώσεων είναι μονωμένο και εφοδιασμένο με διπλά τοιχώματα, κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι. Υπάρχει ακόμα ένας δίσκος απόσταξης ούτως ώστε να καταλήγει το καύσιμο σε περίπτωση διαρροής και να οδηγείται εκτός πλοίου. Τέλος, σχετικά με τα συστήματα προστασίας σε περίπτωση έκτακτου γεγονότος, στο πλοίο εγκαθίσταται ένα shut-down system με δυνατότητα χειρισμού τόσο από το πλοίο όσο και από εξωτερικό σημείο ανεφοδιασμού για να διασφαλιστεί η άμεση απεμπλοκή από τον ανεφοδιασμό.

Γυρίζοντας στο tank connection space υπάρχουν δύο συστήματα που αναφέρθηκαν νωρίτερα (Pressure Build-up Evaporator και Main Gas Evaporator) τα οποία ασχολούνται με την εναλλαγή θερμότητας, χρησιμοποιώντας ένα μείγμα γλυκόλης/νερού σαν αντιψυκτικό θερμαντικό μέσο. Ο σκοπός του PBE είναι να διατηρήσει μια πίεση κοντά στα 5 bar μέσα στη δεξαμενή. Αναλυτικότερα αυξάνει την πίεση στο εσωτερικό της δεξαμενής στο επιθυμητό επίπεδο μετά την ολοκλήρωση του ανεφοδιασμού. Με αυτό το τρόπο διατηρείται η πίεση στη δεξαμενή για να αντισταθμίσει τις απώλειες της καθώς το LNG τροφοδοτεί τη κύρια μηχανή. Λόγω της μη ύπαρξης αντλιών LNG και compressors τον έλεγχο και την διατήρηση της πίεσης μέσα στην δεξαμενή αναλαμβάνει το PBE.

Όσον αφορά το ρόλο του MGE, προκύπτει άμεσα από την ετυμολογία της ονομασίας του συστήματος. Μετατρέπει το LNG από την υγρή σε αέρια κατάσταση, για την τροφοδοσία της κύριας μηχανής. Ενεργοποιείται από το άνοιγμα της master gas

valve, ενώ εν συνεχεία το LNG οδηγείται στο MGE υπό την πίεση της δεξαμενής, και μετά την μετατροπή του καυσίμου σε αέριο, ρέει προς την κύρια μηχανή.

Οι παραπάνω εναλλάκτες θερμότητας, είναι σχεδιασμένοι για να αποτρέπουν την μόλυνση του καυσίμου από το μείγμα γλυκόλης/νερού. Ακόμα όμως και σε μια τέτοια περίπτωση υπάρχει άμεση ενεργοποίηση τόσο του σχετικού συναγερμού όσο και άμεση απενεργοποίηση της τροφοδοσίας καυσίμου.

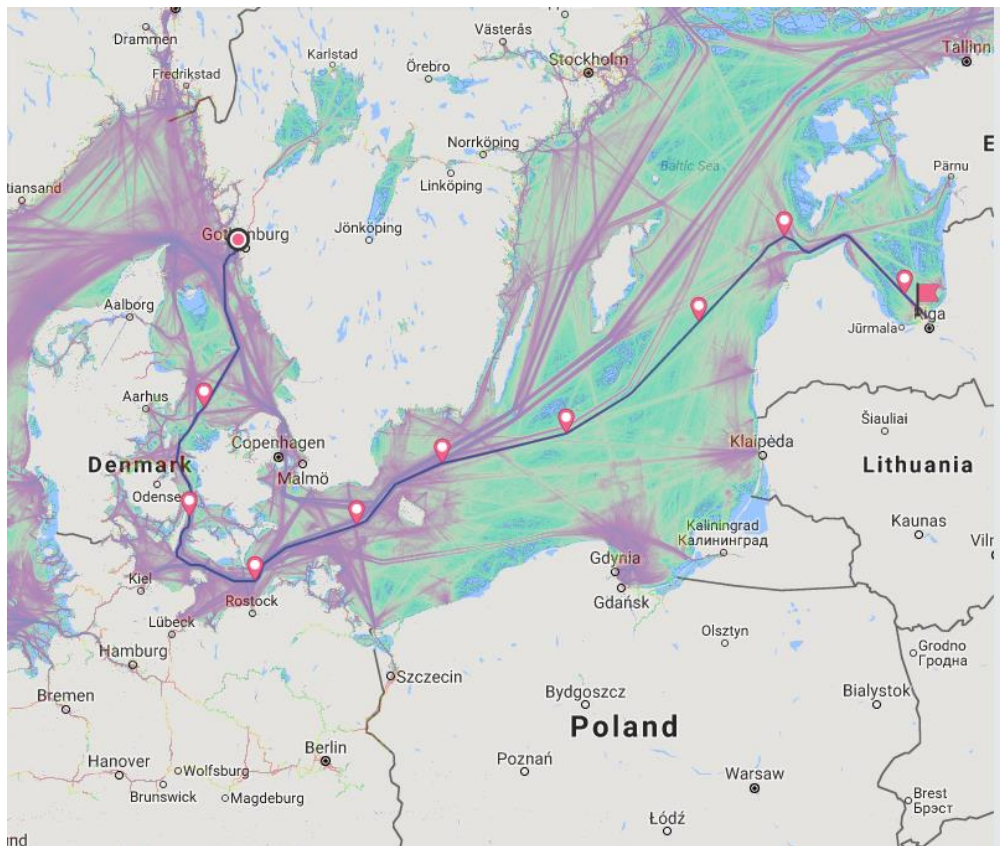
Βαλβίδες ασφαλείας υπάρχουν και στην κεντρική γραμμή παροχής LNG. Χειροκίνητα λειτουργεί μια stop valve ενώ αυτόματα λειτουργεί η master gas fuel valve η οποία έχει την ιδιότητα ότι ενεργοποιείται από απόσταση σε περίπτωση βλάβης του συστήματος.

Το τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό κομμάτι που πρέπει να προσθέσουμε, και που έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενες παραγράφους, είναι το Gas Valve Unit που τοποθετείται μεταξύ δεξαμενής και κύριας μηχανής, μέσα στο engine room, και σκοπό έχει τη ρύθμιση της τροφοδοσίας του αερίου στην κύρια μηχανή. Για λόγους ασφαλείας είναι εξοπλισμένο με block valves και filters.

## 4.2. Οικονομική μελέτη

Το πλοίο που επιλέξαμε δραστηριοποιείται στην περιοχή της Βαλτικής. Η Βαλτική είναι μια θαλάσσια περιοχή που χαρακτηρίζεται από μεγάλη συμφόρηση στις μεταφορές-μετακινήσεις. Ο χαρακτηρισμός της ως θαλάσσια περιοχή SECA χρονολογείται μια δεκαετία πίσω, και συγκεκριμένα από 19 Μάη 2006 (15) και σκοπό είχε τη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων όπως αυτό περιγράφεται με λεπτομέρεια στην παράθεση των κανονισμών σε περασμένα κεφάλαια. Αποτέλεσμα της επιβολής του ορίου εκπομπής SO<sub>x</sub> σε 0.1% από το 2015 για την περιοχή της Βαλτικής ήταν η συμμόρφωση των πλοίων ώστε να πληρούν τις νέες προδιαγραφές. Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα της έρευνας του Baltic Port Organisation για το 2016, ο πρώτος χρόνος από την επιβολή των νέων κανονισμών κύλισε με την ισχυρή πλειοψηφία των πλοίων να χρησιμοποιεί αποσταγμένα καύσιμα προκειμένου να συμμορφωθεί με τους κανονισμούς.(2). Σε αυτό βέβαια συνέβαλε η ραγδαία πτώση στις τιμές των πετρελαιοειδών τα τελευταία χρόνια, γεγονός που απέτρεψε τους περισσότερους πλοικτήτες από μια μακροπρόθεσμη επένδυση είτε σε κάποια μετασκευή είτε στην εγκατάσταση μηχανισμών αποθείωσης. Παρ όλα αυτά υπήρξε ένα καλό ποσοστό πλοίων (κοντά στο 15%) που χρησιμοποίησαν Scrubber ή LNG ήδη από τον πρώτο χρόνο.

Υπό αυτές τις συνθήκες και προκειμένου να περάσουμε στους υπολογισμούς μας, διαλέξαμε μια ενδεικτική διαδρομή μέσα στην Βαλτική. Έτσι θεωρούμε ότι το πλοίο εκτελεί συνεχώς τη σταθερή διαδρομή μεταξύ των λιμένων του Gothenburg (Σουηδία) και Riga (Λετονία) όπως φαίνεται στον χάρτη παρακάτω. Η διαδρομή έχει απόσταση 746 ναυτικών μιλίων (nm) ενώ είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι και οι δυο λιμένες αποτελούν σταθμούς ανεφοδιασμού LNG από το 2017 και έπειτα, με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα ανεφοδιασμού σε κάθε λιμάνι.



**Figure 40 Διαδρομή Gothenburg (Σουηδία)-Riga (Λετονία)**

(Πηγή:Google Maps)

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της κύριας και των βοηθητικών μηχανών που τοποθετήσαμε στο πλοίο προκύπτουν οι αντίστοιχες ειδικές καταναλώσεις στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 8 Καταναλώσεις Κύριας Μηχανής και Βοηθητικών Μηχανών**

<b>Wärtsilä 6X62DF</b>	
<b>Απόδοση (Output MCR)</b>	14310 KW x 103 rpm
<b>75% MCR</b>	10732,5 KW
<b>BSGC gas (gas mode)</b>	142.5 g/KWh
<b>BSFC (diesel mode)</b>	180 g/KWh
<b>BSPC pilot fuel (gas mode)</b>	1 g/KWh

<b>(3X) MAN 6L23/30DF</b>	
<b>Απόδοση (Output MCR)</b>	750 KW
<b>60% MCR</b>	450 KW
<b>BSGC gas (gas mode)</b>	180 g/KWh
<b>BSFC (diesel mode)</b>	200 g/KWh

Σύμφωνα λοιπόν με την διαδρομή που έχει να καλύψει το πλοίο, την ταχύτητά του, το φορτίο του και τις υπηρεσίες των λιμένων καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 9 Διαδρομή Gothenburg-Riga-Gothenburg**

<b>Route</b>	<b>Gothenburg-Riga-Gothenburg</b>
<b>V (Ταχύτητα)</b>	14.5 kn
<b>Απόσταση διαδρομής</b>	1492 NM
<b>Ώρες στη θάλασσα</b>	102.9
<b>Μέρες στη θάλασσα</b>	4.3
<b>Ώρες στους λιμένες (Φορτοεκφόρτωση)</b>	60
<b>Μέρες στους λιμένες (Φορτοεκφόρτωση)</b>	2.5
<b>Ώρες εισόδου-εξόδου σε-από λιμένες</b>	4
<b>Μέρες εισόδου-εξόδου σε-από λιμένες</b>	0.17
<b>Ώρες σύνολο ταξιδιού</b>	166.9

<b>Μέρες σύνολο ταξιδιού</b>	6.9
------------------------------	-----

Βασιζόμενοι στις ειδικές καταναλώσεις καταναλώσεις του LNG των μηχανών όπως έχουν αναλυθεί στο παραπάνω πίνακες, καθώς και στη διαδρομή Gothenburg-Riga-Gothenburg που χρησιμοποιούμε στη μελέτη μας, προχωράμε στον υπολογισμό της ζήτησης σε LNG. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί (θα αναλυθεί και θα αιτιολογηθεί στις επόμενες σελίδες που θα γίνει η αναγωγή σε ετήσιες καταναλώσεις) το εξής:

- Για πλεύση σε ανοιχτή θάλασσα, βρίσκεται σε λειτουργία η κύρια μηχανή καθώς και μια από τις τρεις βοηθητικές
- Για πλεύση από και προς το λιμένα, σε μικρή απόσταση από αυτόν, για τις ανάγκες των ελιγμών, βρίσκεται σε λειτουργία η κύρια μηχανή και δύο εκ των βοηθητικών.
- Κατά τη διάρκεια φορτοεκφόρτωσης εντός λιμένων, λειτουργούν μόνο οι τρεις βοηθητικές μηχανές.

Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε αναλυτικά τη ζήτηση σε LNG και pilot fuel για την εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου ταξιδιού.

**Πίνακας 10 Η ζήτηση σε LNG και pilot fuel για την εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου ταξιδιού**

<b>Κατανάλωση σε ανοιχτή θάλασσα</b>	
<b>Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (LNG)</b>	157.36 mt
<b>Κατανάλωση Βοηθητικής Μηχανής (LNG)</b>	8.33 mt
<b>Συνολική κατανάλωση (LNG)</b>	165.69 mt
<b>Κατανάλωση σε είσοδο/έξοδο</b>	
<b>Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (LNG)</b>	2.85 mt
<b>Κατανάλωση 2 Βοηθητικών Μηχανών (LNG)</b>	0.65 mt
<b>Κατανάλωση στο λιμάνι</b>	
<b>Κατανάλωση 3 Βοηθητικών Μηχανών (LNG)</b>	14.58 mt



<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (LNG)</b>	183.77 mt
<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (LNG)</b>	406.13 m <sup>3</sup>
<b>Κατανάλωση pilot fuel</b>	1.1 mt

Από το παραπάνω πίνακα γίνεται εύκολα κατανοητό το γεγονός ότι το πλοίο καύσης LNG έχει επαρκή αυτονομία καθώς μπορεί να εκτελέσει τη διαδρομή με ζήτηση 406.13 m<sup>3</sup> όταν η αυτονομία που του παρέχει η δεξαμενή που του εγκαταστήσαμε ξεπερνά τα 600 m<sup>3</sup>. Επίσης δεν καθιστά απαραίτητο τον ανεφοδιασμό και στους 2 λιμένες.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι κύριες μηχανές και οι βοηθητικές μηχανές διπλού καυσίμου μπορούν να λειτουργήσουν και σε diesel mode σε κατάσταση ανάγκης. Υπό αυτή την έννοια πρέπει να μελετήσουμε τις καταναλώσεις του πλοίου σε diesel mode κατά τη διάρκεια του ίδιου ταξιδιού. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 11 Η ζήτηση σε Diesel για την εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου ταξιδιού

<b>Κατανάλωση σε ανοιχτή θάλασσα</b>	
<b>Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (Diesel)</b>	198.78 mt
<b>Κατανάλωση Βοηθητικής Μηχανής (Diesel)</b>	9.26 mt
<b>Συνολική κατανάλωση (Diesel)</b>	208.04 mt
<b>Κατανάλωση σε είσοδο/έξοδο</b>	
<b>Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (Diesel)</b>	3.6 mt
<b>Κατανάλωση 2 Βοηθητικών Μηχανών (Diesel)</b>	0.72 mt
<b>Κατανάλωση στο λιμάνι</b>	
<b>Κατανάλωση 3 Βοηθητικών Μηχανών (Diesel)</b>	16.2 mt
<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (Diesel)</b>	228.56 mt

Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (Diesel)	505.12 m <sup>3</sup>
--	-----------------------

Προκειμένου να κάνουμε ένα πρώτο συγκριτικό αναφορικά με τα λειτουργικά έξοδα του πλοίου (κατανάλωση καυσίμων) στα σενάρια που έχουμε πάρει, δηλαδή μεταξύ του πλοίου καύσης διπλού καυσίμου και του αρχικού μας πλοίου με χρήση MGO, παραθέτουμε τις τιμές των καυσίμων στους επόμενους πίνακες. Εδώ θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι τιμές των καυσίμων αναφέρονται στον Απρίλιο του 2017, και είναι ο μέσος όρος των τιμών στις περιοχές της Ευρώπης και Μέσης Ανατολής. (19)



Εικόνα 41 Τιμές LNG ανά τον κόσμο για το μήνα Απρίλιο του 2017

(Πηγή: Federal Energy Regulatory Commission, (2017). World LNG Estimated Landed Prices.)

Σύμφωνα με τις τιμές του LNG στον παγκόσμιο χάρτη για το μήνα Απρίλιο 2017 και πριν προχωρήσουμε στην καταγραφή των τιμών των καυσίμων, πρέπει να σημειώσουμε ότι οι τιμές που βλέπουμε στον παραπάνω χάρτη, είναι σε \$/MMBTU. Η μετατροπή σε \$/ton για το LNG γίνεται ως εξής:  $1\text{MMBTU}=2.0301 \cdot 10^{-2}\text{ TONS LNG}$

Δηλαδή,  $1\$/\text{MMBTU}=49.26\ \$/\text{TON}$  για το LNG.

Πίνακας 12 Τιμές Καυσίμων (\$/ton)

Τιμές Καυσίμων (\$/ton)
-------------------------

<b>HFO (IFO 180)</b>	330
<b>MGO</b>	555
<b>LNG</b>	253
<b>LSFO</b>	440

Μετατρέπουμε τον παραπάνω πίνακα σε ευρώ ανά τόνο καυσίμου προκειμένου στο τέλος να γίνουν όλοι οι υπολογισμοί στο ίδιο νόμισμα. Η αντιστοιχία των δυο νομισμάτων είναι η ακόλουθη : 1\$=0.894€ σύμφωνα με την παγκόσμια αρχή συναλλάγματος.(26)

**Πίνακας 13 Τιμές Καυσίμων (€/ton)**

<b>Τιμές Καυσίμων (€/ton)</b>	
<b>HFO (IFO 180)</b>	295
<b>MGO</b>	496
<b>LNG</b>	226
<b>LSFO</b>	393

Σ αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι ενώ το αρχικό πλοίο καίει MGO, το υπό μελέτη καίει LNG εντός ECA και HFO έξω από αυτές τις περιοχές.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουμε συγκεντρώσει από την εταιρία, το αρχικό πλοίο που είναι εξοπλισμένο με συμβατική μηχανή καύσης HFO έχει κατανάλωση 172 g/KWh . Σύμφωνα λοιπόν με τις τιμές των καυσίμων που αναφέραμε παραπάνω, μπορούμε να παρατηρήσουμε την κατανάλωση της συμβατικής μηχανής και το αντίστοιχο κόστος για την διαδρομή που χρησιμοποιούμε (Gothenburg-Riga-Gothenburg). Η χρήση MGO γίνεται λόγω της δράσης σε περιοχή SECA.

**Πίνακας 14 Η ζήτηση σε MGO για την εκπόνηση ενός ολοκληρωμένου ταξιδιού**

<b>Κατανάλωση σε ανοιχτή θάλασσα</b>	
<b>Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (MGO)</b>	189.5 mt
<b>Κατανάλωση Βοηθητικής Μηχανής (MGO)</b>	7.5 mt

<b>Συνολική κατανάλωση (MGO)</b>	197 mt
<b>Κατανάλωση σε είσοδο/έξοδο</b>	
<b>Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (MGO)</b>	3.43 mt
<b>Κατανάλωση 2 Βοηθητικών Μηχανών (MGO)</b>	0.59 mt
<b>Κατανάλωση στο λιμάνι</b>	
<b>Κατανάλωση 3 Βοηθητικών Μηχανών (MGO)</b>	13.3 mt
<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (MGO)</b>	
<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (MGO)</b>	214.32mt
<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (MGO)</b>	473.64 m <sup>3</sup>

Συνεπώς:

**Πίνακας 15 Κόστος Ταξιδιού για MGO**

<b>Κόστος Ταξιδιού (MGO)</b>	<b>106302.72 €</b>
------------------------------	--------------------

Ακολουθώς κάνουμε τον ίδιο υπολογισμό για την περίπτωση καύσης LNG:

**Πίνακας 16 Κόστος Ταξιδιού για LNG**

<b>Κόστος LNG κατά το ταξίδι</b>	<b>41532.02 €</b>
<b>Κόστος LSFO ως pilot fuel</b>	<b>432.3 €</b>
<b>Κόστος ταξιδιού (LNG)</b>	<b>41964.32€</b>

Μετά τους υπολογισμούς κόστους καυσίμου για ένα ολοκληρωμένο ταξίδι, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στην περίπτωση χρήσης LNG εξοικονομούνται περισσότερα από τα μισά χρήματα σε σχέση με το σενάριο χρήσης MGO. Ένα τέτοιο γεγονός μπορεί να χαρακτηριστεί λογικό καθώς το πλοίο δραστηριοποιείται σε περιοχή ECA και συνεπώς η χρήση του κατά πολύ ακριβότερου MGO γίνεται επιτακτική.

Παρ όλα αυτά, δεν έχουμε προχωρήσει ακόμα σε μια ολοκληρωμένη οικονομική ανάλυση, παρά μόνο σε μια ενδεικτική προσέγγιση κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού ούτως ώστε να αποκτήσουμε μια πρώτη εικόνα για την οικονομική διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δύο σεναρίων. Για να δημιουργήσουμε όμως μια ολοκληρωμένη εικόνα θα πρέπει να συνυπολογίσουμε τόσο το επενδυτικό κεφάλαιο (κόστος αγοράς συνολικού εξοπλισμού σε κάθε σενάριο) όσο και το κόστος λειτουργίας που βασίζεται στην ετήσια κατανάλωση σε κάθε περίπτωση.

Για να υπολογιστεί το επενδυτικό κεφάλαιο προχωρήσαμε στην υιοθέτηση των στοιχείων του Danish Maritime Authority σύμφωνα με τα οποία για να υλοποιηθεί ο υπολογισμός αυτός χρησιμοποιείται τόσο η εγκατεστημένη ισχύς της κύριας μηχανής όσο και των ηλεκτρομηχανών. Πρέπει να τονιστεί ότι συμπεριλαμβάνει όλα τα συστήματα, βοηθητικά και ασφαλείας, που απαιτούνται για την μετασκευή του πλοίου. Τον υπολογισμό που μόλις περιγράψαμε παρατηρούμε αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 17 Επενδυτικό κόστος σεναρίου χρήσης MGO

<b>Επενδυτικό κόστος σεναρίου χρήσης MGO</b>	
<b>Επένδυση για motor conversion/fuel cooler/fuel pumps (€)</b>	130000
<b>Επένδυση για SCR (€/kW<sub>main+aux</sub>)</b>	45
<b>Επενδυτικό κόστος για SCR/EGR (€/kW<sub>main+aux</sub>)</b>	9

Πίνακας 18 Επενδυτικό κόστος σεναρίου χρήσης LNG

<b>Επενδυτικό κόστος σεναρίου χρήσης LNG</b>	
<b>Κόστος εγκατάστασης (€/kW<sub>main+aux</sub>)</b>	150
<b>Επένδυση για SCR (€/kW<sub>main+aux</sub>)</b>	45

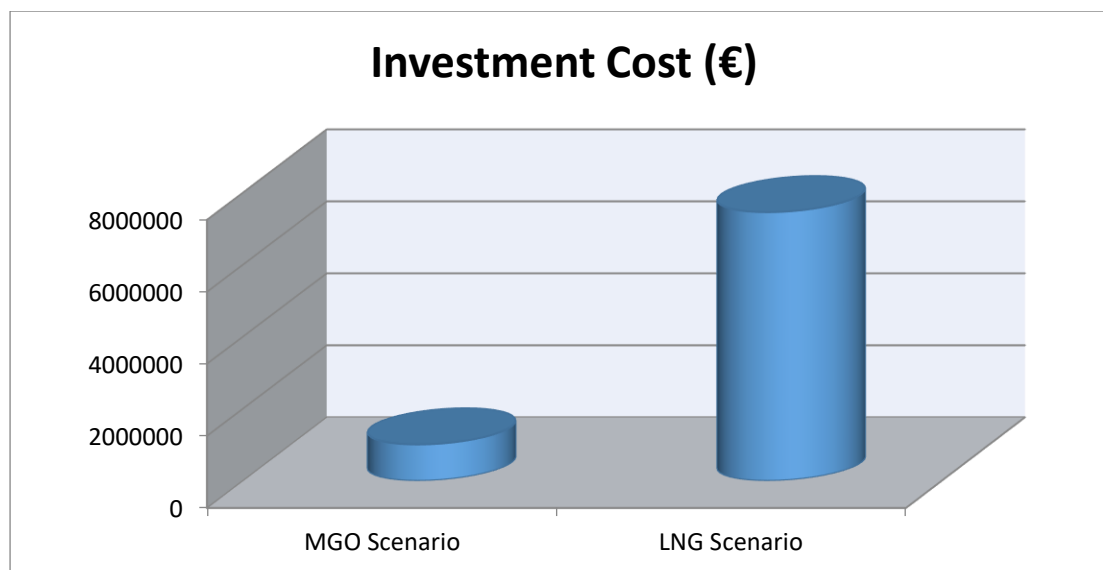
<b>Επενδυτικό κόστος για SCR/EGR (€/kW<sub>main+aux</sub>)</b>	9
<b>Επενδυτικό κόστος για LNG fuel gas supply system tanks (€/kW<sub>main</sub>)</b>	245
<b>Επενδυτικό κόστος για conversion HFO to LNG/HFO (€/kW<sub>main</sub>)</b>	40

Σύμφωνα με τις τιμές αυτές μπορούμε να καταλήξουμε στους τελικούς υπολογισμούς αναφορικά με την αρχική επένδυση σε κάθε σενάριο.

**Πίνακας 19 Υπολογισμός Επενδυτικού Κόστους Σεναρίων**

<b>Επενδυτικό κόστος</b>	
<b>Επενδυτικό κόστος σεναρίου χρήσης MGO (€)</b>	1.004.800
<b>Επενδυτικό κόστος σεναρίου χρήσης LNG (€)</b>	7.456.590

Το κόστος για τις απαιτούμενες μετατροπές στο σενάριο καύσης LNG είναι περίπου 7.5 φορές μεγαλύτερο από εκείνο στο σενάριο καύσης MGO όπως παρουσιάζεται παραστατικά στο γράφημα που ακολουθεί.



**Διάγραμμα 1** Επενδυτικό Κόστος Σεναρίων

Παρ όλα αυτά το σημαντικό στοιχείο είναι κατά πόσον τα λειτουργικά έξοδα των δύο σεναρίων είναι τέτοια ώστε η επιλογή μετασκευής σε πλοίο καύσης LNG είναι συμφέρουσα προς την πλοιοκτήτρια εταιρία. Για να μπορέσουμε να φτάσουμε σε αυτό το συμπέρασμα πρέπει να υπολογίσουμε αναλυτικά τα λειτουργικά έξοδα κατά τη διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους για κάθε ένα από τα δύο σενάρια. Δεν πρέπει να παραβλέψουμε το γεγονός ότι θεωρούμε δεδομένο πως τα έσοδα από την χρήση του πλοίου κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις καθώς και την παραδοχή ότι οι τιμές των καυσίμων παραμένουν αμετάβλητες.

Στον υπολογισμό των ετήσιων λειτουργικών εξόδων έχουν γίνει επιπλέον οι παρακάτω παραδοχές :

Ο χρόνος λειτουργίας του πλοίου κατά τη διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους χωρίζεται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Λειτουργία σε ανοικτή θάλασσα, η κύρια μηχανή λειτουργεί στο 75% της MCR, ενώ οι βοηθητικές στο 60% της MCR. Από τις 3 βοηθητικές, κατά τη λειτουργία σε ανοικτή θάλασσα, σε λειτουργία βρίσκεται μόνο η μια. Αυτός ο χρόνος εκτιμήθηκε στις 5145 ώρες, περίπου 214 μέρες.
- Λειτουργία κοντά στο λιμένα. Η κύρια μηχανή λειτουργεί στο 35% του MCR. Από τις 3 βοηθητικές, κατά τη λειτουργία εντός λιμένα, σε λειτουργία βρίσκονται πλέον δύο από αυτές, ώστε να υποστηρίξουν το bow thruster κατά τη λειτουργία του. Για να διευκρινιστεί σωστά η συγκεκριμένη κατηγορία,

αναφερόμαστε στον χρόνο που χρειάζεται το πλοίο κατά την είσοδο και έξοδο από το λιμάνι, η οποία φτάνει προσεγγιστικά τη 1 ώρα. Αυτός ο χρόνος εκτιμήθηκε στις 200 ώρες, περίπου 9 μέρες.

- Λειτουργία κατά την φορτοεκφόρτωση. Εδώ η κύρια μηχανή είναι εκτός λειτουργίας και οι βοηθητικές δουλεύουν στο 60% του MCR. Λόγω της λειτουργίας των γερανών και των υπολοίπων μέσων φορτοεκφόρτωσης, θεωρείται ότι δουλεύουν 3 βοηθητικές μηχανές. Εκτιμώμενος χρόνος 3000 ώρες, περίπου 125 μέρες.
- Δεν υπάρχει λειτουργία οποιασδήποτε εκ των μηχανών κατά τη διάρκεια του δεξαμενισμού ή άλλων επισκευών. Περίπου 17-18 μέρες.

Με βάση τις υπηρεσίες των λιμένων (ταχύτητα φορτοεκφόρτωσης), το είδος του μεταφερόμενου φορτίου και στατιστικά στοιχεία εμπορικών λιμένων, θεωρούμε ότι το πλοίο χρειάζεται 30 ώρες σε κάθε λιμάνι για τις ανάγκες φορτοεκφόρτωσης.

Η κατανάλωση είναι σε ton/year.

Προχωράμε στον υπολογισμό της κατανάλωσης κατά τη διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους, και στα δύο σενάρια με σκοπό να υπολογίσουμε το κόστος κάθε σεναρίου. Ο υπολογισμός αυτός θα γίνει για τρεις περιπτώσεις:

- Το πλοίο των σεναρίων μας να κινείται το 100% του χρόνου σε θαλάσσιες περιοχές ECA
- Το πλοίο των σεναρίων μας να κινείται το 70% του χρόνου σε θαλάσσιες περιοχές ECA
- Το πλοίο των σεναρίων μας να κινείται το 50% του χρόνου σε θαλάσσιες περιοχές ECA

### 100% ECA AREA



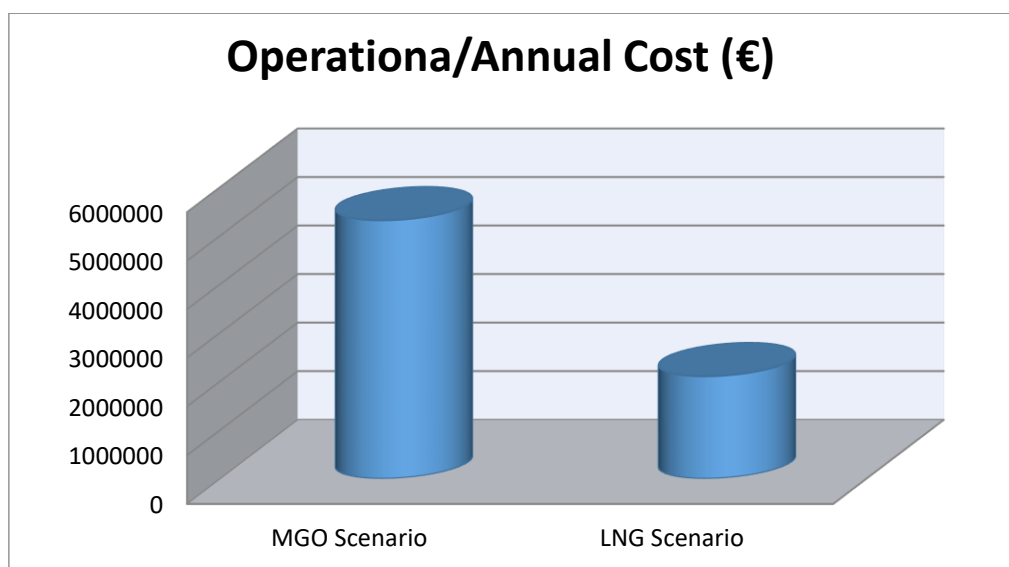
Πίνακας 20 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου LNG

<b>SCENARIO DUAL FUEL ENGINE / ANNUAL REVIEW</b>	
<b>Κατανάλωση σε ανοιχτή θάλασσα</b>	
Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (LNG) (tons)	7868.666531
Κατανάλωση Βοηθητικής Μηχανής (LNG) (tons)	416.745
Συνολική κατανάλωση (LNG) (tons)	8285.411531
<b>Κατανάλωση σε είσοδο/έξοδο</b>	
Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (LNG) (tons)	142.443
Κατανάλωση 2 Βοηθητικών Μηχανών (LNG) (tons)	32.4
<b>Κατανάλωση στο λιμάνι</b>	
Κατανάλωση 3 Βοηθητικών Μηχανών (LNG) (tons)	729
Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (LNG) (tons)	9189.254531
Κατανάλωση pilot fuel	55.2187125
Συνολικό ετήσιο κόστος (€)	2098472.478

Πίνακας 21 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου MGO

<b>SCENARIO CONVENTIONAL ENGINE / ANNUAL REVIEW</b>	
<b>Κατανάλωση σε ανοιχτή θάλασσα</b>	
Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (MGO) (tons)	9477.7074
Κατανάλωση Βοηθητικής Μηχανής (MGO) (tons)	375.3792
Συνολική κατανάλωση (MGO) (tons)	9853.0866
<b>Κατανάλωση σε είσοδο/έξοδο</b>	
Κατανάλωση Κύριας Μηχανής (MGO) (tons)	171.9312
Κατανάλωση 2 Βοηθητικών Μηχανών (MGO) (tons)	29.184
<b>Κατανάλωση στο λιμάνι</b>	
Κατανάλωση 3 Βοηθητικών Μηχανών (MGO) (tons)	656.64
Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (MGO) (tons)	10710.8418
Συνολικό ετήσιο κόστος (€)	5312577.533

Από τους παραπάνω πίνακες γίνεται σαφές ότι το κόστος του LNG που καταναλώνεται στη διάρκεια ενός έτους είναι κατά προσέγγιση 3.2 εκατομμύρια ευρώ λιγότερο από το κόστος κατανάλωσης MGO στο ίδιο χρονικό διάστημα όταν και τα δύο πλοία κινούνται το 100% του χρόνου μέσα σε περιοχές ECA. Αν θέλαμε να αναπαραστήσουμε γραφικά αυτή τη διαφορά τα αποτελέσματα αυτά θα το επιτυγχάναμε με το παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 2 Κόστος καυσίμου μεταξύ των δύο σεναρίων

Είναι προφανές και γραφικά ότι το κόστος κατανάλωσης MGO είναι περίπου 2.5 φορές μεγαλύτερο από το κόστος κατανάλωσης του μετασκευασμένου πλοίου καύσης διπλού καυσίμου που στην περίπτωση αυτή θα καίει 100% LNG καθώς όπως αναφέρθηκε το πλοίο θα κινείται μόνο σε περιοχές ECA.

Με βάση αυτά τα δεδομένα, είναι πλέον σαφές ότι ο υπολογισμός του χρόνου αποπληρωμής της επένδυσης (Payback Period) στην οποία προχωρήσαμε για μετασκευή σε πλοίο καύσης διπλού καυσίμου, είναι απλός. Για την ακρίβεια πρέπει να καλυφθεί το ποσό των 6.451.790 ευρώ που είναι η διαφορά των δύο επενδυτικών σεναρίων, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω, από τα 3.214.105 ευρώ που εξοικονομούνται από τη χρήση LNG σε σχέση με εκείνη του σεναρίου του MGO σε ένα ημερολογιακό έτος. Πρακτικά, για να μπορέσει να γίνει αυτό θα χρειαστούν δύο

χρόνια. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της μεγάλης διαφοράς της τιμής των δύο καυσίμων, όσο περισσότερο χρόνο περνάει ένα πλοίο μέσα σε περιοχές ECA, τόσο μικρότερη είναι η περίοδος αποπληρωμής.

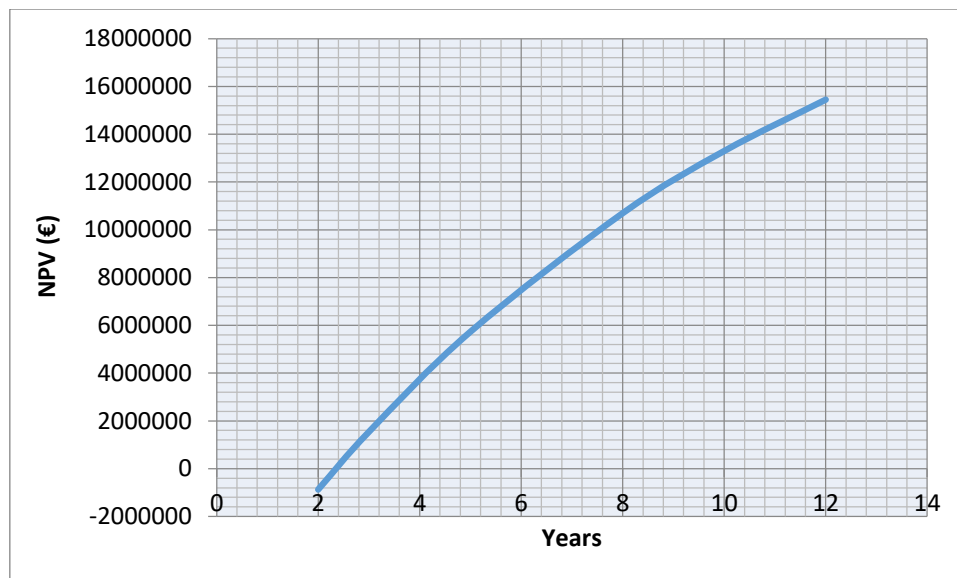
Παρ όλα αυτά, το κριτήριο του PBP δεν είναι απόλυτα ακριβές, από την άποψη ότι μπορεί μεν να προσεγγίζει την περίοδο αποπληρωμής, χωρίς όμως παράλληλα να συνυπολογίζει την αξία του χρήματος στο πέρας του χρόνου. Ένα πιο ακριβές κριτήριο είναι αυτό της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value). Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό μπορούμε να κάνουμε μια ασφαλέστερη πρόβλεψη για το κατά πόσον είναι συμφέρουσα μια επενδυτική κίνηση την οποία πραγματοποιήσαμε. Εφόσον το NPV είναι θετικό, τότε η επενδυτική μας πρόταση θεωρείται σωστή και συμφέρουσα ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί. Αν είναι αρνητικό τότε ισχύει το αντίθετο. Είναι κοινώς αποδεκτό ότι για τα περισσότερα των κριτηρίων προκύπτουν και μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι στην απόφαση-συμπέρασμα για το κατά πόσον μια επενδυτική πρόταση είναι οικονομικά συμφέρουσα η όχι, δεν συμψηφίζεται ο παράγοντας της ψυχολογίας που θεωρείται σημαντικός (16).

Στην περίπτωση αυτή θα παρουσιάσουμε το αποτέλεσμα των υπολογισμών για το NPV καθώς και τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR) της επένδυσής μας σε 2,3,5,8,10 και 12 χρόνια στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 22 Υπολογισμός NPV-IRR**

<b>Δύο χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	-873.591,14
	IRR	0%
<b>Τρία χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	1.541.213,55
	IRR	23%
<b>Πέντε χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	5.732.196,91
	IRR	41%
<b>Οχτώ χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	10.695.223,26
	IRR	48%
<b>Δέκα χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	13.297.494,19
	IRR	49%
<b>Δώδεκα χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	15.448.131,33
	IRR	49%

Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι για αξιολόγηση της επένδυσής μας για 3 χρόνια και πάνω η επένδυσή μας είναι μια επένδυση που αξίζει να υλοποιηθεί. Σε αξιολόγηση όμως στα δύο χρόνια, με discount rate να ορίζεται στο 10%, έχουμε αρνητική καθαρή παρούσα αξία και συνεπώς η επένδυσή μας χαρακτηρίζεται ως μη συμφέρουσα. Πρακτικά κατανοούμε ότι εφόσον στα δύο χρόνια το IRR είναι 0% θα έπρεπε να έχουμε discount rate επίσης 0% ούτως ώστε να στηριχθεί η επένδυσή μας, να είναι δηλαδή μη ζημιογόνα. Στο παρακάτω γράφημα μπορούμε να παρακολουθήσουμε και πρακτικά την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσής μας σε συνάρτηση με το χρόνο.



Διάγραμμα 3 NPV-Time

## 70% ECA AREA

Αφού ολοκληρώσαμε το σενάριο κατά το οποίο το πλοίο μας κινείται μόνο σε περιοχές ECA, και παρουσιάσαμε με τον πλέον αναλυτικό τρόπο την διαδικασία των υπολογισμών αλλά και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν ακριβώς με τις ίδιες μεθόδους για τις περιπτώσεις που το πλοίο κινείται το 70% του χρόνου σε περιοχές ECA με σκοπό να παρατηρήσουμε την διαφορά στον απαιτούμενο χρόνο απόσβεσης και το κατά πόσον αλλάζει η αξιολόγηση της επένδυσης.

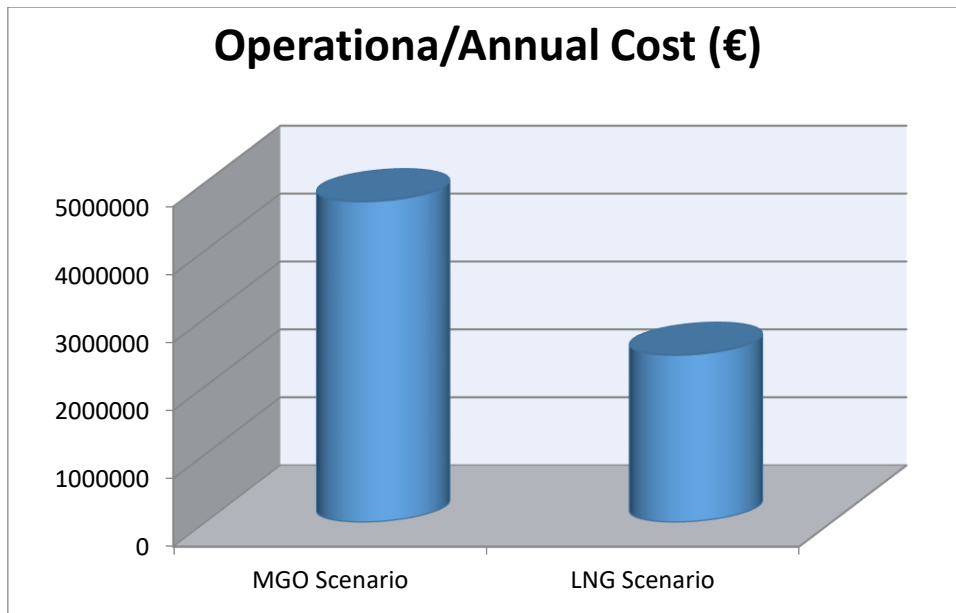
Πίνακας 23 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου LNG

<b>SCENARIO DUAL FUEL ENGINE / ANNUAL REVIEW</b>	
<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (LNG) (tons)</b>	<b>6703.631072</b>
<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (HFO) (tons)</b>	<b>3120.725475</b>
<b>Κατανάλωση pilot fuel</b>	<b>55.2187125</b>
<b>Συνολικό ετήσιο κόστος (€)</b>	<b>2457335.591</b>

Πίνακας 24 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου MGO

<b>SCENARIO CONVENTIONAL ENGINE / ANNUAL REVIEW</b>	
<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (HFO) (tons)</b>	<b>2955.92598</b>
<b>Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (MGO) (tons)</b>	<b>7754.91582</b>
<b>Συνολικό ετήσιο κόστος (€)</b>	<b>4718436.411</b>

Από τους παραπάνω πίνακες γίνεται σαφές ότι το κόστος του LNG που καταναλώνεται στη διάρκεια ενός έτους είναι κατά προσέγγιση 2.2 εκατομμύρια ευρώ λιγότερο από το κόστος κατανάλωσης MGO στο ίδιο χρονικό διάστημα όταν και τα δύο πλοία κινούνται το 70% του χρόνου μέσα σε περιοχές ECA. Αν θέλαμε να αναπαραστήσουμε γραφικά αυτή τη διαφορά τα αποτελέσματα αυτά θα το επιτυγχάναμε με το παρακάτω διάγραμμα



Διάγραμμα 4 Κόστος καυσίμου μεταξύ των δύο σεναρίων

Είναι προφανές και γραφικά ότι το κόστος κατανάλωσης MGO είναι περίπου 2 φορές μεγαλύτερο από το κόστος κατανάλωσης του μετασκευασμένου πλοίου καύσης διπλού καυσίμου καθώς όπως αναφέρθηκε το πλοίο θα κινείται το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου περιοχές ECA.

Με βάση αυτά τα δεδομένα, είναι πλέον σαφές ότι ο υπολογισμός του χρόνου αποπληρωμής της επένδυσης (Payback Period) στην οποία προχωρήσαμε για μετασκευή σε πλοίο καύσης διπλού καυσίμου, είναι απλός. Για την ακρίβεια πρέπει να καλυφθεί το ποσό των 6.451.790 ευρώ που είναι η διαφορά των δύο επενδυτικών σεναρίων, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω, από τα 2.261.100 ευρώ που εξοικονομούνται από τη χρήση LNG σε σχέση με εκείνη του σεναρίου του MGO σε ένα ημερολογιακό έτος. Πρακτικά, για να μπορέσει να γίνει αυτό θα χρειαστούν 2.85 χρόνια. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της μεγάλης διαφοράς της τιμής των δύο καυσίμων, όσο περισσότερο χρόνο περνάει ένα πλοίο μέσα σε περιοχές ECA, τόσο μικρότερη είναι η περίοδος αποπληρωμής.

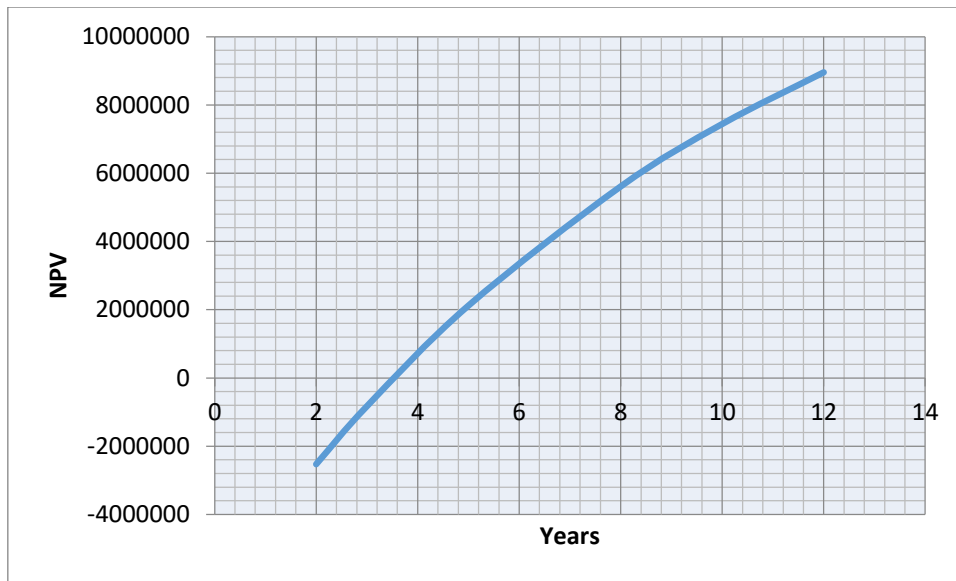
Παρ όλα αυτά, το κριτήριο του PBP δεν είναι απόλυτα ακριβές, από την άποψη ότι μπορεί μεν να προσεγγίζει την περίοδο αποπληρωμής, χωρίς όμως παράλληλα να συνυπολογίζει την αξία του χρήματος στο πέρας του χρόνου. Ένα πιο ακριβές κριτήριο είναι αυτό της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value). Στην περίπτωση αυτή θα παρουσιάσουμε το αποτέλεσμα των υπολογισμών για το NPV

καθώς και τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR) της επένδυσής μας σε 2,3,5,8,10 και 12 χρόνια στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 25 Υπολογισμός NPV-IRR**

<b>Δύο χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	-2.527.565,44
	IRR	-21%
<b>Τρία χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	-828.766,92
	IRR	3%
<b>Πέντε χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	2.119.561,071
	IRR	22%
<b>Οχτώ χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	5.611.015,99
	IRR	31%
<b>Δέκα χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	7.441.695,71
	IRR	33%
<b>Δώδεκα χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	8.954.654,16
	IRR	34%

Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι για αξιολόγηση της επένδυσής μας για 5 χρόνια και πάνω η επένδυσή μας είναι μια επένδυση που αξίζει να υλοποιηθεί. Σε αξιολόγηση όμως στα τρία ή ακόμα χειρότερα στα δύο χρόνια, με discount rate να ορίζεται στο 10%, έχουμε αρνητική καθαρή παρούσα αξία και συνεπώς η επένδυσή μας χαρακτηρίζεται ως μη συμφέρουσα. Πρακτικά κατανοούμε ότι εφόσον στα δύο χρόνια το IRR είναι -21% η επένδυσή μας είναι ζημιογόνος, ενώ σε μια εντελώς θεωρητική προσέγγιση, το 3% των 3 χρόνων μας παραπέμπει στην εύρεση άλλης επένδυσης που να μας αποδίδει από 3% και πάνω. Στο παρακάτω γράφημα μπορούμε να παρακολουθήσουμε και πρακτικά την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσής μας σε συνάρτηση με το χρόνο.



Διάγραμμα 5 NPV-Time



## 50% ECA AREA

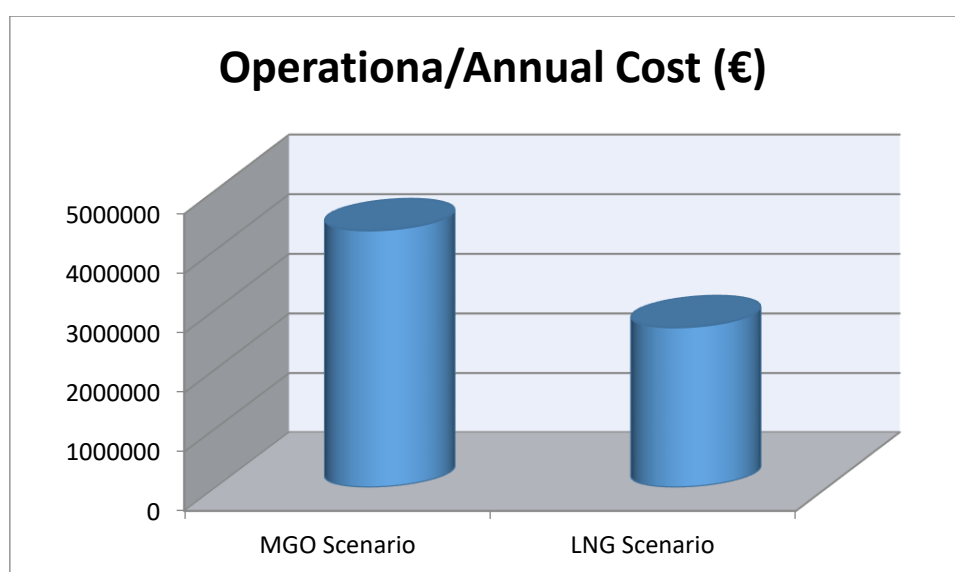
Πίνακας 26 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου LNG

SCENARIO DUAL FUEL ENGINE / ANNUAL REVIEW	
Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (LNG) (tons)	5046.548766
Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (HFO) (tons)	5201.209125
Κατανάλωση pilot fuel	55.2187125
Συνολικό ετήσιο κόστος (€)	2696577.667

Πίνακας 27 Ετήσιο κόστος καυσίμου σεναρίου MGO

SCENARIO CONVENTIONAL ENGINE / ANNUAL REVIEW	
Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (HFO) (tons)	4926.5433
Συνολική κατανάλωση ταξιδιού (MGO) (tons)	5784.2985
Συνολικό ετήσιο κόστος (€)	4322342.33

Σύμφωνα με την τελευταία περίπτωση που εξετάζουμε γίνεται σαφές ότι το κόστος του LNG που καταναλώνεται στη διάρκεια ενός έτους είναι κατά προσέγγιση 1.6 εκατομμύρια ευρώ λιγότερο από το κόστος κατανάλωσης MGO στο ίδιο χρονικό διάστημα όταν και τα δύο πλοία κινούνται το ήμισυ του χρόνου μέσα σε περιοχές ECA. Αν θέλαμε να αναπαραστήσουμε γραφικά αυτή τη διαφορά τα αποτελέσματα αυτά θα το επιτυγχάναμε με το παρακάτω διάγραμμα



Διάγραμμα 6 Κόστος καυσίμου μεταξύ των δύο σεναρίων

Είναι προφανές και γραφικά ότι το κόστος κατανάλωσης MGO είναι περίπου 1.5 φορά μεγαλύτερο από το κόστος κατανάλωσης του μετασκευασμένου πλοίου καύσης διπλού καυσίμου καθώς όπως αναφέρθηκε το πλοίο θα κινείται το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου περιοχές ECA.

Με βάση αυτά τα δεδομένα, είναι πλέον σαφές ότι ο υπολογισμός του χρόνου αποπληρωμής της επένδυσης (Payback Period) στην οποία προχωρήσαμε για μετασκευή σε πλοίο καύσης διπλού καυσίμου, είναι απλός. Για την ακρίβεια πρέπει να καλυφθεί το ποσό των 6.451.790 ευρώ που είναι η διαφορά των δύο επενδυτικών σεναρίων, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω, από τα 1.625.764 ευρώ που εξοικονομούνται από τη χρήση LNG σε σχέση με εκείνη του σεναρίου του MGO σε ένα ημερολογιακό έτος. Πρακτικά, για να μπορέσει να γίνει αυτό θα χρειαστούν 3.96 χρόνια.

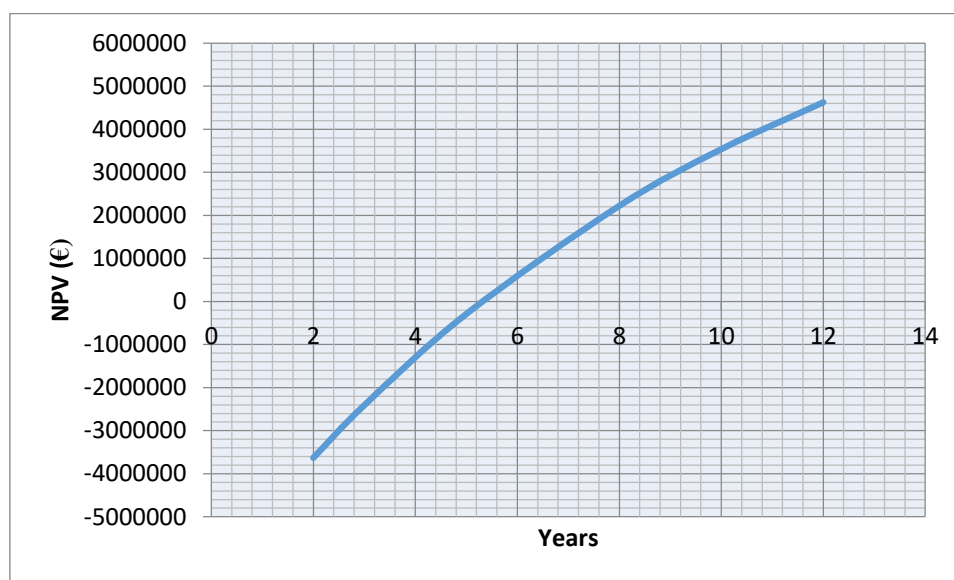
Παρ όλα αυτά, το κριτήριο του PBP δεν είναι απόλυτα ακριβές, από την άποψη ότι μπορεί μεν να προσεγγίζει την περίοδο αποπληρωμής, χωρίς όμως παράλληλα να συνυπολογίζει την αξία του χρήματος στο πέρας του χρόνου. Ένα πιο ακριβές κριτήριο είναι αυτό της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value). Στην περίπτωση αυτή θα παρουσιάσουμε το αποτέλεσμα των υπολογισμών για το NPV καθώς και τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR) της επένδυσής μας σε 2,3,5,8,10 και 12 χρόνια στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 28 Υπολογισμός NPV-IRR**

<b>Δύο χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	-3.630.214,96
	IRR	-36%
<b>Τρία χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	-2.408.753,91
	IRR	-13%
<b>Πέντε χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	-288.862,82
	IRR	8%
<b>Οχτώ χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	2.221.544,49
	IRR	19%
<b>Δέκα χρόνια μετά την επένδυση</b>	NPV	3.537.830,06
	IRR	22%

Δώδεκα χρόνια μετά την επένδυση	NPV	4.625.669,38
	IRR	23%

Γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι για αξιολόγηση της επένδυσής μας για 8 χρόνια και πάνω η επένδυσή μας είναι μια επένδυση που αξίζει να υλοποιηθεί. Σε αξιολόγηση όμως στα πέντε, στα τρία ή ακόμα χειρότερα στα δύο χρόνια, με discount rate να ορίζεται στο 10%, έχουμε αρνητική καθαρή παρούσα αξία και συνεπώς η επένδυσή μας χαρακτηρίζεται ως μη συμφέρουσα. Πρακτικά κατανοούμε οτι εφόσον στα δύο χρόνια το IRR είναι -36% η επένδυσή μας είναι ζημιογόνος, ενώ σε μια εντελώς θεωρητική προσέγγιση, το 8% των πέντε χρόνων μας δίνει την πληροφορία ότι οριακά η επένδυσή μας δεν είναι συμφέρουσα καθώς απέχει μόλις 2 μονάδες από το discount rate. Στο παρακάτω γράφημα μπορούμε να παρακολουθήσουμε και πρακτικά την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσής μας σε συνάρτηση με το χρόνο.

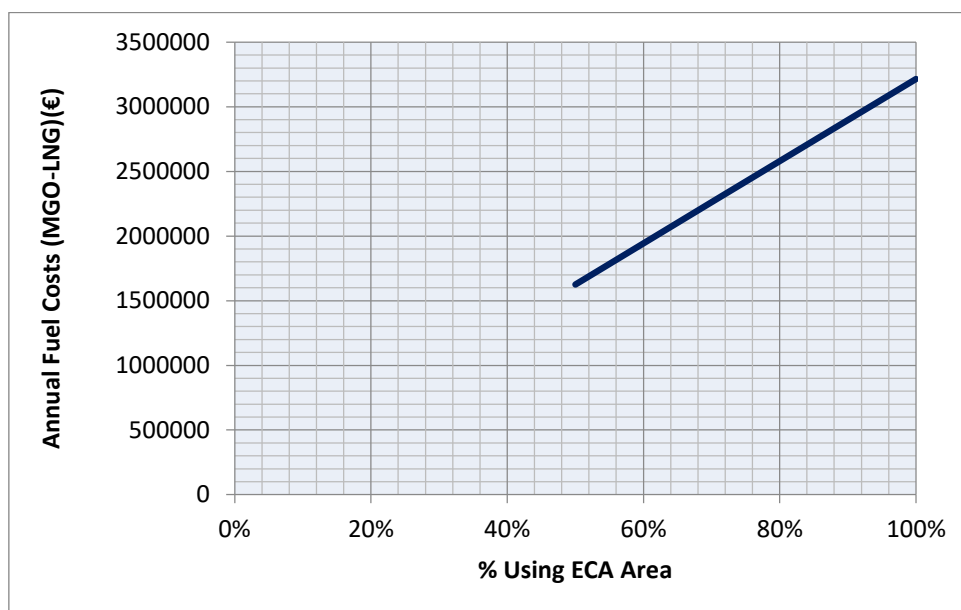


Διάγραμμα 7 NPV-Time

Το γράφημα πιστοποιεί με ακρίβεια αυτά που με λόγια αναφέραμε παραπάνω. Η καμπύλη του NPV μπαίνει στις θετικές τιμές οριακά μετά τα πέντε χρόνια, και η επένδυσή μας μετατρέπεται σε μια συμφέρουσα επένδυση.

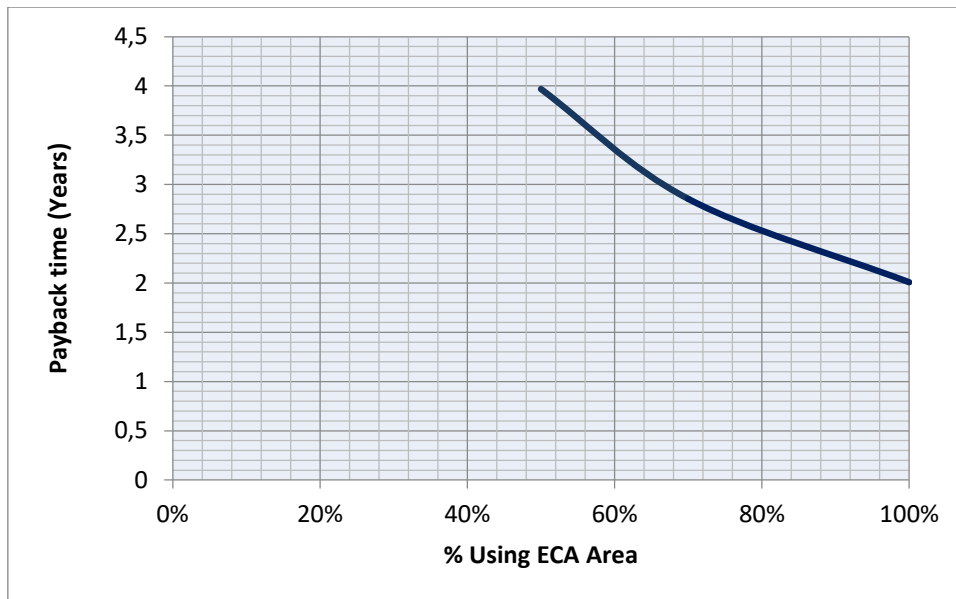
Μετά την εξέταση και των τριών περιπτώσεων διαφορετικής χρονικής διάρκειας έκθεσης σε περιοχές ECA για τα δύο σενάρια της μελέτης, γίνεται εξαγωγή άμεσων

συμπερασμάτων. Είναι σαφές ότι η αύξηση του χρόνου στις περιοχές με αυστηρό περιορισμό στην εκπομπή αερίων ρύπων, προκαλεί εξοικονόμηση χρημάτων, καθώς υπάρχει διαφορά στην τιμή του MGO και του LNG όπως παραθέσαμε λεπτομερώς παραπάνω. Η διαφορά αυτή γίνεται πολύ μικρότερη μεταξύ HFO (που χρησιμοποιείται εκτός ECA) και LNG γι αυτό και ο μειωμένος χρόνος έκθεσης στις περιοχές αυτές μειώνει και τη διαφορά στα ετήσια έξοδα για καύσιμα μεταξύ των δύο σεναρίων. Γραφικά το συμπέρασμα αυτό παρίσταται παρακάτω.



**Διάγραμμα 8 Διαφορά ετήσιου κόστους καυσίμου μεταξύ των δύο σεναρίων συναρτήση ποσοστού έκθεσης σε περιοχές ECA**

Παράλληλα το συμπέρασμα αυτό μας οδηγεί σε ένα ακόμα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στο κόστος των καυσίμων μέσα σε ένα ημερολογιακό έτος, τόσο πιο γρήγορα γίνεται η αποπληρωμή της επένδυσής μας για μετασκευή του πλοίου σε πλοίο καύσης διπλού καυσίμου. Πρακτικά αυτό μεταφράζεται ότι μεγαλύτερη έκθεση σε περιοχές ECA σημαίνει γρηγορότερη αποπληρωμή της επένδυσης. Γραφικά παρίσταται παρακάτω.



Διάγραμμα 9 Διάστημα απόσβεσης σεναρίου LNG σε συνάρτηση με το ποσοστό έκθεσης σε περιοχές ECA

## 5. Συμπεράσματα-Επίλογος

---

Μέσα σε μια περίοδο αλλαγών αναφορικά με τους ισχύοντες περιβαλλοντικούς κανονισμούς, ο κατά τα άλλα δυσμετάβλητος τομέας της ναυτιλίας καλείται να προχωρήσει σε βαθιές τομές ώστε να συμμορφωθεί τόσο με τους ισχύοντες κανονισμούς, που είναι εξαιρετικά αυστηρότεροι στις περιοχές ελέγχου των εκπομπών αερίων ρύπων, όσο και με τα μέτρα που θα εφαρμοστούν μέσα στην επόμενη τριετία. Με απαρχή αυτή την αναγκαιότητα όλα τα ερευνητικά και οικονομικά επιτελεία της ναυτιλιακής βιομηχανίας εργάζονται ακατάπαυστα ώστε να εμπλουτίζουν τα δεδομένα τους με απώτερο σκοπό να καταλήγουν στα βέλτιστα συμπεράσματα αναφορικά με τις στρατηγικές συμμόρφωσης που θα ακολουθήσουν.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο να παρουσιάσει την υφιστάμενη κατάσταση αναφορικά με τους διεθνείς κανονισμούς για τις εκπομπές αερίων ρύπων, να περιγράψει τις κυριότερες στρατηγικές συμμόρφωσης και να επικεντρωθεί σε εκείνη της μετασκευής ενός πλοίου μεταφοράς ξηρού φορτίου (bulk carrier) καύσης HFO σε πλοίο καύσης διπλού καυσίμου (LNG-HFO). Τεχνικά περιγράφονται λεπτομερώς όλες οι μετατροπές που είναι απαραίτητο να γίνουν ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί η μετασκευή. Αναφερόμαστε στην επιλογή κύριας μηχανής και τις συνθήκες λειτουργίας της, στην επιλογή ηλεκτρομηχανών, στην περιγραφή των δεξαμενών αποθήκευσης LNG και στον τρόπο-σημείο τοποθέτησής τους πάνω στο πλοίο με βάση τους ισχύοντες περιορισμούς. Αναφορά και περιγραφή της λειτουργίας τους γίνεται και για άλλα συστήματα όπως το Gas Valve Unit, το Pressure Built-Up Evaporator, το Main Gas Evaporator καθώς και stop, shutdown και block valves που χρησιμοποιούνται για λόγους ασφαλείας.

Μετά την ολοκλήρωση και της τεχνικής μελέτης, όπου γίνεται σαφής η εφικτότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος, οδηγηθήκαμε στο κατά γενική ομολογία πιο σημαντικό κομμάτι της εργασίας, την οικονομική αποτίμηση της επένδυσης μας. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι στόχος μιας οποιαδήποτε μελέτης, πέραν της εφικτότητας που αποτελεί το πρώτο κριτήριο απαραίτητο να ικανοποιείται ούτως ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί η μελέτη, είναι η επένδυση να είναι πέραν από οικονομικά βιώσιμη, ανταγωνιστική έναντι των υπολοίπων προτάσεων που προκύπτουν από την αγορά.

Στην περίπτωση της τρέχουσας μελέτης, τεχνικά προκύπτουν διάφορα σενάρια συμμόρφωσης με τους κανονισμούς. Η επιλογή να καταλήξουμε σε δύο από αυτά (χρήση MGO –μετασκευή για χρήση LNG) και να προχωρήσουμε στην οικονομική τους αξιολόγηση είχε να κάνει με την αφομοίωση τους από την αγορά. Πιο συγκεκριμένα η χρήση καυσίμου, χαμηλό σε περιεκτικότητες θείου που δεν απαιτεί μετασκευή του πλοίου, χρησιμοποιείται ευρέως, παρά το υψηλό κόστος του καυσίμου αυτού προκειμένου το πλοίο να κινείται σε περιοχές ECA. Στον αντίποδα, η μετασκευή-κατασκευή νέων πλοίων καύσης διπλού καυσίμου (LNG-HFO) δεν αποτελεί ιδιαίτερος δημοφιλή επιλογή. Παρ όλα αυτά, το χαμηλό κόστος του LNG ως καύσιμο αλλά και η επιβολή πιο αυστηρών κανονισμών για τις εκπομπές του θείου παγκοσμίως από το 2020 και ύστερα, το καθιστούν μια άκρως ελκυστική εναλλακτική επιλογή.

Η οικονομική αποτίμηση των δύο σεναρίων είχε ορισμένα ξεκάθαρα συμπεράσματα. Το επενδυτικό κόστος της επιλογής MGO είναι κατά πολύ χαμηλότερο από εκείνο της επιλογής LNG. Στον αντίποδα τα λειτουργικά τους έξοδα, αναφορικά με το κόστος καυσίμου στην διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους έχουν αντίστροφη εικόνα, με το σενάριο LNG να είναι χαμηλότερο οικονομικά σε σχέση με το σενάριο MGO. Το πόσο χαμηλότερο είναι το ένα σενάριο από το άλλο αναφορικά με τα λειτουργικά τους έξοδα έχει να κάνει άμεσα με την έκθεση του πλοίου σε περιοχές ελέγχου των εκπομπών. Η οικονομική αξιολόγηση κατέληξε στο συμπέρασμα ότι όσο περισσότερη έκθεση υπάρχει σε περιοχές ECA, τόσο συντομότερη είναι η περίοδος απόσβεσης του σεναρίου LNG. Ακόμα και στο δυσμενέστερο σενάριο του πλοίου να κινείται το μισό χρόνο σε περιοχές ECA και τον υπόλοιπο εκτός, καταλήξαμε στο γεγονός ότι, με χρήση του κριτηρίου NPV, με το πέρας της 5ετίας η μετασκευή σε πλοίο διπλού καυσίμου είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα σε σχέση με τη χρήση MGO.

Είναι προφανές ότι η χρήση LNG αποτελεί μια τομή στην παγκόσμια ναυτιλία. Παρ όλα αυτά είναι μια τεχνολογία που έχει εισαχθεί τα τελευταία χρόνια και ακόμα αναπτύσσεται. Η επόμενη 5ετία είναι εξαιρετικά κρίσιμη αναφορικά με την ανάπτυξη των υποδομών στους λιμένες παγκοσμίως ούτως ώστε να είναι ευκολότερη η χρήση του υγροποιημένου φυσικού αερίου από τα πλοία χωρίς να αποκλείονται μεγάλες εμπορικές διαδρομές λόγω της έλλειψης σταθμών ανεφοδιασμού. Θετικό οιωνό

αποτελεί το γεγονός ότι στην 5ετία που μόλις ολοκληρώθηκε σημειώθηκε τεράστια πρόοδος προς αυτή τη κατεύθυνση.



## Βιβλιογραφία

---

- [1] Ashworth J,(2016). LNG Bunkers-Foggy Passage.
- [2] Baltic Port Organisation, (2016). SECA – One Year Later.
- [3] BP, (2016). *Statistical Review of World Energy*
- [4] Briers K., DelGatto N., Van Rynbach E., (2015). Analysis of Fuel Alternatives for Commercial Ships in the Eca Era.
- [5] Buhaug, Ø., et al. (2009). Second IMO Greenhouse Gas Study. International Maritime Organization, London.
- [6] Den Boer E., Hoen M., (2015). Scrubbers – An economic and ecological assessment.
- [7] DNV, (2012). Shipping 2020.
- [8] Dobrota D., Lalić B., Komar I.,(2013). Problem of Boil – off in LNG Supply Chain.
- [9] European Commission, (2015). Quarterly Report Energy on European Gas Markets: Market Observatory for Energy, DG Energy Volume 7, issue 4, fourth quarter 2014.
- [10] Federal Energy Regulatory Commission, (2017). World LNG Estimated Landed Prices.
- [11] Lloyd’s Register, (2012). LNG-fuelled deep sea shipping: The outlook for LNG bunker and LNG-fuelled newbuild demand up to 2025.
- [12] Lloyd’s Register,(2012). Understanding exhaust gas treatment systems: Guidance for shipowners and operators.
- [13] Maffii F., Molocchi A., Chiffi C., (2007). External Costs of Maritime Transport. European Parliament, Policy Department B: Structural and Cohesion Policies: Transport and Tourism, Brussels.
- [14] MAN Diesel & Turbo,(2016). MAN 23/30 DF GenSet.
- [15] Motorship, (2016). Baltic Sea SECA.
- [16] Nwogugu M., (2016). Anomalies in Net Present Value, Returns and Polynomials, and Regret Theory in Decision Making.
- [17] Rolls-Royce, (2012). Gas Engines Bergen C 26:33L-lean-burn gas engine, Marine.

- [18] Ryu J., Lee C., Seo Y., Kim J., Seo S. and Chang D., (2016). A Novel Boil-Off Gas Re-Liquefaction Using a Spray Recondenser for Liquefied Natural-Gas Bunkering Operations.
- [19] Ship and Bunker, (2016). Marine Gas Oil, Heavy Fuel Oil and Low Sulphur Fuel Oil Average Bunker Prices.
- [20] Smith, T., et al. (2015). Third IMO Greenhouse Gas Study. International Maritime Organization, London.
- [21] Tzannatos E., (2010). Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus - Greece.
- [22] Unseci, T. (2013). Environmentally Superior LNG Fuelled Vessels.
- [23] Van Tassel G. W., (2010). LNG as a Vessel and General Transportation Fuel Developing the Required Supply Infrastructure
- [24] Wärtsilä, (2014). Wärtsilä awarded milestone order to supply 2-stroke dual-fuel engines for large LNG Carriers.
- [25] Wursig G., (2013). LNG for ships-Some key elements. DNV
- [26] XE Currency Converter, (2017). Conversion US Dollars to Euros.
- [27] IMO, (2016). MARPOL Annex VI – an update of international regulatory developments for prevention of air pollution and the energy efficiency of ships.

## Web Sites

---

<http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-34df>

[http://articles.maritimepropulsion.com/image.axd?picture=2012%2f5%2fMAN\\_Gas+tank+lifted+copy.jpg](http://articles.maritimepropulsion.com/image.axd?picture=2012%2f5%2fMAN_Gas+tank+lifted+copy.jpg)

<http://blog.clean-ships.com/2017/03/09/exhaust-emissions-from-ships-and-international-regulations/>

<http://www.ikwangsung.com/scr-scrubber/scrubber-system/>

<http://www.lngworldnews.com/inoxcva-gets-lng-storage-tanks-deal/>

<http://www.marinediesels.info/>

<http://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/>

<http://www.meti.go.jp/english/statistics/sho/slng/result/pdf/201705-e.pdf>

[http://www.saacke.de/marinesystems/en/products/technical-data/technical-data.php?we\\_objectID=1038](http://www.saacke.de/marinesystems/en/products/technical-data/technical-data.php?we_objectID=1038)

<http://www.trafa.se>

[https://lretc.snu.ac.kr/bbs/board.php?bo\\_table=projects&wr\\_id=26](https://lretc.snu.ac.kr/bbs/board.php?bo_table=projects&wr_id=26)

<https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-g20-global-20-ports-average#MGO>

<https://www.wingd.com/en/products/w-x62df/>

[www.marinelink.com/news/commercial-impact-design382007](http://www.marinelink.com/news/commercial-impact-design382007)

[www.pinterest.com](http://www.pinterest.com)

