



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΕ
ΠΛΟΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ»**

ΘΕΜΙΣΤΟΚΛΗΣ ΠΥΛΑΡΙΝΟΣ 08118010

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δ. ΛΥΡΙΑΔΗΣ

ΑΘΗΝΑ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το παρόν πόνημα αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Στην πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας συντέλεσαν ορισμένοι άνθρωποι τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά. Πρώτον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της Διπλωματικής Εργασίας, κ. Δημήτριο Λυρίδη, Αν. Καθηγητή ΕΜΠ για τη πολύτιμη καθοδήγηση και αρωγή του, καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Εν συνεχεία, θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κ. Καϊκτσή και κ. Σαμουηλίδη. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, την αδελφή μου και τους φίλους μου, που μου προσέφεραν ιδιαίτερη αγάπη και ηθική συμπαράσταση τόσο για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου Εργασίας όσο και κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

Σύνοψη	4
Abstract	5
Εισαγωγή.....	6
Κεφάλαιο 1: Οικολογικό πρόβλημα.....	7
1.1 IMO	8
1.1.1 Στόχοι του IMO.....	8
1.2 Ευρωπαϊκή Επιτροπή	9
1.3 Energy Efficiency Existing Ship (EEXI)	10
1.4 Λύσεις Προβλήματος	12
Κεφάλαιο 2: Εναλλακτικά καύσιμα	13
2.1 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)	15
2.1.1 Γενικές πληροφορίες.....	15
2.1.2 Life Cycle Analysis	18
2.1.3 Αποθήκευση πάνω στο πλοίο	18
2.2 Μεθανόλη	23
2.2.1 Γενικές πληροφορίες.....	23
2.2.2 Life Cycle Analysis	25
2.2.3 Τροποποιήσεις Πλοίου	28
2.3 Αμμωνία (NH ₃)	28
2.3.1 Γενικές πληροφορίες.....	28
2.3.2 Τοξικότητα.....	30
2.3.3 Δομές παραγωγής καυσίμου	30
2.3.4 Life Cycle Analysis	32
2.3.5 Διαρρύθμιση πλοίου και αποθήκευση καυσίμου	34
2.4 Υδρογόνο (H ₂).....	34
2.4.1 Γενικές πληροφορίες.....	34
2.4.2 Αποθήκευση καυσίμου	36
2.4.3 Life Cycle Analysis	37
2.4.4 Fuel Cells	39
Κεφάλαιο 3: Μελέτη	44
3.1 Στόχος μελέτης.....	44
3.2 Υπό μελέτη πλοίο	44
3.3 Διαδρομή υπό μελέτη πλοίου.....	47
3.3.1 Port of Rotterdam	48
3.3.2 Port of Shanghai	50
3.4 Κατανάλωση Πλοίου σε VLSFO	52
3.5 Κατανάλωση Πλοίου σε MDO.....	52

3.6 Κόστος κτήσης Containership χωρίς Κύρια Μηχανή και Γεννήτριες	53
3.6.1 Κόστος Κύριας Μηχανής	54
3.6.2 Κόστος Γεννητριών	54
Κεφάλαιο 4: Τεχνοοικονομική ανάλυση.....	55
4.1 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)	55
4.1.1 CAPEX	55
4.1.2 OPEX	59
4.2 Μεθανόλη	64
4.2.1 CAPEX	64
4.2.2 OPEX	67
4.3 Αμμωνία	68
4.3.1 CAPEX	68
4.3.2 OPEX	70
4.4 Υδρογόνο	71
4.4.1 CAPEX	71
4.4.2 OPEX	74
4.5 Σύγκριση CAPEX και OPEX.....	75
4.6 Οικονομική Ανάλυση	79
4.6.1 Case Study 1: Τιμή καυσίμων και ναύλων σταθερή	80
4.6.2 Case Study 2: Τιμή καυσίμου και ναύλων μεταβλητή	87
4.6.3 Case Study 3: Πλεύση σε κατάσταση ερματισμού.....	100
4.6.4 Case Study 4: Φόρος Άνθρακα	102
4.6.5 Case Study 5: Monte Carlo Simulation	106
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα	110
Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	112
Βιβλιογραφία.....	113

Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να μελετήσει το κατά πόσο συμφέρει η επένδυση σε ένα Containership 10,000 TEU, τόσο από οικονομικής όσο και από περιβαλλοντικής σκοπιάς, όταν αυτό λειτουργεί με διάφορα εναλλακτικά καύσιμα. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται εισαγωγή στο περιβαλλοντικό πρόβλημα που απασχολεί αυτή τη στιγμή την ανθρωπότητα, ενώ παράλληλα πραγματοποιούνται αναφορές στις συνέπειες του τόσο στο οικοσύστημα όσο και στον άνθρωπο, καθώς και στους τρόπους με τους οποίους μπορεί να αντιμετωπιστεί. Η πρόωση των πλοίων με εναλλακτικά καύσιμα, φαίνεται να είναι ο μοναδικός τρόπος που θα δώσει τέλος στο πρόβλημα αυτό.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, γίνεται αναφορά στα διάφορα εναλλακτικά καύσιμα που πιθανώς να αντικαταστήσουν τη χρήση του πετρελαίου για τη πρόωση των πλοίων. Τα εναλλακτικά καύσιμα αυτά, είναι το LNG, η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο και όπως είναι προφανές όλα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία αναλύονται σε βάθος. Στο κεφάλαιο αυτό, λοιπόν, εξάγονται οι απαραίτητες πληροφορίες, για τη πραγματοποίηση των υπολογισμών των εσόδων και των εξόδων του υπό μελέτη Containership στη συνέχεια της διπλωματικής.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση των εκπομπών GHG ανά τύπο πλοίου, από όπου εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα Containerships αποτελούν τα πιο βλαβερά για το οικοσύστημα πλοία. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου, ενώ παράλληλα καθορίζεται η διαδρομή που θα εκτελεί κατά τη διάρκεια της ζωής του, η οποία είναι Port of Rotterdam – Port of Shanghai. Τέλος, γίνεται μια αναλυτική αναφορά, στον λόγο επιλογής των λιμανιών αυτών και σε κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο λαμβάνει χώρα η τεχνοοικονομική ανάλυση για να εξεταστεί το κατά πόσο συμφέρει η επένδυση στο υπό μελέτη Containership ανάλογα με το καύσιμο πρόωσης. Αρχικά, πραγματοποιείται υπολογισμός του CAPEX και OPEX του πλοίου ανάλογα με το είδος καυσίμου και συγκρίνονται μεταξύ τους. Έπειτα, αξιολογείται η επένδυση με τη χρήση διαφόρων μεθόδων, μέσα από 5 Case Studies, τα οποία λαμβάνουν υπόψη διαφορετικούς παράγοντες και μεταβλητές. Τέλος, ακολουθεί το πέμπτο κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη παρούσα μελέτη.

Abstract

The purpose of this thesis is to study whether the investment in a 10,000 TEU Containership is profitable, both from an economic and environmental point of view, when it operates with various alternative fuels. More specifically, in the first chapter, an introduction is made to the environmental problem that currently concerns humanity, while at the same time references are made to its consequences both on the ecosystem and on humans, as well as the ways in which it can be dealt with. The propulsion of ships with alternative fuels seems to be the only way to put an end on this problem.

In the second chapter of this thesis, reference is made to the various alternative fuels that could possibly replace the use of oil for ship propulsion. These alternative fuels are LNG, methanol, ammonia and hydrogen and as is obvious they all have different characteristics, advantages and disadvantages, which are analyzed in depth. In this chapter, therefore, the necessary information is extracted for the calculation of the income and expenses of the Containership under study in the continuation of this Thesis.

In the third chapter, an analysis of GHG emissions by type of ship is carried out, from which it is concluded that Containerships are the most damaging ships for the ecosystem. Then, the main characteristics of the ship under study are calculated, while at the same time the route it will perform during its lifetime is determined, which is Port of Rotterdam – Port of Shanghai. Finally, a detailed report is made on the reason for choosing these ports and on some of their special characteristics.

In the fourth chapter, the techno-economic analysis takes place to examine whether the investment in the Containership under study is worthwhile depending on the propulsion fuel. First, the ship's CAPEX and OPEX are calculated depending on the type of fuel and compared to each other. The investment is then evaluated using various methods, through 5 Case Studies, which consider different factors and variables. Finally, the fifth chapter follows, in which the conclusions obtained from the present study are briefly presented.

Εισαγωγή

Η παγκόσμια ναυτιλία, αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι του παγκόσμιου εμπορίου και αποτελεί το κύριο μέσο μεταφοράς της πλειονότητας των αγαθών. Το παγκόσμιο εμπόριο αυξάνεται συνεχώς και μαζί με αυτό αυξάνεται και ο παγκόσμιος στόλος, ο οποίος με τη σειρά του αυξάνει την εκπομπή αερίων, που εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, και ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, με τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων να συμβάλλουν σε μεγαλύτερο βαθμό στην όξυνση του προβλήματος αυτού. Για τον λόγο αυτό, αρμόδιοι φορείς όπως είναι ο ΙΜΟ, έχουν θέσει κάποιους στόχους και έχουν θεσμοθετήσει κάποια μέτρα που έχουν ως απώτερο σκοπό τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος της ναυτιλίας στο περιβάλλον. Τα μέτρα και οι λύσεις που έχουν ληφθεί μέχρι στιγμής δείχνουν να αδυνατούν να μετριάσουν το οικολογικό πρόβλημα και τις συνέπειες της ναυτιλίας στο οικοσύστημα. Για αυτό το λόγο, φαίνεται να αποτελεί μονόδρομο η χρήση εναλλακτικών καυσίμων για τη πρόωση του παγκόσμιου στόλου.

Τα κυριότερα εναλλακτικά καύσιμα που απασχολούν την επικαιρότητα και για τα οποία θα γίνει αναφορά στη παρούσα διπλωματική εργασία, είναι το LNG, η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο. Το κάθε ένα με τη σειρά του κρύβει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να αναλυθούν και να εξετασθούν προτού πραγματοποιηθεί η χρήση τους σε μεγάλο εύρος πλοίων. Στη μελέτη που πραγματοποιείται, εξετάζεται το κατά πόσο συμφέρει ένας πλοιοκτήτης να επενδύσει σε ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, που εκτελεί μια συγκεκριμένη διαδρομή, ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται για τη πρόωση του, υπό διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, τιμών καυσίμου και αγοράς.

Κεφάλαιο 1: Οικολογικό πρόβλημα

Στη σημερινή εποχή, το παγκόσμιο εμπόριο αυξάνεται διαρκώς και θα συνεχίσει να αυξάνεται με τη πάροδο των χρόνων όσο εξελίσσεται η τεχνολογία και αυξάνεται ο πληθυσμός της γης. Η ναυτιλία αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα του διεθνούς εμπορίου καθώς μέσω εκείνης πραγματοποιείται το 72% των συναλλαγών αγαθών που συμβαίνουν παγκοσμίως μετρημένο σε tonne-nautical miles (tnm) ^[1]. Το υπόλοιπο 28% πραγματοποιείται με επίγεια μέσα, όπως είναι τα τρένα και τα φορτηγά ή με τη χρήση εναέριων μέσων, όπως είναι τα εμπορικά αεροπλάνα. Είναι λοιπόν προφανές πως χωρίς την ύπαρξη της ναυτιλίας η ανθρωπότητα θα κλονιζόταν από πολύ σοβαρά προβλήματα, όπως απώλεια τροφής, καυσίμων και φτώχειας.

Παρά το γεγονός ότι η ναυτιλία συμβάλλει σε τεράστιο ποσοστό στο παγκόσμιο εμπόριο και προσφέρει αμέτρητα πλεονεκτήματα στον άνθρωπο, συμβάλλει σημαντικά και στην ανάπτυξη κάποιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο παγκόσμιος ναυτικός στόλος αποτελείται από περίπου 95,000 πλοία εκ των οποίων σχεδόν όλα κινούνται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων (Fossil Fuels), όπως είναι το Heavy Fuel Oil (H.F.O.), Marine Diesel Oil (M.D.O), Marine Gas Oil (M.G.O). Στατιστικές μελέτες έχουν δείξει πως η λειτουργία των πλοίων έχει ετήσια κατανάλωση Heavy Fuel Oil της τάξης των 339 Mt, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη παραγωγή 1,076 Mt αερίων και συντελούν στη διόγκωση του φαινομένου του θερμοκηπίου καθώς αντιστοιχούν στο 2.9% του παγκόσμιου Green House Gases, όπως έδειξαν μελέτες του 2018 ^[1]. Τα αέρια αυτά που δημιουργούνται από την καύση των ορυκτών καυσίμων των πλοίων συμβάλλουν αρνητικά τόσο στο περιβάλλον όσο και στον άνθρωπο. Πιο συγκεκριμένα, η κακή ποιότητα του αέρα, τα σύννεφα που συμβάλλουν στην αλλαγή του κλίματος αποτελούν μερικές από αυτές τις συνέπειες που κλονίζουν το οικοσύστημα και υπολογίζεται πως επιδρούν στον πρόωρο θάνατο, περίπου 250,000 ανθρώπων ετησίως.

Είναι λοιπόν προφανές πως πρέπει να βρεθεί τρόπος για να περιοριστούν τα προβλήματα αυτά, προτού τα πράγματα γίνουν ακόμη χειρότερα και δεν υπάρχουν περιθώρια επιστροφής στη κανονικότητα. Οι αρμόδιοι φορείς εδώ και αρκετά χρόνια ψάχνουν να βρουν με ποιόν τρόπο γίνεται να περιοριστούν οι ρύποι που παράγονται από τη λειτουργία του πλοίου, αλλά χωρίς κάποιο ουσιώδες αποτέλεσμα μέχρι σήμερα. Για αυτό τον λόγο ο IMO πήρε τη πρωτοβουλία να θέσει κάποιους στόχους για την παγκόσμια ναυτιλία, οι οποίοι έχουν ως σκοπό την μείωση

των αερίων του θερμοκηπίου που πηγάζουν από τη λειτουργία του πλοίου. Το μονοπάτι που χάραξε ο IMO, έδειξε να ακολουθεί με τη σειρά της η Ευρωπαϊκή επιτροπή, θεσπίζοντας νέους κανονισμούς για τη λειτουργία των πλοίων τα επόμενα χρόνια.

1.1 IMO

Ο Διεθνής οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization), γνωστός και ως IMO, αποτελεί έναν πολυεθνικό διακυβερνητικό διεθνή ναυτιλιακό οργανισμό. Στόχος του είναι να επιβλέπει την σωστή και ασφαλή επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ των χωρών-μελών του στον τομέα της ναυσιπλοΐας. Αποτελεί οργανισμό του ΟΗΕ, διακρατικού χαρακτήρα, και ιδρύθηκε στην Γενεύη στις 17 Μαρτίου 1948 ως IMCO (Intergovernmental Maritime Consultative Organization). Μετέπειτα το 1982, μετονομάστηκε σε IMO και έχει έδρα το Λονδίνο. Ο οργανισμός αποτελείται από τη συνέλευση, το συμβούλιο και πέντε κύριες επιτροπές ^[2]:

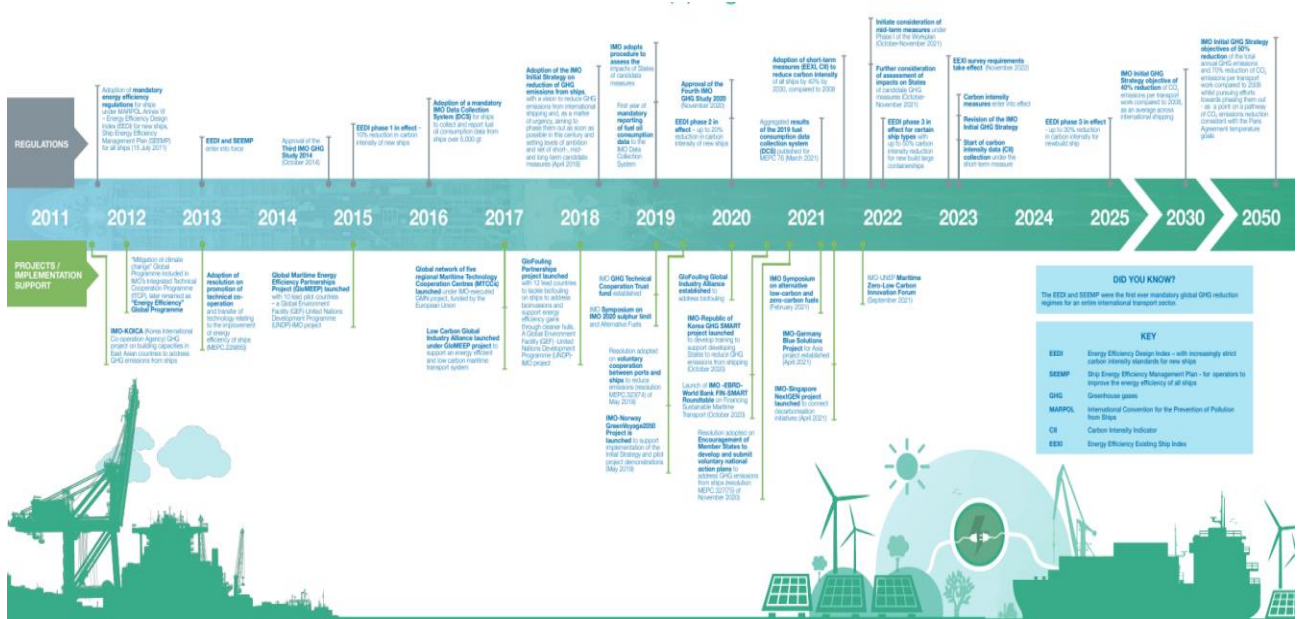
- Επιτροπή ναυτικής ασφάλειας (MSC)
- Επιτροπή προστασίας θαλάσσιου περιβάλλοντος (MEPC)
- Νομική επιτροπή
- Επιτροπή τεχνικής συνεργασίας
- Επιτροπή διευκόλυνσης

1.1.1 Στόχοι του IMO

Ο σκοπός του IMO, είναι να παρέχει μέσω αμοιβαίας συνεργασίας προστατευμένα, αποδοτική και ασφαλή προς το περιβάλλον ναυτιλία. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να υιοθετηθούν τα υψηλότερα στάνταρ όσο αφορά την ασφαλή πλοήγηση των πλοίων και της προστασίας του περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα να θεσπιστούν κατάλληλες νομοθεσίες για την αποτελεσματική εφαρμογή των στόχων που έχουν θεσπιστεί.

Ο IMO τη τελευταία δεκαετία έχει θεσμοθετήσει πληθώρα κανονισμών και στόχων, με απώτερο σκοπό τη μείωση των Green House Gases (GHG) και τη προστασία του περιβάλλοντος. Από τους κανονισμούς αυτούς, οι οποίοι φαίνονται στην εικόνα 1.1, για τη μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι εξής δύο ^[2]:

- Το 2030 να έχουν μειωθεί οι εκπομπές CO₂ που παράγονται από τη διεθνή ναυτιλία στο 40% αυτών που παράχθηκαν το 2008
- Το 2050 να έχουν μειωθεί οι εκπομπές GHG κατά 50% και αντίστοιχα των CO₂ που παράγονται από τη διεθνή ναυτιλία στο 70% αυτών που παράχθηκαν το 2008, απόφαση που πάρθηκε στο Paris agreement.



Εικόνα 1.1: Μέτρα για μείωση των GHG (Πηγή: Marine Insight)

1.2 Ευρωπαϊκή Επιτροπή

Η Ευρωπαϊκή επιτροπή (European Commission) αποτελεί θεσμικό όργανο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με απώτερο σκοπό την προστασία των κοινοτικών συμφερόντων των κρατών μελών της Ένωσης. Ιδρύθηκε το 1953 και έχει ως έδρα τις Βρυξέλλες. Η επιτροπή προτείνει νέες ευρωπαϊκές νομοθετικές πράξεις, τις οποίες υποβάλλει στο ευρωπαϊκό κοινοβούλιο και στο συμβούλιο ευρωπαϊκής ένωσης. Ταυτόχρονα, αποτελεί εκτελεστικό όργανο της ένωσης, αρμόδιο για την εφαρμογή κοινών πολιτικών και εξασφάλιση της ευρωπαϊκής νομοθεσίας.

Πέρα από όλα όσο αναλαμβάνει η Ευρωπαϊκή επιτροπή, ασχολείται σε μεγάλο βαθμό και με τα οικολογικά προβλήματα που κλονίζουν αυτή καθώς και με τρόπους αντιμετώπισής τους. Στη συνάντηση που πραγματοποιήθηκε τον Ιούλιο του 2021, η Ευρωπαϊκή επιτροπή παρουσίασε τη νομοθετική της πρόταση για να καταφέρουν να μειωθούν τα αέρια του

θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 55% μέχρι το 2030, συγκριτικά με τις τιμές που επικρατούσαν το 1990. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος, προτάθηκαν 10 μέτρα καταπολέμησης, εκ των οποίων τα 4 αφορούν άμεσα τη ναυτιλία. Τα μέτρα που αφορούν τη ναυτιλία, είναι τα ακόλουθα^[4]:

1) Ένταξη της ναυτιλίας στο Ευρωπαϊκό σύστημα συναλλαγής εκπομπών

2) Νέα μέτρα πολιτικής για τη στροφή προς καύσιμα χαμηλών εκπομπών άνθρακα, εισάγοντας παράλληλα απαιτήσεις για τη σταδιακή μείωση της έντασης άνθρακα στα καύσιμα που χρησιμοποιούνται για τη πρόωση των πλοίων.

3) Ενίσχυση υποδομών εναλλακτικών καυσίμων στα λιμάνια. Πιο συγκεκριμένα μέχρι το 2030 να έχουν δημιουργηθεί νέες υποδομές για χρήση ηλεκτρισμού και LNG τουλάχιστον στα κύρια λιμάνια της Ευρώπης.

4) Αναθεώρηση της οδηγίας για τη φορολογία της ενέργειας, η οποία εξαιρούσε από φόρους τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται από τα πλοία.

1.3 Energy Efficiency Existing Ship (EEXI)

Ο δείκτης EEXI αποτελεί ένα από τα μέσα που έχει θεσπίσει ο IMO για την αντιμετώπιση των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και πιο συγκεκριμένα του διοξειδίου του άνθρακα^[3]. Ο δείκτης αυτός, μετρά τις εκπομπές του CO₂ από τα ταξίδια που πραγματοποιεί, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου και αποτελεί την εξέλιξη του δείκτη EEDI που τέθηκε σε λειτουργία το 2013 και αφορά μόνο τα νεότευκτα πλοία. Ο υπολογισμός του δείκτη EEXI δεν απαιτεί κάποιου είδους μέτρηση ή αναφορά των πραγματικών εκπομπών CO₂ που έχει η λειτουργία του πλοίου και ο τρόπος υπολογισμού του φαίνεται αναλυτικά στην εικόνα 1.2.

$$EEXI = \frac{CO_2 \text{ emissions}}{\text{Transportation work}}$$

$$EEXI = \frac{\text{Main engine emissions} + \text{Auxiliary engine emissions} + (\text{PTI} - \text{Innovative electrical energy technologies}) - \text{Innovative propulsion energy technologies}}{\text{Capacity} * \text{Reference speed} * \text{Reduction factors}}$$

$$EEXI = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j) (\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} C_{ME(i)} SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} C_{AE} SFC_{AE}) + \left((\prod_{j=1}^n f_j \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{off}} f_{eff(i)} P_{AEoff(i)}) C_{FAE} SFC_{AE} \right) - (\sum_{i=1}^{n_{off}} f_{eff(i)} P_{eff(i)} C_{FME} SFC_{ME})}{\text{Capacity} V_{ref} f_i f_c f_l f_w f_m}$$

Εικόνα 1.2: Περιγραφή υπολογισμού δείκτη EEI (Πηγή:NAPA)

Ο υπολογισμένος δείκτης EEI, πρέπει να συγκριθεί με τον απαιτούμενο δείκτη EEI (Required EEI). Αν ο υπολογισμένος δείκτης είναι μικρότερος του απαιτούμενου, δε χρειάζεται να πραγματοποιηθεί κάποια μεταβολή στο πλοίο, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση πρέπει να πραγματοποιηθούν ενεργειακές βελτιστοποιήσεις μέχρις ότου να ισχύει η συνθήκη,

$$\text{Attained EEI} \leq \text{Required EEI}$$

Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου δείκτη EEI, λαμβάνονται υπόψη οι τιμές της γραμμής αναφοράς EEDI χρησιμοποιώντας κάποιους ειδικούς συντελεστές μείωσης για το EEI, οι οποίοι φαίνονται στην εικόνα 1.3.

SHIP TYPE	SIZE	REDUCTION FACTOR (%)
Bulk Carrier	200,000 dwt and above	15
	20,000 and above but less than 200,000 dwt	20
	10,000 and above but less than 20,000 dwt	0-20*
Gas Carrier	15,000 dwt and above	30
	10,000 and above but less than 15,000 dwt	20
	2,000 and above but less than 15,000 dwt	0-20*
Tanker	200,000 dwt and above	15
	20,000 and above but less than 200,000 dwt	20
	4,000 and above but less than 20,000 dwt	0-20*
Containership	200,000 dwt and above	50
	120,000 and above but less than 200,000 dwt	45
	80,000 and above but less than 120,000 dwt	35
	40,000 and above but less than 80,000 dwt	30
	15,000 and above but less than 40,000 dwt	20
	10,000 and above but less than 15,000 dwt	0-20*
General Cargo Ship	15,000 dwt and above	30
	3,000 and above but less than 15,000 dwt	0-30*
Refrigerated Cargo Carrier	5,000 dwt and above	15
	3,000 and above but less than 5,000 dwt	0-15*
Combination Carrier	20,000 dwt and above	20
	4,000 and above but less than 20,000 dwt	0-20*
LNG Carrier	10,000 dwt and above	30
Ro/ro Vehicle Carrier	10,000 dwt and above	15
Ro/ro Cargo Ship	2,000 dwt and above	5
	1,000 and above but less than 2,000 dwt	0-5*
Ro/pax Ship	1,000 dwt and above	5
	250 and above but less than 1,000 dwt	0-5*
Cruise Passenger Ship with Non-conventional Propulsion	85,000 GT and above	30
	25,000 gt and above but less than 85,000 gt	0-30*

Εικόνα 1.3: Συντελεστές μείωσης για απαιτούμενο EEXI (Πηγή: ABS)

1.4 Λύσεις Προβλήματος

Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι του IMO σχετικά με τη μείωση των αέριων ρύπων, έχουν προταθεί και δοκιμαστεί διάφορες λύσεις. Αυτές που είχαν επικρατήσει τα προηγούμενα χρόνια, είχαν να κάνουν με μηχανολογικές λύσεις, όπως η χρήση συστήματος Energy Power Limitation (EPL) για να λειτουργεί η μηχανή του πλοίου σε χαμηλότερα φορτία και συνεπώς σε χαμηλότερες ταχύτητες προκειμένου να μειωθεί ο δείκτης EEXI του πλοίου. Άλλο παράδειγμα μηχανολογικής, παρέμβασης στα πλοία αποτελούν, τα Scrubbers, τα οποία

αποβάλλουν τα οξείδια του θείου από τα καυσαέρια και τα CCS, τα οποία συλλέγουν το διοξείδιο του άνθρακα από τα καυσαέρια. Εκτός των μηχανολογικών παρεμβάσεων, έχουν γίνει και τροποποιήσεις στη γάστρα του πλοίου, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η υδροδυναμική της και να μειωθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι αντιστάσεις και συνεπώς η απαιτούμενη ισχύς για την επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας. Όλα τα μέτρα που αναφέρθηκαν, μπορούν να συμβάλλουν με τον τρόπο τους στη μείωση των αέριων ρύπων που παράγονται από τη ναυτιλία τη δεδομένη χρονική περίοδο, αλλά δε μπορούν σε καμία περίπτωση να επιτύχουν τους στόχους που έχει θέσει ο IMO για το 2030 και το 2050.

Η μόνη εναπομένουσα λύση για τη καταπολέμηση των προβλημάτων που προκύπτουν από τη χρήση ορυκτών καυσίμων, είναι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων για τη πρόωση του πλοίου. Τα alternative fuels είναι καύσιμα, των οποίων τα καυσαέρια είναι λιγότερο έως και καθόλου βλαβερά τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον, συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούν τα πλοία τη δεδομένη χρονική περίοδο. Παραδείγματα τέτοιων καυσίμων είναι το LNG, η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο. Όλα από τα παραπάνω καύσιμα μπορούν να φανούν ιδιαίτερα χρήσιμα για το μέλλον και μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας. Ωστόσο, εκτός από όλα τα πλεονεκτήματα που έχουν, έχουν και μειονεκτήματα και προκλήσεις, που πρέπει να μελετηθούν σε βάθος προτού ληφθεί η απόφαση για ευρεία χρήση τους.

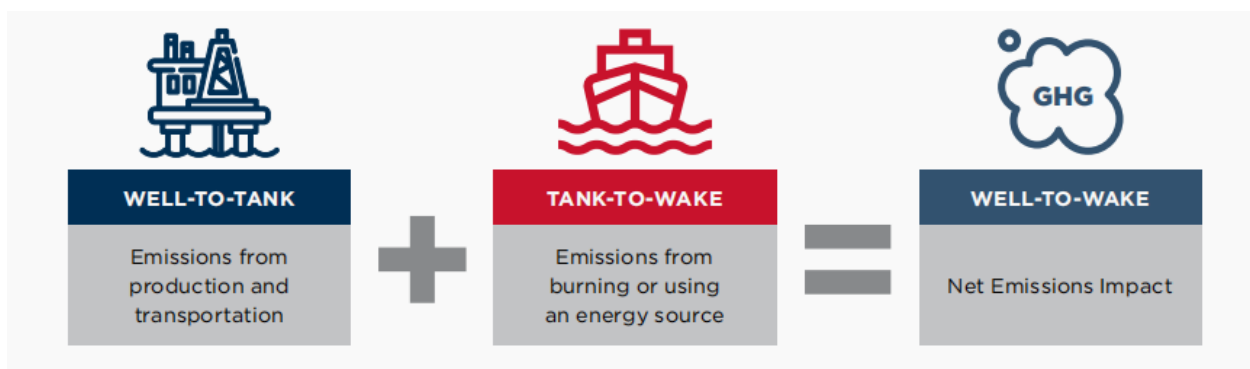
Κεφάλαιο 2: Εναλλακτικά καύσιμα

Η επιλογή ανάμεσα σε έναν αριθμό εναλλακτικών καυσίμων για τη πρόωση ενός πλοίου, δεν είναι μια απλή διαδικασία. Μάλιστα, είναι μια διαδικασία που απαιτεί τον συμψηφισμό διαφόρων παραγόντων προτού παρθεί η τελική απόφαση. Τέτοιοι παράγοντες είναι η διαθεσιμότητα του καυσίμου, οι δομές που υπάρχουν για την παραγωγή του, το κόστος του, η ενεργειακή του πυκνότητα, η ωριμότητα της τεχνολογίας και τελευταίο και σημαντικότερο, το πόσο φιλικό προς το περιβάλλον είναι το καύσιμο αυτό.

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που έχουν τα καύσιμα δεν προκύπτει μόνο από τα καυσαέρια που παράγονται κατά τη διάρκεια της κατανάλωσής τους. Πιο συγκεκριμένα, τα καύσιμα, παράγουν, βλαβερά για το περιβάλλον αέρια σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους, δηλαδή κατά τη παραγωγή τους, την αποθήκευσή τους και τη κατανάλωση τους. Τα στάδια στα οποία

παράγονται καυσαέρια κατά τη διάρκεια ζωής των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη πρόωση ενός πλοίου είναι τα ακόλουθα ^[5]:

- **Well-To-Tank:** Στο στάδιο αυτό, εκπέμπονται GHG στην ατμόσφαιρα από την παραγωγή, τη διαχείριση και τη μεταφορά των καυσίμων στις αποθηκευτικές τους μονάδες
- **Tank-To-Wake:** Στο στάδιο αυτό, εκπέμπονται GHG στο περιβάλλον, από τη κατανάλωση του καυσίμου που χρησιμοποιείται για τη πρόωση του πλοίου
- **Well-To-Wake:** Το στάδιο αυτό, αφορά τη συνολική ποσότητα καυσαερίων που εκπέμπονται από τη παραγωγή έως και τη κατανάλωση του καυσίμου



Εικόνα 2.1: Στάδια παραγωγής καυσαερίων (Πηγή: ABS)

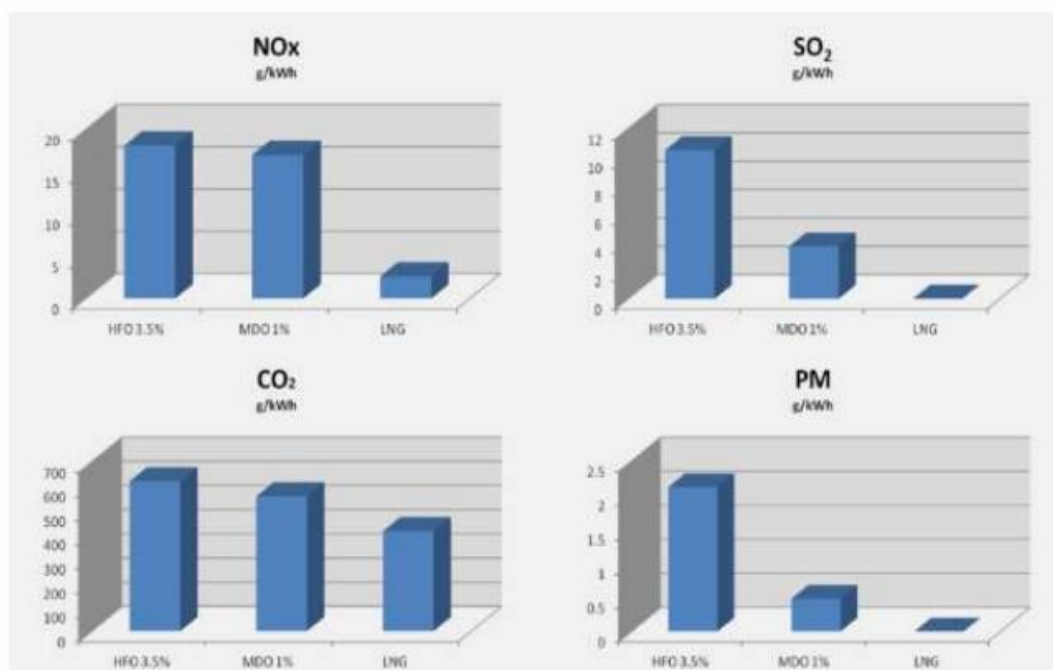
Η ποσότητα των καυσαερίων που παράγονται από τα καύσιμα και συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου εξαρτάται από τη πηγή προέλευσης του καυσίμου, τον καθαρισμό και τους τρόπους μεταφοράς του καυσίμου. Με βάση αυτές τις παραμέτρους, έχει αναπτυχθεί ένας χαρακτηρισμός μέσω χρώματος για το κάθε καύσιμο ^[6].

- **Gray:** Αναφέρεται στα καύσιμα που παράγονται από ορυκτές πηγές χωρίς τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή κάποιας τεχνολογίας αποθήκευσης των εκπομπών
- **Green:** Αναφέρεται στα καύσιμα που παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ο ήλιος και ο αέρας
- **Blue:** Αναφέρεται στα καύσιμα που παράγονται από ορυκτά καύσιμα αλλά χρησιμοποιούν και κάποιου είδους τεχνολογία για να εμποδίσουν τα καυσαέρια να φύγουν στο περιβάλλον
- **Orange:** Αναφέρεται σε μίξη των προηγούμενων χρωμάτων και έχει ως απώτερο σκοπό τη μείωση των συνολικών CO₂ χωρίς τη τεράστια αύξηση των τιμών του καυσίμου

2.1 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)

2.1.1 Γενικές πληροφορίες

Το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εναλλακτικά καύσιμα και χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για τη πρόωση των πλοίων σήμερα. Ένας από τους λόγους για τους οποίους το LNG είναι μια από τις καλύτερες επιλογές καυσίμου για την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας είναι το γεγονός πως κατά τη κατανάλωση του αποτελεί καθαρό καύσιμο και είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα, ενώ παράλληλα συμβάλλει σημαντικά στην επίτευξη των στόχων ανθρώπινης υγιεινής. Πιο συγκεκριμένα, το LNG κατά τη καύση του δεν εκπέμπει καθόλου οξειδία του θείου (SO_x) όπως και καθόλου Particulate matters (PM). Επιπλέον, πάλι συγκριτικά με τα ήδη υπάρχοντα καύσιμα, εκπέμπει 95% λιγότερα οξειδία του αζώτου (NO_x)^[6] και με τη χρήση κατάλληλων τεχνολογιών μπορεί να επιτύχει μέχρι και 21% μείωση στα αέρια του θερμοκηπίου που παράγονται στο στάδιο Well to Wake και 28% στο στάδιο Tank to Wake. Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα που έχει η χρήση του υγροποιημένου φυσικού αερίου, είναι το methane slip. Το methane slip αφορά την εκπομπή μεθανίου, που αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου, στην ατμόσφαιρα, έπειτα από μια μη ολοκληρωμένη καύση. Επιπλέον, μεθάνιο διαρρέει στο περιβάλλον σε όλη τη φάση της ζωής του καυσίμου, δηλαδή όταν παράγεται, μεταφέρεται, αποθηκεύεται και καταναλώνεται. Βέβαια, μέχρι σήμερα οι κανονισμοί του IMO ασχολούνται μόνο με την εκπομπή καυσαερίων, δηλαδή και του methane slip, κατά τη διάρκεια της κατανάλωσης του καυσίμου, πράγμα το οποίο οι μεγάλες κατασκευαστικές εταιρίες Μηχανών Εσωτερικής Καύσης για πλοία, έχουν υποσχεθεί πως θα εξαλειφθεί στο άμεσο μέλλον.



Εικόνα 2.2: Σύγκριση αερίων ρύπων (Πηγή: LNG Fueled Vessels Designed Training)

Η μεταφορά και αποθήκευση του LNG πραγματοποιούνται σε υγρή μορφή, ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]. Όσο αφορά τη δομή του LNG το κύριο συστατικό του είναι το μεθάνιο (CH_4) και άλλοι υδρογονάνθρακες (αιθάνιο C_2H_6 , προπάνιο C_3H_8 , βουτάνιο C_4H_{10}), καθώς και σε μικρές ποσότητες άλλες ουσίες (άζωτο N_2 , υδρόθειο H_2S , διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , κ.α.). Ωστόσο, η ακριβής του σύσταση μεταβάλλεται ανάλογα με τις γεωγραφικές περιοχές στις οποίες εντοπίζεται. Το LNG χαρακτηρίζεται ως ένα άοσμο, άχρωμο και μη τοξικό καύσιμο το οποίο το κάνει να ξεχωρίζει από κάποια άλλα εναλλακτικά καύσιμα. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.1, το υγροποιημένο φυσικό αέριο έχει υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης, πράγμα που καθιστά απαραίτητη τη παρουσία μιας πρόσθετης πηγής ανάφλεξης, δηλαδή ενός “Pilot Fuel”. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του LNG ως καύσιμο.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά LNG

Properties	Values
Πυκνότητα [t/m ³]	0.45
Lower Heating Value [MJ/kg]	50
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης(στοιχειομετρικού μίγματος) [°C]	537

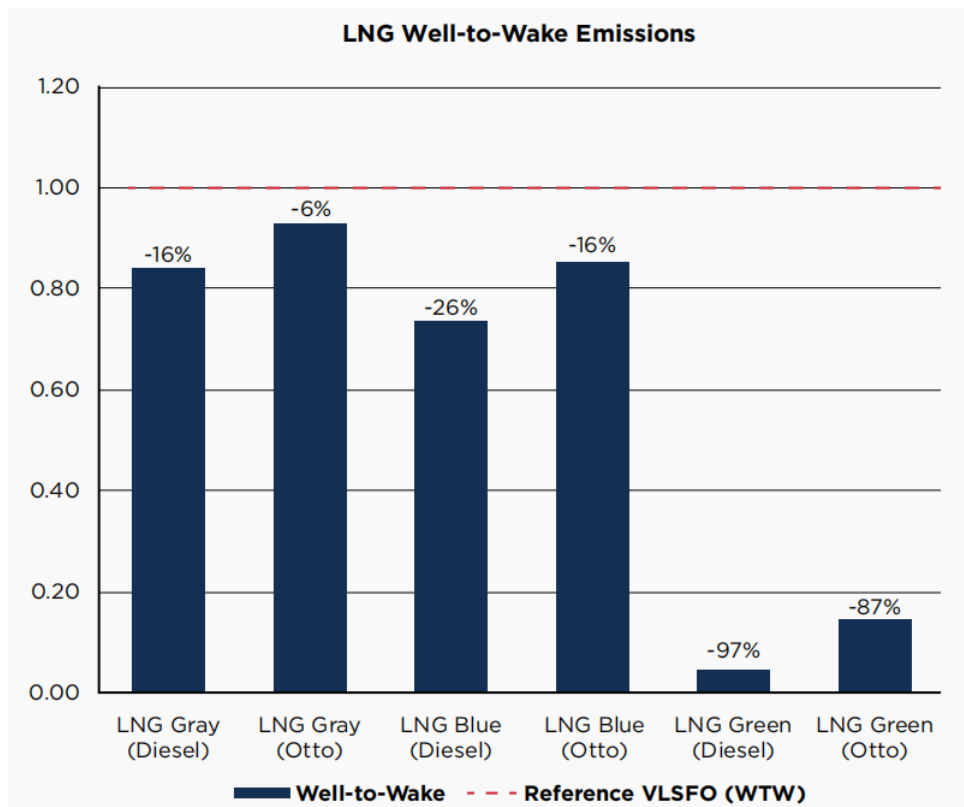
Το υγροποιημένο φυσικό αέριο, είναι το πιο ώριμο και έτοιμο για χρήση από όλα τα εναλλακτικά καύσιμά που κυκλοφορούν αυτή τη στιγμή στην αγορά. Αυτό συμβαίνει γιατί υπάρχουν διεθνής κανονισμοί που καλύπτουν σε βάθος όλα τα θέματα που θα μπορούσαν να προκύψουν κατά τη παραγωγή και τη χρήση του. Παράλληλα, υπάρχει έτοιμη τεχνολογία για κύριες μηχανές και γεννήτριες, η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται ήδη με πολύ καλά αποτελέσματα. Επιπλέον, το LNG βρίσκεται διαθέσιμο σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες τόσο από τα ορυκτά όσο και τα εναλλακτικά καύσιμα, πράγμα που το καθιστά έτοιμο να αντιμετωπίσει την υψηλή ζήτηση που θα ακολουθήσει στο επόμενο χρονικό διάστημα. Εκτός από την υψηλή διαθεσιμότητα του σαν καύσιμο, υπάρχουν αρκετές δομές τροφοδοσίας καυσίμου σε πλοία στα μεγάλα λιμάνια παγκοσμίως, ενώ ταυτόχρονα βρίσκονται υπό κατασκευή κι άλλες τέτοιες δομές, έτοιμες για να καλύψουν την επερχόμενη ζήτηση, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3. Τέλος, υπάρχουν έτοιμες τεχνολογίες για τη παραγωγή πράσινου LNG από διοξείδιο του άνθρακα και πράσινο υδρογόνο και αναμένεται επίσης διεύρυνση της παραγωγής του στο άμεσο μέλλον.



Εικόνα 2.3: Δομές τροφοδοσίας LNG (Πηγή: DNV)

2.1.2 Life Cycle Analysis

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο αποτελεί ένα από τα πιθανά καύσιμα του μέλλοντος, που η χρήση του θα οδηγήσει σε μια πιο πράσινη ναυτιλία. Ωστόσο, αυτό δε συνεπάγεται ότι κατά τη παραγωγή του, τη μεταφορά του και τη κατανάλωση του είναι εξίσου φιλικό ως προς το περιβάλλον. Για αυτό, το LNG, όπως και όλα τα άλλα εναλλακτικά καύσιμα, ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής του, χωρίζεται στις κατηγορίες Gray, Blue, Green. Στην εικόνα 2.4. φαίνονται οι εκπομπές GHG σε όλη τη διάρκεια της ζωής του καυσίμου LNG ανάλογα με τον τρόπο που παράγεται και το είδος της καύσης με το οποίο καταναλώνεται [7].



Εικόνα 2.4: Well-To-Wake καυσαέρια από τα διάφορα είδη LNG (Πηγή: ABS)

2.1.3 Αποθήκευση πάνω στο πλοίο

Ένας από του σημαντικότερα μειονεκτήματα της χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου για τη πρόωση του πλοίου, είναι η αισθητά μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα που έχει συγκριτικά με τα HFO, VLSFO. Γεγονός που δημιουργεί την απαίτηση για μεγαλύτερες δεξαμενές καυσίμου για την αποθήκευση ίσης σε ενέργεια ποσότητας καυσίμου, πράγμα που επιδρά αρνητικά στον διαθέσιμο χώρο μεταφοράς φορτίου του πλοίου. Για τη μεταφορά κρυογόνων υγρών καυσίμων χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι τύποι δεξαμενών [4]:

- Type A
- Type B
- Type C
- Membrane

Από τις οποίες δεξαμενές οι Type B, Type C, Membrane μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση του LNG όταν χρησιμοποιείται σαν καύσιμο για πρόωση του πλοίου.

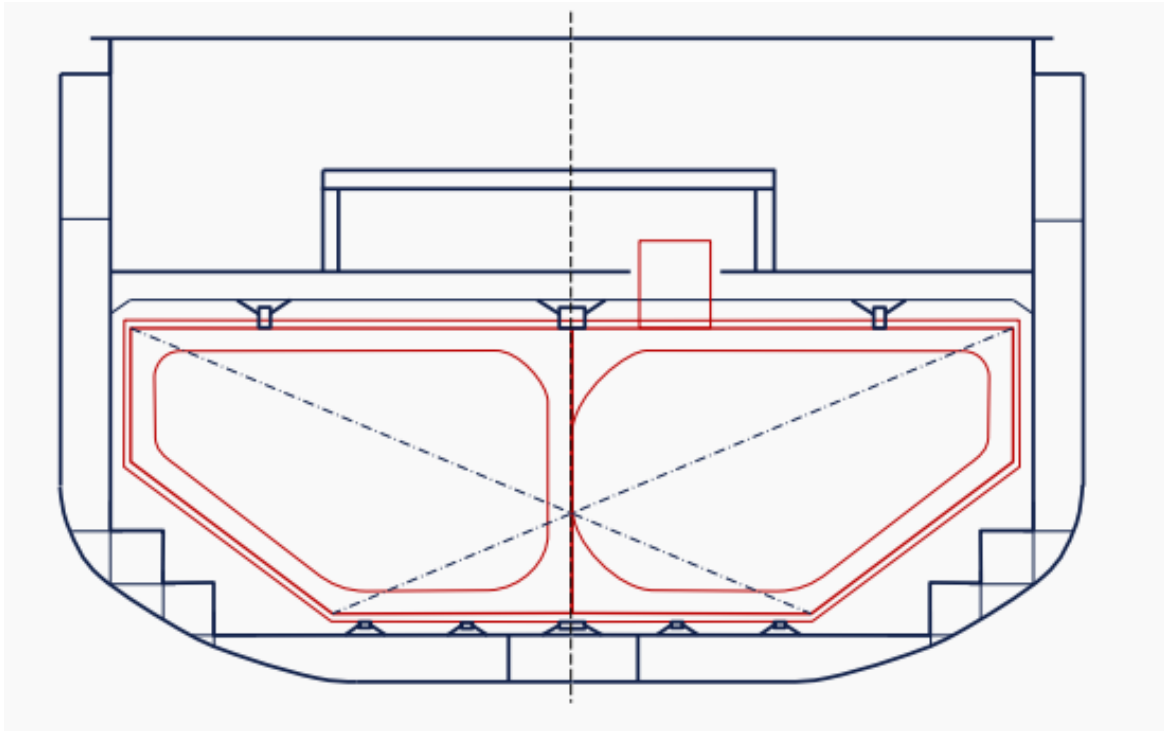
2.1.3.1 Type B tank

Πλεονεκτήματα

Οι δεξαμενές καυσίμου Type B είναι από τις πιο διαδεδομένες για την αποθήκευση του LNG. Αυτό συμβαίνει διότι αποτελούν ανεξάρτητες δεξαμενές καυσίμου και είναι σχεδιασμένες σύμφωνα με τους κανονισμούς αντοχής των συμβατικών πλοίων. Επιπλέον, μπορούν να εξοπλιστούν με φράκτες τύπου Swash για τη μείωση έως εξάλειψη του φαινομένου sloshing που προκαλείται από την μετακίνηση καυσίμου και μπορεί να ωθήσει μέχρι και σε ανατροπή του πλοίου. Τέλος, πέρα από όσα προαναφέρθηκαν, υπάρχει αρκετή εξειδίκευση τόσο για σχεδίαση όσο και συντήρηση των δεξαμενών σε διάφορα ναυπηγεία, πράγμα που κάνει την λειτουργία τους πολύ πιο προσιτή και συγκρίσιμη με αυτή των συμβατικών δεξαμενών αποθήκευσης ορυκτών καυσίμων.

Μειονεκτήματα

Οι δεξαμενές καυσίμου Type B, πέρα από τα προφανή πλεονεκτήματα που έχουν, έχουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η ανάγκη για εκτεταμένους υπολογισμούς, οι οποίοι αφορούν τις μέγιστες τάσεις που μπορούν να ασκηθούν, το όριο κόπωσης, τη διάδοση των ρωγμών καθώς και τη διαρροή καυσίμου. Τα αρνητικά αυτά βέβαια, θα μειωθούν όσο αναπτύσσεται η αγορά και η χρήση τέτοιων δεξαμενών γίνεται συχνότερη. Ένα ακόμη αξιοσημείωτο μειονέκτημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη προτού γίνει η αγορά της δεξαμενής, είναι η απαίτηση για σύστημα διαχείρισης του αερίου που εξατμίζεται το οποίο μπορεί να μηδενιστεί με τη χρήση μεγαλύτερης μόνωσης στις δεξαμενές.



Εικόνα 2.5: Δεξαμενή "Type B" (Πηγή: DNV)

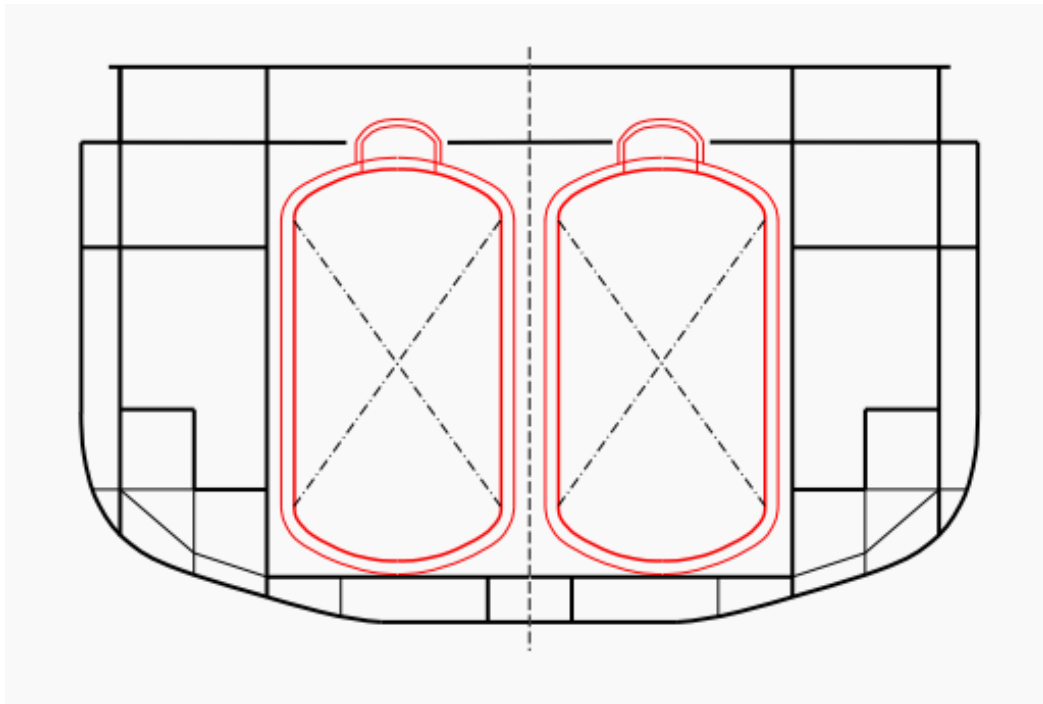
2.1.3.2 Type C tank

Πλεονεκτήματα

Οι δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμου Type C, όπως και η Type B, είναι αρκετά διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες για την αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου. Οι δεξαμενές αυτές έχουν τη δυνατότητα να τοποθετηθούν τόσο πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου, όσο και κάτω από αυτό και μάλιστα σε όλες τις πιθανές κατευθύνσεις, γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο για μετασκευές σε πλοία με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο. Επιπρόσθετα, είναι εύκολες στη τοποθέτησή τους με αποτέλεσμα, αυτή, να μπορεί να γίνει και από ναυπηγεία με ελάχιστη εμπειρία σε πλοία LNG ή στο καύσιμο LNG γενικότερα. Τέλος, όπως και οι δεξαμενές Type B, έχουν τη δυνατότητα να εφοδιαστούν με swash φρακτές για τον περιορισμό του sloshing, ενώ αντίθετα με τις Type B, απαιτείται ένα απλό σύστημα διαχείρισης του εξατμιζόμενου αερίου.

Μειονεκτήματα

Εκτός από τα αδιαμφισβήτητα θετικά στοιχεία που δείχνουν να έχουν οι δεξαμενές Type C, έχουν και κάποια αρνητικά τα οποία περιορίζουν τη δυνατότητα τους για ευρεία χρήση προς το παρόν. Ένα από αυτά είναι το γεγονός ότι τα υψηλά μέτρα ασφαλείας που έχουν, ωθούν στο να έχουν αυξημένο βάρος συγκριτικά με τα άλλα ήδη δεξαμενών, πράγμα που συμβάλλει αρνητικά στο διαθέσιμο χώρο φορτίου των πλοίων. Επιπλέον, ένα άλλο δεσμευτικό για τη χρήση τους πρόβλημα αποτελεί η ανάγκη ανεφοδιασμού από πλοία που παρέχουν δυνατότητα μεταφοράς του καυσίμου με υψηλή πίεση, σύμφωνα με αυτή της δεξαμενής. Τα προβλήματα αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για το τώρα, αλλά στο άμεσο μέλλον που θα ωριμάσει κι άλλο η τεχνολογία τους, θα αρχίσουν σιγά σιγά να εξαλείφονται.



Εικόνα 2.6: Δεξαμενή "Type C" (Πηγή: DNV)

2.1.3.3 Membrane Tank

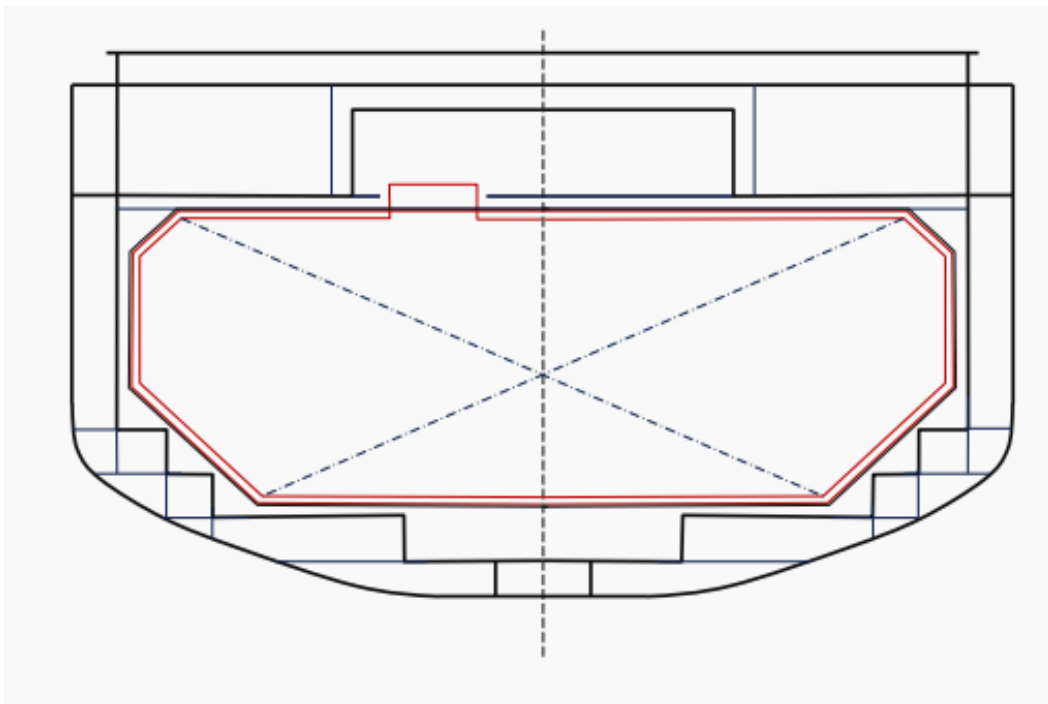
Πλεονεκτήματα

Οι δεξαμενές μεμβράνης αποτελούν μια άλλη επιλογή για την αποθήκευση του υγροποιημένου φυσικού αερίου ως καύσιμο. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους που τις κάνουν να ξεχωρίζουν, είναι ότι παρέχουν υψηλή απόδοση όγκου χωρίς να καταλαμβάνουν ιδιαίτερα

μεγάλο όγκο και έχοντας ταυτόχρονα χαμηλό ίδιο βάρος. Όπως τα άλλα δύο είδη δεξαμενών, έτσι και η Membrane Tank είναι ιδιαίτερα γνωστές σε ναυπηγεία και κατασκευαστές, οπότε προφανώς υπάρχει μεγάλη εμπειρία για την επισκευή και τη συντήρησή τους. Τέλος, ένα ακόμη ιδιαίτερα ενδιαφέρον πλεονέκτημα τους είναι η ικανότητα γρήγορης ψύξης, με αποτέλεσμα να πηγαίνει το LNG στην επιθυμητή θερμοκρασία χωρίς χρονοτριβές και απώλειες.

Μειονεκτήματα

Οι δεξαμενές μεμβράνης έχουν και κάποια σημαντικά αρνητικά τα οποία δε γίνεται να παραληφθούν. Αρχικά, η κατασκευή της πραγματοποιείται αφού ολοκληρωθεί το διαμέρισμα των δεξαμενών του πλοίου, πράγμα που απαιτεί επιπλέον χρόνο αναμονής του πλοίου στο ναυπηγείο καθώς και επιπλέον έξοδα. Παρά το γεγονός πως υπάρχει αρκετή ειδικευση για επισκευές και συντηρήσεις, υπάρχει περιορισμένος αριθμός προμηθευτών, πράγμα που σε περίοδο αυξημένης ζήτησης μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά αυξημένο διάστημα αναμονής. Τέλος, όμοια με τις δεξαμενές Tank B, απαιτούν σύστημα διαχείρισης του εξατμιζόμενου αερίου εξαιτίας του περιορισμού πίεσης.



Εικόνα 2.7: Δεξαμενή “Membrane Tank” (Πηγή: DNV)

Πίνακας 2.2: Σύγκριση χαρακτηριστικών των δεξαμενών

Χαρακτηριστικά	Ανεξάρτητες δεξαμενές		Αναπόσπαστες δεξαμενές
Τύπος	IMO Type B	IMO Type C	Membrane
Γεωμετρία	Πρισματικές δεξαμενές	Κυλινδρικές, bi-lobe, tri-lobe σχεδίαση	Πρισματική δεξαμενή
Προσαρμογή στον χώρο	Καλή	Χαμηλή - μέτρια	Μέτρια - καλή
Θερμοκρασία/πίεση	-163 °C/<0.7 bar	NA / > 2.0 bar (πιθανή υπερπίεση)	-163 °C/<0.7 bar
Σχεδιαστική δυσκολία	Υψηλή	Χαμηλή - μέτρια	Μέτρια
Κατασκευή	Προκατασκευή - Ανεξάρτητη από τη δομή του πλοίου	Προκατασκευή - μπορεί να βρίσκεται και στο κατάστρωμα	Κατασκευή της δεξαμενής μέσα στο προκατασκευασμένο διαμέρισμα της δεξαμενής
Υλικό	Χάλυβας με 9% περιεκτικότητα νικελίου	Χάλυβας με 9% περιεκτικότητα νικελίου	Ανοξείδωτος χάλυβας
Ρίσκο Sloshing	Μικρό λόγω Swash φρακτής	Μικρό λόγω σχήματος, όγκου, φρακτής	Υψηλό
Κύριες Δυσκολίες	Σχεδιαστική δυσκολία	Βελτιστοποίηση Χώρου και βάρους	Sloshing και τυποποιημένες κατασκευές

2.2 Μεθανόλη

2.2.1 Γενικές πληροφορίες

Ένα επιπλέον εναλλακτικό καύσιμο το οποίο μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει το Diesel, είναι η μεθανόλη. Η μεθανόλη ή Methanol αποτελεί ένα τοξικό και διαβρωτικό υγρό καύσιμο, μειονέκτημα το οποίο αντιμετωπίζεται εύκολα από τις ήδη υπάρχουσες 2-χρονης, 4-χρονης μηχανές της εταιρίας MAN όπως η ίδια αναφέρει ^[8]. Η καύση του εκπέμπει αέρια με σχεδόν μηδενική περιεκτικότητα σε θείο καθώς και με σημαντικά λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου συγκριτικά με τα ήδη χρησιμοποιούμενα ορυκτά καύσιμα. Ακόμη, η μεθανόλη έχει ιδιαίτερα χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης (11°C), πράγμα που δεν την κάνει συμβατή με τους διεθνείς

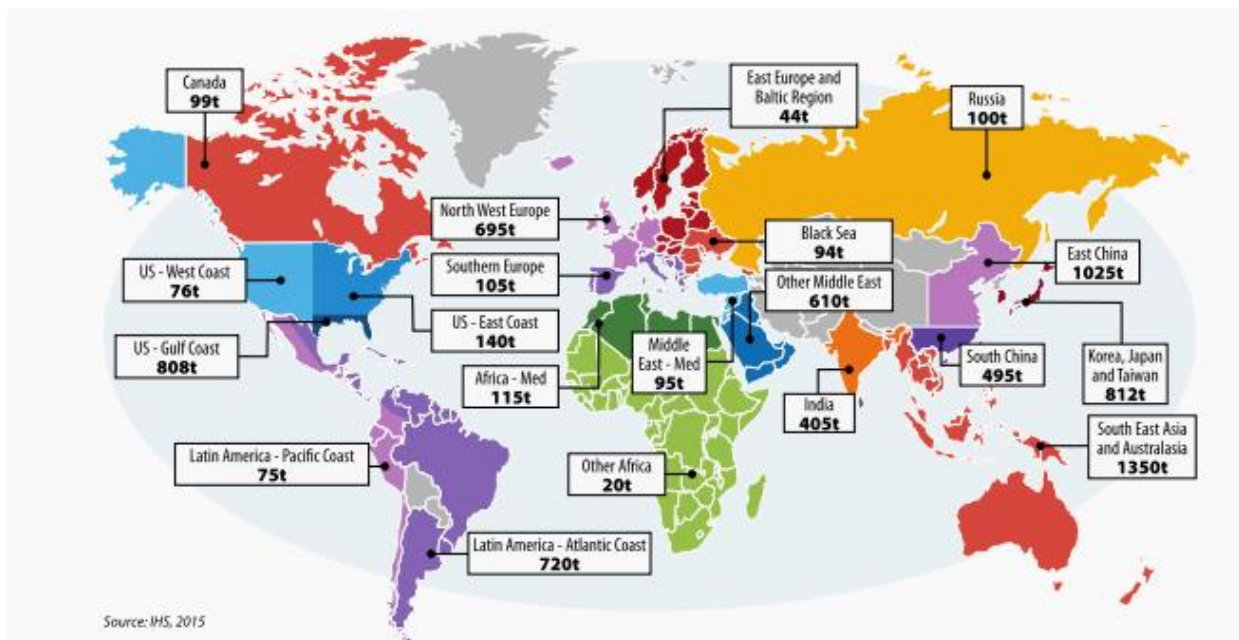
κανονισμούς για τη προστασία της θαλάσσιας ζωής (SOLAS). Ωστόσο, όπως πάλι υποστηρίζει η MAN, με διπλά τοιχώματα στα απαραίτητα τμήματα του μηχανολογικού εξοπλισμού και των δεξαμενών καυσίμου, το πρόβλημα αυτό, αντιμετωπίζεται εύκολα ^[8]. Η μεθανόλη αποτελεί ένα από τα νέα καύσιμα της ναυτιλίας, γεγονός που εξηγεί την απουσία κανονισμών για τη σωστή και ασφαλή χρήση της στη Ναυτιλία μέχρι τον Νοέμβριο 2020, χάσμα που κάλυψε ο IMO με την έγκριση κανονισμών για ασφαλή χρήση της μεθανόλης ως καύσιμο. Πέρα από τη ναυτιλία έχει αποδειχθεί ότι η μεθανόλη αποτελεί ένα από τα πιο ασφαλή καύσιμα, καθώς τα τελευταία 100 χρόνια μεταφέρεται παγκοσμίως με τη χρήση πλοίων και χρησιμοποιείται με ασφάλεια σε μεγάλο πλήθος ενεργειακών εφαρμογών. Πέρα από όσα ήδη αναφέρθηκαν, ένα ακόμα αξιοσημείωτο πλεονέκτημα που έχει η χρήση της μεθανόλης έναντι άλλων καυσίμων, είναι ότι αποτελεί βιοδιασπώμενο καύσιμο, το οποίο αν χυθεί στο νερό εξαφανίζεται γρήγορα χωρίς να αποτελεί κίνδυνο για την υποθαλάσσια ζωή, σε αντίθεση με το πετρέλαιο, το οποίο καταστρέφει το θαλάσσιο οικοσύστημα και οφείλεται για αρκετά μεγάλες καταστροφές που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν. Τέλος, εξίσου αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μερικές από τις μεγαλύτερες ναυτιλιακές εταιρίες αλλά και εταιρίες παραγωγής ναυτικών μηχανών, έχουν επενδύσει πολύ μεγάλα κεφάλαια για τη λειτουργία πλοίων με χρήση μεθανόλης ^[9].

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά Μεθανόλης

Properties	Values
Πυκνότητα [t/m^3]	0.798
Lower Heating Value [MJ/kg]	20.1
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης(στοιχειομετρικού μίγματος) [$^{\circ}C$]	450

Όπως είναι ήδη γνωστό, η διεθνής ναυτιλία καταναλώνει ετησίως, τεράστια ποσότητα ορυκτού καυσίμου HFO, η οποία κυμαίνεται περίπου στους 300 εκατομμύρια τόνους. Η τεράστια ανάγκη αυτή σε καύσιμο, αποτελεί ένα ιδιαίτερα λεπτό ζήτημα που πρέπει να μελετηθεί καλά, προτού να ληφθεί η απόφαση για τη στροφή της ναυτιλίας σε κάποιο συγκεκριμένο εναλλακτικό καύσιμο. Η μεθανόλη, δίνει λύση στο πρόβλημα αυτό, καθώς υπάρχουν σε παγκόσμιο επίπεδο έτοιμες δομές παραγωγής, εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης της στη χημική βιομηχανία. Μάλιστα, όπως δείχνει η εικόνα, το 2013 η παγκόσμια παραγωγή μεθανόλης έφτανε κοντά στους 100 εκατομμύρια τόνους ^[10]. Ενώ, πιο πρόσφατες έρευνες και στατιστικές μελέτες έδειξαν ότι υπάρχουν άμεσα διαθέσιμες εγκαταστάσεις σε τουλάχιστον 90 από τα 100

μεγαλύτερα λιμάνια παγκοσμίως. Επιπλέον, οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις βρίσκονται τοποθετημένες σε στρατηγικές θέσεις, οι οποίες με τη σχεδίαση του κατάλληλου supply chain, θα μπορούσαν να εφοδιάσουν τα πλοία σε παγκόσμιο επίπεδο. Ακόμη, οι ήδη υπάρχουσες δεξαμενές πετρελαίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για αποθήκευση όσο και για μεταφορά μεθανόλης με ελάχιστες αλλαγές, των οποίων το κόστος είναι σχεδόν μηδενικό μπροστά στα αμέτρητα θετικά που θα προκύψουν από τη χρήση της μεθανόλης για τη πρόωση των πλοίων. Τέλος, χάρη στις ήδη υπάρχουσες υποδομές, υπάρχει πληθώρα τεχνογνωσίας για την ταχεία επέκταση των μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης μεθανόλης, προκειμένου να καλυφθεί η αυξημένη ζήτηση που πιθανώς να προκύψει αν καθιερωθεί ως το νέο καύσιμο της ναυτιλίας.

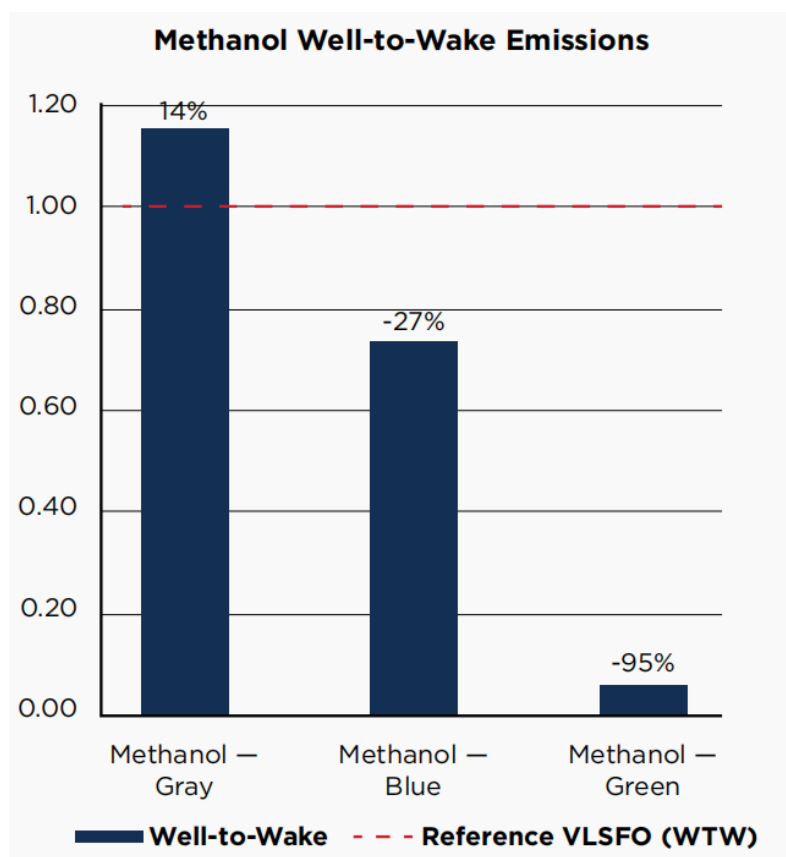


Εικόνα 2.8: Δομές αποθήκευσης και τροφοδοσίας μεθανόλης (Πηγή: Analysis of the Requirements for ships using Methanol as Fuel)

2.2.2 Life Cycle Analysis

Η μεθανόλη, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ένα αρκετά φιλικό καύσιμο ως προς το περιβάλλον κατά τη καύση της, συγκριτικά με αυτά που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή. Ωστόσο, αυτό δε συνεπάγεται ότι κατά τη παραγωγή της, είναι εξίσου φιλική ως προς το περιβάλλον. Για αυτό, η μεθανόλη, ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής της, χωρίζεται στις 4 ακόλουθες κατηγορίες ^[11]:

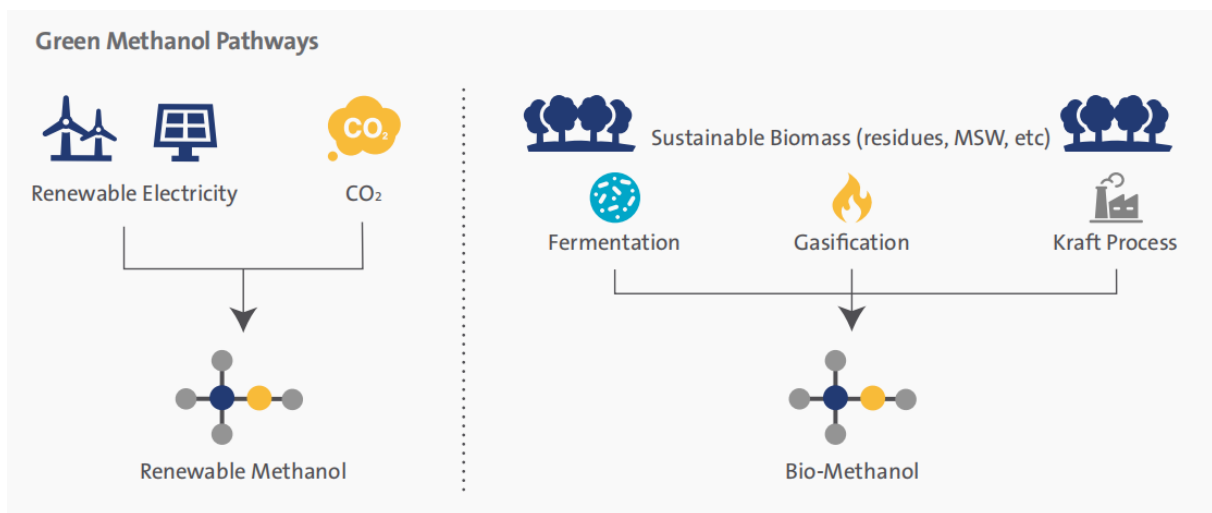
- **Brown Methanol:** Η καφέ μεθανόλη παράγεται από κάρβουνο και οι εκπομπές σε διοξείδιο του άνθρακα, από τη παραγωγή ως τη κατανάλωσή της, είναι μεγαλύτερες από εκείνες του diesel
- **Grey Methanol:** Η γκρι μεθανόλη παράγεται από φυσικό αέριο, ωστόσο όμοια με τη καφέ μεθανόλη, κατά τη διάρκεια του well-to-wake δεν παρουσιάζουν σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα
- **Blue Methanol:** Η μπλε μεθανόλη, παράγεται από μπλε υδρογόνο με τη χρήση κατάλληλης τεχνολογίας για αποθήκευση του άνθρακα. Σε αντίθεση με τα άλλα δύο είδη μεθανόλης, αυτή μειώνει σημαντικά τη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα σε όλη τη διάρκεια ζωής του καυσίμου
- **Green Methanol:** Η πράσινη μεθανόλη, αποτελεί την πιο καθαρή μορφή μεθανόλης, η οποία μάλιστα κατά τη διάρκεια του well-to-wake εκπέμπει σχεδόν μηδενικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα



Εικόνα 2.9: Well-To-Wake καυσαέρια από τα διάφορα είδη μεθανόλης (Πηγή: ABS)

Όπως, αναφέρθηκε προηγουμένως και φαίνεται στην εικόνα 2.9, η πράσινη μεθανόλη αποτελεί με διαφορά την πιο πράσινη λύση από τα διάφορα είδη μεθανόλης. Η παραγωγή της γίνεται με

δύο τρόπους, είτε από βιομάζα η οποία δημιουργεί βίο-μεθανόλη, είτε από πράσινο υδρογόνο, αποθηκευμένο άνθρακα και ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, η οποία δημιουργεί την e-methanol. Η πράσινη μεθανόλη δείχνει να είναι ένα από τα πιο υποσχόμενα εναλλακτικά καύσιμα, η εκτεταμένη χρήση του οποίου θα μπορούσε να συμβάλλει σημαντικά στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας, καθώς και στην επίτευξη των στόχων του IMO τόσο για το 2030, όσο και για το 2050. Σύμφωνα με τα στατιστικά των τελευταίων ετών, η τιμή της πράσινης μεθανόλης είναι οριακά διπλάσια, από αυτή τις γκρι, γεγονός που δε προξενεί μεγάλη εντύπωση, αφού ο τρόπος παραγωγής της είναι πιο σύνθετος και ακριβός. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μεγάλης τιμής της πράσινης μεθανόλης, μια λύση για την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, είναι η μίξη 50% γκρι και 50% πράσινης μεθανόλης, η οποία δημιουργεί την πορτοκαλή μεθανόλη. Η τιμή της πορτοκαλή μεθανόλης κυμαίνεται σε ανταγωνιστικά επίπεδα με αυτή του ορυκτού καυσίμου VLSFO, ενώ παράλληλα συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια του well-to-tank.



Εικόνα 2.10: Τρόποι παραγωγής πράσινης μεθανόλης (Πηγή: Methanex Brochure)

2.2.3 Τροποποιήσεις Πλοίου

Η χρήση της μεθανόλης ως καύσιμο σε διπλού καυσίμου κύριες μηχανές, χρησιμοποιεί ίδιες αρχές με αυτές που χρησιμοποιούνται για κύριες μηχανές Diesel. Συνεπώς, δε χρειάζονται ιδιαίτερες καινοτομίες για τη παραγωγή τέτοιων μηχανών από τους κολοσσούς παραγωγής ναυτικών κινητήρων, όπως είναι η MAN και η Wartsila. Το μόνο κομμάτι που χρειάζεται περαιτέρω έρευνα και που ήδη έχουν επενδυθεί κεφάλαια για την επίτευξή του, είναι η εύρεση τρόπου για να γίνουν πιο αποδοτικές οι μηχανές αυτές και να εκπέμπονται όσο το δυνατόν λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου κατά την καύση. Εκτός, από τις μηχανές εσωτερικής καύσης, οι ήδη υπάρχουσες δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμου Diesel μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές και χωρίς την ανάγκη επιπλέον εξοπλισμού που απαιτείται για κρυογονικές δεξαμενές ή δεξαμενές αυξημένης πίεσης. Είναι λοιπόν προφανές, ότι το CAPEX του πλοίου που χρησιμοποιεί ως καύσιμο τη μεθανόλη δεν είναι σημαντικά μεγαλύτερο από εκείνο αντίστοιχου πλοίου που λειτουργεί με Diesel.

2.3 Αμμωνία (NH₃)

2.3.1 Γενικές πληροφορίες

Η αμμωνία αποτελεί ένα ακόμη εναλλακτικό καύσιμο, το οποίο εμφανίζεται όλο και περισσότερο στο φως της δημοσιότητας και πολλοί πιστεύουν ότι αποτελεί το καύσιμο που θα δώσει λύση στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας. Η αμμωνία αποτελείται από σύνθεση υδρογόνου και αζώτου και στην ατμοσφαιρική πίεση και σε κανονικές θερμοκρασίες, είναι ένα άχρωμο αέριο με χαρακτηριστική ‘πικάντική’, ενοχλητική μυρωδιά ^[12]. Σε μεγαλύτερες πιέσεις μετατρέπεται από αέριο σε υγρό καύσιμο, γεγονός που τη καθιστά ευκολότερη στη μεταφορά και στην αποθήκευση, μιας και οι εφοδιαστικές αλυσίδες σε παγκόσμιο επίπεδο είναι αρκετά εξοικειωμένες στη διαχείριση υγρών καυσίμων. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος παρασκευής της είναι η μέθοδος Haber-Bosch, η οποία αποτελείται από την αντίδραση υδρογόνου και αζώτου υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία με τη παρουσία καταλύτη. Επιπλέον, η αμμωνία όπως και η πλειοψηφία των εναλλακτικών καυσίμων έχει χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τα ορυκτά καύσιμα. Συνεπώς για τη παραγωγή ίδιας ποσότητας ενέργειας με τη καύση αμμωνίας, απαιτούνται δεξαμενές χωρητικότητας περίπου 2.4 φορές μεγαλύτερες από αυτές για τα αντίστοιχα συμβατικά καύσιμα, όπως αναφέρει ο ABS ^[12]. Ακόμη, η αμμωνία έχει στενό εύρος ανάφλεξης συγκριτικά με άλλα εναλλακτικά καύσιμα, ενώ ταυτόχρονα είναι ιδιαίτερα τοξική

και αντιδραστική. Για τον λόγο αυτό ο Διεθνής κώδικας μεταφοράς υγρών αερίων (IGC Code) έχει θέσει αυστηρές προϋποθέσεις στα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση και τη μεταφορά της αμμωνίας, προκειμένου να μειωθεί το ρίσκο έκθεσης του προσωπικού σε αυτή.

Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά Αμμωνίας

Properties	Values
Πυκνότητα [t/m^3]	0.682
Lower Heating Value [MJ/kg]	18.6
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης(στοιχειομετρικού μίγματος) [$^{\circ}C$]	651

Παρά το γεγονός ότι η χρήση της αμμωνίας ως καύσιμο για τη πρόωση των πλοίων, μπορεί να μειώσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και να φέρει τη ναυτιλία ένα βήμα πιο κοντά στους στόχους του IMO για απαρθρακοποίηση, πρέπει να αντιμετωπιστούν κάποιες σημαντικές προκλήσεις προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Κρίνεται σκόπιμο, να γίνει αναφορά στα πλεονεκτήματα και στις προκλήσεις που έχει η χρήση της αμμωνίας.

2.3.1.1 Πλεονεκτήματα

- Μηδενική περιεκτικότητα σε άνθρακα
- Χαμηλός κίνδυνος αναφλεξιμότητας
- Δυνατότητα παραγωγής από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια
- Δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς σε υγρή μορφή, σε συγκεκριμένες πιέσεις και θερμοκρασίες
- Εδραιωμένο εμπορικό προϊόν

2.3.1.2 Προκλήσεις

- Τοξικότητα
- Δομές παραγωγής και αποθήκευσης καυσίμου
- Απουσία κανονισμών
- Αρχικό κόστος κτήσης μηχανών
- Κόστος πράσινης αμμωνίας

- Διαβρωτική επίδραση σε συγκεκριμένα μέταλλα
- Πιθανή χρήση μεγάλης ποσότητα πιλοτικού καυσίμου
- Πιθανότητα αυξημένης παραγωγής NO_x

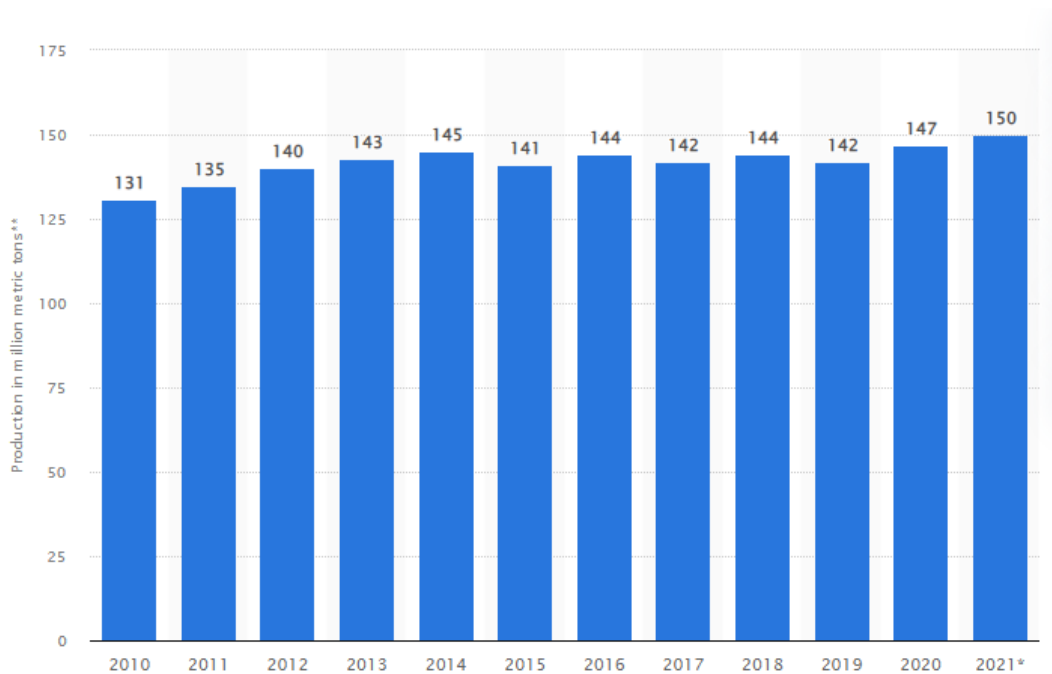
2.3.2 Τοξικότητα

Η αμμωνία, όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι ένα τοξικό καύσιμο και απαιτούνται συγκεκριμένες δομές και υλικά για την αποθήκευσή της, προκειμένου να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η πιθανότητα να έρθει σε επαφή με κάποιον ζωντανό οργανισμό. Είναι λοιπόν σκόπιμο να γίνει αναφορά στις επιπτώσεις που έχει η επαφή της με τον άνθρωπο. Σε μικρή περιεκτικότητα, προκαλεί ενόχληση στα μάτια, στους πνεύμονες και στο δέρμα, ενώ σε άμεση επαφή μπορεί να γίνει απειλητική για τη ζωή, καθώς προκαλούνται συμπτώματα όπως, δυσκολία στην αναπνοή, πόνος στο στήθος και σπασμοί στους βρόγχους. Το χειρότερο όμως είναι το πνευμονικό οίδημα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τα πνευμόνια να γεμίζουν με υγρό και να προκαλείται αστοχία του αναπνευστικού συστήματος και συνεπώς ο θάνατος των ανθρώπων. Επιπλέον, η άμεση επαφή με το δέρμα, προκαλεί σοβαρά χημικά εγκαύματα, ενώ η επαφή στα μάτια προκαλεί πόνο, καταστροφή της ίριδας, γλαύκωμα και μπορεί ακόμη να προκαλέσει και καταρράκτη ^[12].

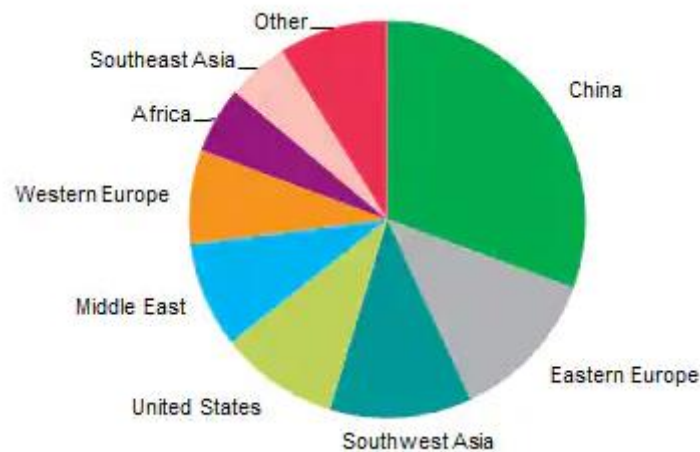
2.3.3 Δομές παραγωγής καυσίμου

Εδώ και πολλά χρόνια η αμμωνία παράγεται και χρησιμοποιείται για τη πραγματοποίηση διαφόρων εργασιών. Πιο συγκεκριμένα η αμμωνία φαίνεται να χρησιμοποιείται σε διαφόρους καθαρισμούς, ως ψυκτικό αέριο, στη βιομηχανία παραγωγής πλαστικών και σε άλλους τομείς. Όμως, ο τομέας που καταναλώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα παγκοσμίως, είναι ο αγροτικός. Η αμμωνία αποκτά τον ρόλο του λιπάσματος για τους καρπούς και συμβάλλει σημαντικά στη γρηγορότερη και πιο επιτυχημένη παραγωγή των φυτών. Μάλιστα, όπως αναφέρει το c&en, παράγονται ετησίως 150 εκατομμύρια τόνοι αμμωνίας και 120 λιμάνια παγκοσμίως είναι εφοδιασμένα με κατάλληλους σταθμούς για την αποθήκευση και επεξεργασία της ^[13]. Επιπλέον, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.11 , η παραγωγή της τη τελευταία δεκαετία ήταν σχεδόν σταθερή. Το 2021 η μεγαλύτερη ποσότητα αμμωνίας παράχθηκε στην ανατολική Ασία και ήταν ίση με 64.6 εκατομμύρια τόνους, ενώ μόνο στην Κίνα παράχθηκαν περίπου 39 εκατομμύρια τόνοι, γεγονός που τη καθιστά ως τη νούμερο 1 χώρα σε παραγωγή αμμωνίας σε παγκόσμιο επίπεδο ^[14]. Παρά τη μεγάλη ποσότητα αμμωνίας που παράγεται τα τελευταία χρόνια, δε θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες πρόωσης των πλοίων, στο υποθετικό σενάριο

που ο παγκόσμιος στόλος τη χρησιμοποιούσε ως καύσιμο. Για αυτόν τον λόγο, οι δομές παραγωγής αμμωνίας είναι ένα από τα ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν στο μέλλον, προκειμένου να μπορεί να συντελέσει με τον δικό της τρόπο στην ανθρακοποίηση της ναυτιλίας.



Εικόνα 2.11: Παγκόσμια παραγωγή αμμωνίας 2010-2021 (Πηγή: Statista)



Εικόνα 2.12: Παγκόσμια κατανάλωση αμμωνίας 2020 (Πηγή: S&P Global)

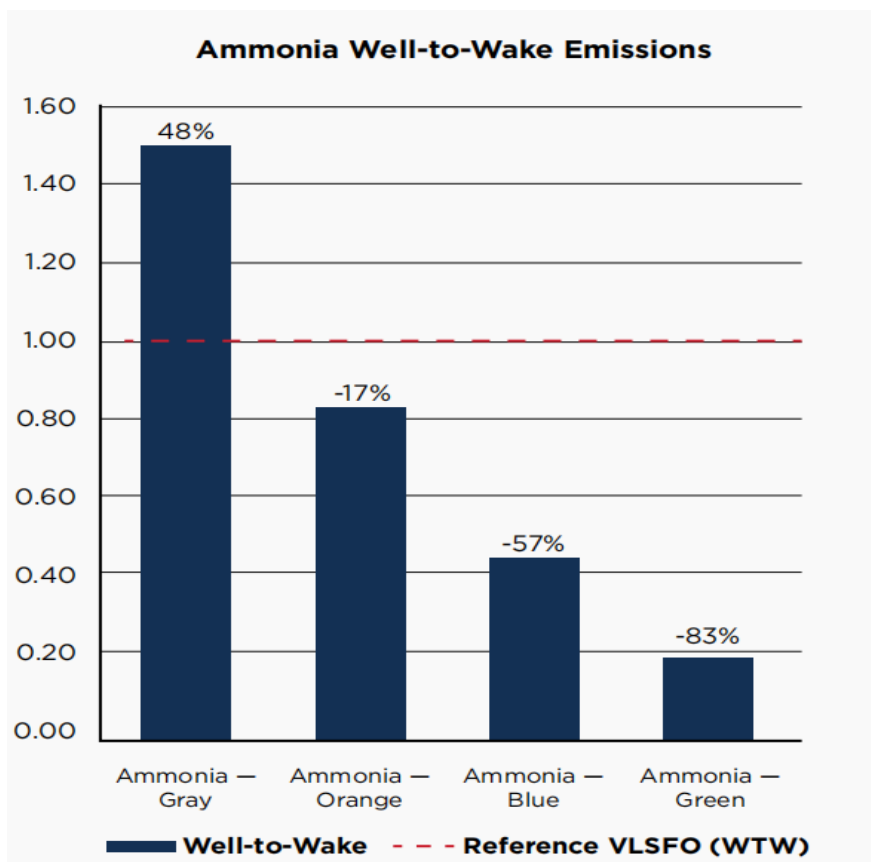
2.3.4 Life Cycle Analysis

Η παραγωγή της αμμωνίας δύναται να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση ορυκτών πηγών όπως είναι το φυσικό αέριο, είτε με τη χρήση υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού. Ο πρώτος τρόπος παραγωγής απαιτεί υψηλή ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα να εκπέμπει μεγάλη ποσότητα αποτυπωμάτων άνθρακα, γεγονός που αντιτίθεται στον αρχικό σκοπό χρήσης των καυσίμων με μικρότερη παραγωγή ποσότητας άνθρακα. Αντιθέτως, ο δεύτερος τρόπος παραγωγής της αμμωνίας, ο οποίος πραγματοποιείται με τη χρήση νερού και ανανεώσιμης ενέργειας, έχει τη δυνατότητα να μειώσει την εκπομπή άνθρακα σε όλα τα στάδια ζωής του καυσίμου, δηλαδή από τη παραγωγή ως τη κατανάλωσή του.

Οι κυριότεροι τύποι αμμωνίας που κυκλοφορούν στην αγορά και διακρίνονται από τον τρόπο παρασκευής τους και από τα καυσαέρια που εκπέμπουν κατά τη διάρκεια της ζωής τους, είναι οι ακόλουθοι τρεις ^[13]:

- **Gray Ammonia:** Η γκρι αμμωνία, γνωστή και ως καφέ αμμωνία, είναι αυτή που παράγεται σε μεγαλύτερο ποσοστό μέχρι σήμερα. Η παραγωγή της γίνεται με τη μέθοδο Haber-Bosch, η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί χρησιμοποιεί την αντίδραση αζώτου και υδρογόνου για τη παραγωγή αμμωνίας. Όμως, το υδρογόνο που χρησιμοποιείται παράγεται με τη μέθοδο αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό, διαδικασία η οποία εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.
- **Blue Ammonia:** Η μπλε αμμωνία, είναι συμβατική αμμωνία για την παραγωγή της οποίας έχει δεσμευτεί και αποθηκευτεί υποπροϊόν CO₂, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των περιβαλλοντικών και κλιματικών επιπτώσεων συγκριτικά με την γκρι αμμωνία. Ωστόσο, ο τύπος της αμμωνίας αυτής είναι ιδιαίτερα αμφιλεγόμενος, καθώς το κατά πόσο είναι φιλική η χρήση του προς το περιβάλλον, εξαρτάται από το πώς χρησιμοποιείται η αποθηκευμένη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα.
- **Green Ammonia:** Η πράσινη αμμωνία είναι η πιο καθαρής φιλική ως προς το περιβάλλον αμμωνία που μπορεί να παραχθεί μέχρι και σήμερα. Η παραγωγή της βασίζεται σε υδρογόνο που προέρχεται από ηλεκτρόλυση νερού με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το μοναδικό μειονέκτημα της είναι, ότι παράγεται σε πολύ μικρή ποσότητα ετησίως, γεγονός που έπεται να αλλάξει μελλοντικά. Μάλιστα ήδη βρίσκεται σε εφαρμογή ένα τεράστιο έργο στη Σαουδική Αραβία, το οποίο έχει ως

απώτερο στόχο τη δημιουργία πάνω από 1 εκατομμύριο τόνους πράσινης αμμωνίας ετησίως.



Εικόνα 2.13: Well-To-Wake καυσαέρια από τα διάφορα είδη αμμωνίας (Πηγή: ABS)

Στην εικόνα 2.13, παρουσιάζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα σε ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του καυσίμου (well to wake), ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής του. Ωστόσο, για όλους τους τύπους αμμωνίας, η ποσότητα CO₂ που παράγεται κατά τη καύση τους δηλαδή κατά το tank-to-wake, είναι μηδενική από το ίδιο καύσιμο και εξαρτάται μόνο από τη χρήση του pilot fuel που χρησιμοποιείται για τη καύση. Το στάδιο tank-to-wake είναι και αυτό το οποίο θα εξετασθεί στη παρούσα διπλωματική εργασία, αφού οι μέχρι τώρα κανονισμοί του διεθνούς οργανισμού ναυτιλίας IMO, αναφέρονται στα καυσαέρια που παράγονται κατά τη διάρκεια αυτού.

2.3.5 Διαρρύθμιση πλοίου και αποθήκευση καυσίμου

Τα πλοία που αποτελούν αυτή τη στιγμή τον παγκόσμιο ναυτιλιακό στόλο, όπως τα δεξαμενόπλοια, τα φορτηγά και τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, θα απαιτούν μελλοντικά πολύ μεγάλες αλλαγές στη σχεδίαση, ανάλογα με το εναλλακτικό καύσιμο και το είδος πρόωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Μάλιστα, στις περιπτώσεις που η πρόωση του πλοίου θα πραγματοποιείται με τη χρήση κυψελών καυσίμου, η αρχιτεκτονική των μηχανοστασίων αναμένεται να αλλάξει ολοκληρωτικά και να μην έχει καμία σχέση με τα μέχρι τώρα μηχανοστάσια. Επιπλέον, εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας ενέργειας της αμμωνίας, απαιτούνται μεγαλύτερες δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμου, η θέση των οποίων αποτελούν πολύ σημαντικό παράγοντα της σχεδίασης. Η θέση εξαρτάται από τον τύπο της δεξαμενής που θα χρησιμοποιηθεί, ενώ έχει σε κάθε περίπτωση ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του χώρου φορτίου στο πλοίο. Η αμμωνία παραμένει σε υγρή μορφή είτε αν βρίσκεται υπό θερμοκρασία $-33.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ και πίεση 1 bar, είτε αν βρίσκεται σε πίεση 8.6 bar και σε θερμοκρασία $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]. Όπως έχουν δείξει οι μέχρι τώρα μελέτες, η πιο βολική για ναυπηγική χρήση δεξαμενή είναι η δεξαμενή πίεση Type B, καθώς δεν απαιτεί την εγκατάσταση μηχανημάτων για επανυγροποίηση του καυσίμου. Τέλος, τα πλοία που σκοπεύουν να λειτουργήσουν με τη χρήση αμμωνίας, χρειάζονται νέα συστήματα για την αποθήκευση και διαχείριση της αμμωνίας πάνω σε αυτά, όπως είναι οι σωλήνες μεταφοράς καυσίμου, τα συστήματα διαχείρισης του εξατμιζόμενου αερίου καθώς και κατάλληλα συστήματα περιορισμού του καυσίμου για να αποφευχθεί η οποιαδήποτε επαφή με άνθρωπο ή περιβάλλον.

2.4 Υδρογόνο (H_2)

2.4.1 Γενικές πληροφορίες

Το υδρογόνο αποτελεί ένα επιπλέον εναλλακτικό καύσιμο, του οποίου η χρήση είναι δυνατόν να συμβάλλει στην αντιμετώπιση του προβλήματος του θερμοκηπίου και να οδηγήσει σε μια πιο πράσινη ναυτιλία. Το υδρογόνο, εντοπίζεται φυσικά ως χημική ένωση νερού (H_2O) ή μεθανόλης και όπως είναι αναμενόμενο, χρειάζεται να απομονωθεί από τις ενώσεις αυτές προκειμένου να χρησιμοποιηθεί. Στις συνήθεις συνθήκες, αποτελεί ένα άχρωμο, άγευστο, μη τοξικό αέριο, το οποίο είναι ταυτόχρονα ιδιαίτερα εύφλεκτο με τεράστιο φάσμα αναφλεξιμότητας [15].

Η μικρή πυκνότητα του υδρογόνου το ωθεί στο να διασκορπίζεται ταχύτατα όποτε έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα, γεγονός που σημαίνει ότι δε μπορεί να περιοριστεί με τη χρήση της βαρύτητας και τελικά οδηγείται στο διάστημα. Παρά το γεγονός αυτό, η μη τοξικότητα του δεν εγείρει ανησυχίες και δεν εγκυμονεί κινδύνους ως προς το περιβάλλον. Η χρήση του υδρογόνου ως ναυτιλιακό καύσιμο, μπορεί να μειώσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις εκπομπές αερίων του άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του σταδίου Tank-To-Wake η χρήση του υδρογόνου μπορεί να έχει μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει, όταν η κατανάλωση του πραγματοποιείται από fuel cells ή από μηχανές εσωτερικής καύσης ενός καυσίμου ^[15]. Στη περίπτωση των μηχανών εσωτερικής καύσης διπλού καυσίμου, μπορεί οι εκπομπές άνθρακα να μη μηδενίζονται, αλλά μειώνονται σημαντικά. Παρά τις απίστευτες επιδόσεις του υδρογόνου κατά τη διάρκεια της κατανάλωσης του και με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος, απαιτείται προσοχή στις εκπομπές που προκαλεί η χρήση του κατά το στάδιο παραγωγής και αποθήκευσής του, γεγονός που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Το υδρογόνο αποτελεί το καύσιμο με τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα ανά ποσότητα μάζας από όλα τα χημικά καύσιμα που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στην ανθρωπότητα. Η ενεργειακή του πυκνότητα ξεπερνά αυτή του MGO κατά 2.8 φορές και των καυσίμων με κύριο συστατικό αλκοόλες κατά 6 φορές, όπως αναφέρει στη σχετική του έρευνα ο ABS ^[16]. Το χαρακτηριστικό του αυτό, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποδοτικότητας των μηχανών, ενώ ταυτόχρονα και τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Στον αντίποδα, λόγω της πολύ μικρής του πυκνότητας, η ενεργειακή του πυκνότητα ανά ποσότητα όγκου είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να απαιτούνται 4 φορές μεγαλύτερες δεξαμενές από MGO και 2 φορές μεγαλύτερες από LNG προκειμένου να αποθηκευτεί η ίδια ποσότητα ενέργειας ^[6].

Πίνακας 2.5: Χαρακτηριστικά Υδρογόνου

Properties	Values
Πυκνότητα [t/m ³]	0.0708
Lower Heating Value [MJ/kg]	120.2
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης στοιχειομετρικού μίγματος [°C]	585

Το υδρογόνο μπορεί να συμβάλλει σε πολύ μεγάλο βαθμό στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας λόγω της καθαρότητας των αερίων που παράγονται κατά τη κατανάλωση του. Παρά το γεγονός αυτό, το υδρογόνο αποτελεί ένα πολύ νέο καύσιμο στον ναυτιλιακό κόσμο, με

αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλά πράγματα που απαιτούν βελτίωση προκειμένου να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα και να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα. Ακολουθούν, λοιπόν, στη συνέχεια κάποια από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση του, καθώς και κάποιες από τις κυριότερες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν στο άμεσο μέλλον ^[16].

2.4.1.1 Πλεονεκτήματα

- Μηδενική ποσότητα άνθρακα και θείου
- Μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και από βίο-ανανεώσιμες διαδικασίες
- Αποθηκεύεται και μεταφέρεται είτε ως υγρό είτε ως αέριο
- Μηδενική εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου κατά τη κατανάλωση τους από Fuel Cells
- Υψηλή άνωση και διασπάται εύκολα αν χυθεί, ακόμα και στις θερμοκρασίες τις οποίες είναι υγρό

2.4.1.2 Προκλήσεις

- Μικρή εμπειρία στη μεταφορά με πλοία
- Υψηλή αξία καυσίμου
- Μικρή διαθεσιμότητα ανανεώσιμα παραγόμενου υδρογόνου
- Οι Δομές παραγωγής και αποθήκευσης καυσίμου απαιτούν ανάπτυξη
- Υψηλό ρίσκο έκρηξης σε περιορισμένους χώρους
- Χαμηλή κρυογονική θερμοκρασία
- Ανάγκη χρήσης νέων υλικών με συγκεκριμένες ιδιότητες
- Αυξημένη παραγωγή εκπομπών NO_x όταν καίγεται σε μηχανές εσωτερικής καύσης

2.4.2 Αποθήκευση καυσίμου

Όπως είναι αναμενόμενο, για την αποθήκευση μεγάλης ποσότητας καυσίμου υδρογόνου σε ένα πλοίο απαιτείται είτε μεγαλύτερο μέγεθος πλοίου, είτε μείωση του χώρου φορτίου. Το γεγονός αυτό συμβαίνει, εξαιτίας της πολύ μικρής πυκνότητας του υδρογόνου, που απαιτεί την ανάγκη πολύ μεγαλύτερου χώρου για την αποθήκευση ίσης ενεργειακά ποσότητας καυσίμου και απασχολεί τα πλοία που πραγματοποιούν μακρινά ταξίδια χωρίς τη δυνατότητα συχνών

ανεφοδιασμών. Επιπλέον, για την αποθήκευση του υδρογόνου σε υγρή μορφή, δηλαδή σε θερμοκρασία $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, απαιτείται πολύ καλή μόνωση στις δεξαμενές και μια μικρή υπερπίεση 1-10 bar ^[15], η οποία επιδρά επίσης αρνητικά στον χώρο του φορτίου. Όταν, το υγροποιημένο υδρογόνο, αποθηκεύεται σε χαμηλές πιέσεις, το boil off gas αποτελεί μια ιδιαίτερη δυσκολία που χρήζει αντιμετώπισης καθώς ισούται σχεδόν με 1-5% ημερησίως για τις συμβατές δεξαμενές. Για την αντιμετώπιση των διαρροών αυτών, γίνεται χρήση αυξημένης μόνωσης στις δεξαμενές, η οποία αυξάνει ελάχιστα το κόστος αποθήκευσης του καυσίμου, αλλά μειώνει δραστικά το boil off gas σε 0.02%/ημέρα ^[15], νούμερο που μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Υπολογίζεται ότι η μόνωση των κρυογονικών δεξαμενών είναι σχεδόν διπλάσια-τριπλάσια αυτής των αντίστοιχων δεξαμενών αποθήκευσης LNG, σύμφωνα με τη μελέτη του ABS ^[16]. Ωστόσο, εκτός από τις κρυογονικές δεξαμενές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι υψηλής πίεσης δεξαμενές Type C για την αποθήκευση του υδρογόνου σε αέρια μορφή.

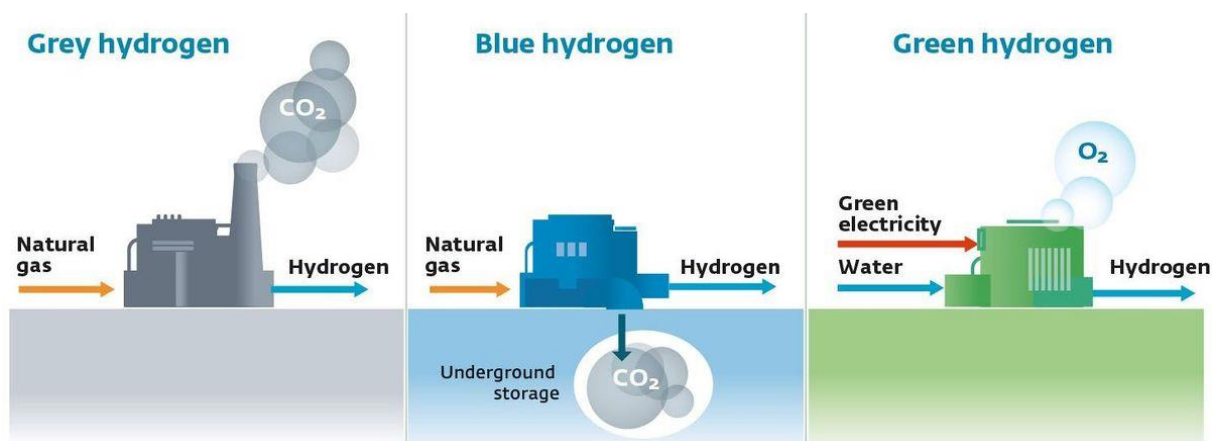
2.4.3 Life Cycle Analysis

Όμοια με την αμμωνία, η μεγαλύτερη ποσότητα παραγωγής υδρογόνου πραγματοποιείται από φυσικό αέριο και κάρβουνο. Ο τρόπος αυτός παραγωγής του υδρογόνου δεν είναι ιδιαίτερα φιλικός προς το περιβάλλον και μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι πιο βλαβερός, από ότι η χρήση των ορυκτών καυσίμων. Το γεγονός αυτό έχει ωθήσει τα τελευταία χρόνια στην εύρεση τρόπων για όξυνση της παραγωγής του υδρογόνου με ηλεκτρόλυση χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ενέργεια.

Οι κυριότεροι τύποι υδρογόνου που κυκλοφορούν στην αγορά και διακρίνονται από τον τρόπο παρασκευής τους και από τα καυσαέρια που εκπέμπουν κατά τη διάρκεια της ζωής τους, είναι οι ακόλουθοι τρεις ^[17]:

- **Gray Hydrogen:** Το γκρι υδρογόνο παράγεται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων όπως είναι το κάρβουνο και το φυσικό αέριο. Το γκρι υδρογόνο αποτελεί περίπου το 95% της ποσότητας υδρογόνου που παράγεται παγκοσμίως. Οι κύριοι τρόποι παραγωγής του είναι η αναμόρφωση μεθανίου ατμού και η αεριοποίηση άνθρακα, ωστόσο και οι δύο μέθοδοι αυτοί εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, το υδρογόνο που παράγεται είναι γκρι και δεν ανήκει στα χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα καύσιμα.

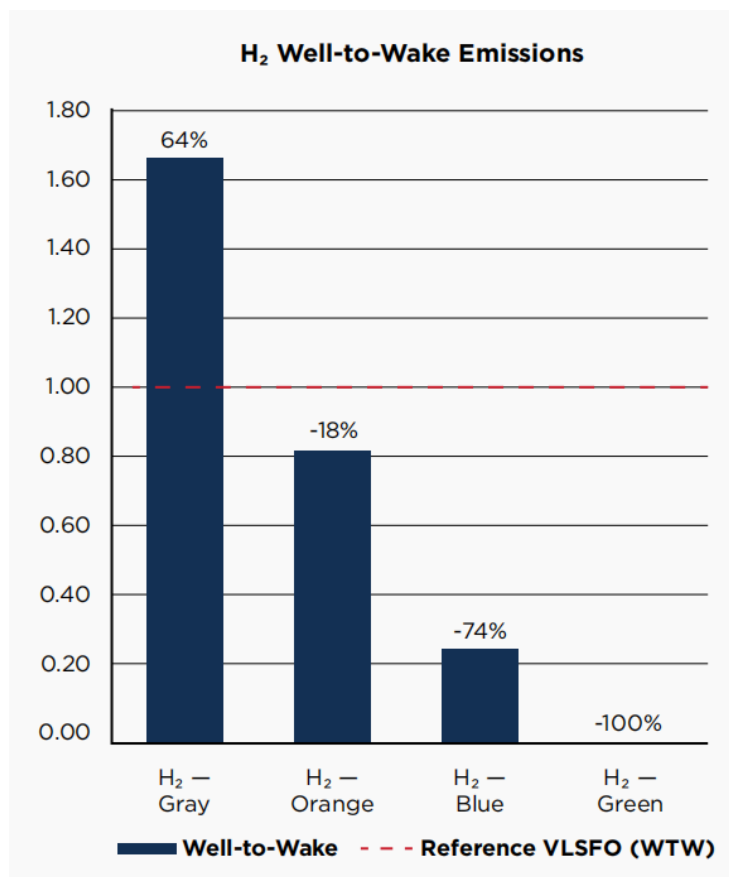
- **Blue Hydrogen:** Το μπλε υδρογόνο είναι παρόμοιο με το γκρι, με μοναδική διαφορά ότι το διοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπεται κατά τη παραγωγή του, αποθηκεύεται στο έδαφος με τη χρήση κατάλληλων μηχανημάτων αποθήκευσης άνθρακα (CCS). Η συλλογή και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα προτού απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα κατατάσσει το καύσιμο αυτό στη κατηγορία των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα. Το μπλε υδρογόνο αποτελεί ένα καθαρότερο εναλλακτικό καύσιμο από το γκρι υδρογόνο, το κόστος του οποίου όμως είναι ιδιαίτερα μεγάλο εξαιτίας των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή και αποθήκευση άνθρακα.
- **Green Hydrogen:** Το πράσινο υδρογόνο παράγεται με τη χρήση ηλεκτρισμού που προέρχεται από καθαρές πηγές ενέργειας. Το πράσινο υδρογόνο, θεωρείται ότι εκπέμπει μικρές έως μηδενικές ποσότητες υδρογόνου επειδή χρησιμοποιεί πηγές ενέργειας, όπως αέρας και ηλιακή ενέργεια, οι οποίες δεν εκπέμπουν αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το πράσινο υδρογόνο δημιουργείται όταν το νερό (H_2O) χωρίζεται σε υδρογόνο (H_2) και οξυγόνο (O_2). Ο διαχωρισμός αυτός του νερού είναι γνωστός και ως ηλεκτρόλυση και απαιτεί εισαγωγή ποσότητας ενέργειας. Η μέθοδος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για τον διαχωρισμό του νερού, αποτελεί μια ιδιαίτερα ακριβή διαδικασία, η οποία όμως είναι η πιο φιλική ως προς το περιβάλλον, συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους.



Εικόνα 2.14: Τρόποι παραγωγής υδρογόνου (Πηγή: Brunel)

Στην εικόνα 2.15, φαίνεται η σύγκριση των εκπομπών CO₂ που παράγονται κατά το στάδιο Well-To-Wake για όλους τους τύπους υδρογόνου, έναντι αυτών που παράγονται από το VLSFO. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός, ότι το γκρι υδρογόνο εκπέμπει 64% περισσότερο CO₂

από ότι το VLSFO ^[6], δείχνοντας το πόσο μεγάλο ρόλο παίζει ο τρόπος παραγωγής του καυσίμου στο αν τελικά το καύσιμο κάνει καλό στο περιβάλλον ή όχι. Ένα επιπλέον σπουδαίο συμπέρασμα που προκύπτει από το διάγραμμα αυτό, είναι ότι το πράσινο υδρογόνο σε όλη τη διάρκεια της ζωής του, δηλαδή από τη παραγωγή έως και τη κατανάλωσή του, παράγει μηδενική ποσότητα CO₂ δείχνοντας το πόσο φιλικό είναι προς το περιβάλλον και το ότι η μεγάλης κλίμακας παραγωγή και χρήση του θα μπορούσε να αφήσει στο παρελθόν τα προβλήματα που πηγάζουν από το διοξείδιο του άνθρακα στο περιβάλλον.

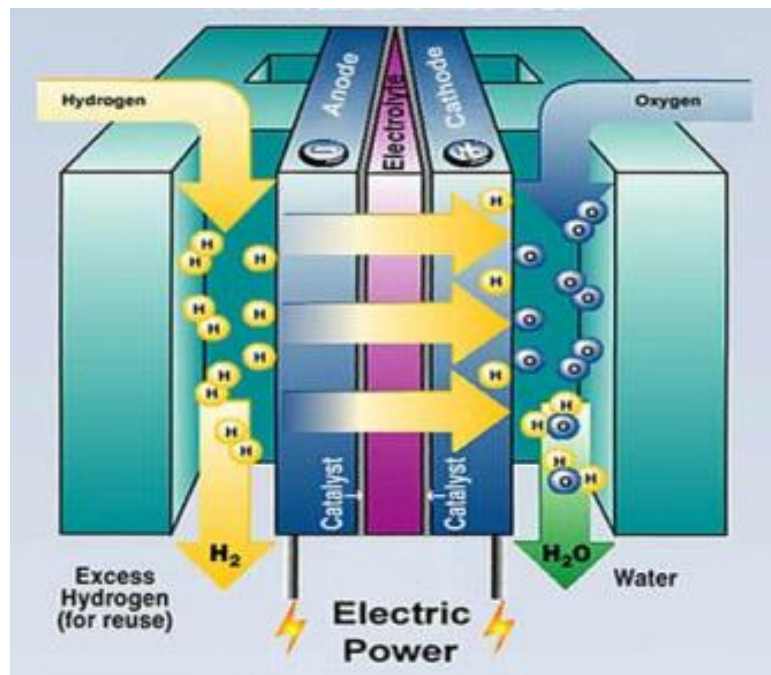


Εικόνα 2.15: Well-To-Wake καυσαέρια από τα διάφορα είδη υδρογόνου (Πηγή: ABS)

2.4.4 Fuel Cells

Οι Κυψέλες Καυσίμου (Fuel Cells) αποτελούν διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης υδρογόνου και οξυγόνου, έχοντας ως μοναδικό υποπροϊόν το νερό. Πιο συγκεκριμένα, ένα σύστημα Fuel Cell αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, μία άνοδο και μία κάθοδο, τα οποία παρεμβάλλονται από έναν ηλεκτρολύτη. Στη κάθοδο εισέρχεται το οξυγόνο από τον αέρα, ενώ στην άνοδο τροφοδοτούνται τα καύσιμα υδρογόνου. Με τη χρήση

ενός κατάλληλου καταλύτη διασπώνται τα άτομα του υδρογόνου σε πρωτόνια και σε ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται ξεχωριστά προς τη κάθοδο, προκειμένου να αντιδράσουν με το οξυγόνο. Τα πρωτόνια περνούν στην κάθοδο διαπερνώντας τον ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια ακολουθούν διαφορετική διαδρομή, εφόσον αδυνατούν να τον διαπεράσουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να γίνεται η ροή των ηλεκτρονίων μέσω μιας παράκαμψης που συνδέει την άνοδο με τη κάθοδο, παράγοντας με αυτό τον τρόπο ηλεκτρικό ρεύμα υπό τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας ^[18].



Εικόνα 2.16: Τυπική λειτουργία κυψέλης καυσίμου (Πηγή: Battery University)

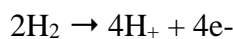
Ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη και τη θερμοκρασία λειτουργίας, οι κυψέλες καυσίμου μπορούν, εν γένει, να χωριστούν σε πέντε κύρια είδη: alkaline fuel cells (AFC), proton exchange membrane fuel cells (PEMFC), solid oxide fuel cells (SOFC), Phosphoric acid fuel cells (PAFC) και molten carbonate fuel cells (MCFC). Για ναυτικές εφαρμογές, οι κυψέλες καυσίμου που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι PEMFC και οι SOFC.

2.4.4.1 PEMFC

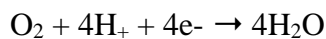
Οι κυψέλες καυσίμου PEMFC ή αλλιώς Proton-Exchange Membrane Fuel Cells, έχουν ηλεκτρόδια με βάση τη πλατίνα και ο ηλεκτρολύτης που παίζει τον ρόλο ηλεκτρικού μονωτή, είναι από υγροποιημένη πολυμερή μεμβράνη. Η θερμοκρασία λειτουργίας του βρίσκεται κάπου

ανάμεσα στο διάστημα [50,100] °C και πιθανή υπέρβαση των 100 °C μπορεί να σταματήσει τη λειτουργία του συστήματος καθώς η μεμβράνη πρέπει να διατηρείται υγρή ^[18]. Το PEMFC αντιδρά με υδρογόνο και οξυγόνο και παράγει νερό, εκτός από ρεύμα και θερμότητα. Εξαιτίας της παραγωγής του νερού από την ηλεκτροχημική αντίδραση, η διαχείριση του είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία των κυψέλων καυσίμου. Οι κύριες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτού του είδους τις κυψέλες καυσίμου είναι οι εξής ^[18]:

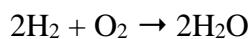
Anode reaction:



Cathode reaction:



Total reaction:



Οι κυψέλες καυσίμου PEMFC παρέχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και έχουν χαμηλό βάρος σχετικά με άλλους τύπους Fuel Cells. Οι κυψέλες καυσίμου αυτές, λόγω της εύκολης χρησιμότητάς τους, έχουν χρησιμοποιηθεί σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, όπως μεταφορές και άλλες διατάξεις εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, έχει χρησιμοποιηθεί σε οχήματα, σε επιβατηγά πλοία, όπως είναι το Alsterwasser με ισχύ 96 kW, ενώ ακόμα και σε γερμανικά υποβρύχια κατηγορίας Type 212A με ισχύ 30-50 kW ^[18]. Οι κυψέλες καυσίμου αυτού του είδους μπορούν να λειτουργήσουν με μεγάλη ευκολία και σε χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που επιτρέπει την ευέλικτη λειτουργία του, καθώς και λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις υλικών.

Παρά τα πολλά θετικά που έχει η χρήση των Fuel Cells αυτού του τύπου, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Αρχικά, το κόστος του καταλύτη πλατίνας είναι σχετικά υψηλό και μπορεί εύκολα να καταστραφεί από μονοξείδιο του άνθρακα και θείο κατά τη λειτουργία του. Επιπλέον, προκειμένου να λειτουργήσει χρειάζεται να καταναλώσει μια καθαρή πηγή

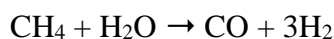
υδρογόνου. Σε κάθε άλλη περίπτωση που χρησιμοποιείται άλλο καύσιμο για τη λειτουργία του, απαιτείται αναμορφωτής καυσίμου, για τη παραγωγή καθαρού υδρογόνου από υδρογονάνθρακες. Συνεπώς, σε κάποιες περιπτώσεις λειτουργίας των κυψελών καυσίμου αυτών το κόστος κτήσης και λειτουργίας αυξάνεται σημαντικά, ενώ παράλληλα στη περίπτωση λειτουργίας με υδρογονάνθρακες, εκπέμπεται CO₂ και NO_x τα οποία επιδρούν αρνητικά στο περιβάλλον.

2.4.4.2 SOFC

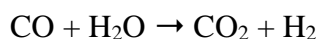
Οι κυψέλες καυσίμου τύπου SOFC, γνωστές και ως Solid Oxide Fuel Cell, λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, ανάμεσα σε 500-1000 °C ^[18], γεγονός που καθιστά μη αναγκαία τη χρήση αναμορφωτή καυσίμου, μειώνοντας έτσι το αρχικό κόστος. Χρησιμοποιούν ως άνοδο κράμα νικελίου και ως κάθοδο, λανθάνιο, στρόντιο, μαγγανίτη, ενώ στους ηλεκτρολύτες χρησιμοποιείται πορώδες κεραμικό υλικό. Τα SOFC έχουν χρησιμοποιηθεί γενικά σε μεγάλα υπεράκτια έργα, τα οποία απαιτούν πολύ μεγάλες ποσότητες ενέργειας, με χωρητικότητες μέχρι και 10 MW, ενώ υπάρχουν παραδείγματα που έχουν χρησιμοποιηθεί και σε ναυτιλιακές εφαρμογές. Εξαιτίας της λειτουργίας τους σε υψηλές θερμοκρασίες, οι κυψέλες καυσίμου τύπου SOFC, μπορούν να λειτουργήσουν με σχεδόν όλα τα είδη εναλλακτικών αλλά και ορυκτών καυσίμων, χωρίς τη παρουσία αναμορφωτή καυσίμου. Ο μόνος ρύπος που παράγεται από τη λειτουργία τους, είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και μόνο στη περίπτωση που χρησιμοποιείται ως καύσιμο κάποιο άλλο πέρα από το υδρογόνο. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία τους είναι οι ακόλουθες ^[18]:

Internal reforming of LNG:

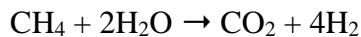
Steam reforming:



Water-gas-shift:

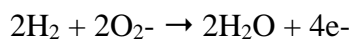


Total reaction from reforming:

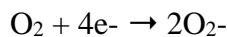


Fuel cell reactions

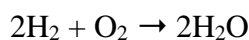
Anode reaction:



Cathode reaction:



Total reaction for fuel cell:



Υπάρχουν δύο είδη κυψελών καυσίμου τύπου SOFC, τα επίπεδα και τα σωληνοειδή. Τα σωληνοειδή SOFC είναι πιο σταθερά όσο αφορά τον θερμικό κύκλο, ενώ το επίπεδο SOFC αποτελεί τον πλέον κατάλληλο σχεδιασμό λόγω της υψηλής του ενεργειακής πυκνότητας. Η απόδοση των κυψελών καυσίμου μπορεί να φτάσει το 85% ή και ακόμα παραπάνω, αν τους εφαρμοστεί ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας ^[18]. Μάλιστα ο συνδυασμός τους με κατάλληλη μπαταρία μπορεί να μειώσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις θερμικές καταπονήσεις και να συμβάλλει σημαντικά σε μια πιο ευέλικτη λειτουργία. Αυτή τη χρονική περίοδο, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανάπτυξη και στην εξέλιξη των κυψελών καυσίμου τύπου SOFC από αρκετές εταιρίες και επιστημονικές ομάδες, γεγονός που όπως όλα δείχνουν θα έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η διάρκεια ζωής τους σε πάνω από 50,000 ώρες, ενώ επίσης θα οδηγήσει στη μείωση του κόστους κτήσης σε τιμές κάτω των 2,000 \$/kW την επόμενη δεκαετία.

Κεφάλαιο 3: Μελέτη

3.1 Στόχος μελέτης

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως απώτερο σκοπό να μελετήσει τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και το κατά πόσο αυτά συμφέρει να λειτουργούν με εναλλακτικά καύσιμα. Συνεπώς θα πραγματοποιηθεί μια μελέτη σκοπιμότητας η οποία θα δώσει βάση τόσο στο περιβαλλοντικό όσο και στο οικονομικό ζήτημα. Για τη πραγματοποίηση της μελέτης θα εντοπιστεί το πλοίο ενδιαφέροντος και οι λεπτομέρειες λειτουργίας του στη διάρκεια της ζωής του, ενώ στη συνέχεια θα γίνουν διάφορα case studies τα οποία θα ερευνήσουν το κατά πόσο αξίζει ή όχι ένας πλοιοκτήτης να λειτουργεί τα πλοία του με κάποιο από τα εναλλακτικά καύσιμα LNG, μεθανόλη, αμμωνία, υδρογόνο.

3.2 Υπό μελέτη πλοίο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εισαγωγικό κομμάτι της παρούσας διπλωματική εργασίας, ο παγκόσμιος ναυτιλιακός στόλος ευθύνεται για την εκπομπή μεγάλου ποσοστού των αερίων του θερμοκηπίου στο περιβάλλον. Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, δεν ευθύνονται όλα τα είδη πλοίων στον ίδιο βαθμό για τις εκπομπές βλαβερών για το οικοσύστημα αερίων. Για αυτό τον λόγο, σε πρώτη φάση θα ερευνηθεί ποια είναι η κατηγορία των πλοίων που συμβάλλουν περισσότερο στη διόγκωση του προβλήματος αυτού.

Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια, από καθηγητές και εξειδικευμένους επιστήμονες πάνω στη ναυπηγική και στη προστασία του περιβάλλοντος, έχουν εξαχθεί διάφορα συμπεράσματα για τα πλοία που παίζουν μεγαλύτερο παράγοντα στην όξυνση των βλαβερών για το περιβάλλον αερίων και ιδιαιτέρως στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, οι έρευνες αυτές έχουν δείξει πως τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αποτελούν τη κύρια πηγή του προβλήματος, καθώς αποτελούν μόνο το 18.4% του παγκόσμιου DWT και ευθύνονται για το 38.42% των GHG που παράγονται από τη ναυτιλία, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1. Επίσης, ένα αρκετά ενδιαφέρον στατιστικό αποτελεί το γεγονός ότι το 32.5% των αερίων του θερμοκηπίου εκπέμπεται από 2,000 πλοία και το 52.5% οφείλεται σε 5,000 πλοία που καταναλώνουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας ^[19].

Καθόλου εντύπωση δε προξενεί το γεγονός πως όλα από τα πρώτα 2,000 πλοία καθώς και η συντριπτική πλειοψηφία των 5,000 είναι Containerships.

Vessel Type	DWT	% DWT	GHG emissions (tCO ₂ /nm/DWT) *10 ⁶ (e@w)	% GHG Emissions	No. of Vessels	% of Vessels
Bulker	807,889,610	46.73%	3.77	35.48%	12,052	49.90%
Tanker	583,190,134	33.74%	3.60	24.45%	6,643	27.50%
LPG	19,587,872	1.13%	7.26	1.65%	510	2.11%
Container	318,030,735	18.40%	10.38	38.42%	4,947	20.48%

Εικόνα 3.1: GHG εκπομπές ανάλογα με το είδος του πλοίου (Πηγή: N.T.U.A.)

Επιπλέον, ένα αρκετά ενδιαφέρον στατιστικό αποτελεί, η εύρεση του μεγέθους των Containerships που συμβάλλουν σε μεγαλύτερο βαθμό στις εκπομπές GHG. Η ίδια έρευνα που ανέδειξε τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ως τη πιο βλαβερή για το περιβάλλον κατηγορία πλοίων, έδειξε πως τα μικρά πλοία feeders που μεταφέρουν κάτω από 3,000 TEU συντελούν σε μεγαλύτερο βαθμό από τα πιο μεγάλα ^[19].

Size Range (TEU)	Average Speed (kn)	DWT [t]	%DWT	GHG emissions (tCO ₂ /nm/DWT) *10 ⁶ (e@w)	% GHG Emissions	No. of Vessels	% of Vessels
Feeder <3,000	19.22	50,487,331	15.9%	14.13	22.0%	2,228	45%
Intermediate 3-5,999	23.13	61,836,481	19.4%	11.89	18.5%	1,095	22%
Intermediate 6-7,999	23.71	22,790,186	7.2%	12.83	20.0%	275	6%
Neo-P'max 8-11,999	24.25	79,013,856	24.8%	9.96	15.5%	706	14%
Neo-P'max 12-14,999	23.61	63,851,222	20.1%	8.21	12.8%	429	9%
Post-P'max 15,000+	21.80	40,051,659	12.6%	7.18	11.2%	214	4%

Εικόνα 3.2: GHG εκπομπές ανάλογα με το μέγεθος του Containership (Πηγή: N.T.U.A.)

Όπως είναι ευρέως γνωστό τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων κινούνται με πολύ μεγάλες ταχύτητες, συνήθως μεγαλύτερες των 20 kn, από τη μια άκρη του κόσμου στην άλλη. Μάλιστα, είναι αξιοσημείωτο ότι τα πλοία αυτά κινούνται με τις μεγαλύτερες ταχύτητες από τα πλοία του εμπορικού στόλου. Γίνεται εύκολα κατανοητό, ότι σε αυτές τις τόσο μεγάλες ταχύτητες και σε αυτά τα μεγέθη πλοίου, οι υδροδυναμικές βελτιστοποιήσεις που δύναται να γίνουν είναι περιορισμένες, συγκριτικά με αυτές που πραγματοποιούνται στα μεγαλύτερα και πιο αργά πλοία ^[19]. Για αυτόν τον λόγο, προκειμένου να λειτουργήσουν με την επιθυμητή τους ταχύτητα τα Containerships χρειάζεται οι μηχανές τους να λειτουργούν σε πολύ υψηλά φορτία και συνεπώς να καταναλώσουν πολύ μεγάλη ποσότητα καυσίμου και ενέργειας, πράγμα που κάνει απόλυτα κατανοητά τα στατιστικά των παραπάνω μελετών.

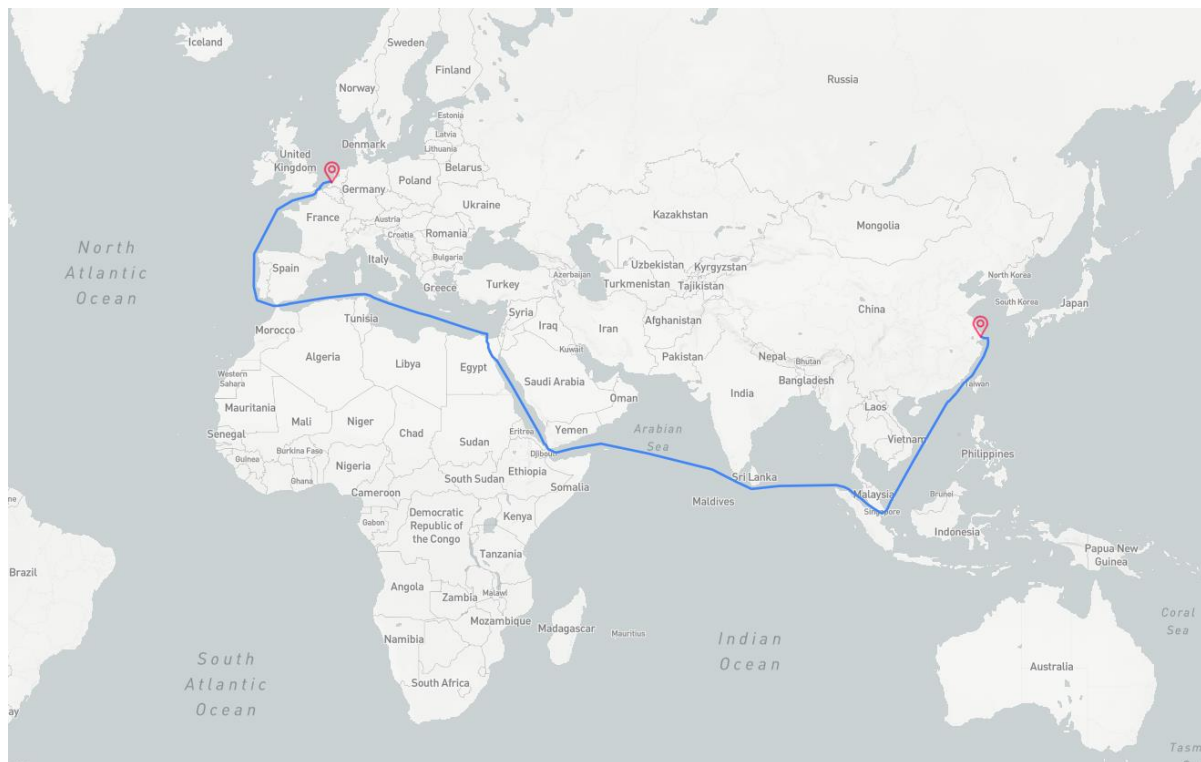
Βάση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη παραπάνω ανάλυση, θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ως πλοίο μελέτης ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με χωρητικότητα σε TEU περίπου 10,000, αφού αυτού του μεγέθους τα πλοία μεταφέρουν το μεγαλύτερο ποσοστό DWT από όλα τα άλλα containerships. Επιπλέον, το πλοίο αυτό βρίσκεται στο εύρος των containership τα οποία συμβάλλουν περισσότερο στις εκπομπές των GHG και παράλληλα είναι σε θέση να κάνει διεθνή ταξίδια αρκετών ημερών ώστε να είναι πιο κοντά στις προτιμήσεις ενός πλοιοκτήτη. Συνεπώς, το υπό μελέτη πλοίο που επιλέχθηκε, έχει χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά υπό μελέτη Containership

LOA	324	m
B	48.4	m
D	27.3	m
T _{design}	13	m
V _{design}	21	kn
Container Capacity	10,000	TEU
DWT _{Design}	124,092	t
ME MCR	36,600 x 72	kW x rpm
A/E MCR	4 x 3,500 x 720	kW x rpm
Crew	35	-
ME SFC at 85% MCR	170	g/kWh
AE SFC at 50% MCR	224.2	g/kWh
Gross Tonnage	110,632	-

3.3 Διαδρομή υπό μελέτη πλοίου

Στη συνέχεια επιλέγεται η διαδρομή που εκτελεί το πλοίο σε όλη τη διάρκεια της ζωής του και θεωρείται σταθερή μεταξύ 2 λιμανιών και όπως προαναφέρθηκε τα λιμάνια αυτά δε βρίσκονται στην ίδια χώρα, συνεπώς το υπό μελέτη πλοίο εκτελεί διεθνές ταξίδι. Η επιλογή των λιμανιών δεν έγινε τυχαία, μάλιστα πραγματοποιήθηκε επειδή αποτελούν 2 από τους μεγαλύτερους τερματικούς σταθμούς Container παγκοσμίως. Επιπλέον, υπάρχουν πολλές διαθέσιμες πληροφορίες για λιμενικά έξοδα, ναύλα, τιμές καυσίμων και άλλα χρήσιμα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Τα λιμάνια αυτά δε θα μπορούσαν να είναι άλλα από το Port of Rotterdam στην Ολλανδία, και το Port of Shanghai στη Κίνα.



Εικόνα 3.3: Διαδρομή υπό μελέτη Containership

3.3.1 Port of Rotterdam

Το λιμάνι του Rotterdam αποτελεί το μεγαλύτερο λιμάνι της Ευρώπης. Η έκταση του υπολογίζεται περίπου στα 104 τετραγωνικά χιλιόμετρα, ενώ εκτείνεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 40 χιλιομέτρων ^[20]. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του λιμανιού είναι η πετρελαιοχημική βιομηχανία και οι διάφορες μέθοδοι μεταφοράς και διαχείρισης εμπορευμάτων που είναι εγκατεστημένες. Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί ένα από τα κομβικά λιμάνια της Ευρώπης, από το οποίο εξαρτάται η μεταφορά προϊόντων σε όλη την ήπειρο αλλά και σε χώρες του εξωτερικού. Η μεταφορά αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση πλοίων, τρένων και φορτηγών.

Το βύθισμα του λιμανιού του είναι 24 μέτρα, γεγονός που το κατατάσσει ανάμεσα στα βαθύτερα λιμάνια της Ευρώπης. Χάρη σε αυτό το ιδιαίτερα σημαντικό χαρακτηριστικό, ένα από τα μεγαλύτερα bulk carrier μεταφοράς σιδήρου, έχει τη δυνατότητα να προσδέσει στο λιμάνι του Rotterdam, ενώ είναι πλήρως φορτωμένο.

Το λιμάνι του Rotterdam, βρίσκεται μέσα στα 10 μεγαλύτερα λιμάνια εισαγωγής-εξαγωγής και διαχείρισης εμπορευματοκιβωτίων σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ ταυτόχρονα είναι το μεγαλύτερο στην Ευρώπη [20]. Τα τελευταία 10 χρόνια αυξάνεται διαρκώς ο αριθμός των container που διαχειρίζεται, γεγονός που δικαιολογεί τις εξελιγμένες εγκαταστάσεις και τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για τη διαχείρισή τους. Πιο συγκεκριμένα, αυτόνομοι γερανοί και φορτηγά χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων από και προς τα πλοία καθώς και για την στοίβαξη και αποθήκευσή τους.

Για να προσδέσει ένα πλοίο, να ξεφορτώσει και να παραμείνει ένα πλοίο στο λιμάνι του Rotterdam, όπως και σε όλα τα λιμάνια παγκοσμίως, χρειάζεται να πληρώσει ένα αντίτιμο. Τα ημερήσια λιμανιάτικα έξοδα του υπό μελέτη πλοίου βρέθηκαν από την επίσημη σελίδα του λιμανιού του Rotterdam και είναι ίσα με [21],

$$\text{Rotterdam port Expenses}_{\text{Daily}} = 55,000\$$$

3.1



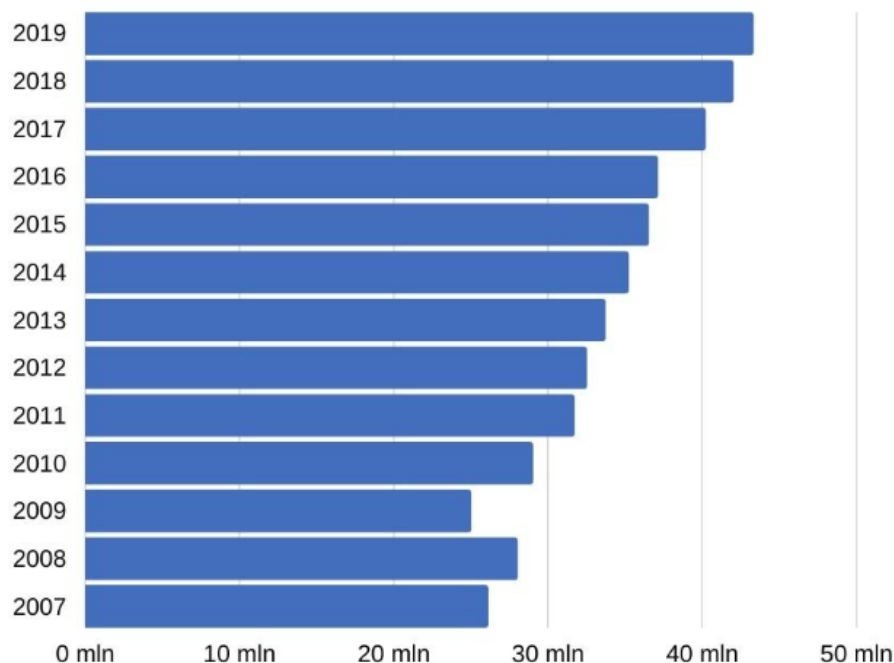
Εικόνα 3.4: Συνολικός αριθμός Containers που διαχειρίστηκαν από το λιμάνι του Rotterdam στο διάστημα 2013-2021 (Πηγή: Statista)

3.3.2 Port of Shanghai

Το λιμάνι της Shanghai αποτελεί το μεγαλύτερο λιμάνι παγκοσμίως και λειτούργησε πρώτη φορά το 1842. Το λιμάνι αυτό, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα της ηπείρου και καταλαμβάνει μια επιφάνεια περίπου 4 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Η σχέση του με το ποτάμι Yangtze είναι άρρηκτη, καθώς με τη χρήση αυτού μεταφέρονται αγαθά σε πολλές περιοχές της Κίνας, ενώ παράλληλα αποτελεί σταθμό για τη μεταφορά του ¼ των αγαθών που εξάγονται και εισάγονται από την κίνα ^[22].

Τα λιμάνια της Σανγκάης και της Σιγκαπούρης ανταγωνιζόταν εδώ και πολλά χρόνια για το ποιο θα είναι το μεγαλύτερο παγκοσμίως. Η κόντρα αυτή έληξε οριστικά το 2010, όπου για πρώτη φορά το λιμάνι της Shanghai ξεπέρασε κατά 5,000 TEU τον αντίπαλό του ^[22]. Το 2013 φορτώθηκαν και εκφορτώθηκαν στο λιμάνι της Shanghai περίπου 33 εκατομμύρια Containers, ενώ το 2017 το νούμερο αυτό αυξήθηκε στα 40 εκατομμύρια και αυξάνεται διαρκώς μέχρι και σήμερα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.5.

Container volume in the Port of Shanghai



Εικόνα 3.5: Όγκος Container στο λιμάνι της Shanghai (Πηγή: Port of Shanghai)

Για να προσδέσει ένα πλοίο, να ξεφορτώσει και να παραμείνει ένα πλοίο στο λιμάνι της Shanghai, όπως και για το λιμάνι του Rotterdam, χρειάζεται να πληρώσει ένα αντίτιμο. Τα ημερήσια λιμανιάτικα έξοδα του υπό μελέτη πλοίου βρέθηκαν από την ιστοσελίδα e-ports και είναι ίσα με ^[23],

$$Shanghai\ port\ Expenses_{Daily} = 99,700\$ \quad 3.2$$

Έπειτα από την επιλογή των λιμανιών πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της μεταξύ τους απόστασης. Στη συνέχεια, προκειμένου να υπολογιστεί ο χρόνος ταξιδιού, θεωρήθηκε ότι το πλοίο κινείται με μια μέση ταχύτητα των 18 kn. Η ταχύτητα αυτή προέκυψε θεωρώντας πως το πλοίο σε ολόκληρο το ταξίδι που πραγματοποιεί θα αντιμετωπίσει κακές καιρικές συνθήκες, συνωστισμούς στα λιμάνια, καθυστερήσεις και άλλα απρόβλεπτα γεγονότα τα οποία θα ρίξουν τη μέση ταχύτητα του.

Πίνακας 3.2: Στοιχεία ταξιδιού

Port of Rotterdam - Port of Shanghai		
Απόσταση	11,999	nm
Μέση ταχύτητα	18	kn
Μέση διάρκεια μιας διαδρομής	27.8	Days
Μέση διάρκεια παραμονής στο λιμάνι	3	Days

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, η μέση διάρκεια του ταξιδιού από το ένα λιμάνι στο άλλο είναι 27.8 μέρες και ο μέσος χρόνος παραμονής στο κάθε λιμάνι είναι 3 μέρες. Η αναμενόμενη μέση διάρκεια ταξιδιού είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος για τον υπολογισμό μας, καθώς με τη χρήση αυτής, της κατανάλωσης της κύριας μηχανής και των γεννητριών στο σημείο λειτουργίας και την ισχύ στην οποία λειτουργούν οι μηχανές, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την απαραίτητη ποσότητα καυσίμου Very Low Sulphur Fuel Oil και Marine Diesel Oil για τη πραγματοποίηση ενός ταξιδιού.

3.4 Κατανάλωση Πλοίου σε VLSFO

Για τον υπολογισμό της ημερήσιας κατανάλωσης του καυσίμου σε Very Low Sulphur Fuel Oil χρησιμοποιείται η σχέση:

$$Consumption_{D.VLSFO} = C \cdot SFC_{ME,85\%} \cdot P_{ME} \cdot \frac{24}{10^6} = 126.9 \frac{t}{day} \quad 3.3$$

Όπου,

- $P_{ME}=0.85 \cdot MCR_{ME}$ η ισχύς της κύριας μηχανής στο σημείο λειτουργίας της
- $C = 1.05$, διόρθωση κατανάλωσης λόγω κακοκαιρίας, ελιγμών και απρόσμενων συνθηκών

Για τη συνολική κατανάλωση καυσίμου Very Low Sulphur Fuel Oil στη διάρκεια ενός ταξιδιού χρησιμοποιείται η σχέση:

$$Consumption_{T.VLSFO} = 27.8 \cdot Consumption_{D.VLSFO} = 3,705 \frac{t}{trip} \quad 3.4$$

Για να βρεθεί η συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών καυσίμου σε Very Low Sulphur Fuel Oil, θα χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$Capacity_{VLSFO,tank} = Consumption_{T.VLSFO} \cdot C_1 = 4,446 t \quad 3.5$$

Όπου,

- $C_1 = 1.2$, ποσοστό αύξησης διαθέσιμου καυσίμου στις δεξαμενές για περίπτωση ανάγκης.

3.5 Κατανάλωση Πλοίου σε MDO

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης του καυσίμου σε Marine Diesel Oil χρησιμοποιείται η σχέση:

$$Consumption_{D.MDO} = C_2 \cdot SFC_{AE,50\%} \cdot P_{AE} \cdot \frac{24}{10^6} = 18.83 \frac{t}{day} \quad 3.6$$

Όπου,

- $P_{AE} = 0.5 \cdot MCR_{AE}$ η ισχύς της 1 γεννήτριας στο σημείο λειτουργίας της
- $C_2 = 2$, ο αριθμός των γεννητριών που θεωρήθηκε ότι βρίσκονται σε λειτουργία κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού. Ο αριθμός των γεννητριών αυτών θεωρήθηκε προσεγγιστικά 2, καθώς θεωρείται ότι το πλοίο μεταφέρει και μια ποσότητα Containers που απαιτούν ψύξη.

Για τη συνολική κατανάλωση καυσίμου Marine Diesel Oil στη διάρκεια ενός ταξιδιού χρησιμοποιείται η σχέση:

$$Consumption_{T.MDO} = 27.8 \cdot Consumption_{D.MDO} = 523.6 \frac{t}{trip} \quad 3.7$$

Για να βρεθεί η συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών καυσίμου σε Marine Diesel Oil, θα χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$Capacity_{MDO,tank} = Consumption_{T.MDO} \cdot C_1 = 628.3 t \quad 3.8$$

Συνεπώς, η συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών του πλοίου σε καύσιμο (VLSFO, MDO), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Capacity_{total} = Capacity_{VLSFO,tank} + Capacity_{MDO,tank} = 5,074.3 t \quad 3.9$$

3.6 Κόστος κτήσης Containership χωρίς Κύρια Μηχανή και Γεννήτριες

Τη περίοδο της πανδημίας, δηλαδή από το 2020 έως σήμερα, έχουν αυξηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό οι ηλεκτρονικές αγορές και το διεθνές εμπόριο αγαθών έχει φτάσει σε πολύ υψηλά και διαρκώς αυξανόμενα επίπεδα. Αυτό, είχε ως επακόλουθο την απότομη αύξηση των ναύλων για μεταφορά αγαθών από χώρα σε χώρα. Μάλιστα, σε κάποιες περιπτώσεις, τα ναύλα έφτασαν να έχουν δεκαπλάσια τιμή από ότι είχαν πριν τη πανδημία. Γεγονός το οποίο, όπως ήταν αναμενόμενο, δε πέρασε απαρατήρητο από τους εφοπλιστές, οι οποίοι στράφηκαν σε αγορές πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, προκειμένου να εκμεταλλευτούν αυτό το άνοιγμα

της αγοράς, έχοντας ως αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση των τιμών για ένα νεότευκτο containerships.

Στατιστικά και άρθρα έδειξαν, ότι το 2022 οι τιμές για αγορά ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 7,000 TEU κυμαίνονται περίπου στα 90,000,0000 \$. Ενώ ταυτόχρονα έδειξαν πως οι τιμές για αγορά ίδιου τύπου πλοίου χωρητικότητας 3,000 TEU κυμαίνεται περίπου στα 50,000,000 \$ ^[24]. Συνεπώς, γνωρίζοντας τις τιμές αυτές, θεωρήθηκε πως το κόστος ενός newbuilding Containership το οποίο είναι έτοιμο να πλεύση και μπορεί να μεταφέρει 10,000 TEU, ανέρχεται στα 120,000,000 \$.

Για τον υπολογισμό του κόστους ενός νεότευκτου Containership χωρητικότητας 10,000 TEU, χωρίς κύρια μηχανής, γεννήτριες και όλο τον απαραίτητο μηχανολογικό εξοπλισμό που απαιτείται για τη λειτουργία τους, πρέπει πρώτα να υπολογιστούν τα κόστη κτήσης και τοποθέτησης τους.

3.6.1 Κόστος Κύριας Μηχανής

Με τη χρήση στατιστικών που έχουν εξαχθεί από διάφορες μελέτες, η τιμή μιας κύριας μηχανής που καταναλώνει Very Low Sulphur Oil ισούται με 300\$/kW ^[25]. Συνεπώς, το κόστος της κύριας μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Main\ Engine_{Cost} = 300 \frac{\$}{kW} \cdot MCR_{ME} = 10,980,000 \$ \quad 3.10$$

3.6.2 Κόστος Γεννητριών

Όμοια με την κύρια μηχανή, το κόστος κτήσης και εγκατάστασης μιας γεννήτριας η οποία καταναλώνει Marine Diesel Oil, είναι ίσο με 350\$/kW ^[25]. Οπότε, όπως είναι αναμενόμενο, το κόστος των τεσσάρων γεννητριών υπολογίζεται με τη χρήση της σχέσης:

$$Auxiliary\ Engine_{Cost} = 4 \cdot 350 \frac{\$}{kW} \cdot MCR_{AE} = 4,900,000 \$ \quad 3.11$$

Συνεπώς το κόστος κτήσης ενός πλοίου μεταφοράς Container χωρίς κύρια μηχανή και χωρίς γεννήτριες, υπολογίζεται αφαιρώντας από την αρχική τιμή αγοράς του πλήρως εξοπλισμένου containership το κόστος κτήσης και εγκατάστασης της κύριας μηχανής και των ηλεκτρογεννητριών. Το κόστος αυτό, ισούται περίπου με,

$$\text{Containership without Engines}_{Cost} = 104,120,000 \$ \quad 3.12$$

Στη πρώτη φάση της παρούσας οικονομικής μελέτης γίνεται υπολογισμός του αρχικού κόστους κτήσης του υπό μελέτη πλοίου, καθώς και τον ετήσιων λειτουργικών του εξόδων ανάλογα με το καύσιμο το οποίο χρησιμοποιεί για τη πρόωσή του. Τα έξοδα αυτά, είναι αναγκαίο να υπολογισθούν, καθώς με τη χρήση τους είναι δυνατόν να εξετασθεί το κατά πόσο συμφέρει η επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο. Συνεπώς, στη συνέχεια και με γνωστά τα CAPEX, OPEX του υπό μελέτη πλοίου για κάθε εναλλακτικό καύσιμο, πραγματοποιούνται διάφορα Case Studies, τα οποία έχουν ως απώτερο σκοπό, να εξετάσουν το κατά πόσο συμφέρει τον πλοιοκτήτη να επενδύσει σε ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που εκτελεί τη διαδρομή Port of Rotterdam - Port of Shanghai. Τέλος, πραγματοποιούνται συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων, με τη χρήση κοινών διαγράμμάτων και εξάγονται διάφορα συμπεράσματα ανάλογα με το είδος του καυσίμου και τον τρόπο λειτουργίας του πλοίου.

Κεφάλαιο 4: Τεχνοοικονομική ανάλυση

4.1 Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)

4.1.1 CAPEX

Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του κόστους αγοράς πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, το οποίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο το υγροποιημένο φυσικό αέριο. Προκειμένου να συμβεί αυτό, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το κόστος κτήσης ενός Containership, το οποίο δε διαθέτει κύρια μηχανή και γεννήτριες. Το κόστος αυτό υπολογίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και ισούται με,

$$\text{Containership without Engines}_{Cost} = 104,120,000 \$ \quad 4.1$$

Έπειτα, ακολουθεί ο υπολογισμός του κόστους αγοράς και εγκατάστασης της κύριας μηχανής του πλοίου. Η μηχανή αυτή έχει ίδιο MCR με την αντίστοιχη που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του πλοίου με καύσιμο Very Low Sulphur Fuel Oil. Συνεπώς, η μηχανή του υπό μελέτη πλοίου για λειτουργία με καύσιμο LNG έχει MCR: 36,600 x 72 rpm. Για τον υπολογισμό του κόστους της, χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά δεδομένα που δίνουν το κόστος της ίσο με 550\$/kW ^[26]. Συνεπώς, το κόστος της κύριας μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Main Engine, } LNG_{Cost} = 550 \frac{\$}{kW} \cdot MCR_{ME} = 20,130,000 \$ \quad 4.2$$

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των τεσσάρων γεννητριών του υπό μελέτη πλοίου. Πραγματοποιείται ίδια υπόθεση με τη κύρια μηχανή, δηλαδή ότι οι γεννήτριες που λειτουργούν με LNG έχουν ίδιο MCR με αυτές που λειτουργούν με υγροποιημένο φυσικό αέριο. Για τον υπολογισμό του κόστους της, χρησιμοποιήθηκαν στατιστικά δεδομένα που δίνουν το κόστος της ίσο με 600\$/kW ^[26]. Συνεπώς, το κόστος κτήσης και εγκατάστασης των ηλεκτρογεννητριών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Auxiliary Engine, } LNG_{Cost} = 600 \frac{\$}{kW} \cdot MCR_{AE} = 8,400,000 \$ \quad 4.3$$

Τέλος, προκειμένου να ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί για το CAPEX του υπό μελέτη πλοίου, πρέπει να γίνει υπολογισμός του κόστους των νέων δεξαμενών καυσίμων. Επιλέχθηκαν τελικά δεξαμενές καυσίμου οι κρυογονικές δεξαμενές Type B με ιδιαίτερα μεγάλη μόνωση, ώστε η ποσότητα των Boil-off αερίων να θεωρείται αμελητέα. Ο υπολογισμός του κόστους κτήσης και εγκατάστασης των δεξαμενών αποθήκευσης του καυσίμου LNG πραγματοποιείται με τη χρήση της τιμής 0.305\$/kWh ^[26], αφού πρώτα υπολογιστούν οι απαιτούμενες kWh για τη πραγματοποίηση ενός ταξιδιού μονής διαδρομής από το λιμάνι του Rotterdam στο λιμάνι της Shanghai.

$$\begin{aligned} \text{Total Energy Consumed}_{Trip} &= 1.2 \cdot (0.85 \cdot MCR_{ME} \cdot 24 \cdot 27.8 + 0.5 \cdot 2 \cdot MCR_{AE} \cdot 24 \cdot 30.8) \\ &= 27,495,110 kWh \end{aligned} \quad 4.4$$

Οπότε, το συνολικό κόστος κτήσης και εγκατάστασης των δεξαμενών για αποθήκευση καυσίμου LNG στο υπό μελέτη πλοίο, είναι ίσο με,

$$Total\ Fuel\ Tank_{cost} = Total\ Energy\ Consumed_{trip} \cdot \frac{0.305\$}{kWh} = 8,386,009 \$ \quad 4.5$$

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται υπολογισμός της χωρητικότητας των δεξαμενών καυσίμου LNG για το υπό μελέτη πλοίο. Ο υπολογισμός αυτός δύναται να πραγματοποιηθεί με ακρίβεια, πράγμα που κάνει τα τελικά αποτελέσματα να ανταποκρίνονται σε μεγάλο βαθμό στη πραγματικότητα. Σε πρώτη φάση, πρέπει να υπολογιστεί η κατανάλωση (SFC) της κύριας μηχανής. Η SFC της μηχανής για καύσιμο LNG υπολογίζεται από τη σχέση,

$$ME\ SFC_{LNG,85\%} = ME\ SFC_{VLSFO,85\%} \cdot \frac{LHV_{VLSFO}}{LHV_{LNG}} = 141.6 \frac{g}{kWh} \quad 4.6$$

Όπου,

- $LHV_{VLSFO} = 42.7 \frac{MJ}{kg}$, η θερμογόνος ικανότητα του Very Low Sulphur Fuel Oil
- $LHV_{LNG} = 50 \frac{MJ}{kg}$, η θερμογόνος ικανότητα του LNG

Σε δεύτερη φάση, υπολογίζεται η ημερήσια κατανάλωση της κύριας μηχανής του πλοίου σε LNG, με τη χρήση της σχέσης,

$$ME\ Consumption_{D.LNG} = C \cdot SFC_{ME,85\%} \cdot P_{ME} \cdot \frac{24}{10^6} = 113.82 \frac{t}{day} \quad 4.7$$

Όπου,

- $P_{ME} = 0.85 \cdot MCR_{ME}$ η ισχύς της κύριας μηχανής στο σημείο λειτουργίας της
- $C = 1.05$, διόρθωση κατανάλωσης λόγω κακοκαιρίας, ελιγμών και απρόσμενων συνθηκών

Όμοια με τους υπολογισμούς που έγιναν για τη κύρια μηχανή του υπό μελέτη πλοίου, θα γίνουν και για τις γεννήτριες του.

$$AE\ SFC_{LNG,50\%} = AE\ SFC_{VLSFO,50\%} \cdot \frac{LHV_{VLSFO}}{LHV_{LNG}} = 191.5 \frac{g}{kWh} \quad 4.8$$

Όπου,

- $LHV_{VLSFO} = 42.7 \frac{MJ}{kg}$, η θερμογόνοος ικανότητα του Heavy Fuel Oil
- $LHV_{LNG} = 50 \frac{MJ}{kg}$, η θερμογόνοος ικανότητα του LNG

Έπειτα, υπολογίζεται η ημερήσια κατανάλωση των γεννητριών του υπό μελέτη πλοίου.

$$AE\ Consumption_{D,LNG} = C_2 \cdot SFC_{AE,50\%} \cdot P_{AE} \cdot \frac{24}{10^6} = 16.9 \frac{t}{day} \quad 4.9$$

Όπου,

- $P_{AE} = 0.5 \cdot MCR_{AE}$ η ισχύς της 1 γεννήτριας στο σημείο λειτουργίας της
- $C_2 = 2$, ο αριθμός των γεννητριών που θεωρήθηκε ότι βρίσκονται σε λειτουργία κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού.

Συνεπώς, η συνολική ποσότητα καυσίμου που υπάρχει στις δεξαμενές καυσίμου, ισούται με,

$$\begin{aligned} \text{Total Fuel Weight}_{LNG} &= 27.8 \cdot ME\ Consumption_{D,LNG} + \\ &30.8 \cdot AE\ Consumption_{D,LNG} = 3,684.3\ t \end{aligned} \quad 4.10$$

Δεδομένης της πυκνότητας του υγροποιημένου φυσικού αερίου, $\rho_{LNG} = 0.45\ t/m^3$ [6], και συμπεριλαμβανόμενης μιας προσαύξησης της τάξης του 20% για επιπλέον καύσιμα σε περίπτωση ανάγκης, υπολογίζεται ο όγκος του απαιτούμενου καυσίμου για τη πραγματοποίηση ενός ταξιδιού, ο οποίος, ισούται και με τη χωρητικότητα των δεξαμενών.

$$\text{Total Fuel Tank Capacity}_{LNG} = 9,824.7\ m^3 \quad 4.11$$

Πλέον, γνωρίζοντας τη χωρητικότητα των δεξαμενών καυσίμου LNG, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον χαμένο χώρο φορτίου εξαιτίας των μεγαλύτερων δεξαμενών καυσίμου και της μόνωσης τους. Για να γίνει αυτό, χρειαζόμαστε τον όγκο των δεξαμενών καυσίμου πετρελαίου καθώς και τον χώρο τον οποίο καταλαμβάνει ένα Twenty-Foot Container. Η μείωση

σε χωρητικότητα φορτίου και συνεπώς σε μεταφερόμενα container TEU, εξαιτίας των δεξαμενών καυσίμου LNG φαίνεται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Χαμένο φορτίο υπό μελέτη πλοίου

Χαμένος όγκος φορτίου [m ³]	4,483
Όγκος εμπορευματοκιβωτίου [m ³ /TEU]	38.55
Χαμένα εμπορευματοκιβώτια	116

Έχοντας όλες τις απαραίτητες πληροφορίες διαθέσιμες για τον υπολογισμό του κόστους κτήσης του πλοίου, αυτό υπολογίζεται ίσο με,

$$\text{CAPEX} = 141,036,009 \$ \quad 4.12$$

Πίνακας 4.2: CAPEX υπό μελέτη πλοίου για καύσιμο LNG

Κόστος κτήσης πλοίου χωρίς μηχανές [\$]	104,120,000
Κόστος κύριας μηχανής LNG [\$]	20,130,000
Κόστος γεννητριών LNG [\$]	8,400,000
Κόστος δεξαμενών LNG [\$]	8,386,009
CAPEX [\$]	141,036,009

4.1.2 OPEX

4.1.2.1 Κόστος καυσίμων

Έχοντας υπολογίσει το CAPEX για την επένδυση του υπό μελέτη πλοίου, ακολουθεί ο υπολογισμός των λειτουργικών εξόδων του πλοίου κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού. Τα οποία στη συνέχεια θα αναχθούν σε ετήσια λειτουργικά έξοδα ανά έτος. Το πρώτο και μεγαλύτερο λειτουργικό έξοδο που θα μελετηθεί, αποτελούν τα έξοδα καυσίμων για τη πρόωση του πλοίου και για τη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές του. Αρχικά, γίνεται υπολογισμός των καυσίμων που καταναλώνονται σε ένα ταξίδι του πλοίου, τα οποία είναι ίσα με αυτά που υπολογίστηκαν στην εξίσωση 4.10.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το υπό μελέτη πλοίο εκτελεί το δρομολόγιο Port of Shanghai - Port of Rotterdam 11 φορές στη διάρκεια ενός έτους. Συνεπώς η ετήσια κατανάλωση καυσίμου LNG, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης των γεννητριών όσο το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι, υπολογίζεται ίση με,

$$\text{Annual Fuel Consumption}_{\text{LNG}} = 11 \cdot 3,684.3 = 40,526.7 \text{ t} \quad 4.13$$

Η συνολική τιμή του κόστους καυσίμου από σενάριο σε σενάριο διαφέρει, καθώς αποτελεί μια από τις κυριότερες μεταβλητές των σεναρίων, η οποία παίζει καθοριστικό παράγοντα στη βιωσιμότητα της επένδυσης. Στο παρόν στάδιο, θα θεωρηθεί ότι το κόστος καυσίμου ισούται με 450 \$/t ^[25], τιμή ίση με αυτή που κινούταν η αγορά στις αρχές του 2022, πριν την έναρξη του πολέμου μεταξύ Ρωσίας - Ουκρανίας. Συνεπώς, το ετήσιο κόστος καυσίμου είναι ίσο με,

$$\text{Annual Fuel Cost}_{\text{LNG}} = 18,439,467 \$ \quad 4.14$$

Προκειμένου να γίνει η ανάφλεξη του καυσίμου LNG, όπως έχει ήδη γίνει αναφορά, είναι απαραίτητη μια μικρή ποσότητα καυσίμου MDO της τάξης του 1% ^[7]. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μηχανής, καταναλώνεται και ποσότητα MDO. Για ένα χρόνο λειτουργίας των μηχανών, η κατανάλωση σε MDO, ισούται περίπου με,

$$\text{Annual Fuel Consumption}_{\text{MDO}} = 1\% \cdot \text{Annual Fuel Consumption}_{\text{LNG}} = 405.3 \text{ t} \quad 4.15$$

Η τιμή του Marine Diesel Oil τον Οκτώβρη του 2022 κυμαινόταν περίπου στα 600 \$/t ^[27]. Με τη χρήση αυτής της τιμής, η οποία θα θεωρηθεί σταθερή σε όλα τα case studies, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του κόστους που έχει η χρήση Pilot Fuel για την ανάφλεξη του καυσίμου.

$$\text{Annual MDO Cost} = 202,633 \$ \quad 4.16$$

4.1.2.2 Κόστος λιπαντικών

Πέρα των καυσίμων που καταναλώνουν η κύρια και οι βοηθητικές μηχανές, καταναλώνουν και σημαντικές ποσότητες λιπαντικών. Η ποσότητα του λιπαντικού που υπολογίζεται πως καταναλώνουν τα πλοία για τη λίπανση των μηχανών τους, θεωρείται περίπου, ίση με τη

κατανάλωση των γεννητριών σε καύσιμο ^[28]. Συνεπώς, η ετήσια κατανάλωση λιπαντικού, υπολογίζεται ίση με,

$$\text{Annual Lubricants Consumption} = 2,263.8 \text{ t} \quad 4.17$$

Μια συνηθισμένη τιμή, στην οποία μπορούν να βρεθούν τα λιπαντικά στην αγορά, είναι αυτή των 800 \$/t ^[28]. Με τη χρήση αυτής της τιμής, υπολογίζεται το ετήσιο κόστος λιπαντικών για το υπό μελέτη πλοίο, ίσο με,

$$\text{Annual Lubricants Cost} = 1,968,960 \text{ \$} \quad 4.18$$

4.1.2.3 Μισθοί πληρώματος

Το αμέσως επόμενο μεγαλύτερο λειτουργικό έξοδο του πλοίου, είναι οι μισθοί του πληρώματος. Οι μισθοί του πληρώματος, σε διάρκεια ενός έτους, ισούνται με,

$$\text{Average Personnel Salary} = 35 \cdot \frac{\text{salary}}{\text{month}} \cdot 12 \text{ months} = 4,200,000 \frac{\text{\$}}{\text{year}} \quad 4.19$$

Στη προκειμένη περίπτωση, όμως, το υπό μελέτη πλοίο χρησιμοποιεί υγροποιημένο φυσικό αέριο ως καύσιμο, πράγμα που απαιτεί επιπλέον προσωπικό και πιο εξειδικευμένο στο καύσιμο αυτό. Οπότε τα έξοδα για τη μισθοδοσία του προσωπικού αυξάνονται περίπου 50,000\$ μηνιαίως όπως δείχνει σχετική έρευνα του Νορβηγικού Νηογνώμονα ^[4].

$$\text{Extra Personnel Salary} = 600,000 \frac{\text{\$}}{\text{year}} \quad 4.20$$

Οπότε για λειτουργία πλοίου μεταφοράς Container με καύσιμο LNG, τα αναμενόμενα ετήσια έξοδα προσωπικού ανέρχονται περίπου στα,

$$\text{Total Personnel Salaries} = 4,800,000 \frac{\text{\$}}{\text{year}} \quad 4.21$$

4.1.2.4 Κόστος διέλευσης από διώρυγα Suez

Η διαδρομή που έχει επιλεγεί για το υπό μελέτη πλοίο, δηλαδή από το λιμάνι του Rotterdam, στο λιμάνι της Shanghai και αντίστροφα, περιλαμβάνει πέρασμα από τη διώρυγα του Σουέζ, καθώς αυτή είναι η συντομότερη διαδρομή για τη πραγματοποίηση του ταξιδιού αυτού, σε όλη τη διάρκεια του έτους. Το γεγονός αυτό που δημιουργεί ένα επιπλέον λειτουργικό έξοδο στο πλοίο, το οποίο βέβαια με τη σειρά του γλιτώνει από τον πλοιοκτήτη ή τον ναυλωτή το πολύ μεγάλο κόστος καυσίμων που θα χρειαζόταν να δαπανήσει για να ταξιδέψει το πλοίο περιμετρικά της Αφρικής, καθώς επίσης μειώνει κατακόρυφα τη πιθανότητα πειρατείας, η οποία θα μπορούσε θέσει σε κίνδυνο τόσο το πλήρωμα όσο και το φορτίο του πλοίου.

Για τον υπολογισμό των εξόδων του πλοίου για πέρασμα από τη διώρυγα του Σουέζ, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Suez toll calculator ^[29], και με τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου, υπολογίστηκε το κόστος περάσματος από τη διώρυγα, ίσο με,

$$\text{SUEZ Canal Fees}_{\text{trip}} = 255,632 \$ \quad 4.22$$

Συνεπώς, δεδομένου ότι το πλοίο ενδιαφέροντος πραγματοποιεί 11 ταξίδια ετησίως, το ετήσιο κόστος που προκύπτει από περάσματα του πλοίου από τη διώρυγα του Σουέζ, είναι ίσο με,

$$\text{SUEZ Canal Fees}_{\text{annual}} = 11 \text{ trips} \cdot 255,632 \frac{\$}{\text{trip}} = 2,811,952 \$ \quad 4.23$$

4.1.2.5 Λιμανιάτικα έξοδα

Τα έξοδα του λιμανιού όπως έχουν ήδη υπολογιστεί προηγουμένως φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 4.3 και είναι ίσα με,

$$\text{Total Port Fees} = 1,856,412 \frac{\$}{\text{year}} \quad 4.24$$

Πίνακας 4.3: Ετήσια λιμανιάτικα έξοδα για το υπό μελέτη πλοίο

Rotterdam Expenses for 6 visits [\$/year]	660,000
Shanghai Expenses for 6 visits [\$/year]	1,196,412
Total Port Expenses [\$/year]	1,856,412

4.1.2.6 Έξοδα ασφάλισης

Τα έξοδα ασφάλισης, αποτελούν επίσης ένα έξοδο που πρέπει να συμπεριληφθεί στα ετήσια έξοδα λειτουργίας του πλοίου. Για τον υπολογισμό των ετήσιων εξόδων ασφάλισης του μέσου πλοίου, χρησιμοποιήθηκε ο προσεγγιστικός τύπος του μαθήματος “Θέμα μελέτης & Σχεδίασης Πλοίου”^[28],

$$\text{Annual Insurance Cost} = 1,925 \cdot \left(N_{\text{crew}} + \frac{GT}{1,000} \right) = 280,341.6 \$ \quad 4.25$$

Εξαιτίας της χρήσης LNG για καύσιμο και σύμφωνα με την έρευνα του DNV, θεωρείται μια αύξηση 25% στα ετήσια έξοδα ασφάλειας. Συνεπώς, τα συνολικά ετήσια έξοδα ασφάλειας για το υπό μελέτη πλοίο, είναι ίσα με,

$$\text{Total Annual Insurance Cost} = 350,427 \$ \quad 4.26$$

4.1.2.7 Κόστη συντήρησης

Ένα επιπλέον λειτουργικό έξοδο του πλοίου, προκύπτει από την ανάγκη συντήρησης των μηχανών του. Από στατιστικά δεδομένα υπολογίζεται ότι το συνολικό κόστος συντήρησης για τη κύρια μηχανή και τις ηλεκτρογεννήτριες^[28], υπολογίζεται περίπου ίσο με,

$$\text{Annual Engines Maintenance}_{\text{cost}} = 497,760 \$ \quad 4.27$$

Πέρα από τα έξοδα συντήρησης των μηχανών του πλοίου, προστίθεται και ένα επιπλέον κόστος συντήρησης, το κόστος δεξαμενισμού, το οποίο μάλιστα θεωρείται ότι πραγματοποιείται μια φορά κάθε 5 χρόνια.

$$\text{Big Drydock}_{\text{cost}} = 3,000,000 \frac{\$}{5 \text{ year}} \quad 4.28$$

4.1.2.8 Υπόλοιπα έξοδα

Τέλος, θα υπολογιστούν προσεγγιστικά κάποια επιπλέον έξοδα που προκύπτουν ή μπορεί να προκύψουν κατά τη λειτουργία του πλοίου. Τα έξοδα αυτά, αφορούν έξοδα ανεφοδιασμού, τροφοδοσίας, πόσιμο νερού, συντήρησης γάστρας και άλλα έξοδα τα οποία είναι σχεδόν αμελητέα για την μελέτη μας, για αυτό δε πραγματοποιείται και αναλυτική μελέτη για αυτά.

$$\text{Rest}_{\text{costs}} = 300,000 \frac{\$}{\text{year}} \quad 4.29$$

Πίνακας 4.4: OPEX υπό μελέτη πλοίου για καύσιμο LNG

Fuel Cost [\$/year]	18,439,647
Lubricants Cost [\$/year]	1,968,960
Personnel Salaries [\$/year]	4,800,000
Suez Canal Fees [\$/year]	2,811,952
Port Fees [\$/year]	1,856,412
Insurance Costs [\$/year]	350,427
Engines Maintenance Costs [\$/year]	497,760
Big Drydock Cost [\$/5year]	3,000,000
Rest Costs [\$/year]	300,000
OPEX [\$/year]	31,025,158

4.2 Μεθανόλη

4.2.1 CAPEX

Το κόστος κτήσης του υπό μελέτη πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 10,000 TEU χωρίς κύρια μηχανή και γεννήτριες, υπολογίζεται στην εξίσωση 4.1.

Στη συνέχεια, ακολουθεί υπολογισμός για την εύρεση του κόστους κτήσης και εγκατάστασης των μηχανολογικών κατασκευών. Αρχικά, υπολογίζεται το κόστος της κύριας μηχανής με MCR 36,600 kW x 72 rpm, η οποία λειτουργεί με μεθανόλη, ενώ απαιτεί και μια μικρή ποσότητα Pilot Fuel MDO, για την πραγματοποίηση της ανάφλεξης. Το κόστος μιας τέτοιας μηχανής εσωτερικής καύσης η οποία χρησιμοποιείται για τη πρόωση ενός containership, υπολογίζεται από άλλες έρευνες ίσο με 400\$/kW [26].

$$Main\ Engine,\ Methanol_{Cost} = 400 \frac{\$}{kW} \cdot MCR_{ME} = 14,640,000 \$ \quad 4.30$$

Με όμοιο τρόπο, γίνεται ο υπολογισμός του κόστους κτήσης και εγκατάστασης των τεσσάρων ηλεκτρογεννητριών του υπό μελέτη πλοίου. Από στατιστικά δεδομένα, βρέθηκε ότι το κόστος μιας ηλεκτρογεννήτριας, είναι ίσο με 450\$/Kw [26]. Συνεπώς, η συνολική τιμή για την αγορά και τοποθέτηση 4 ηλεκτρογεννητριών ισχύος 3,500 kW, στο υπό μελέτη πλοίο είναι,

$$Auxiliary\ Engine,\ Methanol_{Cost} = 450 \frac{\$}{kW} \cdot MCR_{AE} = 6,300,000 \$ \quad 4.31$$

Έπειτα, υπολογίζεται το κόστος αγοράς και τοποθέτησης των δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμου μεθανόλης. Το κόστος αυτό, υπολογίζεται από δεδομένα που βρέθηκαν στο διαδίκτυο και ισούται με 0.14 \$/kWh [26]. Συνεπώς, για να γίνει ο υπολογισμός του κόστους των δεξαμενών, πρέπει πρώτα να γίνει υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου για τη πραγματοποίηση ενός ταξιδιού από το λιμάνι στο Rotterdam ως το λιμάνι της Shanghai.

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου μεθανόλης για τη κύρια μηχανή στο 85% του MCR υπό μελέτη πλοίο, ισούται με,

$$SFC_{ME,METHANOL} = 361.1 \frac{g}{kWh} \quad 4.32$$

Ενώ, η ειδική κατανάλωση μεθανόλης των ηλεκτρομηχανών στο 50% του φορτίου τους, ισούται με,

$$SFC_{AE,METHANOL} = 476.3 \frac{g}{kWh} \quad 4.33$$

Συνεπώς, με τη χρήση των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν και στο κεφάλαιο του LNG, υπολογίζεται ότι κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού του πλοίου, από το ένα λιμάνι στο άλλο, το υπό μελέτη πλοίο χρειάζεται 9,164.8t μεθανόλης. Η ποσότητα αυτή, αντιστοιχεί σε ενεργειακή ποσότητα ίση με 27,495,110 kWh, λαμβάνοντας υπόψη και μια προσαύξηση της τάξης του 20% για τα εφεδρικά καύσιμα. Οπότε, το κόστος κτήσης και εγκατάστασης των δεξαμενών μεθανόλης για το υπό μελέτη containership είναι ίσο με,

$$Total\ Fuel\ Tank_{cost} = 3,821,820\ \$ \quad 4.34$$

Η συνολική ποσότητα καυσίμου που περιέχουν οι δεξαμενές του πλοίου, είναι ίση με 10,539.5t καθώς υπολογίζεται και ένα επιπλέον περιθώριο ασφαλείας, για περίπτωση ανάγκης. Δεδομένης της πυκνότητας της μεθανόλης, η οποία είναι $\rho_{Meth}=0.798\ t/m^3$ [6], η συνολική χωρητικότητα των δεξαμενών καυσίμου μεθανόλης για το υπό μελέτη πλοίο, είναι ίση με

$$Total\ Fuel\ Tank\ Capacity_{Methanol} = 13,207.4\ m^3 \quad 4.35$$

Πλέον, γνωρίζοντας τη χωρητικότητα των δεξαμενών καυσίμου μεθανόλης, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον χαμένο χώρο φορτίου. Για να γίνει αυτό, χρειαζόμαστε τον όγκο των δεξαμενών καυσίμου πετρελαίου καθώς και τον χώρο τον οποίο καταλαμβάνει ένα Twenty-Foot Container. Η μείωση σε χωρητικότητα φορτίου και συνεπώς σε μεταφερόμενα container εξαιτίας των δεξαμενών καυσίμου μεθανόλης φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.5: Χαμένο φορτίο υπό μελέτη πλοίου

Χαμένος όγκος φορτίου [m ³]	7,866
Όγκος εμπορευματοκιβωτίου [m ³ /TEU]	38.55
Χαμένα εμπορευματοκιβώτια	204

Τέλος, υπολογίζεται το συνολικό κόστος κτήσης ενός νεότευκτου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 10,000 TEU το οποίο λειτουργεί με τη χρήση μεθανόλης και είναι ίσο με,

$$CAPEX = 128,881,820\ \$ \quad 4.36$$

Πίνακας 4.6: CAPEX υπό μελέτη πλοίου με καύσιμο μεθανόλη

Κόστος κτήσης πλοίου χωρίς μηχανές [\$]	104,120,000
Κόστος κύριας μηχανής μεθανόλης [\$]	14,640,000
Κόστος γεννητριών μεθανόλης [\$]	6,300,000
Κόστος δεξαμενών μεθανόλης [\$]	3,821,820
CAPEX [\$]	128,881,820

4.2.2 OPEX

Τα Operational Expenses του υπό μελέτη Containership που λειτουργεί με τη χρήση μεθανόλης, είναι τα ακόλουθα:

- Κόστη καυσίμου
- Κόστη λιπαντικών
- Μισθοί πληρώματος
- Έξοδα για πέρασμα από διώρυγα του Suez
- Λιμανιάτικα έξοδα
- Έξοδα ασφάλειας
- Έξοδα συντήρησης
- Drydock
- Υπόλοιπα έξοδα

Τα έξοδα αυτά, υπολογίζονται κατά βάση με την ίδια μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο του καυσίμου LNG. Η μόνη σημαντική διαφοροποίηση που πραγματοποιείται, είναι ο υπολογισμός του κόστους Pilot Fuel, καθώς για να πραγματοποιηθεί η καύση με τη χρήση μεθανόλης ως καυσίμου, απαιτείται λίγο μεγαλύτερη ποσότητα pilot fuel η οποία είναι ίση με το 2.5% της ποσότητας καυσίμου μεθανόλης που καταναλώνεται ^[10].

Επιπλέον, η ετήσια κατανάλωση καυσίμου του υπό μελέτη πλοίου, υπολογίζεται όμοια με το LNG, και στο συγκεκριμένο παράδειγμα, πραγματοποιείται η υπόθεση, ότι η τιμή της μεθανόλης ισούται με 500\$/t για όλη τη διάρκεια της επένδυσης ^[30]. Η τιμή αυτή, είναι η μέση τιμή που επικρατούσε στην αγορά τον μήνα Οκτώβρη του 2022. Οπότε, με τη χρήση αυτής και

συμπεριλαμβάνοντας το ετήσιο κόστος για pilot fuel, υπολογίζονται τα ετήσια έξοδα καυσίμου για το πλοίο ενδιαφέροντος.

$$\text{Annual Fuel Cost}_{\text{Methanol}} = 51,666,498 \$ \quad 4.37$$

Πίνακας 4.7: OPEX υπό μελέτη πλοίου για καύσιμο μεθανόλη

Fuel Cost [\$/year]	51,666,498
Lubricants Cost [\$/year]	1,968,960
Personnel Salaries [\$/year]	4,200,000
Suez Canal Fees [\$/year]	2,811,952
Port Fees [\$/year]	1,856,412
Insurance Costs [\$/year]	350,427
Engines Maintenance Costs [\$/year]	497,760
Big Drydock Cost [\$/5year]	3,000,000
Rest Costs [\$/year]	300,000
OPEX [\$/year]	63,652,009

4.3 Αμμωνία

4.3.1 CAPEX

Το κόστος κτήσης του υπό μελέτη πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 10,000 TEU χωρίς κύρια μηχανή και γεννήτριες, υπολογίζεται στην εξίσωση 4.1.

Στη συνέχεια, ακολουθεί υπολογισμός για την εύρεση του κόστους κτήσης και εγκατάστασης των μηχανολογικών κατασκευών. Αρχικά, υπολογίζεται το κόστος της κύριας μηχανής με MCR 36,600 kW x 72 rpm, η οποία λειτουργεί με αμμωνία, ενώ απαιτεί και μια μικρή ποσότητα Pilot Fuel MDO, για την πραγματοποίηση της ανάφλεξης. Το κόστος μιας τέτοιας μηχανής εσωτερικής καύσης η οποία χρησιμοποιείται για τη πρόωση ενός containership, υπολογίζεται από στατιστικά ίσο με 500 \$/ kW ^[25].

$$\text{Main Engine, Ammonia}_{\text{Cost}} = 500 \frac{\$}{\text{kW}} \cdot \text{MCR}_{\text{ME}} = 18,300,000 \$ \quad 4.38$$

Με όμοιο τρόπο, γίνεται ο υπολογισμός του κόστους κτήσης και εγκατάστασης των τεσσάρων ηλεκτρογεννητριών του υπό μελέτη πλοίου. Από στατιστικά δεδομένα, βρέθηκε ότι το κόστος μιας ηλεκτρογεννήτριας, είναι ίσο με 550\$/ kW ^[25]. Συνεπώς, η συνολική τιμή για την αγορά και τοποθέτηση 4 ηλεκτρογεννητριών ισχύος 3,500 kW, στο υπό μελέτη πλοίο είναι,

$$Auxiliary\ Engine,\ Ammonia_{cost} = 4 \cdot 550 \frac{\$}{kW} \cdot MCR_{AE} = 7,700,000 \$ \quad 4.39$$

Έπειτα, υπολογίζεται το κόστος αγοράς και τοποθέτησης των δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμου αμμωνίας. Το κόστος αυτό, υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται για καύσιμο LNG και βρίσκεται στην εξίσωση,

$$Total\ Fuel\ Tank_{cost} = 8,386,009 \$ \quad 4.40$$

Ακολουθεί ο υπολογισμός της συνολικής χωρητικότητας καυσίμου αμμωνίας στο υπό μελέτη πλοίο. Αρχικά, γίνεται υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου αμμωνίας για τη κύρια μηχανή στο 85% του MCR υπό μελέτη πλοίο, ισούται με,

$$SFC_{ME,AMMONIA} = 390.3 \frac{g}{kWh} \quad 4.41$$

Ενώ, η ειδική κατανάλωση αμμωνίας των ηλεκτρομηχανών στο 50% του φορτίου τους, ισούται με,

$$SFC_{AE,AMMONIA} = 514.7 \frac{g}{kWh} \quad 4.42$$

Συνεπώς, με τη χρήση των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν και για τα προηγούμενα εναλλακτικά καύσιμα, υπολογίζεται ότι κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού του πλοίου, από το ένα λιμάνι στο άλλο, το υπό μελέτη πλοίο χρειάζεται 8,903.2t αμμωνίας. Η ποσότητα αυτή, αντιστοιχεί σε όγκο ίσο με 15,665.5m³.

Πλέον, γνωρίζοντας τη χωρητικότητα των δεξαμενών καυσίμου αμμωνίας, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον χαμένο χώρο φορτίου. Για να γίνει αυτό, χρειαζόμαστε τον όγκο των δεξαμενών καυσίμου πετρελαίου καθώς και τον χώρο τον οποίο καταλαμβάνει ένα Twenty-

Feet Container. Η μείωση σε χωρητικότητα φορτίου και συνεπώς σε μεταφερόμενα container εξαιτίας των δεξαμενών καυσίμου LNG φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.8: Χαμένος χώρος φορτίου για καύσιμο αμμωνία

Χαμένος όγκος φορτίου [m ³]	12,084.8
Όγκος εμπορευματοκιβωτίου [m ³ /TEU]	38.55
Χαμένα εμπορευματοκιβώτια	313

Τέλος, υπολογίζεται το συνολικό κόστος κτήσης ενός νεότευκτου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 10,000 TEU το οποίο λειτουργεί με τη χρήση αμμωνίας και είναι ίσο με,

$$CAPEX = 138,506,009 \$ \quad 4.43$$

Πίνακας 4.9: CAPEX για το υπό μελέτη πλοίο για καύσιμο αμμωνία

Κόστος κτήσης πλοίου χωρίς μηχανές [\$]	104,120,000
Κόστος κύριας μηχανής αμμωνίας [\$]	18,300,000
Κόστος γεννητριών αμμωνίας [\$]	7,700,000
Κόστος δεξαμενών αμμωνίας [\$]	8,386,009
CAPEX [\$]	138,506,009

4.3.2 OPEX

Τα Operational Expenses του υπό μελέτη Containership που λειτουργεί με τη χρήση μεθανόλης, είναι τα ακόλουθα:

- Κόστη καυσίμου
- Κόστη λιπαντικών
- Μισθοί πληρώματος
- Έξοδα για πέρασμα από διώρυγα του Suez
- Λιμανιάτικα έξοδα
- Έξοδα ασφάλειας

- Έξοδα συντήρησης
- Drydock
- Υπόλοιπα έξοδα

Τα έξοδα αυτά, υπολογίζονται κατά βάση με την ίδια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τα προηγούμενα εναλλακτικά καύσιμα. Η μόνη σημαντική διαφοροποίηση που πραγματοποιείται, είναι ο υπολογισμός του κόστους Pilot Fuel, καθώς για να πραγματοποιηθεί η καύση με τη χρήση αμμωνίας ως καυσίμου, απαιτείται λίγο μεγαλύτερη ποσότητα pilot fuel η οποία είναι ίση με το 7.5% της ποσότητας καυσίμου αμμωνίας που καταναλώνεται ^[31].

Επιπλέον, η ετήσια κατανάλωση καυσίμου του υπό μελέτη πλοίου, υπολογίζεται όμοια με LNG και μεθανόλη, και στο συγκεκριμένο παράδειγμα, πραγματοποιείται η υπόθεση, ότι η τιμή της αμμωνίας ισούται με 350\$/t ^[6] για όλη τη διάρκεια της επένδυσης. Η τιμή αυτή, είναι η μέση τιμή που επικρατούσε στην αγορά τον μήνα Οκτώβρη του 2019, με μια προσαύξηση της τάξεως του 20% λόγω ενεργειακής κρίσης και πολέμων. Οπότε, με τη χρήση αυτής και συμπεριλαμβάνοντας το ετήσιο κόστος για pilot fuel, υπολογίζονται τα ετήσια έξοδα καυσίμου για το πλοίο ενδιαφέροντος.

$$\text{Annual Fuel Cost}_{\text{AMMONIA}} = 42,215,309 \$ \quad 4.44$$

Πίνακας 4.10: OPEX για καύσιμο αμμωνία

Fuel Cost [\$/year]	42,215,309
Lubricants Cost [\$/year]	1,968,960
Personnel Salaries [\$/year]	4,200,000
Suez Canal Fees [\$/year]	2,811,952
Port Fees [\$/year]	1,856,412
Insurance Costs [\$/year]	350,427
Engines Maintenance Costs [\$/year]	263,120
Big Drydock Cost [\$/5year]	3,000,000
Rest Costs [\$/year]	300,000
OPEX [\$/year]	53,966,180

4.4 Υδρογόνο

4.4.1 CAPEX

Το κόστος κτήσης του υπό μελέτη πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 10,000 TEU χωρίς κύρια μηχανή και γεννήτριες, υπολογίζεται στην εξίσωση 4.1.

Έπειτα, ακολουθεί υπολογισμός για την εύρεση του κόστους κτήσης και εγκατάστασης των μηχανολογικών συσκευών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση που το υπό μελέτη πλοίο λειτουργεί με καύσιμο υδρογόνο, χρησιμοποιούνται κυψέλες καυσίμου για τη πρόωση του. Οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούνται ανήκουν στη κατηγορία PEMFC, διότι ανταποκρίνονται καλύτερα σε μεταβλητά φορτία. Όπως είναι προφανές, τα Fuel Cells που θα τοποθετηθούν στο πλοίο καλύπτουν τόσο τις ανάγκες πρόωσης, όσο και τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή αντικαθιστούν τόσο την κύρια μηχανή όσο και τις γεννήτριες ενός συμβατικού Containership. Το κόστος των κυψελών καυσίμου που χρειάζονται για τη κάλυψη των αναγκών του πλοίου, υπολογίζεται με τη χρήση της τιμής ανά κιλοβατώρα 1,500 \$/kW^[18]. Συνεπώς, το κόστος κτήσης και εγκατάστασης των κυψελών καυσίμου του υπό μελέτη πλοίου, ισούται με,

$$Fuel\ Cells, Hydrogen_{Cost} = 1,500 \frac{\$}{kW} \cdot MCR_{ME+AE} = 75,900,000 \$ \quad 4.45$$

Με όμοιο τρόπο, γίνεται ο υπολογισμός του κόστους κτήσης και εγκατάστασης των υπολοίπων μηχανημάτων που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί η πρόωση του πλοίου χρησιμοποιώντας Fuel Cells. Τα μηχανήματα αυτά, είναι ο ηλεκτροκινητήρας, το inverter, converter και κάποια άλλα των οποίων, το κόστος υπολογίζεται από στατιστικά ίσο με 116\$/kW^[18]. Συνεπώς, η συνολική τιμή για την αγορά και τοποθέτηση των βοηθητικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια των Fuel Cells για τη κίνηση του πλοίου, ισούται με,

$$Auxiliary\ Machinery, Hydrogen_{Cost} = 116 \frac{\$}{kW} \cdot MCR_{ME+AE} = 5,869,600 \$ \quad 4.46$$

Έπειτα, υπολογίζεται το κόστος αγοράς και τοποθέτησης των δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμου αμμωνίας. Το κόστος αυτό, υπολογίζεται από δεδομένα που βρέθηκαν στο διαδίκτυο και ισούται με 0.831\$/kWh^[26]. Συνεπώς, εφόσον η απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας για τη πραγματοποίηση ενός ταξιδιού είναι γνωστή, το συνολικό κόστος κτήσης και τοποθέτησης των δεξαμενών καυσίμου, είναι ίσο με,

$$Total\ Fuel\ Tank_{cost} = Total\ Energy\ Consumed_{Trip} \cdot \frac{0.831\$}{kWh} = 22,848,437 \$ \quad 4.47$$

Ακολουθεί, ο υπολογισμός της συνολικής χωρητικότητας των δεξαμενών καυσίμου. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, γίνεται υπολογισμός της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου υδρογόνου για τις κυψέλες καυσίμου τύπου PEMFC και είναι ίση με,

$$SFC_{FC,Hydrogen} = 60.4 \frac{g}{kWh} \quad 4.48$$

Συνεπώς, με τη χρήση των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν και για τα προηγούμενα εναλλακτικά καύσιμα, υπολογίζεται ότι κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού του πλοίου, από το ένα λιμάνι στο άλλο, το υπό μελέτη πλοίο χρειάζεται 1,590.5t υδρογόνου, ποσότητα η οποία αντιστοιχεί σε όγκο ίσο με 22,464.4m³.

Πλέον, γνωρίζοντας τη χωρητικότητα των δεξαμενών καυσίμου αμμωνίας, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον χαμένο χώρο φορτίου. Για να γίνει αυτό, χρειαζόμαστε τον όγκο των δεξαμενών καυσίμου πετρελαίου καθώς και τον χώρο τον οποίο καταλαμβάνει ένα Twenty-Foot Container. Η μείωση σε χωρητικότητα φορτίου και συνεπώς σε μεταφερόμενα container εξαιτίας των δεξαμενών καυσίμου LNG φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.11: Χαμένο φορτίο για καύσιμο υδρογόνο

Χαμένος όγκος φορτίου [m ³]	19,747.5
Όγκος εμπορευματοκιβωτίου [m ³ /TEU]	38.55
Χαμένα εμπορευματοκιβώτια	512

Τέλος, υπολογίζεται το συνολικό κόστος κτήσης ενός νεότευκτου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 10,000 TEU το οποίο λειτουργεί με τη χρήση υδρογόνου και είναι ίσο με,

$$CAPEX = 208,738,037 \$ \quad 4.49$$

Πίνακας 4.12: CAPEX για το υπό μελέτη πλοίο με καύσιμο υδρογόνο

Κόστος κτήσης πλοίου χωρίς μηχανές [\$]	104,120,000
Κόστος κτήσης PEMFC [\$]	75,900,000
Κόστος κτήσης εξαρτημάτων πρόωσης [\$]	5,869,600
Κόστος δεξαμενών Hydrogen [\$]	22,848,437
CAPEX [\$]	208,738,037

4.4.2 OPEX

Τα Operational Expenses του υπό μελέτη Containership που λειτουργεί με τη χρήση υδρογόνου, είναι τα ακόλουθα:

- Κόστη καυσίμου
- Μισθοί πληρώματος
- Έξοδα για πέρασμα από διώρυγα του Suez
- Λιμανιάτικα έξοδα
- Έξοδα ασφάλειας
- Έξοδα συντήρησης
- Drydock
- Υπόλοιπα έξοδα

Τα έξοδα αυτά, υπολογίζονται κατά βάση με την ίδια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τα προηγούμενα εναλλακτικά καύσιμα. Επιπλέον, η ετήσια κατανάλωση καυσίμου του υπό μελέτη πλοίου, υπολογίζεται όμοια με τα υπόλοιπα καύσιμα, και στο συγκεκριμένο παράδειγμα, πραγματοποιείται η υπόθεση, ότι η τιμή του υδρογόνου ισούται με 2,500 \$/t για όλη τη διάρκεια της επένδυσης. Η τιμή αυτή, είναι η μέση τιμή που βρέθηκε από διάφορα στατιστικά για πορτοκαλί υδρογόνο, το οποίο αποτελεί μια μίξη του γκρι με το πράσινο υδρογόνο.

$$\text{Annual Fuel Cost}_{\text{HYDROGEN}} = 40,706,684 \$ \quad 4.50$$

Συγκριτικά με τα υπόλοιπα εναλλακτικά καύσιμα που έχουν ήδη μελετηθεί, το κόστος συντήρησης των μηχανών PEMFC αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα στην επένδυση. Αυτό συμβαίνει διότι πέρα από τα κόστος συντήρησης των κυψελών καυσίμου,

πρέπει να υπολογιστεί και το κόστος επανάκτησης τους καθώς ο χρόνος ζωής τους είναι μικρότερος από αυτόν του πλοίου.

Αρχικά, το κόστος συντήρησης των κυψελών καυσίμου υπολογίζεται με τη χρήση της τιμής 45\$/kW^[18]. Οπότε το ετήσιο κόστος συντήρησης των Fuel Cells, είναι ίσο με,

$$\text{Annual FC Maintenance}_{\text{cost}} = 2,577,000 \$ \quad 4.51$$

Το προσδόκιμο ζωής των κυψελών καυσίμου τύπου PEMFC είναι περίπου 10 χρόνια συνεχής λειτουργίας με τη κατάλληλη συντήρηση. Για το υπό μελέτη πλοίο που έχει προσδόκιμο ζωής 25 χρόνια και δεδομένου ότι όσο εξελίσσεται η τεχνολογία και αυξάνεται η ανθεκτικότητα των μηχανημάτων, έχει θεωρηθεί ότι θα αλλάξει μια φορά τις κυψέλες καυσίμου στο 13^ο έτος λειτουργίας του. Συνεπώς, στη χρονιά εκείνη στα λειτουργικά έξοδα προστίθενται και τα έξοδα κτήσης και εγκατάστασης των καινούριων κυψελών καυσίμου για τις οποίες έχει θεωρηθεί μια μείωση της τάξεως του 20%, καθώς σε βάθος 13^{ων} χρόνων αναμένεται να έχει ωριμάσει η τεχνολογία τους και η τιμή τους να έχει μειωθεί αισθητά.

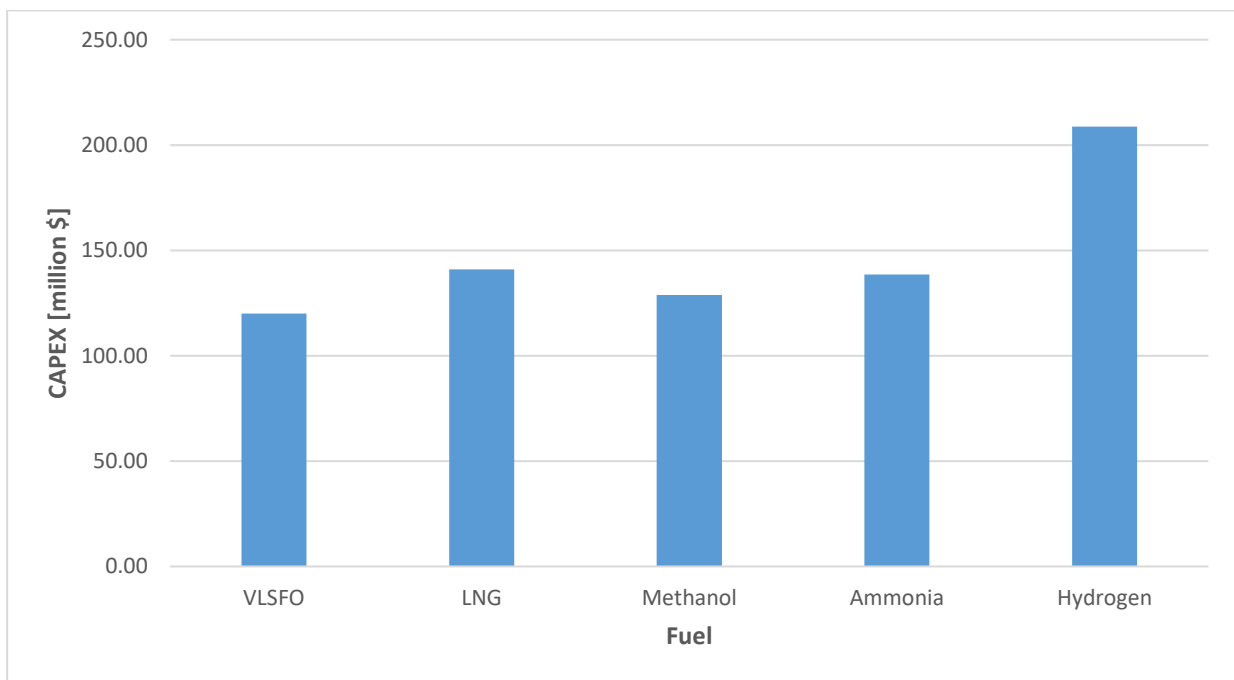
Πίνακας 4.13: OPEX υπό μελέτη πλοίου με καύσιμο υδρογόνο

Fuel Cost [\$/year]	40,706,684
Personnel Salaries [\$/year]	4,200,000
Suez Canal Fees [\$/year]	2,811,952
Port Fees [\$/year]	1,856,412
Insurance Costs [\$/year]	350,427
Fuel Cells Maintenance Costs [\$/year]	2,277,000
Big Drydock Cost [\$/5year]	3,000,000
Rest Costs [\$/year]	300,000
OPEX [\$/year]	52,502,475

4.5 Σύγκριση CAPEX και OPEX

Έχοντας συλλέξει όλα τα έξοδα που έχει τόσο η κτήση, όσο και η λειτουργία του υπό μελέτη πλοίου για κάθε πιθανού καυσίμου, συμπεριλαμβανομένου και του VLSFO, είμαστε σε θέση να προχωρήσουμε στα Case Studies, τα οποία θα εξετάσουν το αν η επένδυση συμφέρει ή όχι και υπό ποιές περιπτώσεις. Πρώτα όμως, κρίνεται αναγκαίο, να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις

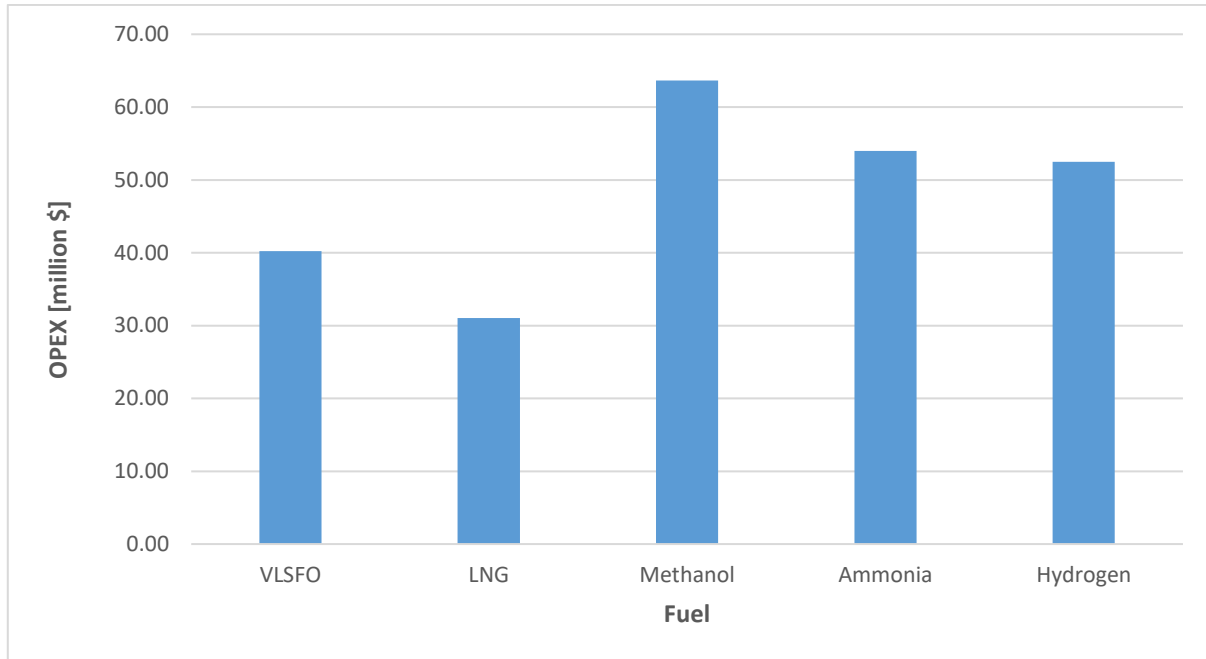
μεταξύ των CAPEX και OPEX για το υπό μελέτη πλοίο με τη χρήση των διάφορων τύπων καυσίμου, καθώς και στη συνέχεια να σχολιαστούν τα αποτελέσματα αυτά. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση της χωρητικότητας του υπό μελέτη πλοίου ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται για τη πρόωση.



Εικόνα 4.1: Σύγκριση CAPEX για όλα τα πιθανά καύσιμα του υπό μελέτη πλοίου

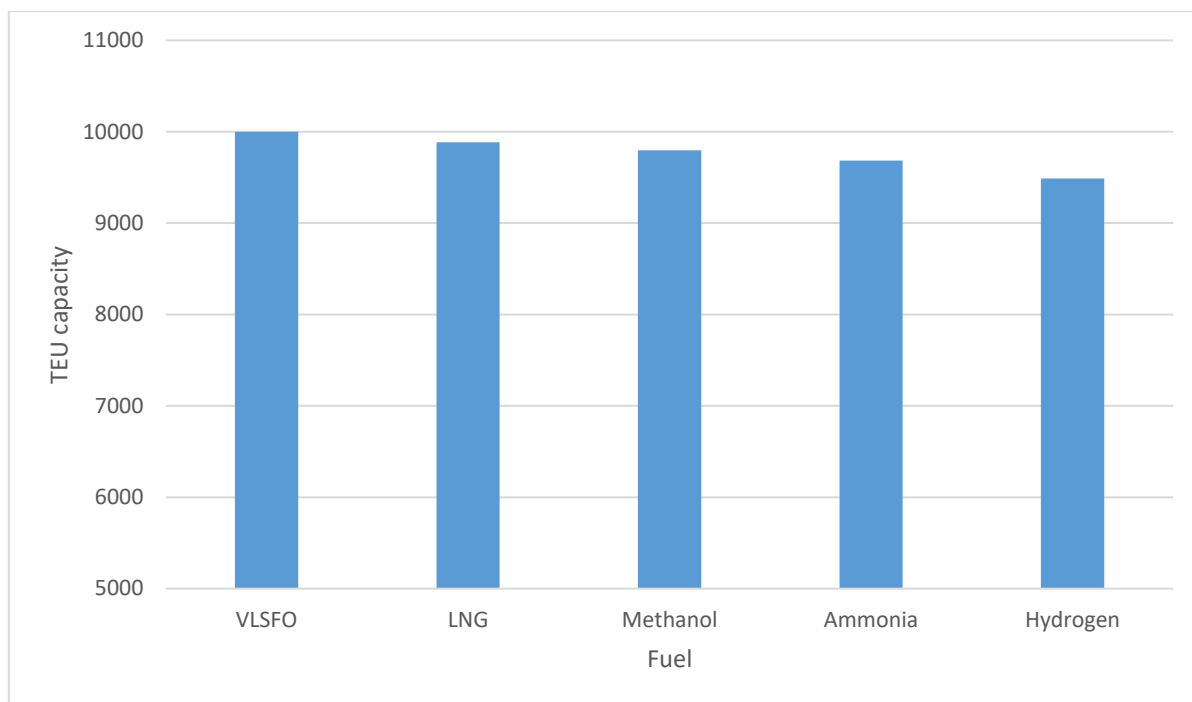
Στην εικόνα 4.1 πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ της κεφαλαιουχικής δαπάνης (CAPEX) για την αγορά και τη κτήση του υπό μελέτη containership ανάλογα με το είδος καυσίμου που χρησιμοποιείται. Όπως είναι προφανές το μικρότερο CAPEX το έχει το containership που λειτουργεί με τη χρήση Very Low Sulfur Fuel Oil (VLSFO) το οποίο είναι ένα από τα καύσιμα που κυριαρχούν αυτή τη στιγμή στην αγορά, λόγω της μικρής σχετικά τιμής τους και της πολύ μικρής περιεκτικότητάς τους σε θείο. Αμέσως μετά ακολουθεί η μεθανόλη με CAPEX ελαφρώς αυξημένο, το οποίο οφείλεται στο λίγο μεγαλύτερο κόστος που έχει η παραγωγή μηχανών διπλού καυσίμου που καταναλώνουν μεθανόλη. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα CAPEX για καύσιμα LNG και AMMONIA τα οποία είναι περίπου 20 million \$ μεγαλύτερα από αυτά του VLSFO, εξαιτίας του μεγαλύτερου κόστους κτήσης και εγκατάστασης των μηχανών διπλού καυσίμου, καθώς και του αυξημένου κόστους που έχουν οι κρυογονικές δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμου. Τέλος, το υπό μελέτη containership που λειτουργεί με υδρογόνο έχει το μεγαλύτερο κόστος δαπάνης καθώς αυξάνεται σημαντικά το κόστος αποθήκευσης καυσίμου

αφού απαιτείται πολύ μεγαλύτερη μόνωση για τη διατήρηση του υδρογόνου σε υγρή μορφή στους $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ ταυτόχρονα το κόστος κτήσης των κυψελών καυσίμου είναι πολύ μεγαλύτερο αυτού των μηχανών διπλού καυσίμου.



Εικόνα 4.2: Σύγκριση OPEX για όλα τα πιθανά καύσιμα του υπό μελέτη πλοίου

Στην εικόνα 4.2 πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ του κόστους λειτουργίας (OPEX) του υπό μελέτη containership ανάλογα με το είδος καυσίμου που χρησιμοποιεί και για τις τιμές καυσίμου που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στην αγορά. Τα αποτελέσματα αυτού του διαγράμματος είναι ιδιαίτερα ενδιαφέροντα καθώς δεν είναι τα αναμενόμενα. Το υπό μελέτη πλοίο που χρησιμοποιεί για τη πρόωση του υγροποιημένο φυσικό αέριο, έχει το χαμηλότερο OPEX από όλα τα εναλλακτικά καύσιμα αλλά και από το μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενο καύσιμο VLSFO. Επιπρόσθετα, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι το OPEX για containership που καταναλώνει μεθανόλη είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από κάθε άλλη περίπτωση, παρά το σχετικά μικρό του CAPEX. Αυτό συμβαίνει επειδή η μεθανόλη σαν καύσιμο έχει μικρή θερμογόνο ικανότητα, με αποτέλεσμα να καταναλώνεται μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου για τη πρόωση του πλοίου, από ότι στα υπόλοιπα καύσιμα, για τη παραγωγή ίδιας ποσότητας ενέργειας.



Εικόνα 4.3: Χωρητικότητα σε TEU του υπό μελέτη πλοίου για κάθε καύσιμο

Στην εικόνα 4.3 γίνεται σύγκριση μεταξύ της χωρητικότητας του υπό μελέτη πλοίου σε εμπορευματοκιβώτια TEU ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται για τη πρόωση του. Ο λόγος που εξετάζεται η χωρητικότητα του πλοίου, είναι ότι έχει άμεση σχέση με τα έσοδα του πλοίου, καθώς όσο περισσότερα container μπορεί να μεταφέρει σε ένα ταξίδι, τόσο περισσότερο αυξάνονται και τα έσοδα του. Στη μειωμένη χωρητικότητα που παρατηρείται σε συγκεκριμένα καύσιμα, οφείλεται το γεγονός ότι οι δεξαμενές καυσίμου καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο, ο οποίος χάνεται από το εμπόρευμα. Η χωρητικότητα του πλοίου για καύσιμο VLSFO είναι ίση με 10,000 TEU, καθώς δεν απαιτείται κάποιος επιπλέον χώρος για την αποθήκευση του καυσίμου. Το καύσιμο που μπορεί να μεταφέρει τα λιγότερα εμπορευματοκιβώτια συγκριτικά με όλα τα υπόλοιπα είναι το υδρογόνο, το οποίο μπορεί να μεταφέρει 9,448 TEU. Η απώλεια των 512 TEU οφείλεται στη πολύ μικρή πυκνότητα του υδρογόνου, η οποία συνεπάγεται δεξαμενές πολύ μεγάλου όγκου, με ιδιαίτερα ενισχυμένη μόνωση για την αποθήκευση της απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου για τη πραγματοποίηση ενός ταξιδιού, στην απαιτούμενη θερμοκρασία.

4.6 Οικονομική Ανάλυση

Για την οικονομική ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί στη παρούσα διπλωματική εργασία, θα θεωρηθούν οι ακόλουθες συνθήκες, οι οποίες θα παραμείνουν αμετάβλητες για όλα τα Case Studies και όλα τα καύσιμα, εκτός από κάποιες συγκεκριμένες τιμές, η μεταβολή των οποίων θα αποτελέσει τα Case Studies.

- Το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας του επενδυτή είναι ίσο με $i = 10\%$.
- Η διάρκεια ζωής του υπό μελέτη πλοίου θεωρείται ότι είναι 25 χρόνια. Συνεπώς, για τη συγκεκριμένη επένδυση τα έσοδα και τα έξοδα που προκύπτουν από τη λειτουργία του πλοίου από το 1^ο έτος λειτουργίας του έως το 25^ο.
- Για την αγορά του υπό μελέτη πλοίου, το οποίο λειτουργεί υπό οποιοδήποτε είδους καύσιμο, ο πλοιοκτήτης δίνει ένα ποσό από ίδια κεφάλαια και δανείζεται τα υπόλοιπα χρήματα που απαιτούνται για τη κάλυψη του CAPEX. Πιο συγκεκριμένα, από το συνολικό ποσό του CAPEX ο πλοιοκτήτης εξοφλεί το 30% με ίδια κεφάλαια και τα υπόλοιπα 70% με τη χρήση δανείου.
- Το δάνειο που χρησιμοποιείται για την κτήση του πλοίου, έχει υποτεθεί πως έχει επιτόκιο 5% και πως ο χρόνος αποπληρωμής του είναι 10 χρόνια. Συνεπώς η δόση δανείου που καλείται να πληρώσει ο πλοιοκτήτης για αυτά τα 10 χρόνια, υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης,

$$CRF = \text{Δάνειο} \cdot \frac{0.05 \cdot (1.05)^{10}}{(1.05)^{10} - 1} \quad 4.52$$

- Η μεγαλύτερη πλειοψηφία των πλοίων στο πέρας της ζωής τους πηγαίνει για scrap. Σε αυτό το στάδιο της ζωής τους η αξία τους είναι πολύ μικρή αλλά όχι αμελητέα για τα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Για αυτό τον λόγο γίνεται η υπόθεση ότι το υπό μελέτη πλοίο, στο πέρας των 25 χρόνων έχει αξία ίση με το 5% του CAPEX.
- Ο φορολογικός συντελεστής των κερδών ισούται με 24%.

4.6.1 Case Study 1: Τιμή καυσίμων και ναύλων σταθερή

Στο παρόν Case Study, θεωρείται ότι η τιμή των ναύλων, συνεπώς και τα έσοδα του πλοιοκτήτη παραμένουν σταθερά και για τα 25 χρόνια ζωής του υπό μελέτη πλοίου. Η τιμή των ναύλων αποτελεί τη μέση τιμή των ναύλων για μεταφορά ενός TEU από το λιμάνι του Rotterdam στο λιμάνι της Shanghai τον Οκτώβρη του 2022, ενώ εξετάζονται οι περιπτώσεις που το πλοίο ταξιδεύει πλήρως φορτωμένο και φορτωμένο στο 70% της συνολικής χωρητικότητάς του. Ταυτόχρονα, γίνεται η υπόθεση ότι η τιμή των εναλλακτικών καυσίμων παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της επένδυσης. Η τιμή αυτή είναι η μέση τιμή που επικρατούσε στην αγορά στις αρχές του 2022, καθώς για εκείνη τη περίοδο βρέθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα. Συνεπώς, με τη χρήση των τιμών αυτών και με υπολογισμένες τις ετήσιες καταναλώσεις καυσίμου, γίνεται υπολογισμός των απαραίτητων οικονομικών μεταβλητών, οι οποίες χρειάζονται για να μπορέσει να αξιολογηθεί η επένδυση

Πίνακας 4.14: Τιμές καυσίμου 2022

Καύσιμο	Τιμή Καυσίμου [\$/t]
VLSFO	600
LNG	450
Methanol	500
Ammonia	350
Hydrogen	2,500

Η αξιολόγηση της επένδυσης για το κάθε πλοίο στο παρόν Case Study πραγματοποιείται με τη χρήση δύο μεθόδων, οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια. Σε πρώτο στάδιο εξετάζεται το κατά πόσο συμφέρει η επένδυση, αν θεωρηθεί ότι το πλοίο είναι πλήρως φορτωμένο.

I) Net Present Value (NPV)

Στη μέθοδο αυτή, υπολογίζεται η Καθαρά Παρούσα Αξία (NPV) του υπό μελέτη πλοίου. Ο υπολογισμός αυτός, πραγματοποιείται με τη χρήση της σχέσης,

$$NPV = \sum_1^{25} \frac{\text{Χρηματοροή}}{(1+i)^t} - \text{Αρχική επένδυση} \quad 4.53$$

Όπου για την οικονομική μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ισχύουν τα ακόλουθα,

- Αρχική επένδυση = CAPEX
- Χρηματοροή = Έσοδα - Έξοδα - Φόροι
- Έσοδα = μεταφορική ικανότητα [TEU] · ναύλος [\$/TEU] · Ετήσια ταξίδια
- Έξοδα = OPEX
- Φόροι = (Έσοδα - Έξοδα - Απόσβεση) · 24%

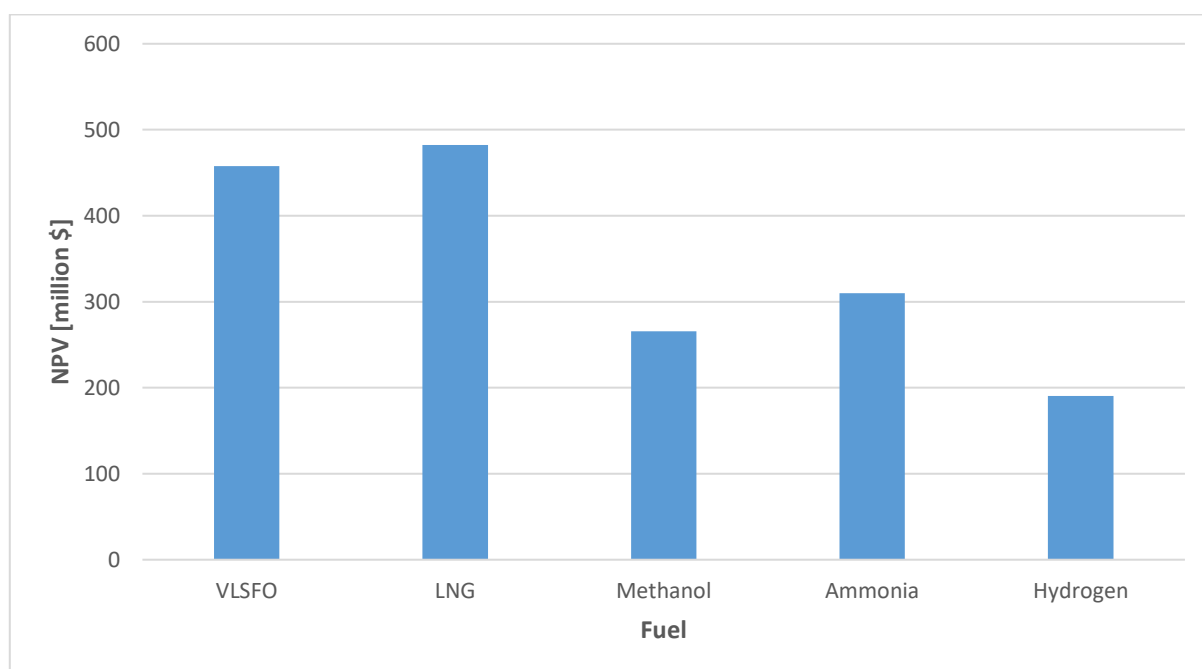
Ο υπολογισμός της καθαρής παρούσας αξίας υπολογίζεται για κάθε σενάριο, θεωρώντας ότι το κόστος κεφαλαίου είναι ίσο με 10%. Συνεπώς, με τη χρήση του excel και του παρακάτω πίνακα, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του NPV για το υπό μελέτη πλοίο όταν λειτουργεί υπό οποιοδήποτε καύσιμο.

Πίνακας 4.15: Υπολογισμός NPV για χρήση καυσίμου LNG

Έτος	Έξοδα	Προσδοκώμενος ναύλος	Έσοδα	Βάση Φόρου	Φόρος	Χρηματοροή
0	141,036,008.67	-	-	-	-	-
1.00	43,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	79,582,632.19	19,099,831.73	65,842,168.80
2.00	43,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	79,582,632.19	19,099,831.73	65,842,168.80
3.00	43,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	79,582,632.19	19,099,831.73	65,842,168.80
4.00	43,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	79,582,632.19	19,099,831.73	65,842,168.80
5.00	46,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	76,582,632.19	18,379,831.73	63,562,168.80
6.00	43,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	79,582,632.19	19,099,831.73	65,842,168.80
7.00	43,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	79,582,632.19	19,099,831.73	65,842,168.80
8.00	43,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	79,582,632.19	19,099,831.73	65,842,168.80
9.00	43,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	79,582,632.19	19,099,831.73	65,842,168.80
10.00	46,810,523.97	1,184.25	128,752,524.49	76,582,632.19	18,379,831.73	63,562,168.80
11.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
12.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
13.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
14.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
15.00	34,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	89,563,366.90	21,448,319.53	73,279,046.84
16.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
17.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84

18.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
19.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
20.00	34,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	89,563,366.90	21,448,319.53	73,279,046.84
21.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
22.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
23.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
24.00	31,025,158.12	1,184.25	128,752,524.49	92,563,366.90	22,168,319.53	75,559,046.84
25.00	31,025,158.12	1,184.25	135,547,260.65	99,419,798.48	23,860,751.63	80,918,415.17
NPV						482,425,661.64

Συνεπώς, με τη μέθοδο αυτή προκύπτει ότι για $i=10\%$, σε βάθος χρόνου 25 έτη, η επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο που πραγματοποιεί διαρκώς πλήρως φορτωμένα ταξίδια θα έχει NPV σύμφωνα με την εικόνα 4.4.



Εικόνα 4.4: NPV επένδυσης για $i=10\%$ και πλήρως φορτωμένο πλοίο

Στην εικόνα 4.4, σε αρχικό στάδιο παρατηρείται ότι για κάθε είδος καυσίμου, υπό τις συνθήκες που έχουν ήδη αναφερθεί, το NPV είναι θετικό. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε περίπτωση, η επένδυση είναι συμφέρουσα και έχει νόημα η πραγματοποίησή της. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η μεγαλύτερη κερδοφορία του containership πραγματοποιείται όταν αυτό λειτουργεί με καύσιμο υδροποιημένο φυσικό αέριο, όταν εξετάζονται οι τιμές που κυκλοφορούσαν στις αρχές του 2022 στην αγορά. Το γεγονός αυτό, είναι ιδιαίτερα σπουδαίο, καθώς δείχνει ότι υπό αυτό το σενάριο, το LNG το οποίο αποτελεί ένα πιο πράσινο καύσιμο από τα μέχρι στιγμής χρησιμοποιούμενα, μπορεί να φέρει ακόμη μεγαλύτερα έσοδα στον

πλοιοκτική. Τέλος, όπως ήταν αναμενόμενο, το υδρογόνο αποτελεί το καύσιμο που δίνει τη μικρότερη δυνατότητα κέρδους στον πλοιοκτική, από όλα τα υπόλοιπα καύσιμα.

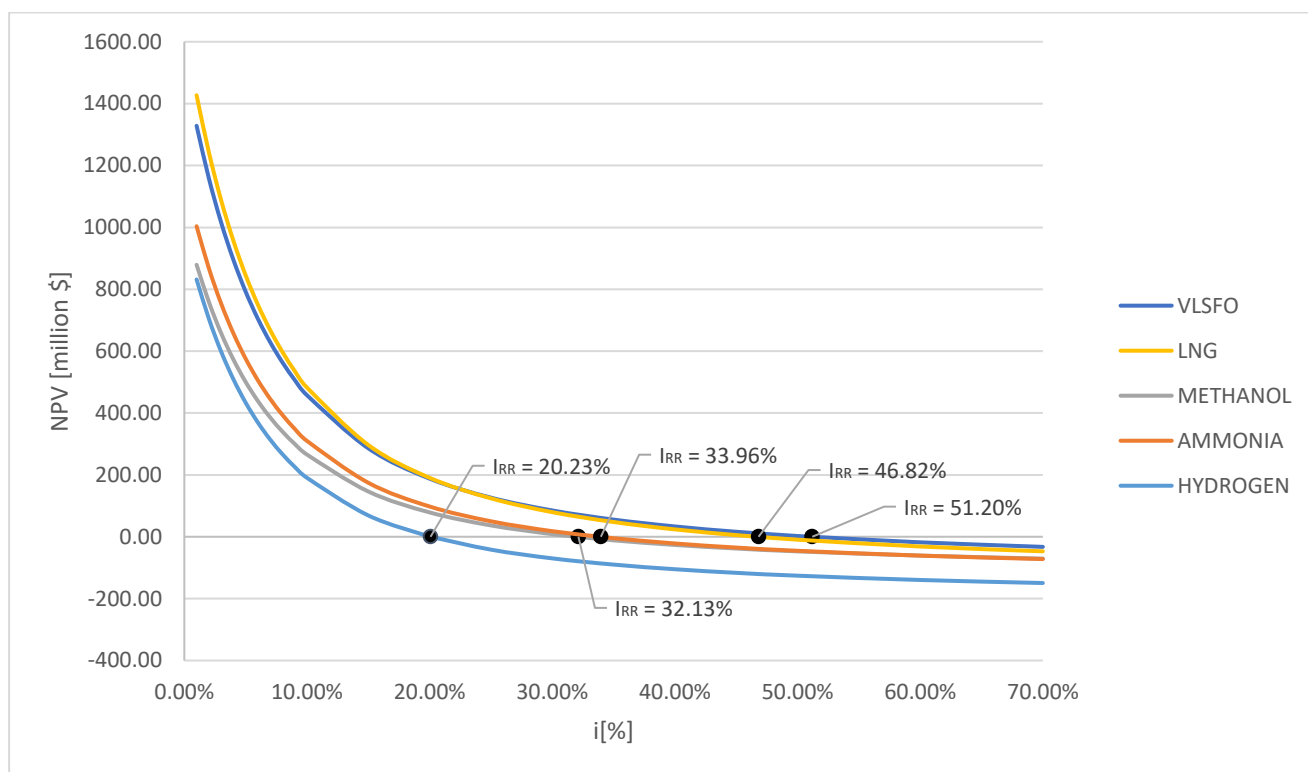
II) Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (i_{RR})

Στη συνέχεια, ακολουθεί το δεύτερο κριτήριο αξιολόγησης της επένδυσης για το παρόν Case Study. Στο κριτήριο αυτό, εξετάζεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (i_{RR}). Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης αποτελεί το κόστος κεφαλαίου για το οποίο το NPV της επένδυσης ισούται με μηδέν. Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο πιο ασφαλής και επικερδής είναι η επένδυση.

Για τον υπολογισμό του i_{RR} , πραγματοποιείται υπολογισμός του NPV για ένα εύρος τιμών του κόστους κεφαλαίου και στη συνέχεια, υπολογίζεται η τιμή αυτή που μηδενίζεται το NPV. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται συγκεντρωτικός πίνακας με τη τιμή της καθαρής παρούσας αξίας για διάφορες τιμές του κόστους κεφαλαίου, ενώ και συγκεντρωτικό διάγραμμα που δείχνει τη μεταβολή.

Πίνακας 4.16: NPV επένδυσης για διαφορετικές τιμές κόστους κεφαλαίου

i	NPV [million \$]				
	VLSFO	LNG	METHANOL	AMMONIA	HYDROGEN
-					
1.00%	1328.40	1427.09	879.15	1003.72	831.63
2.00%	1158.77	1242.96	759.12	868.04	704.81
3.00%	1015.96	1087.97	658.20	753.94	598.60
4.00%	895.10	956.83	572.93	657.51	509.19
5.00%	792.28	845.30	500.50	575.58	433.53
6.00%	704.37	749.95	438.66	505.61	369.16
7.00%	628.82	668.04	385.61	445.57	314.14
8.00%	563.56	597.31	339.86	393.79	266.85
9.00%	506.93	535.93	300.22	348.91	226.01
10.00%	457.54	482.43	265.71	309.83	190.56
15.00%	285.96	296.67	146.39	174.60	68.90
20.00%	187.89	190.63	78.76	97.85	0.62
25.00%	126.46	124.29	36.71	50.09	-41.61
30.00%	85.04	79.60	8.55	18.06	-69.85
35.00%	55.44	47.70	-11.48	-4.73	-89.94
40.00%	33.31	23.85	-26.40	-21.72	-104.93
45.00%	16.15	5.37	-37.94	-34.85	-116.54
50.00%	2.46	-9.37	-47.12	-45.31	-125.80
60.00%	-18.02	-31.39	-60.82	-60.93	-139.64
70.00%	-32.60	-47.08	-70.56	-72.03	-149.51



Εικόνα 4.5: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης για πλήρως φορτωμένο πλοίο

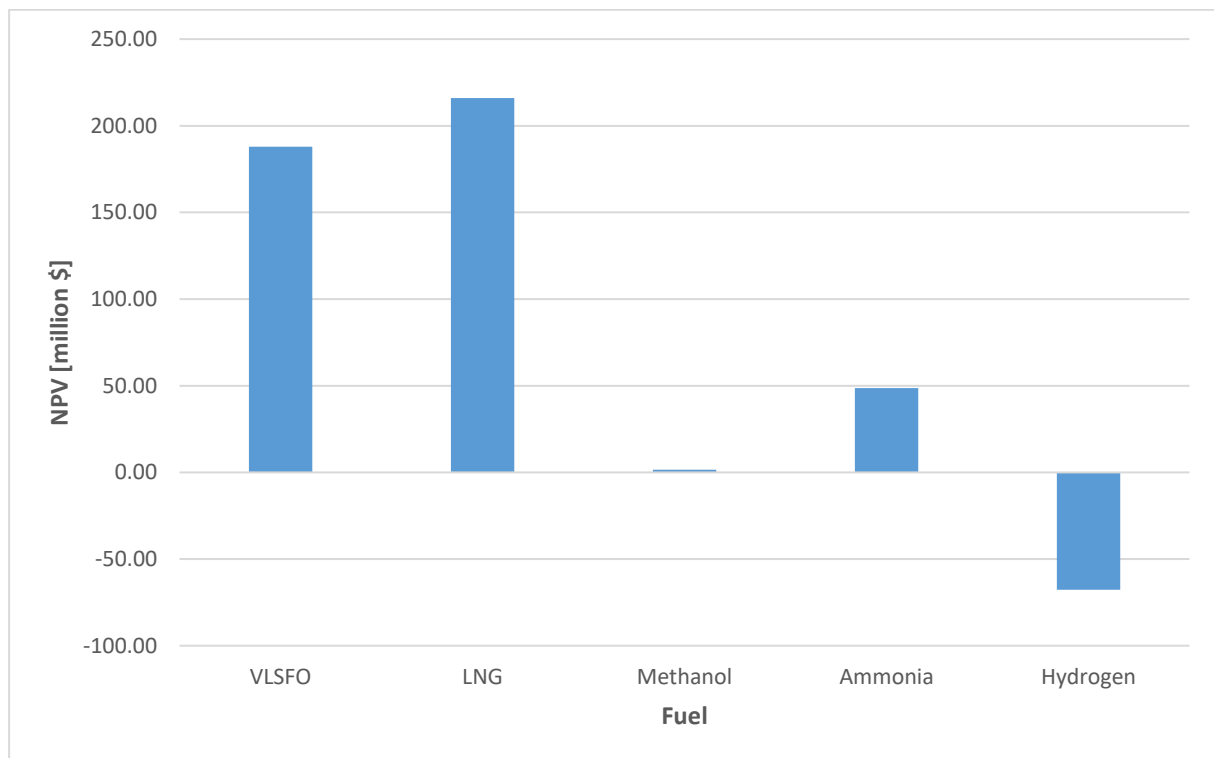
Στην εικόνα 4.5, φαίνεται η διακύμανση της καθαρής παρούσας αξίας της επένδυσης συναρτήσει του κόστους ευκαιρίας, για όλα τα καύσιμα με τα οποία μπορεί να λειτουργήσει το υπό μελέτη containership. Επιπλέον, στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης για κάθε είδος καύσιμο, με τη χρήση του οποίου εξάγονται κάποια σημαντικά συμπεράσματα για την επένδυση. Σε πρώτη φάση, ένα σπουδαίο συμπέρασμα που προκύπτει, αποτελεί το γεγονός ότι για τη λειτουργία του υπό μελέτη containership το οποίο εκτελεί 11 πλήρως φορτωμένα ταξίδια κάθε χρόνο και με τιμή των ναύλων σταθερή και ίση με αυτή του Οκτώβρη του 2022, η επένδυση συμφέρει και είναι ασφαλής για όλα τα καύσιμα. Αυτό συμβαίνει επειδή όλα τα υπολογισθέντα IRR είναι μεγαλύτερα από εκείνο του επιθυμητού κόστους ευκαιρίας $i=10\%$. Ακόμη, είναι αξιοσημείωτο ότι με τη μέθοδο του NPV φάνηκε το LNG να αποτελεί τη πιο συμφέρουσα επένδυση καθώς είχε μεγαλύτερο NPV στο $i=10\%$. Ωστόσο, με τη μέθοδο του εσωτερικού βαθμού απόδοσης, φαίνεται ότι το VLSFO αποτελεί τη πιο επικερδή και ασφαλή επένδυση. Το γεγονός αυτό, δείχνει το πόσο σημαντικό είναι να εξετάζεται η επένδυση και με τους δύο τρόπους για μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

Έπειτα, εξετάζεται το σενάριο το υπό μελέτη πλοίο να εκτελεί 11 ταξίδια ετησίως με 70% πληρότητα φορτίου. Οι μεθοδολογίες που ακολουθούνται είναι ίδιες με εκείνες που έλαβαν χώρα στο προηγούμενο σενάριο.

I) Net Present Value (NPV)

Ο υπολογισμός του NPV πραγματοποιήθηκε με τον τρόπο που έχει ήδη παρουσιαστεί. Η μόνη διαφορά με τη προηγούμενη περίπτωση είναι ότι για τον υπολογισμό των εσόδων, χρησιμοποιείται η σχέση,

$$\text{Έσοδα} = 0.7 \cdot \text{μεταφορική ικανότητα [TEU]} \cdot \text{ναύλος [$/TEU]} \cdot \text{Ετήσια ταξίδια} \quad 4.54$$



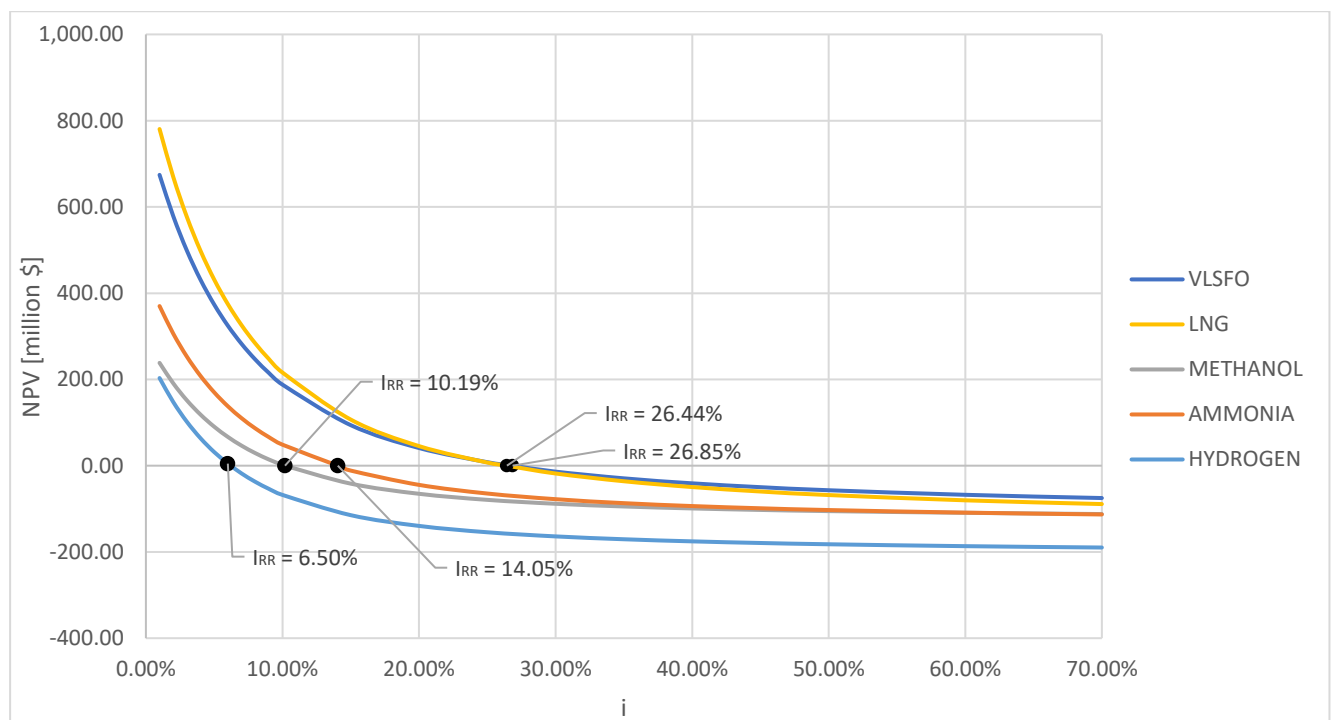
Εικόνα 4.6: NPV επένδυσης για $i=10\%$ και 70% φορτωμένο πλοίο

Στην εικόνα 4.6, σε αρχικό στάδιο παρατηρείται ότι υπό τις συνθήκες που έχουν ήδη αναφερθεί, το NPV δεν είναι για όλα τα πιθανά καύσιμα θετικό. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε περίπτωση, η επένδυση είναι επικερδής και έχει νόημα η πραγματοποίησή της, εκτός από όταν το χρησιμοποιούμενο καύσιμο για τη πρόωση του πλοίου είναι το υδρογόνο. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η μεγαλύτερη κερδοφορία του containership πραγματοποιείται όταν αυτό

λειτουργεί με καύσιμο υγροποιημένο φυσικό αέριο, όταν εξετάζονται οι τιμές που κυκλοφορούν αυτή τη στιγμή στην αγορά, ομοίως με όταν το πλοίο πλέει πλήρως φορτωμένο. Επιπλέον, η καθαρά παρούσα αξία της μεθανόλης είναι οριακά μεγαλύτερη του μηδενός, γεγονός που δεν την καθιστά μια ιδιαίτερα ελκτική επένδυση.

II) Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (i_{RR})

Ακολουθεί ο υπολογισμός του εσωτερικού βαθμού απόδοσης για την επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο όταν η πρόωση του γίνεται με κάθε ένα από τα καύσιμα ενδιαφέροντος.



Εικόνα 4.7: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης για 70% φορτωμένο πλοίο

Στην εικόνα 4.7, παρουσιάζεται η μεταβολή της καθαρής παρούσας αξίας συναρτήσει του κόστους ευκαιρίας, για όλα τα είδη καυσίμου με τα οποία θα μπορούσε να λειτουργήσει το υπό μελέτη containership. Από το διάγραμμα είναι προφανές ότι, όταν το πλοίο λειτουργεί με VLSFO, LNG, αμμωνία η επένδυση συμφέρει για το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας με περιθώριο τουλάχιστον 4%. Συνεπώς για τα καύσιμα αυτά, μπορεί να πραγματοποιηθεί άφοβα η επένδυση με υψηλά κέρδη για τον πλοιοκτήτη. Παρά το γεγονός ότι και η μεθανόλη έχει εσωτερικό βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο του $i=10\%$, η κερδοφορία της είναι πολύ οριακή, αποτέλεσμα που συμφωνεί με τη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας. Για το υδρογόνο, όμως, ο

εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι σχεδόν 4% μικρότερος από το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας. Το γεγονός αυτό, καθιστά την επένδυση μη συμφέρουσα και μη επιθυμητή, το οποίο επίσης συνάδει και με τα αποτελέσματα της προηγούμενης μεθόδου.

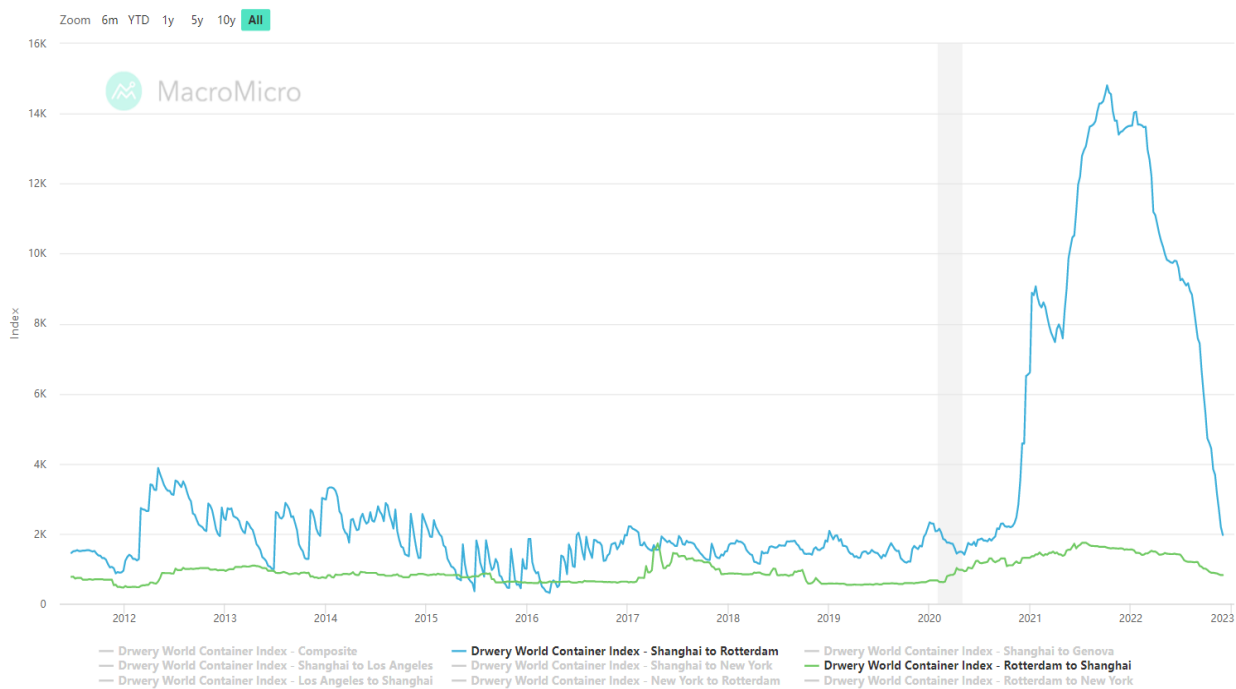
4.6.2 Case Study 2: Τιμή καυσίμου και ναύλων μεταβλητή

Στο δεύτερο σενάριο, θα εξεταστεί το κατά πόσο συμφέρει η επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο, όταν αυτό πλέει πλήρως φορτωμένο, και η τιμή του χρησιμοποιούμενου καυσίμου, μεταβάλλεται με τον ακόλουθο τρόπο:

- 1) Σταθερή για όλη τη διάρκεια της επένδυσης
- 2) Αυξάνεται κατά 1.5% κάθε χρόνο
- 3) Αυξάνεται κατά 3% κάθε χρόνο

Αρχικά, θα μελετηθεί το κατά πόσο αξίζει να πραγματοποιηθεί η επένδυση δεδομένου ότι σε όλη τη διάρκεια της ζωής του πλοίου, το κόστος για μεταφορά ενός Container TEU μεταβάλλεται με το πέρασμα του χρόνου, σύμφωνα με τα στατιστικά της προηγούμενης δεκαετίας. Στη συνέχεια, θα γίνει μελέτη, για το ποιός είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος που πρέπει να υπάρχει στην αγορά, ώστε να συμφέρει τον πλοιοκτήτη να αγοράσει και να λειτουργήσει το υπό μελέτη πλοίο.

Πρώτο στάδιο στη μελέτη αυτού του σεναρίου, αποτελεί ο υπολογισμός των ναύλων του πλοίου για τη διαδρομή Port of Rotterdam - Port of Shanghai, την τελευταία δεκαετία. Για τη πραγματοποίηση των υπολογισμών αυτών χρησιμοποιήθηκαν βάσεις δεδομένων που κρατούν αρχείο για τη διακύμανση των ναύλων στη πάροδο των χρόνων ^[32]. Υπολογίστηκαν 4 τιμές ναύλων ετησίως, δηλαδή μια τιμή ανά 3 μήνες κάθε έτους για τη κάθε διαδρομή. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τεσσάρων τιμών και έτσι υπολογίστηκε ο μέσος ναύλος για κάθε έτος και για κάθε διαδρομή. Τέλος, με τον μέσο όρο των ναύλων για τις δύο διαδρομές, υπολογίστηκε ο μέσος ναύλος του κυκλικού ταξιδιού για κάθε έτος στο χρονικό διάστημα 2012-2022. Στον πίνακα 4.17 φαίνονται αναλυτικά όσα περιγράφηκαν.



Εικόνα 4.8: Ναύλα για διαδρομή Shanghai-Rotterdam, Rotterdam-Shanghai 2012-2022 (Πηγή: MacroMicro)

Πίνακας 4.17: Υπολογισμός μέσου ετήσιου ναύλου (\$/TEU) για την επιθυμητή διαδρομή

Έτος	Rotterdam – Shanghai (\$/FEU)	Shanghai – Rotterdam (\$/FEU)	Rotterdam - Shanghai (\$/TEUaver)	Shanghai - Rotterdam(\$/TEUaver)	Average (\$/TEUaver)
2012	505	1350	381	1210	795.5
2012	608	2600			
2012	960	3500			
2013	975	2230	462.25	1070.875	766.5625
2013	968	2700			
2013	1075	2067			
2013	880	2300	404.625	1044.25	724.4375
2013	775	1500			
2013	770	1940			
2014	770	1940	404.625	1044.25	724.4375
2014	853	1984			
2014	799	2630			
2014	815	1800	391.125	640.5	515.8125
2015	826	2105			
2015	819	1612			
2015	780	640	311.625	737.125	524.375
2015	704	767			
2015	704	767			
2016	600	1849	311.625	737.125	524.375
2016	604	611			
2016	656	1689			
2016	633	1748			

2017	624	2210	510.5	875.375	692.9375
2017	1076	1756			
2017	1200	1712			
2017	1184	1325			
2018	857	1685	383.75	787.75	585.75
2018	840	1470			
2018	795	1601			
2018	578	1546			
2019	576	1839	284.25	743.375	513.8125
2019	542	1431			
2019	565	1374			
2019	591	1303			
2020	666	2325	501.625	1047.875	774.75
2020	825	1746			
2020	1222	1839			
2020	1300	2473			
2021	1357	6606	749.125	5008.625	2878.875
2021	1402	7973			
2021	1684	11196			
2021	1550	14294			
2022	1549	13658	629.25	4920.25	2774.75
2022	1400	12221			
2022	1195	9799			
2022	890	3684			

Στον πίνακα 4.18, παρουσιάζονται τα ετήσια έσοδα του υπό μελέτη πλοίου για 11 πλήρως φορτωμένα ταξίδια, ανάλογα με το καύσιμο λειτουργίας του και για τα 25 χρόνια ζωής του. Τα ετήσια έσοδα υπολογίζονται με τη χρήση των στατιστικών ναύλων που υπολογίστηκαν στον προηγούμενο πίνακα.

Πίνακας 4.18: Έσοδα για μεταβλητά ναύλα και 11 πλήρως φορτωμένα ταξίδια ετησίως

Έτος	Έσοδα				
	VLSFO	LNG	METHANOL	AMMONIA	HYDROGEN
-					
1	87,505,000.00	86,487,340.71	85,719,487.42	84,761,860.91	83,022,503.27
2	84,321,875.00	83,341,234.58	82,601,313.11	81,678,521.69	80,002,435.78
3	79,688,125.00	78,761,373.83	78,062,113.35	77,190,032.20	75,606,052.43
4	56,739,375.00	56,079,511.54	55,581,625.53	54,960,688.10	53,832,866.08
5	57,681,250.00	57,010,432.79	56,504,281.86	55,873,036.85	54,726,492.96
6	76,223,125.00	75,336,670.84	74,667,815.61	73,833,654.30	72,318,549.16
7	64,432,500.00	63,683,167.59	63,117,774.68	62,412,646.17	61,131,906.08
8	56,519,375.00	55,862,070.08	55,366,114.56	54,747,584.74	53,624,135.71
9	85,222,500.00	84,231,385.56	83,483,561.13	82,550,913.57	80,856,925.72
10	316,676,250.00	312,993,391.55	310,214,568.64	306,748,965.85	300,454,316.90
11	305,222,500.00	301,672,845.54	298,994,528.88	295,654,272.24	289,587,292.20
12	87,505,000.00	86,487,340.71	85,719,487.42	84,761,860.91	83,022,503.27
13	84,321,875.00	83,341,234.58	82,601,313.11	81,678,521.69	80,002,435.78

14	79,688,125.00	78,761,373.83	78,062,113.35	77,190,032.20	75,606,052.43
15	56,739,375.00	56,079,511.54	55,581,625.53	54,960,688.10	53,832,866.08
16	57,681,250.00	57,010,432.79	56,504,281.86	55,873,036.85	54,726,492.96
17	76,223,125.00	75,336,670.84	74,667,815.61	73,833,654.30	72,318,549.16
18	64,432,500.00	63,683,167.59	63,117,774.68	62,412,646.17	61,131,906.08
19	56,519,375.00	55,862,070.08	55,366,114.56	54,747,584.74	53,624,135.71
20	85,222,500.00	84,231,385.56	83,483,561.13	82,550,913.57	80,856,925.72
21	316,676,250.00	312,993,391.55	310,214,568.64	306,748,965.85	300,454,316.90
22	305,222,500.00	301,672,845.54	298,994,528.88	295,654,272.24	289,587,292.20
23	87,505,000.00	86,487,340.71	85,719,487.42	84,761,860.91	83,022,503.27
24	84,321,875.00	83,341,234.58	82,601,313.11	81,678,521.69	80,002,435.78
25	85,688,125.00	85,813,174.27	84,506,204.37	84,115,332.63	86,042,954.27

1. Σταθερή τιμή καυσίμου

Στη περίπτωση αυτή η τιμή του καυσίμου παραμένει σταθερή και για τα 25 χρόνια λειτουργίας του υπό μελέτη πλοίου και ισούται με αυτή που έχουν τα καύσιμα στις αρχές του 2022, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.14.

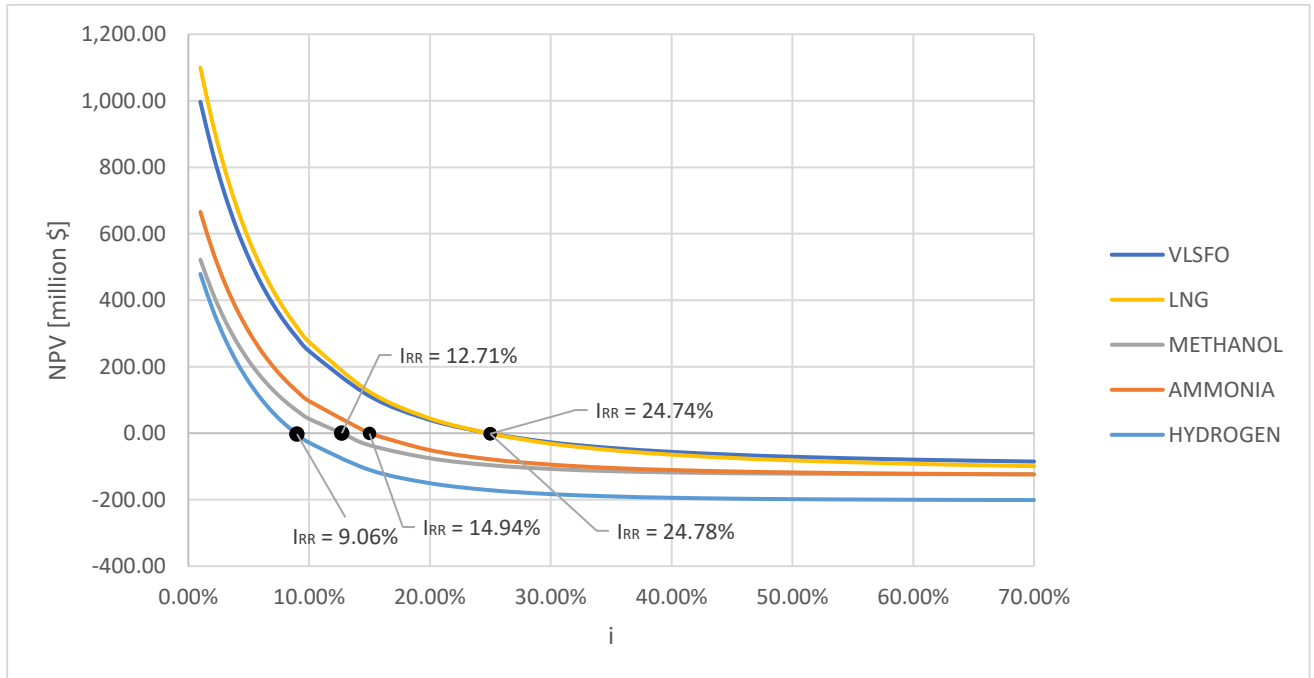
Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι υπολογισμοί, όπως έχουν παρουσιαστεί προηγουμένως, για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο καύσιμο.

Πίνακας 4.19: NPV για σταθερή τιμή καυσίμου και μεταβλητά ναύλα

Είδος Καυσίμου	NPV [\$]
VLSFO	246,792,025.18
LNG	274,268,615.84
Methanol	43,043,867.70
Ammonia	96,417,100.64
Hydrogen	-24,061,062.98

Στον πίνακα 4.19, παρουσιάζονται οι τιμές της καθαρής παρούσας αξίας για την επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο, για κάθε είδος καυσίμου, όταν η τιμή του καυσίμου είναι σταθερή και τα ναύλα μεταβάλλονται σύμφωνα με τη τελευταία δεκαετία. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η επένδυση συμφέρει για τα καύσιμα VLSFO, LNG, μεθανόλη, αμμωνία αφού το NPV

είναι μεγαλύτερο του μηδενός, ενώ το μέγιστο κέρδος φαίνεται να επιτυγχάνεται για Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο. Για καύσιμο υδρογόνο, η καθαρά παρούσα αξία προκύπτει αρνητική, γεγονός που καθιστά την επένδυση μη κερδοφόρα.



Εικόνα 4.9: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης για σταθερή τιμή καυσίμου

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την εικόνα 4.9, είναι ότι για τη λειτουργία του υπό μελέτη containership με VLSFO, LNG, μεθανόλη, αμμωνία, για μεταβλητά ναύλα και σταθερή τιμή καυσίμου, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας του πλοιοκτήτη. Γεγονός που επιβεβαιώνει τη κερδοφορία της επένδυσης για όποιο από αυτά τα καύσιμα και αν επιλεγθεί. Αντιθέτως, για καύσιμο υδρογόνο ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης προκύπτει μικρότερος από το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας, γεγονός που καθιστά την επένδυση μη ασφαλή.

$$2. \text{ Τιμή καυσίμου} = (1.015)^N \cdot (\text{Τιμή καυσίμου 2022}) \$/t$$

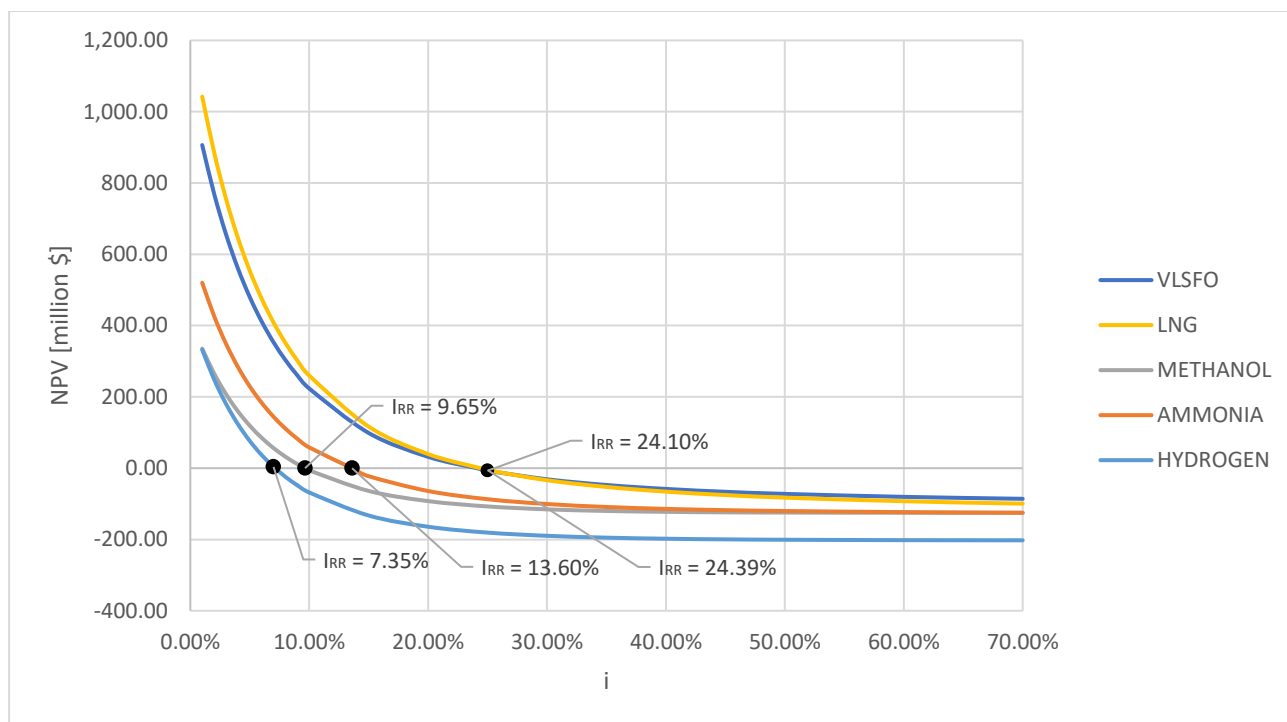
Στη περίπτωση αυτή, γίνεται η υπόθεση, πως όλα τα έσοδα και τα έξοδα του πλοίου παραμένουν ίδια με αυτά της προηγούμενης υπόθεσης, εκτός από τα έξοδα καυσίμου που χρησιμοποιείται για τη πρόωση του πλοίου και για τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών του ή των Fuel Cells αν το καύσιμο είναι το υδρογόνο. Μάλιστα θεωρείται ότι τον 1ο χρόνο λειτουργίας του πλοίου το κόστος του καυσίμου είναι ίσο με τη τιμή του καυσίμου το 2022,

ενώ με κάθε χρόνο που περνάει η τιμή του αυξάνεται κατά 1.5%. Το σενάριο αυτό βασίζεται στην ενεργειακή κρίση που υπάρχει τη δεδομένη περίοδο σε παγκόσμιο επίπεδο, η οποία ωθεί τις τιμές των καυσίμων σε πολύ υψηλά επίπεδα. Στη συνέχεια ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τη τιμή του NPV για το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας του επενδυτή, καθώς και διάγραμμα με τη μεταβολή του κόστους NPV συναρτήσει του κόστους ευκαιρίας και τη τιμή του εσωτερικού βαθμού απόδοσης.

Πίνακας 4.20: NPV για αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 1.5%/έτος και μεταβλητά ναύλα

Είδος Καυσίμου	NPV [\$]
VLSFO	223,382,592.98
LNG	259,742,223.90
Methanol	-6,229,189.46
Ammonia	58,118,578.42
Hydrogen	-63,728,822.71

Στον πίνακα 4.20, παρουσιάζονται οι τιμές της καθαρής παρούσας αξίας για την επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο, για κάθε είδος καυσίμου, όταν η τιμή του καυσίμου αυξάνεται κατά 1.5% κάθε χρόνο και τα ναύλα μεταβάλλονται σύμφωνα με τη τελευταία δεκαετία. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η επένδυση συμφέρει για VLSFO, LNG, αμμωνία αφού το NPV είναι μεγαλύτερο του μηδενός, ενώ το μέγιστο κέρδος φαίνεται να επιτυγχάνεται για Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο. Η μεθανόλη και το υδρογόνο, έχουν NPV αρνητικό, γεγονός που δείχνει ότι δε συμφέρει να πραγματοποιηθεί η επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο το οποίο λειτουργεί με αυτά τα καύσιμα, υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες.



Εικόνα 4.10: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης για αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 1.5%/έτος

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την εικόνα, είναι ότι για τη λειτουργία του υπό μελέτη containership με VLSFO, LNG, αμμωνία, για μεταβλητά ναύλα και αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 1.5% κάθε χρόνο, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας του πλοιοκτήτη. Γεγονός που επιβεβαιώνει τη κερδοφορία της επένδυσης για τα καύσιμα αυτά, ακόμη και σε ένα αρκετά συντηρητικό σενάριο, όπως είναι αυτό. Ωστόσο, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης για τη μεθανόλη και το υδρογόνο είναι μικρότερος από το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας, με αποτέλεσμα η επένδυση να θεωρείται μη κερδοφόρα.

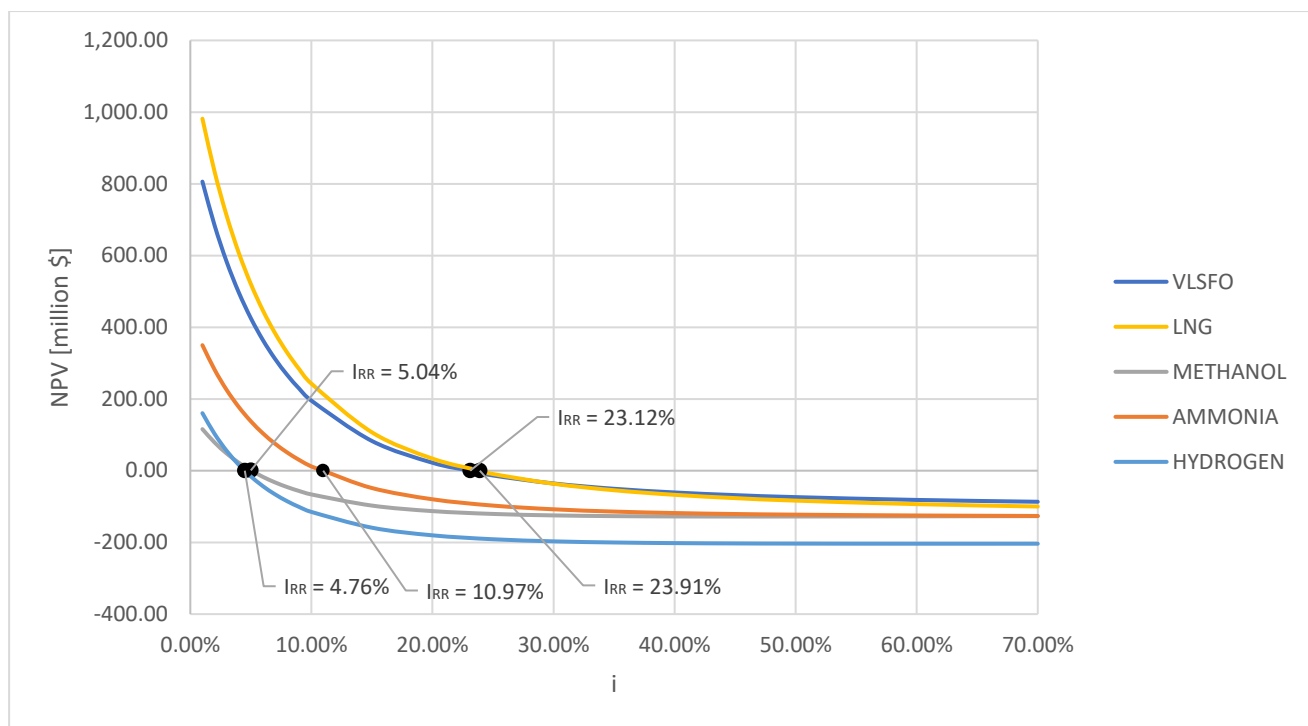
$$3. \text{ Τιμή καύσιμου} = (1.03)^N \cdot (\text{Τιμή καυσίμου 2022}) \$/t$$

Στην υπόθεση αυτή θεωρήθηκε ότι τα κόστος του καυσίμου θα αυξάνεται σταθερά κατά 3% κάθε χρόνο από τη στιγμή της έναρξης της λειτουργίας του πλοίου. Συνεπώς, τα ετήσια έξοδα λειτουργίας του πλοίου θα αυξηθούν περαιτέρω και θα διερευνηθεί, το κατά πόσο συμφέρει η επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο, ακόμη και στο πιο συντηρητικό σενάριο, γεγονός που παρέχει ασφάλεια και σιγουριά για την φερεγγυότητα των υπολογισμών. Οι μέθοδοι που ακολουθούν είναι ίδιοι με αυτούς που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα δύο σενάρια.

Πίνακας 4.21: NPV για αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 3%/έτος και μεταβλητά ναύλα

Fuel Type	NPV [\$]
VLSFO	195,255,223.96
LNG	242,703,476.66
Methanol	-66,277,668.77
Ammonia	11,727,896.85
Hydrogen	-110,673,057.84

Στον πίνακα 4.21, παρουσιάζονται οι τιμές της καθαρής παρούσας αξίας για την επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο, για κάθε είδος καυσίμου, όταν η τιμή του καυσίμου αυξάνεται κατά 3% κάθε χρόνο και τα ναύλα μεταβάλλονται σύμφωνα με τη τελευταία δεκαετία. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι η επένδυση συμφέρει για τα καύσιμα VLSFO, LNG και αμμωνία καθώς επιτυγχάνουν NPV μεγαλύτερο του 0. Αντιθέτως, όταν το υπό μελέτη πλοίο χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη ή υδρογόνο και το κόστος του καυσίμου αυξάνεται κατά 3% κάθε χρόνο, η επένδυση αποδεικνύεται μη κερδοφόρα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί, ότι με αυτή τη μέθοδο αξιολόγησης και υπό αυτές τις συνθήκες, το καύσιμο LNG αποτελεί το καλύτερο καύσιμο για τη μεγιστοποίηση του κέρδους του επενδυτή.



Εικόνα 4.11: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης για αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 3%/έτος

Το συμπέρασμα που προκύπτει από την εικόνα 4.11, είναι ότι για τη λειτουργία του υπό μελέτη containership με οποιοδήποτε από τα καύσιμα μελέτης, πλην της μεθανόλης και του υδρογόνου, για μεταβλητά ναύλα και αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 3% κάθε χρόνο, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος από το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας του πλοιοκτήτη. Γεγονός που επιβεβαιώνει τη κερδοφορία της επένδυσης για τα καύσιμα αυτά, σε ένα πάρα πολύ συντηρητικό και απαισιόδοξο σενάριο για τη διακύμανση της τιμής των καυσίμων στο μέλλον. Από την άλλη, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης για μεθανόλη και υδρογόνο, είναι μικρότερος από το επιθυμητό κόστος ευκαιρίας, γεγονός που καθιστά την επένδυση μη ελκτική για τον επενδυτή και που επιβεβαιώνει τους υπολογισμούς της μεθόδου της καθαρής παρούσας αξίας.

4. Τιμή καυσίμων στο μέλλον

Υπάρχει ένα ακόμη σενάριο το οποίο δε θα μελετηθεί λόγω απουσίας δεδομένων, είναι ένα από αυτά που ίσως ακολουθήσουν στο μέλλον, καθώς η αύξηση της παραγωγής, δηλαδή της προσφοράς, των εναλλακτικών καυσίμων θα αυξηθεί ραγδαία, πράγμα που πιθανώς να έχει ως επακόλουθο τη σταδιακή πτώση της τιμής τους. Επιπλέον, ένας άλλος παράγοντας που θα μπορούσε επηρεάσει τη πτώση της τιμής τους, είναι φοροελαφρύνσεις ή επιδοτήσεις που

παρέχονται από τα κράτη στα πλοία αυτά, ως επιβράβευση που χρησιμοποιούν εναλλακτικό καύσιμο για τη πρόωσή τους. Αντίθετα, όσο αφορά τα ήδη χρησιμοποιούμενα ορυκτά καύσιμα όπως είναι το VLSFO, η τιμή της του αναμένεται να αυξηθεί με τη πάροδο του χρόνου εξαιτίας της μείωσης αποθέματος πρώτων υλών για τη παρασκευή τους.

Στη συνέχεια του Case Study γίνεται η έρευνα για το ποια πρέπει να είναι η τιμή του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου (RFR), ώστε να έχει οικονομικό όφελος για τον πλοιοκτήτη η επένδυση, δηλαδή για $NPV \geq 0$. Στη συνέχεια, ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος που απαιτείται για να είναι η επένδυση κερδοφόρα, θα συγκριθεί με τον μέσο ναύλο της αγοράς για τη συγκεκριμένη διαδρομή, τα τελευταία 10 χρόνια. Η μελέτη αυτή θα πραγματοποιηθεί για τα ακόλουθα σενάρια:

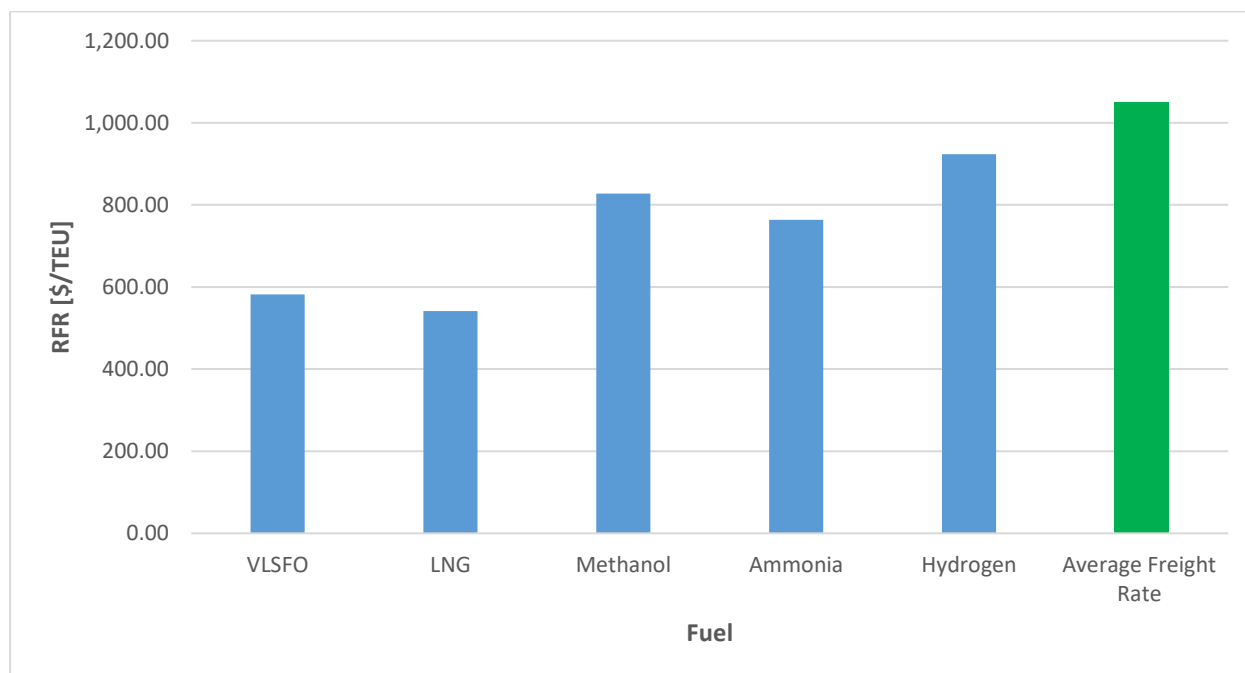
- Πραγματοποιούνται 11 πλήρως φορτωμένα ταξίδια ετησίως από το λιμάνι του Rotterdam στο λιμάνι της Shanghai και αντίστροφα
- Το επιθυμητό κόστος κεφαλαίου για την επένδυση θεωρείται σταθερό και ίσο με 10%
- Η τιμή του κάθε καυσίμου θεωρείται ότι μελλοντικά θα κυμανθεί σύμφωνα με τα τρία σενάρια που έλαβαν χώρα προηγουμένως
- Η μέση τιμή του ναύλου για τη μεταφορά ενός container TEU από το λιμάνι του Rotterdam στο λιμάνι της Shanghai και αντίστροφα, είναι ίση με $1,049.8 \frac{\$}{TEU}$ και ισούται με τον μέσο όρο των τιμών που κυμαινόταν η αγορά την προηγούμενη δεκαετία.

1. Σταθερή τιμή καυσίμου

Στο σενάριο αυτό, όπως και προηγουμένως, θεωρείται ότι η τιμή όλων των μελετώμενων καυσίμων, παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της ζωής του υπό μελέτη πλοίου, δηλαδή για 25 χρόνια. Ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος που προκύπτει για τη λειτουργία του πλοίου, υπό τις συνθήκες που έχουν αναφερθεί για κάθε είδος καυσίμου, φαίνεται στον πίνακα και συγκρίνεται στην εικόνα με τον μέσο ναύλο τα τελευταία 10 χρόνια.

Πίνακας 4.22: RFR για σταθερή τιμή καυσίμου

Fuel Type	RFR [\$/TEU]
VLSFO	581.85
LNG	541.69
Methanol	827.41
Ammonia	763.41
Hydrogen	917.17



Εικόνα 4.12: Σύγκριση RFR με μέσο ναύλο για σταθερή τιμή καυσίμου

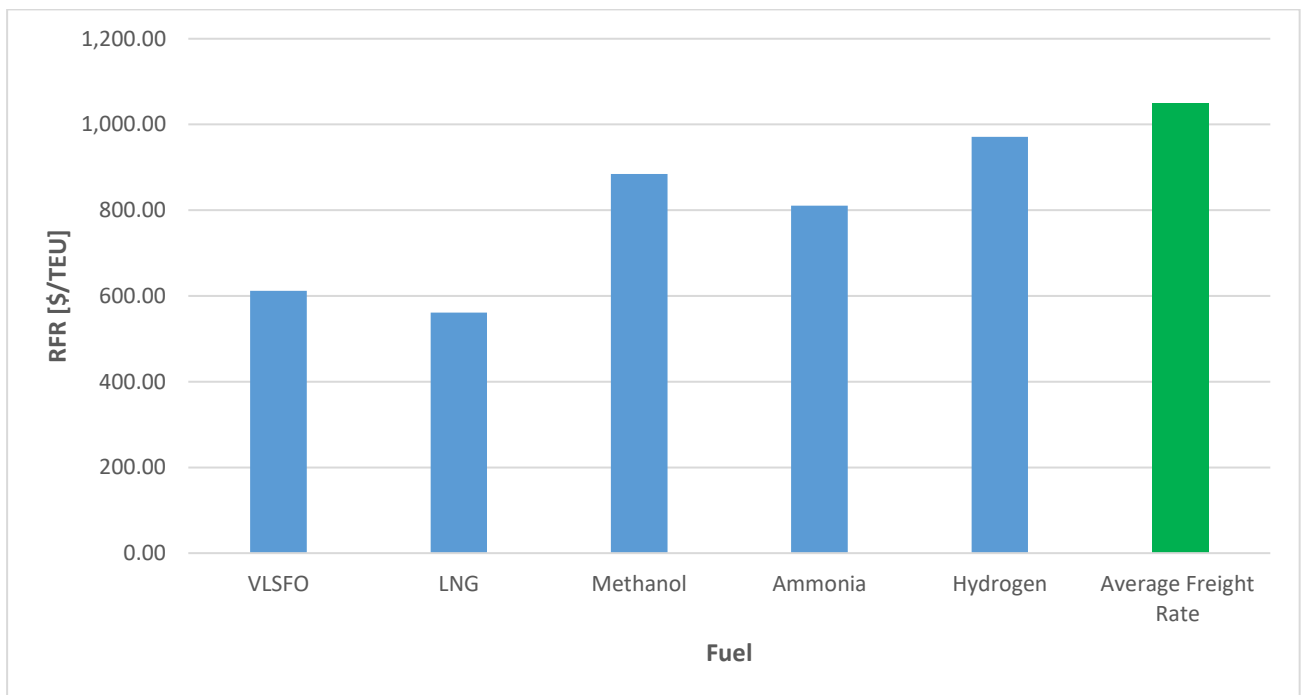
Από την εικόνα 4.12, γίνεται φανερό ότι για κάθε είδος καυσίμου που χρησιμοποιεί το υπό μελέτη πλοίο και για τιμή καυσίμου σταθερή και τα 25 χρόνια, ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος για να συμφέρει η πραγματοποίηση της επένδυσης, δηλαδή το NPV να είναι θετικό, είναι μικρότερος από τον μέσο ναύλο της τελευταίας δεκαετίας. Συνεπώς, για όποιο καύσιμο και αν χρησιμοποιηθεί για τη πρόωση του πλοίου, αν τα ναύλα κυμανθούν στα ίδια επίπεδα και την επόμενη 25ετία, αξίζει ο πλοιοκτήτης να προβεί στην αγορά του υπό μελέτη πλοίου.

$$2. \text{ Τιμή καυσίμου} = (1.015)^N \cdot (\text{Τιμή καυσίμου 2022}) \$/t$$

Η τιμή των καυσίμων θεωρείται ότι κάθε χρόνο αυξάνεται κατά 1.5%, σενάριο αρκετά συντηρητικό το οποίο όμως έχει νόημα γιατί εξετάζεται το κατά πόσο είναι σε θέση η επένδυση να ανταπεξέλθει και να συνεχίσει να είναι κερδοφόρα, ακόμη και στα πιο ανεπιθύμητα σενάρια. Ακολουθεί ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος για τη λειτουργία του πλοίου, υπό τις συνθήκες που έχουν αναφερθεί.

Πίνακας 4.23: RFR για αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 1.5%/έτος

Fuel Type	RFR [\$/TEU]
VLSFO	612.17
LNG	561.06
Methanol	827.41
Ammonia	810.51
Hydrogen	965.24



Εικόνα 4.13: Σύγκριση RFR με μέσο ναύλο για αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 1.5%/έτος

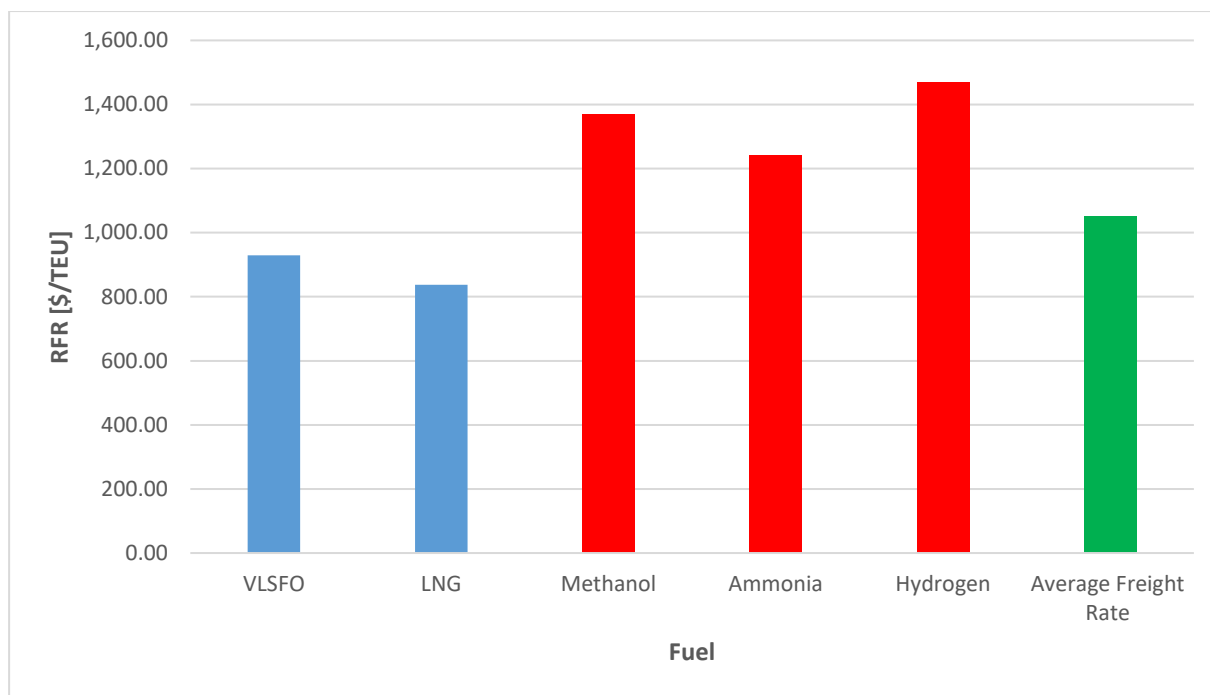
Στη περίπτωση όπου οι τιμές καυσίμου αυξάνονται κατά 1.5% κάθε έτος, τα αποτελέσματα είναι όμοια με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης. Δηλαδή, αν οι τιμές των ναύλων κυμανθούν στα ίδια επίπεδα τα επόμενα 25 χρόνια, η επένδυση θα είναι συμφέρουσα, αφού ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος για το υπό μελέτη πλοίο, είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερος από τον μέσο ναύλο.

$$3. \text{ Τιμή καύσιμου} = (1.03)^N \cdot (\text{Τιμή καυσίμου 2022}) \$/t$$

Η τιμή του καυσίμου θεωρείται ότι κάθε χρόνο αυξάνεται κατά 3%, σενάριο ακόμη πιο συντηρητικό το οποίο όμως έχει νόημα γιατί εξετάζεται το κατά πόσο είναι σε θέση η επένδυση να ανταπεξέλθει και να συνεχίσει να είναι κερδοφόρα, ακόμη και στα πιο ανεπιθύμητα σενάρια. Ακολουθεί ο ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος για τη λειτουργία του πλοίου, υπό τις συνθήκες που έχουν αναφερθεί.

Πίνακας 4.24: RFR για αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 3%/έτος

Fuel Type	RFR [\$/TEU]
VLSFO	929.10
LNG	837.17
Methanol	1,368.43
Ammonia	1,242.46
Hydrogen	1,461.38



Εικόνα 4.14: Σύγκριση RFR με μέσο ναύλο για αυξανόμενη τιμή καυσίμου κατά 3%/έτος

Στη περίπτωση όπου οι τιμές καυσίμου αυξάνονται κατά 3% κάθε έτος, τα αποτελέσματα διαφέρουν σημαντικά με αυτά των προηγούμενων περιπτώσεων, ακόμη και με των προηγούμενων μεθόδων. Στην εικόνα 4.14, παρουσιάζονται για κάθε καύσιμο οι τιμές του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου, ώστε η επένδυση να συμφέρει, καθώς και ο μέσος ναύλος που επικρατεί στην αγορά για την υπό μελέτη διαδρομή, τη τελευταία δεκαετία. Με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι τιμές του ελάχιστου απαιτούμενου ναύλου για τα καύσιμα, των οποίων το RFR είναι μεγαλύτερο από τον μέσο ναύλο. Συνεπώς, όταν το πλοίο λειτουργεί με καύσιμο μεθανόλη, αμμωνία ή υδρογόνο και η τιμή τους αυξάνεται κατά 3% ετησίως, η επένδυση δεν συμφέρει. Το αποτέλεσμα αυτό, αντιπαρέρχεται στις προηγούμενες μεθόδους αξιολόγησης της επένδυσης, οι οποίες για αύξηση των τιμών του καυσίμου κατά 3%, έκριναν ως ασύμφορη την επένδυση μόνο για το καύσιμο του υδρογόνου και της μεθανόλης.

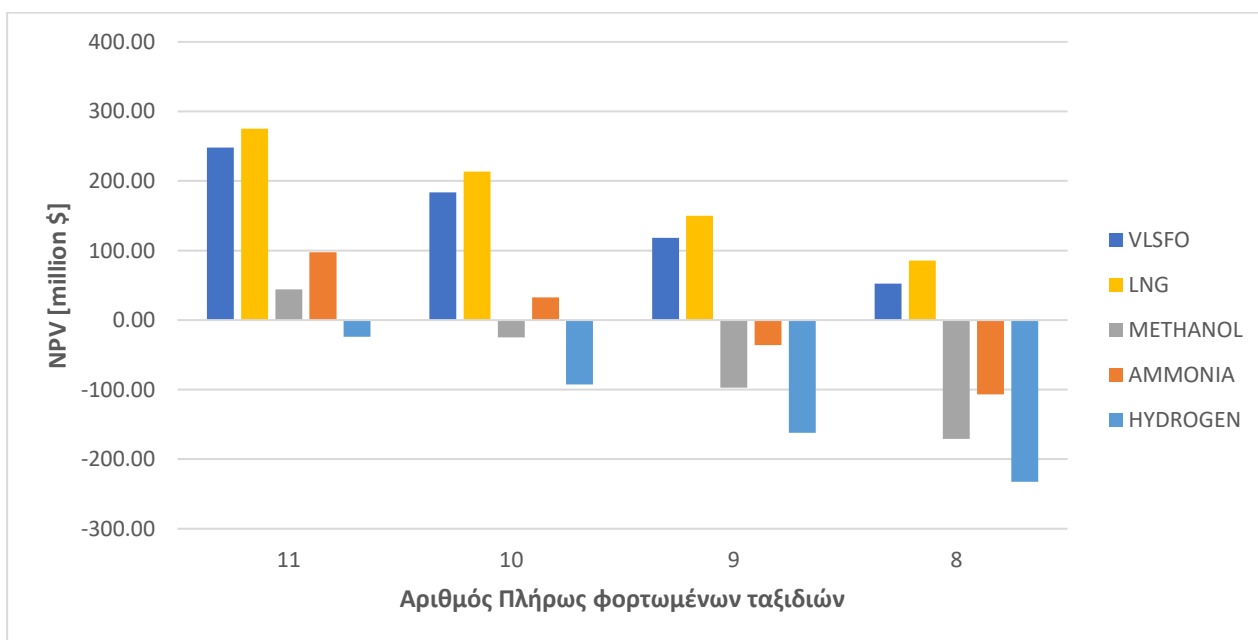
4.6.3 Case Study 3: Πλεύση σε κατάσταση ερματισμού

Σε όλα τα σενάρια λειτουργίας του πλοίου που έχουν μελετηθεί προηγουμένως, έχει θεωρηθεί πως το πλοίο ταξιδεύει σε κάθε διαδρομή, είτε πλήρως φορτωμένο, είτε φορτωμένο μέχρι ένα ποσοστό. Γεγονός το οποίο δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στη πραγματικότητα. Για αυτό τον λόγο κρίνεται σκόπιμο να μελετηθεί η συμπεριφορά της επένδυσης, σε διάφορα σενάρια φόρτωσης του πλοίου.

Στο σενάριο αυτό θεωρείται ότι το πλοίο πραγματοποιεί τη διαδρομή Port of Shanghai - Port of Rotterdam όπως και σε όλα τα προηγούμενα σενάρια. Ωστόσο, γίνεται η υπόθεση πως σε κάποια από τα σενάρια αυτά το πλοίο ταξιδεύει άφορτο, δηλαδή σε κατάσταση ερματισμού. Γεγονός το οποίο δεν απέχει πολύ από τη πραγματικότητα, καθώς είναι πολύ πιο συνηθισμένο το πλοίο να ταξιδεύει γεμάτο από Shanghai για Rotterdam παρά το αντίθετο, γιατί η πλειοψηφία των προϊόντων που μεταφέρονται με τη χρήση εμπορευματοκιβωτίων παράγονται στην Κίνα. Επιπλέον, σε περιόδους έξαρσης των ηλεκτρονικών αγορών, όπως ήταν η περίοδος του Covid-19, αυξήθηκαν σε τεράστιο βαθμό οι εξαγωγές της κίνας, πράγμα που είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση αποθεμάτων εμπορευματοκιβωτίων στη Κίνα. Το γεγονός αυτό, είχε ως επακόλουθο, πολλά Containerships να πραγματοποιούν ταξίδια προς τη Κίνα, μεταφέροντας απλά άδεια Containerships προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της αγοράς.

Για τη μελέτη της επένδυσης αυτής, θεωρούνται ότι ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες,

- Για όλη τη διάρκεια της ζωής του πλοίου, τα ναύλα μεταβάλλονται σύμφωνα με τα στατιστικά της προηγούμενης δεκαετίας
- Η τιμή των καυσίμων παραμένει σταθερή και ίση με τις τιμές στις αρχές του 2022
- Το υπό μελέτη πλοίο πραγματοποιεί [0-3] ταξίδια χωρίς φορτίο στη διάρκεια της ζωής του.



Εικόνα 4.15: NPV για διαφορετικό αριθμό πλήρως φορτωμένων ταξιδιών

Στην εικόνα 4.15, φαίνεται η μεταβολή του Net Present Value της επένδυσης ανάλογα με τον αριθμό των πλήρως φορτωμένων ταξιδιών που πραγματοποιεί το πλοίο στη διάρκεια ενός έτους, για όλα τα καύσιμα. Το συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη αυτή, για κάθε καύσιμο ξεχωριστά, είναι:

- VLSFO: Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η τιμή του NPV για κάθε πιθανό αριθμό πλήρως φορτωμένων ταξιδιών, είναι μεγαλύτερη του μηδενός και σχεδόν μεγαλύτερη από 50 million \$. Συνεπώς, η επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο, συμφέρει άφοβα ακόμη και για 4 ταξίδια χωρίς φορτίο ετησίως, υπό τις συνθήκες που έχουν εξετασθεί.
- LNG: Όμοια με το καύσιμο VLSFO, το υγροποιημένο φυσικό αέριο, έχει θετικό NPV σε κάθε πιθανό αριθμό πλήρως φορτωμένων ταξιδιών. Μάλιστα, στη χειρότερη των περιπτώσεων, όπου το πλοίο πραγματοποιεί 4 άδεια ταξίδια κατά τη διάρκεια ενός έτους, το $NPV=85,731,394.98$ \$, δηλαδή η επένδυση είναι εξαιρετικά επικερδής ακόμα και στο πιο συντηρητικό σενάριο.
- Methanol: Όταν το υπό μελέτη πλοίο λειτουργεί με καύσιμο μεθανόλη, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, συμφέρει η πραγματοποίηση της επένδυσης, μόνο όταν το πλοίο πλέει πλήρως φορτωμένο σε κάθε ταξίδι που πραγματοποιεί. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η επένδυση κρίνεται ως μη συμφέρουσα και δεν αξίζει να πραγματοποιηθεί από τον επενδυτή.
- Ammonia: Για λειτουργία του υπό μελέτη containership με αμμωνία, η επένδυση συμφέρει όταν το πλοίο πραγματοποιεί τουλάχιστον 10 πλήρως φορτωμένα ταξίδια κάθε έτος. Όταν το πλοίο ταξιδεύει 10 φορές πλήρως φορτωμένο στη διάρκεια ενός έτους, το $NPV = 32,484,386$ \$, το οποίο είναι συγκρίσιμο με το CAPEX.
- Hydrogen: Στη περίπτωση που η πρόωση του πλοίου πραγματοποιείται με τη χρήση PEMFC που καταναλώνουν υδρογόνο, η επένδυση φαίνεται να μην είναι συμφέρουσα σε καμία περίπτωση. Το αποτέλεσμα αυτό, είναι ιδιαίτερα αποτρεπτικό για τον πλοιοκτήτη και δείχνει την ανάγκη μείωση της τιμής του καυσίμου προκειμένου να συμφέρει η επένδυση στο πλοίο αυτό.

4.6.4 Case Study 4: Φόρος Άνθρακα

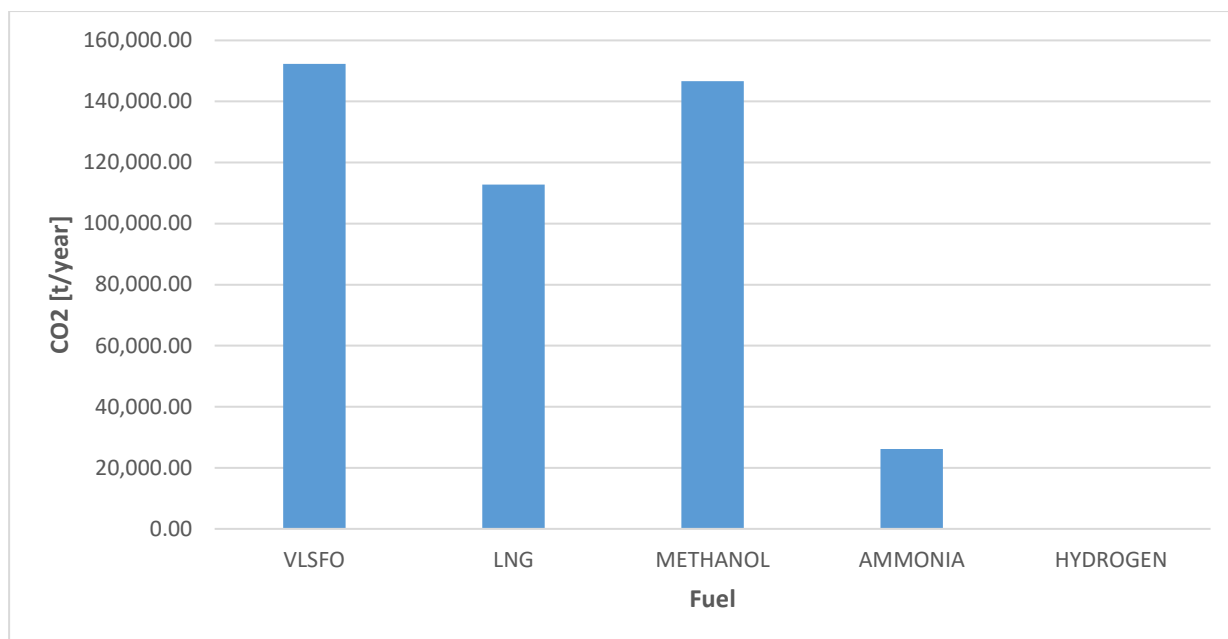
Στο σενάριο αυτό, πραγματοποιείται μελέτη, η οποία εξετάζει σε πρώτη φάση το σύνολο των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται κατά το στάδιο της κατανάλωσης των καυσίμων, από το υπό μελέτη πλοίο. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η παραγωγή CO₂ στο στάδιο

tank to propeller και όχι κατά τη διάρκεια της παραγωγή του, καθώς αυτή τη στιγμή οι κανονισμοί του IMO δεν έχουν αναφερθεί στο στάδιο εκείνο. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται υπόθεση για την επιβολή Carbon Tax κατά τη λειτουργία του πλοίου και εξετάζεται το κατά πόσο συμφέρει η επένδυση για διάφορες τιμές του φόρου.

Για τον υπολογισμό της ετήσιας παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα του υπό μελέτη πλοίου, χρειάζονται η ετήσια κατανάλωση του πλοίου για κάθε είδος εξεταζόμενου καυσίμου, καθώς και η κατανάλωση σε MDO, στις περιπτώσεις όπου το καύσιμο χρειάζεται Pilot Fuel για την ανάφλεξη του. Στον πίνακα 4.25, παρουσιάζονται οι ετήσιες καταναλώσεις των καυσίμων καθώς και οι συντελεστές Carbon Factor που δείχνουν τη ποσότητα CO₂ που παράγεται κατά τη κατανάλωση ενός τόνου καυσίμου, καθώς και η συνολική ποσότητα CO₂.

Πίνακας 4.25: Εκπεμπόμενη ποσότητα CO₂ για το υπό μελέτη Containership

Καύσιμο Πρόωσης	VLSFO	LNG	METHANOL	AMMONIA	HYDROGEN
Κατανάλωση καυσίμου [t/year]	47,455.15	40,526.70	100,812.68	108,942.73	16,282.67
Fuel Carbon Factor [t _{CO2} /t _{FUEL}]	3.21	2.75	1.38	0	0
Pilot Fuel (MDO) Consumption [t/year]	0	405.27	1,557.10	7,345.15	0.00
MDO Carbon Factor [t _{CO2} /t _{MDO}]	3.21	3.21	3.21	3.21	3.21
CO ₂ [t/Year]	152,331.03	112,747.70	146,697.57	26,195.28	0



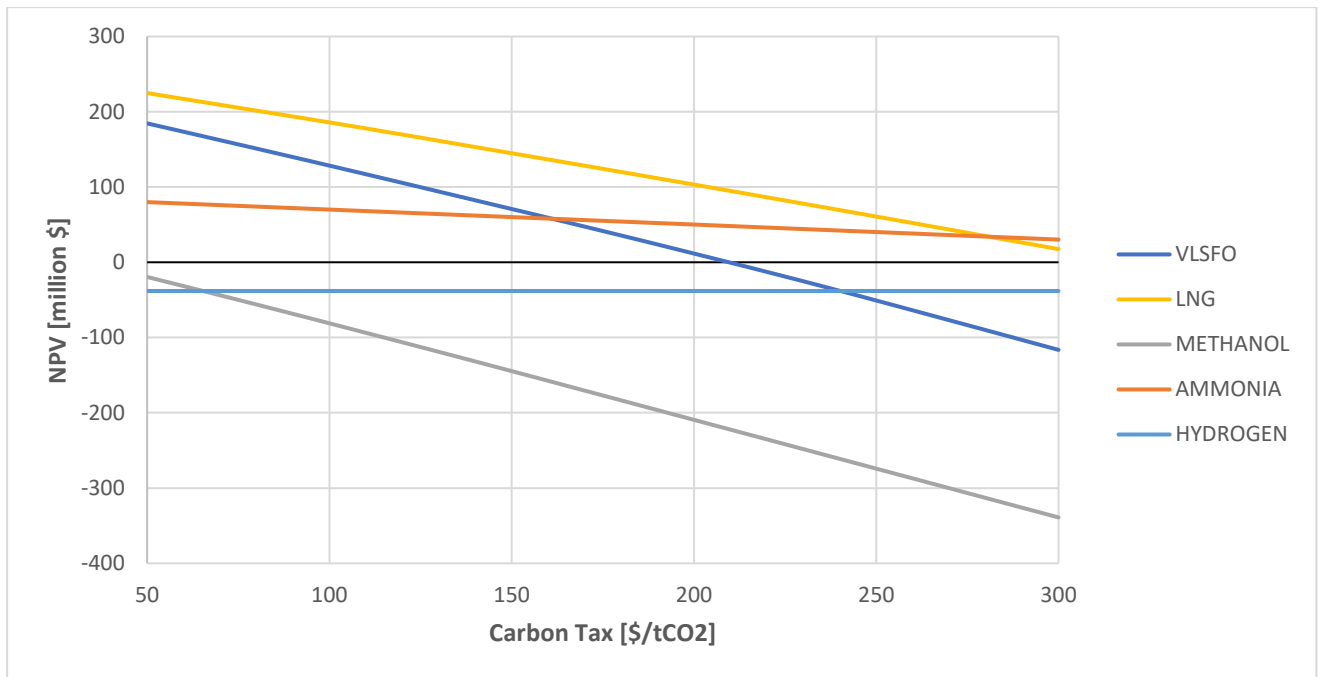
Εικόνα 4.16: Σύγκριση CO₂ υπό μελέτη πλοίου για κάθε καύσιμο

Στην εικόνα 4.16, παρουσιάζονται οι ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από το υπό μελέτη πλοίο ανάλογα με το είδος καυσίμου που χρησιμοποιεί για τη πρόωση του, όταν πραγματοποιεί το ταξίδι Shanghai – Rotterdam. Όπως ήταν αναμενόμενο όλα τα εναλλακτικά καύσιμα, εκπέμπουν μικρότερη ποσότητα CO₂ από το VLSFO, με το υδρογόνο να αποτελεί με διαφορά το πιο φιλικό προς το περιβάλλον καύσιμο, καθώς η κατανάλωση του εκπέμπει μηδενική ποσότητα CO₂ στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό το καθιστά, ως ένα από τα πιο υποσχόμενα μελλοντικά καύσιμα, που μπορεί με πτώση της τιμής του και αύξηση της παραγωγής του να αντικαταστήσει οριστικά τα ορυκτά καύσιμα και να ωθήσει τη ναυτιλία σε μια νέα «πράσινη» πραγματικότητα. Τέλος, ιδιαίτερα αξιοσημείωτη και προβληματική φαίνεται να είναι η εκπομπή της μεθανόλης σε CO₂ αφού προσεγγίζει πολύ τη τιμή που παράγει το VLSFO.

Προκειμένου να γίνει πιο φιλική προς το περιβάλλον η ναυτιλία και να μειωθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται από αυτή, ο IMO εξετάζει την επιβολή προστίμων που πρέπει να καταβάλλουν τα πλοία ετησίως, ανάλογα με τη ποσότητα CO₂ που εκπέμπει η λειτουργία τους ^[2]. Μέτρο το οποίο θα ωθήσει τους πλοιοκτήτες στην υιοθέτηση πιο οικολογικών τακτικών για τη λειτουργία των πλοίων τους. Ενώ ταυτόχρονα, τα έσοδα που θα συγκεντρώνονται από αυτόν τον φόρο, θα επενδύονται σε νέες έρευνες και μελέτες για τη μείωση των ρύπων που παράγονται από τη ναυτιλία.

Αρχικά, υπολογίζονται τα επιπλέον ετήσια έξοδα λειτουργίας που προκύπτουν για το υπό μελέτη πλοίο, για διάφορες τιμές του Carbon Tax, εξαιτίας των εκπομπών διοξειδίων του άνθρακα που παράγει όσο ταξιδεύει, ανάλογα με τον τύπο καυσίμου που χρησιμοποιείται. Έπειτα, παρουσιάζονται οι νέες τιμές του συντελεστή καθαρής παρούσας αξίας του πλοίου, όταν ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

- Τιμή καυσίμου σταθερή σε όλη τη διάρκεια της επένδυσης και ίση με αυτή του 2022
- Το κόστος κεφαλαίου της επένδυσης είναι ίσο με 10%
- Πραγματοποιούνται 11 πλήρως φορτωμένα ταξίδια από Shanghai σε Rotterdam και αντίστροφα κατά τη διάρκεια ενός έτους.
- Τιμή ναύλων μεταβάλλεται σύμφωνα με τα στατιστικά της τελευταίας δεκαετίας
- Η τιμή του προστίμου άνθρακα κυμαίνεται στο εύρος [50,300] $\$/tCO_2$



Εικόνα 4.17: NPV για διάφορες τιμές του Carbon Tax

Στην εικόνα 4.17, παρουσιάζεται η καθαρά παρούσα αξία της επένδυσης στο υπό μελέτη πλοίο ανάλογα με το Carbon Tax, για κάθε καύσιμο ξεχωριστά. Η κλίση της κάθε καμπύλης, δείχνει πόσο ευάλωτη είναι η επένδυση, στον φόρο άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, όπως είναι προφανές το VLSFO, η μεθανόλη και το LNG, έχουν με τη σειρά τις μεγαλύτερες κλίσεις, αφού παράγουν και τις μεγαλύτερες ποσότητες CO_2 από όλα τα καύσιμα. Ακολουθεί η αμμωνία με αισθητά μικρότερη κλίση, η οποία πλησιάζει την οριζόντια ευθεία, εξαιτίας της σαφώς μικρότερης παραγωγής CO_2 από τη κατανάλωσή τους. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα που

προκύπτει από το διάγραμμα αυτό, είναι η μηδενική κλίση που έχει η καμπύλη του υδρογόνου, το οποίο οφείλεται στις μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και δείχνει ότι δεν επηρεάζεται καθόλου από τον φόρο άνθρακα, ανεξάρτητα από το ποιά είναι η τιμή του. Στις υψηλότερες τιμές του Carbon Tax, δηλαδή για Carbon Tax = 300 \$/tCO₂ η επένδυση αξίζει να πραγματοποιηθεί μόνο για τα καύσιμα LNG, αμμωνία, καθώς μόνο αυτά έχουν NPV>0. Τέλος, προκειμένου η επένδυση να είναι κερδοφόρα για τα καύσιμα VLSFO, μεθανόλη, υδρογόνο πρέπει να ισχύουν:

- VLSFO: Η τιμή του Carbon Tax να είναι μικρότερη ή ίση από 256.93 \$/tCO₂
- Methanol: Μείωση της τιμής του καυσίμου και μικρό σχετικά Carbon Tax
- Hydrogen: Μείωση της τιμής του καυσίμου

4.6.5 Case Study 5: Monte Carlo Simulation

Σε αυτό το Case Study εξετάζεται το ρίσκο αποτυχίας της επένδυσης, με τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo. Η μέθοδος του Monte Carlo αποτελεί μια μαθηματική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση πιθανών αποτελεσμάτων ενός αβέβαιου γεγονότος. Πήρε το όνομα της από το καζίνο του Μονακό, αφού ο πυρήνας της μοντελοποίησης, είναι παρόμοιος με το παιχνίδι της ρουλέτας και έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του ρίσκου σε πολλά αληθινά σενάρια, όπως είναι η προσέγγιση της τιμής των μετοχών και η πρόβλεψη πωλήσεων ^[33].

Η προσομοίωση Monte Carlo δημιουργεί ένα μοντέλο πιθανών αποτελεσμάτων με τη χρήση πιθανοτικών κατανομών, όπως είναι η ομοιόμορφη και η κανονική κατανομή, για κάθε μεταβλητή η οποία έχει αβεβαιότητα. Στη συνέχεια, πραγματοποιεί διαρκώς υπολογισμούς, χρησιμοποιώντας διαφορετικά σενάρια τυχαίων αριθμών ανάμεσα στις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές τους. Μια τυπική προσομοίωση Monte Carlo, μπορεί να επαναληφθεί χιλιάδες φορές, ώστε να παραχθεί μεγάλος αριθμός πιθανών αποτελεσμάτων.

Για τον υπολογισμό του NPV του υπό μελέτη πλοίου για κάθε πιθανό είδος καυσίμου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, θεωρήθηκαν ως μεταβλητές τα ακόλουθα και οι τιμές τους παράγονται με τη χρήση της κανονικής κατανομής:

- Η τιμή του καυσίμου που χρησιμοποιείται για τη πρόωση του υπό μελέτη πλοίου

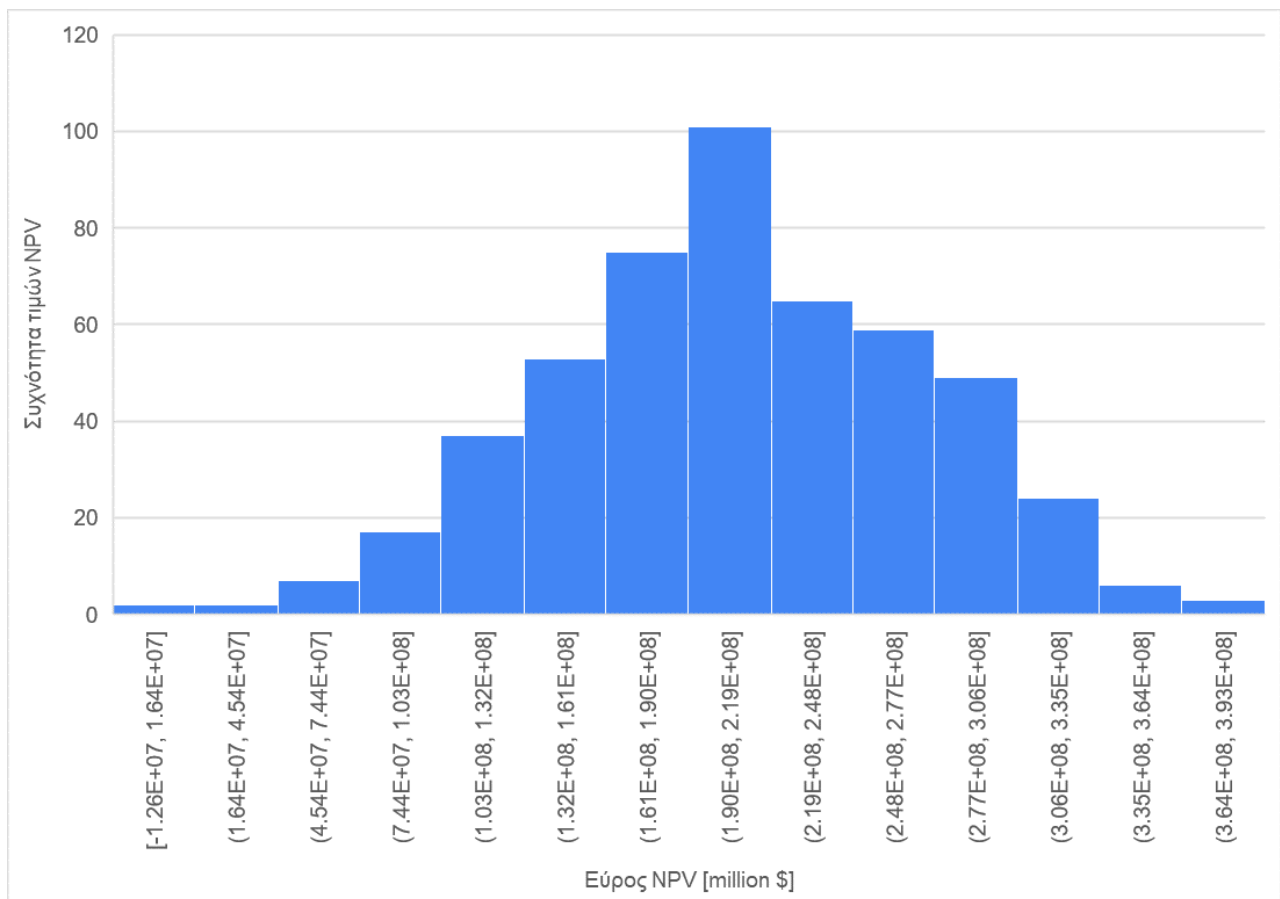
- Το πρόστιμο που επιβάλλεται στα πλοία το έτος 1, για το διοξείδιο του άνθρακα που παράγουν κατά τη λειτουργία τους
- Το ετήσιο ποσοστό αύξησης της τιμής του προστίμου άνθρακα
- Το ύψος των ναύλων για τη διαδρομή λιμάνι της Shanghai – λιμάνι του Rotterdam
- Ο αριθμός των πλήρως φορτωμένων ταξιδιών που πραγματοποιεί το πλοίο κάθε έτος.

Στον πίνακα 4.26 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μεταβλητές αυτές καθώς και η αναμενόμενη τιμή τους και η τυπική απόκλιση που θεωρήθηκε για τη πραγματοποίηση των υπολογισμών. Οι αναμενόμενες τιμές, έχουν υπολογιστεί με βάση τα στατιστικά του 2022 καθώς και των προηγούμενων τιμών. Ωστόσο, για τις μεταβλητές που δεν υπήρχαν διαθέσιμα στατιστικά, τόσο η αναμενόμενη τιμή όσο και η τυπική απόκλιση, λήφθηκαν με υπόθεση.

Πίνακας 4.26: Στατιστικές τιμές για μεταβλητές της προσομοίωσης Monte Carlo

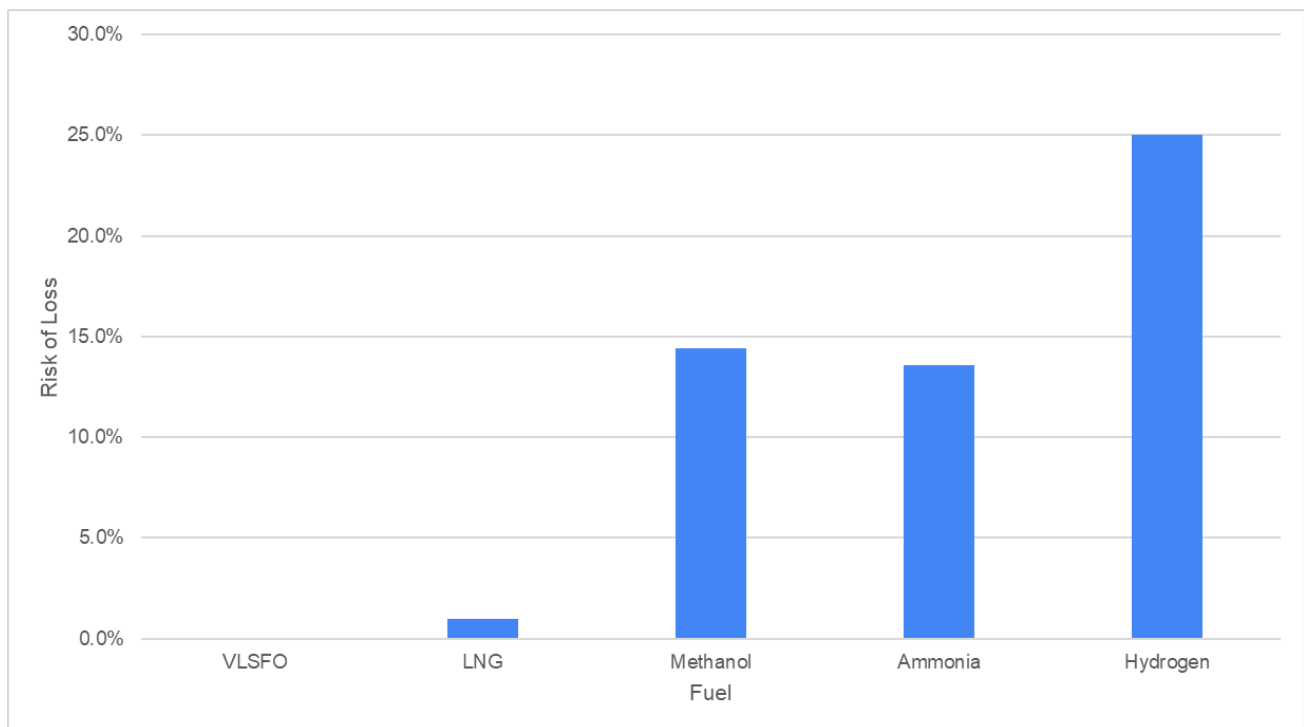
Καύσιμο	Στατιστικά στοιχεία	Τιμή καυσίμου [\$/t]	Carbon Tax year 1 [\$/tCO ₂]	Carbon Tax increase per year [%]	Ναύλος [\$/TEU]	Αριθμός πλήρως Φορτωμένων ταξιδιών
VLSFO	Αναμενόμενη Τιμή	600	50	3	1050	9.5
	Τυπική Απόκλιση	120	10	0.6	400	1.5
LNG	Αναμενόμενη Τιμή	450	50	3	1050	9.5
	Τυπική Απόκλιση	90	10	0.6	400	1.5
METHANOL	Αναμενόμενη Τιμή	500	50	3	1050	9.5
	Τυπική Απόκλιση	120	10	0.6	400	1.5
AMMONIA	Αναμενόμενη Τιμή	350	50	3	1050	9.5
	Τυπική Απόκλιση	70.00	10	0.6	400	1.5
HYDROGEN	Αναμενόμενη Τιμή	2,500	50	3	1050	9.5
	Τυπική Απόκλιση	500	10	0.6	400	1.5

Με τη χρήση των δεδομένων που υπάρχουν στον πίνακα 4.26 και με τη δημιουργία κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης Monte Carlo στο Excel, υπολογίστηκε το Net Present Value της επένδυσης για κάθε καύσιμο με τη πραγματοποίηση 500 επαναλήψεων. Στην εικόνα 4.18 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα, για καύσιμο LNG, που δείχνει τη συχνότητα εμφάνισης ενός εύρους NPV, από το οποίο εύκολα συμπεραίνεται, ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη προσομοίωση αυτή ακολουθούν κανονική κατανομή.



Εικόνα 4.18: Ιστόγραμμα αποτελεσμάτων Monte Carlo για LNG

Το κυριότερο συμπέρασμα που εξάγεται με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo για την επένδυση στο υπό μελέτη Containership, είναι ότι το ρίσκο αποτυχίας που έχει η επένδυση ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται για τη πρόωση του. Πιο συγκεκριμένα, από τις 500 επαναλήψεις που πραγματοποιούνται για το κάθε καύσιμο, εξάγονται στατιστικά για το πόσες τιμές είχαν NPV μικρότερο του 0. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον επενδυτή, ώστε να λάβει μια πιο σωστή απόφαση η οποία να ανταποκρίνεται σε μεγαλύτερο βαθμό στην πραγματικότητα.



Εικόνα 4.19: Πιθανότητα αποτυχίας επένδυσης ανάλογα με το καύσιμο πρόωσης

Στην εικόνα 4.19 υπάρχει υπολογισμένο ρίσκο αποτυχίας της επένδυσης στο υπό μελέτη πλοίο, ανάλογα με το καύσιμο πρόωσης που χρησιμοποιείται και σύμφωνα με τις συνθήκες και τις μεταβλητές που ορίστηκαν για τη πραγματοποίηση της προσομοίωσης Monte Carlo. Το ρίσκο αποτυχίας της επένδυσης που χρησιμοποιεί LNG, προξενεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς έχει πιθανότητα αποτυχίας μόνο 1%, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στον πλοιοκτήτη να πραγματοποιήσει την επένδυση στο υπό μελέτη πλοίο, με σχεδόν μηδενικό άγχος για το πώς θα κυμανθεί η αγορά, τα Carbon Taxes και η τιμή καυσίμου. Από τα υπόλοιπα εναλλακτικά καύσιμα, το αμέσως μεγαλύτερο ρίσκο το έχει η αμμωνία και η μεθανόλη και κυμαίνεται στο 15%. Τέλος, επένδυση στο υπό μελέτη Containership με τη χρήση υδρογόνου έχει το μεγαλύτερο ρίσκο αποτυχίας, το οποίο κυμαίνεται στο 25% και είναι ιδιαίτερα αποτρεπτικό για τον πλοιοκτήτη.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Από τη τεχνοοικονομική μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εξήχθησαν μερικά πολύ σημαντικά συμπεράσματα, που ρίχνουν φως στο πως πρέπει να κινηθούν οι πλοιοκτήτες και γενικότερα η αγορά της ναυτιλίας, προκειμένου να γίνει πιο πράσινη με τη πάροδο του χρόνου. Τα συμπεράσματα αυτά, θα χωριστούν σε δύο κατηγορίες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες δύο:

- Συμπεράσματα που προκύπτουν για τον στόχο 2030
- Συμπεράσματα που προκύπτουν για τον στόχο 2050

Στόχος 2030

Ο στόχος του 2030 είναι πιο προσιτός και απαιτεί μείωση των εκπομπών CO₂ που παράγονται από τη ναυτιλία κατά 40% συγκριτικά με το 2008. Ο στόχος αυτός, είναι αδύνατον να πραγματοποιηθεί με τη χρήση VLSFO και άλλων παρόμοιων ορυκτών καυσίμων, συνεπώς αποτελεί μονόδρομο η χρήση κάποιου εναλλακτικού καυσίμου. Από τα καύσιμα που μελετήθηκαν, το πιο ώριμο αυτή τη στιγμή φαίνεται να είναι η μεθανόλη και το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο, αφού υπάρχουν πλήρεις κανονισμοί, μεγάλη διαθεσιμότητα και κατάλληλη εφοδιαστική αλυσίδα. Ωστόσο, το υπό μελέτη πλοίο που λειτουργεί με LNG εκπέμπει 23% λιγότερα CO₂ από τη μεθανόλη, ενώ ταυτόχρονα σε όλα τα Case Studies αποδεικνύεται πολύ πιο συμφέρον και κερδοφόρο για τον πλοιοκτήτη. Μάλιστα, η επένδυση στο LNG όπως έδειξε το Case Study 5 με τη προσομοίωση του Monte Carlo, έχει σχεδόν μηδενικό ρίσκο αποτυχίας. Συνεπώς, τόσο από οικονομικής άποψης όσο και από άποψης προστασίας του περιβάλλοντος, το καύσιμο LNG υπερτερεί της μεθανόλης. Για αυτό τον λόγο όταν ο επενδυτής έχει να επιλέξει για εναλλακτικό καύσιμο πρόωσης του 10,000 TEU Containership με βάση τους στόχους του 2030, η επιλογή του LNG αποτελεί μονόδρομο.

Στόχος 2050

Ο στόχος του 2050 είναι αρκετά πιο αυστηρός και ταυτόχρονα δύσκολος στη πραγματοποίησή του, καθώς απαιτεί μείωση των εκπομπών CO₂ στο 70% συγκριτικά με αυτά που παράχθηκαν από τη ναυτιλία το 2008. Ο στόχος αυτός, όπως είναι προφανές, δε μπορεί να καλυφθεί σε καμία περίπτωση από τα ήδη χρησιμοποιούμενα καύσιμα, αλλά ούτε και με τα καύσιμα LNG,

μεθανόλη. Από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν για το υπό μελέτη Containership, βρέθηκε ότι τα μόνα εναλλακτικά καύσιμα τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και να επιτύχουν τον στόχο αυτό, είναι η αμμωνία και το υδρογόνο. Όταν η πρόωση του πλοίου πραγματοποιείται με τη χρήση αμμωνίας, εκπέμπονται ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα από τη καύση του Pilot Fuel που χρησιμοποιείται εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας αυτανάφλεξης της αμμωνίας. Το CO₂ που παράγεται είναι 83% μικρότερο από αυτό που εκπέμπει το ίδιο πλοίο όταν λειτουργεί με VLSFO, ενώ όταν το πλοίο λειτουργεί PEMFC που καταναλώνουν υδρογόνο, το CO₂ που εκπέμπεται είναι 100% μικρότερο, αφού το υδρογόνο εκπέμπει μηδενικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Συνεπώς και τα δύο καύσιμα, υπερκαλύπτουν τους στόχους του IMO για το 2050.

Πέρα από το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που αφήνουν η αμμωνία και το υδρογόνο, πρέπει να συγκριθούν και από οικονομικής άποψης, για να εντοπιστεί το πιο συμφέρον για τον πλοιοκτήτη καύσιμο. Από τα Case Studies που πραγματοποιήθηκαν στην εργασία αυτή, συμπεραίνεται ότι η χρήση του υπό μελέτη πλοίου με αμμωνία έναντι υδρογόνου, αποτελεί μια πολύ πιο επικερδή και ασφαλή επένδυση, κρίνοντας από την αγορά και τις τιμές την συγκεκριμένη περίοδο. Επιπλέον, το Containership που μεταφέρει αμμωνία έχει τη δυνατότητα μεταφοράς 200 περισσότερων Containers, γεγονός το οποίο του δίνει περιθώρια για πολύ μεγαλύτερα κέρδη σε βάθος χρόνου. Ωστόσο, δεν μπορεί να αμεληθεί ο μηδενικός επηρεασμός της κερδοφορίας της επένδυσης από τα Carbon Taxes, όταν χρησιμοποιείται υδρογόνο για τη πρόωση του πλοίου. Συνεπώς, αν μελλοντικά πέσουν οι τιμές του καυσίμου υδρογόνου και το NPV της επένδυσης προκύπτει θετικό, η επένδυση στο καύσιμο αυτό θα αποτελεί τη πιο safe επιλογή, όταν λαμβάνεται υπόψιν ο παράγοντας των φόρων άνθρακα.

Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Όλοι οι υπολογισμοί και οι συγκρίσεις που έχουν πραγματοποιηθεί, στη παρούσα Διπλωματική Εργασία αφορούν καθαρά το κομμάτι της λειτουργίας του πλοίου, συνεπώς και όλες οι αναφορές που γίνονται στα καυσαέρια, είναι στοχευμένες για αυτά που παράγονται κατά τη λειτουργία του. Όπως έχει αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, καυσαέρια εκπέμπονται σε όλη τη διάρκεια της ζωής του καυσίμου και όχι μόνο κατά τη στιγμή της κατανάλωσης του. Για τον λόγο αυτό, οι στόχοι και οι προσπάθειες των διεθνών οργανισμών για μείωση των GHG, δε θα έπρεπε να περιορίζονται μόνο στους ρύπους που παράγονται κατά τη λειτουργία του πλοίου. Λύση στο πρόβλημα αυτό, θα μπορούσε να δώσει ένας διαφορετικός φόρος άνθρακα, ο οποίος αξιολογεί και φορολογεί τα καύσιμα που καταναλώνει ένα πλοίο σε όλο το διάστημα της ζωής τους. Ειδικότερα, θα γίνεται μέτρηση των καυσαερίων που εκπέμπονται από τη στιγμή της παραγωγής ως της κατανάλωσης του καυσίμου, για να είναι τα αποτελέσματα πιο αληθινά και να ανταποκρίνονται σε μεγαλύτερο βαθμό στη πραγματικότητα. Τέλος, τα έσοδα που θα πηγάζουν από τους φόρους άνθρακα για ολόκληρο το Life Cycle των καυσίμων, θα επενδύονται σε δομές παραγωγής πράσινων καυσίμων, το οποίο μελλοντικά θα έχει θετικό αντίκτυπο τόσο στο περιβάλλον όσο και στην κοινωνία.

Βιβλιογραφία

[1] Boris Stolz, Maximilian Held, Gil Georges, Konstantinos Boulouchos. “Techno-economic analysis of renewable fuels for ships carrying bulk cargo in Europe”, *Nat Energy* 7, 203-212 (2022).

[2] Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (IMO). “IMO’s work to cut GHG emissions from ships”

Πηγή: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>

[3] The basics of EEXI – from 2023, all existing ships must meet new energy efficiency standards

Πηγή: <https://www.napa.fi/the-basics-of-eexi-from-2023-all-existing-ships-must-meet-new-energy-efficiency-standards/>

[4] DNV. “Alternative Fuels for Containerships”

Πηγή: <https://www.dnv.com/>

[5] Bureau Veritas. “Well-To-Wake Decarbonization”

Πηγή: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/what-well-wake-decarbonization-means-shipowners>

[6] Sea LNG. “LNG as a Marine Fuel – The Investment Opportunity”

Πηγή: <https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2020/04/SEA-LNGStudyFINAL2.pdf>

[7] American Bureau of Shipping. “Setting the course to Low Carbon Shipping”

Πηγή: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2021/04/ABS-Setting-the-Course-to-Low-Carbon-Shipping-View-of-the-Value-Chain-2021_04.pdf

[8] Nader R. Ammar. “An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular containership”, *Transportation Research Part D* 69 (2019) 66-76

[9] Methanex. “Methanol as a Marine Fuel”

Πηγή: https://www.methanex.com/sites/default/files/methanex_brochure_marinefuel_final2_032521.pdf

[10] Michael Rachow, Steffen Loest, Agus Dwy Bramastha. “Analysis of the Requirement for the Ships Using Methanol as Fuel”, *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, Vol. 3(2), Dec. 2018. 58-68

[11] Bureau Veritas. “An inside look at Methanol as Fuel”

Πηγή: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/inside-look-methanol-fuel>

[12] American Bureau of Shipping. “ Ammonia as Marine Fuel”

Πηγή:<https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ammonia-as-marine-fuel-whitepaper-20188.pdf>

[13] c&en. “ Is Ammonia the Fuel of the future?”

Πηγή:<https://cen.acs.org/articles/99/i8/ammonia-fuel-future.html>

[14] Statista. “ Ammonia production worldwide from 2010 to 2021”

Πηγή:<https://www.statista.com/statistics/1266378/global-ammonia-production/>

[15] DNV. “ Handbook for Hydrogen-Fueled Vessels”

[16] American Bureau of Shipping. “ Hydrogen as Marine Fuel”

Πηγή: <https://absinfo.eagle.org/acton/media/16130/hydrogen-as-marine-fuel-whitepaper>

[17] Brunel. “ What are the 3 main types of Hydrogen?”

Πηγή: <https://www.brunel.net/en/blog/renewable-energy/3-main-types-of-hydrogen>

[18] Naohiro Saito. “ The economic analysis of commercial ships with hydrogen fuel cell through case studies”, *World Maritime University Dissertations*. 618

Πηγή: https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=1617&context=all_dissertations

[19] Nikolaos Christopoulos, Dimitrios V. Lyridis, Panayiotis Mitrou, Christos Papaleonidas, Panayiotis Evangelou. “Quantitative Analysis of the Global Commercial Fleet GHG Emissions Profile”, *NTUA SNAME Laboratory for Maritime Transport Feb. 2019*

[20] Marvest. “The port of Rotterdam”

Πηγή: <https://www.marvest.de/en/magazine/ships/the-port-of-rotterdam/>

[21] Port of Rotterdam. “Port dues tariffs”

Πηγή: <https://www.portofrotterdam.com/en/port-dues-tariffs>

[22] Shiphub. “The port of Shanghai”

Πηγή: <https://www.shiphub.co/port-of-shanghai/>

[23] e-ports. “Port Disbursement calculator”

Πηγή: <https://public.e-ports.com/calculate>

[24] Splash. “RCL orders 7,000 TEU pair in China for \$170m”

Πηγή: <https://splash247.com/rcl-orders-7000-teu-pair-in-china-for-170m/>

[25] Kyunghwa Kim, Gilltae Roh, Wook Kim, Kangwoo Chun. “A preliminary study on an Alternative ship propulsion system fueled by Ammonia: Environmental and Economic Assessments”, *J. Mar. Sci. Eng.* 2020, 8(3), 183

[26] Stephen Horvath, Mahdi Fasihi, Christian Breyer. “ Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040”, *Energy Conversion and Management, Volume 164* , May 2018

[27] Ship & Bunker. “Bunker Prices”

Πηγή: <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam>

[28] Lampros Tsiros, Themistoklis Pylarinos. “ Economic assessment of 63,000 t DWT Bulk Carrier”

[29] Wilhelmsen. “Suez Toll Calculator”

Πηγή: <https://www.wilhelmsen.com/tollcalculators/suez-toll-calculator/>

[30] Marine Methanol. “Fuel price comparison”

Πηγή: <http://marinemethanol.com/?nav=meohp>

[31] Maersk Mc-Kinney Moller Center. “Ammonia as a marine Fuel”

Πηγή: https://cms.zerocarbonsshipping.com/media/uploads/documents/Ammonia-Documentation-for-Navigate-1.0_2022-06-07-104302_erdg.pdf

[32] MacroMicro. “Drewry World Container Index”

Πηγή: <https://en.macromicro.me/collections/4356/freight/44756/drewry-world-container-index>

[33] IBM. “What is Monte Carlo simulation?”

Πηγή: <https://www.ibm.com/topics/monte-carlo-simulation>