



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

# *Οικονομοτεχνική Ανάλυση της Αμμωνίας σαν Ναυτιλιακό Καύσιμο: Μελέτη περίπτωσης πλοίου Bulk Carrier*

Διπλωματική Εργασία

Συγγραφέας: Χάλαρης Μάριος

Α.Μ.: 17042

Επιβλέπων: Αντώνιος Χατζηαποστόλου

Αθήνα, 2023



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Χάλαρης Μάριος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 17042 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο/Η Δηλών/ούσα

Χάλαρης Μάριος





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## **Διπλωματική εργασία**

Οικονομοτεχνική Ανάλυση της Αμμωνίας σαν Ναυτιλιακό Καύσιμο: Μελέτη περίπτωσης πλοίου Bulk Carrier

## **Συγγραφέας**

Μάριος Χάλαρης (Α.Μ. 17042)

## **Επιβλέπων**

Αντώνιος Χατζηαποστόλου

## **Ημερομηνία εξέτασης**

19/10/2023

## **Εξεταστική επιτροπή**

---

Χατζηαποστόλου Αντώνιος

---

Λιβανός Γεώργιος

---

Κουμπογιάννης Δημήτριος

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κύριο Αντώνιο Χατζηαποστόλου που με βοήθησε να διευρύνω τις γνώσεις μου μέσω της διπλωματικής μου εργασίας, που με καθοδήγησε και με βοήθησε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον αδερφό μου, Γιάννη Χάλαρη, όπου κατά την διάρκεια του διδακτορικού του στην Γλασκώβη, με συμβούλεψε και με βοήθησε στο μέγιστο σε οτιδήποτε θέμα μου προέκυπτε γενικά.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στήριξε και με στήριζει σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου και είναι πάντα δίπλα μου.

## Περίληψη

Σήμερα, η χρήση της αμμωνίας σαν ναυτιλιακό καύσιμο εξετάζεται σοβαρά, με κύριο κίνητρο την σταδιακή από-καρβουνοποίηση της πρόωσης πλοίων η οποία αποτελεί στρατηγική επιλογή του IMO. Η εργασία παρουσιάζει βιβλιογραφικά τις τεχνολογίες παραγωγής της πράσινης αμμωνίας, η οποία αποτελεί βασική προϋπόθεση για την χρήση της σαν καύσιμο. Στην συνέχεια, αναλύονται τα προβλήματα που ανακύπτουν από τα χαρακτηριστικά της αμμωνίας για την εφαρμογή της σαν ναυτιλιακό καύσιμο, με έμφαση στα τοξικά χαρακτηριστικά της, που σχετίζονται με διακίνηση & αποθήκευση, αλλά και στην παραγωγή οξειδίων αζώτου κατά την καύση της. Με βάση σύγχρονα στοιχεία και κανονισμούς, έγινε εκτίμηση των κινδύνων από την χρήση της και μελετήθηκε η περίπτωση εφαρμογής της σε πλοίο Bulk Carrier, με οικονομική ανάλυση και εκτίμηση χρόνου αποπληρωμής. Το πλοίο που επιλέχθηκε θα χρησιμοποιήσει την μηχανή ME-LGIM του κατασκευαστή MAN, ο οποίος τροποποιήθηκε ώστε να καίει αμμωνία αντί για μεθανόλη. Στο τέλος της εργασίας καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως με κάποιες τροποποιήσεις, τα πλοία τα οποία θα καίνε αμμωνία, μπορούν να θεωρηθούν ως μία πάρα πολύ καλή και υποσχόμενη λύση για το μέλλον της πράσινης ναυτιλίας

## Abstract

Today, the use of ammonia as a marine fuel is being seriously considered, with the main motivation being the gradual decarbonization of ship propulsion which is a strategic choice of the IMO. The paper will present bibliographically the production technologies of green ammonia, which is a basic condition for its use as a fuel. Then, the problems arising from the characteristics of ammonia for its application as marine fuel will be analyzed, with an emphasis on its toxic characteristics, related to handling & storage, but also on the production of nitrogen oxides during its combustion. Based on the data and the changes, an assessment of the risks of its use will be made and its case on the Bulk Carrier will be studied, with an economic analysis and an estimate of the payback period. The selected ship will use MAN's ME-LGIM engine, modified to burn ammonia instead of methanol. At the end, we come to the conclusion that with some modifications, the ships which will burn ammonia, can be considered as a very good and promising solution for the future of green shipping

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract.....	6
Λίστα Γραφημάτων .....	9
Λίστα Πινάκων.....	9
Συντομογραφίες – Λέξεις κλειδιά.....	11
<b>1 Πρόλογος .....</b>	<b>13</b>
<b>1. IMO Regulations.....</b>	<b>14</b>
<b>2. Αμμωνία.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Ιδιότητες της Αμμωνίας.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Η αγορά σήμερα .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Παραγωγή Αμμωνίας.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.1 Συμβατική Αμμωνία.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2 Μπλε Αμμωνία .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.3 Πράσινη Αμμωνία.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.4 Haber Bosch .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 Ασφάλεια και Κίνδυνοι.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.1 Τοξικότητα και Διάβρωση .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.2 Φωτιά και Ευφλεκτότητα.....</b>	<b>30</b>
<b>2.5 Τεχνικοί Κανονισμοί και Κανονισμοί Ασφάλειας .....</b>	<b>31</b>
<b>IGF &amp; IGC Code .....</b>	<b>32</b>
<b>2.5.1 Ανεφοδιασμός Αμμωνίας .....</b>	<b>33</b>
<b>2.5.2 Αποθήκευση Αμμωνίας.....</b>	<b>34</b>
<b>2.5.3 Χειρισμός Αμμωνίας και Ασφάλεια στο πλοίο.....</b>	<b>36</b>
<b>2.5.4 Κύρια στοιχεία ενός κινητήρα για την αμμωνία .....</b>	<b>36</b>
<b>2.5.5 Fuel Cell Ammonia και ShipFc.....</b>	<b>38</b>
<b>3. Μελέτη Περίπτωσης.....</b>	<b>40</b>



3.1	Κύρια στοιχεία του πλοίου .....	40
3.2	Επιλογή ταξιδιού και υποδομές σε λιμάνια για την Αμμωνία.....	41
3.3	Σταθμοί ανεφοδιασμού καυσίμων .....	45
4.	Μελέτη Περίπτωσης : Τεχνικές Λεπτομέρειες .....	47
4.1	ME-LGI Κινητήρας .....	48
4.2	Αρχές λειτουργίας καυσίμου αμμωνίας.....	54
4.2.1	Πεδίο εφαρμογής του συστήματος ανακυκλοφορίας καυσίμου .....	55
4.2.2	Σύστημα Παροχής Καυσίμου.....	55
4.2.3	Σύστημα αζώτου & FVT.....	55
4.2.4	Σύστημα σωληνώσεων & εξαερισμού διπλού τοιχώματος.....	56
4.3	Ενσωματωμένες δεξαμενές αποθήκευσης Αμμωνίας.....	56
4.4	Σύστημα SCR .....	58
4.5	Τροποποίηση συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου .....	60
5	Αξιολόγηση Κινδύνου.....	61
5.1	HAZOP.....	62
5.2	FMEA & FSS.....	62
6	Οικονομικά στοιχεία της μελέτης περίπτωσης.....	63
6.1	Οικονομική ανάλυση.....	63
6.2	Εκτίμηση αποπληρωμής.....	66
7	Συμπεράσματα .....	69
8	Βιβλιογραφικές Αναφορές .....	71
9	Παραρτήματα.....	73
9.1	Παράρτημα 1 : Μηχανήματα, εξαρτήματα και ισχύοντες κανονισμοί.....	73
9.2	Παράρτημα 2 : Εκτιμήσεις Απόσβεσης .....	76
9.3	Παράρτημα 3 : Σχέδιο FSS.....	78

## Λίστα Γραφημάτων

Γράφημα 1 : Βαθμίδες εκπομπών NOx σε ECAs (Daihatsu Diesel).....	15
Γράφημα 2 : Χάσμα εκπομπών GHG μεταξύ της στρατηγικής του IMO GHG και των εκπομπών BAU (DNV-GL 2019) .....	16
Γράφημα 3 Η αγορά της αμμωνίας σήμερα ( Πηγή : Mordor Intelligence).....	20
Γράφημα 4 :Καμπύλη κόστους αμμωνίας και εκτιμήσεις κόστους πράσινης αμμωνίας ( Πηγή : Ammonia Energy Association ).....	24
Γράφημα 5 : Γράφημα κατανάλωσης Καυσίμου αμμωνίας, με δεδομένα από το λογισμικό CEAS, για TIER III.....	51
Γράφημα 6 : Γράφημα κατανάλωσης Καυσίμου αμμωνίας, με δεδομένα από το λογισμικό CEAS, για TIER II.....	52
Γράφημα 7: Στόχοι μείωσης των εκπομπών CO2 (Πηγή : Lloyd’s Register).....	53
Γράφημα 8 : Σύγκριση τιμών VLSFO και NH3 .....	65
Γράφημα 9 : Εκτίμηση Απόσβεσης για Σενάριο 2040 με διαφορετικά σενάρια υποτίμησης .....	68

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1 : Βασικές ιδιότητες της αμμωνίας σε σύγκριση με το MGO ( Πηγή : European Maritime Safety Agency (EMSA) ).....	18
Πίνακας 2 : Γενικοί κίνδυνοι αμμωνίας.....	29
Πίνακας 3 : Συνθήκες ταξιδιού.....	44
Πίνακας 4: Ανάλυση κινδύνου σε μορφή δέντρου, για ανεφοδιασμό της αμμωνίας ( Πηγή : Safety Assessment of the Ammonia Bunkering Process in the Maritime Sector: A Review (paper) ) ...	47
Πίνακας 5 : Πίνακας με την σύγκριση κρίσιμων σημείων μεταξύ αμμωνίας και μεθανόλης για την επιλογή κινητήρα ( Πηγή : An innovative tool for the evaluation and comparison of different fuels and technologies onboard ships).....	48
Πίνακας 6 : Αποτελέσματα από το Λογισμικό CEAS για TIER III.....	51
Πίνακας 7 : Αποτελέσματα από το Λογισμικό CEAS για TIER II .....	52
Πίνακας 8 : Προφίλ λειτουργίας και κατανάλωση κινητήρα με VLSFO.....	64

Πίνακας 9 : Προφίλ λειτουργίας κινητήρα και κατανάλωση με NH <sub>3</sub> Προφίλ λειτουργίας κινητήρα και κατανάλωση με NH <sub>3</sub> .....	64
Πίνακας 10 : Οικονομικά δεδομένα για μελέτη περίπτωσης διαδρομής και πλοίου.....	65
Πίνακας 11 :Σενάρια υποτίμησης και Απόσβεσης (συνέχεια πίνακα 10) .....	68
Πίνακας 12 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (5%) .....	76
Πίνακας 13 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (5%) (συνέχεια πίνακα 12) .....	76
Πίνακας 14: Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (6%) .....	76
Πίνακας 15 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (6%) (συνέχεια πίνακα 14) .....	77
Πίνακας 16 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (8%) .....	77
Πίνακας 17 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (8%) (συνέχεια πίνακα 16) .....	77

## Συντομογραφίες – Λέξεις κλειδιά

AP	Acidification Potential
CAPEX	Capital Expenditure
CCS	Carbon Capture and Storage
ECA	Emission Control Area
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EP	Eutrophication Potential
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FSS	Fuel Supply System
FVT	Fuel Supply System
GHG	Greenhouse Gases
GWP	Global Warming Potential
HAZOP	Hazard and Operability study
HB	Haber-Bosch
HFO	Heavy Fuel Oil
IACS	International Association of Classification Societies
ICE	Internal Combustion Engine
IGC	International Code for the construction and equipment of ships carrying liquified Gases in bulk
IGF	International Code for the construction and equipment of ships carrying liquified Gases in bulk
IMO	International Maritime Organisation
IPCC	Intergovernmental Panel for Climate Change
LCA	Life-Cycle Assessment
LNG	Liquefied Natural Gas

LPG	Liquefied Petroleum Gas
MARPOL	Marine Pollution
MDO	Marine Diesel Oil
OPEX	Operational Expenses
PM	Particulate Matter
POCP	Photochemical Potential
PPE	Personal Protective Equipment
SCR	Selective Catalytic Reduction
SECA	Sulphur Emission Control Area
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SMR	Steam Methane Reformation
ULSFO	Ultra Low Sulphur Fuel Oil
SPOC	Specific Pilot Oil Consumption
SGC	Specific Gas Consumption

# 1 Πρόλογος

Στις μέρες μας, η ναυτιλιακή βιομηχανία καλείται να αντιμετωπίσει μια μεταβατική εποχή σχετικά με τη μεταβίβαση από το καύσιμο ντίζελ σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Από ιστορικής σκοπιάς, έχει αποδειχθεί ότι οι νέες τεχνολογίες μπορούν να προσαρμοστούν στην τρέχουσα αγορά, όπως όταν από τους ατμοστρόβιλους που λειτουργούσαν με εξωτερική καύση, πήγαμε στις παλινδρομικές ΜΕΚ που πραγματοποιείται εσωτερικά η καύση. Στην αρχή ο ατμός λειτουργούσε ως μέσο στην εξωτερική καύση και σήμερα το καύσιμο ντίζελ είναι κύριο καύσιμο. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο εποχών είναι ότι πρόσφατα οργανισμοί, όπως ο ΙΜΟ, εφάρμοσαν αυστηρότερους κανονισμούς για την προστασία του περιβάλλοντος, το οποίο επηρεάζεται από την κλιματική αλλαγή περισσότερο από ποτέ.

Για διεθνή ταξίδια μεγάλων αποστάσεων, το ΗFO είναι σήμερα η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη πηγή καυσίμου στην ανοιχτή θάλασσα. Η διαδικασία αποθήκευσης του είναι απλή και μεγάλες ποσότητες μπορούν να αποθηκευτούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς εξάντληση. Το ΗFO έχει σημαντικά υψηλή περιεκτικότητα σε θείο και γι' αυτό το VLSFO και το ULSFO έχουν εισαχθεί ως κύρια λύση. Ως αποτέλεσμα, μειώνονται οι ρύποι SO<sub>x</sub>. Παρά τον μετριασμό του SO<sub>x</sub> που μπορούν να επιτύχουν οι VLSFO και ULSFO, τα NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> και PM εξακολουθούν να βρίσκονται σε σημαντικό επίπεδο.

Ο πιο αξιόπιστος δρόμος για την προσαρμογή στους μελλοντικούς κανονισμούς του ΙΜΟ είναι η δημιουργία και η ενσωμάτωση εναλλακτικών καυσίμων. Ειδικότερα, η αμμωνία, μεταξύ άλλων εναλλακτικών καυσίμων, δηλαδή το LNG, το υδρογόνο και η μεθανόλη, θεωρείται ένα υπερσύγχρονο βιώσιμο καύσιμο που έχει συγκεντρώσει πρόσφατα τα φώτα της δημοσιότητας (Hansson, Brynolf, Fridell, & Lehtveer, 2020). Ωστόσο, δεδομένου ότι πρόκειται για μια νέα τεχνολογία, υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα για την αποτελεσματική εφαρμογή της στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Ως εκ τούτου, το αντικείμενο αυτής της έκθεσης είναι η περαιτέρω έρευνα της αμμωνίας ως βιώσιμου εναλλακτικού καυσίμου πλοίων.

Ο κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι να αξιολογήσει τις προοπτικές της αμμωνίας ως καινοτόμου καυσίμου για τη ναυτιλιακή βιομηχανία σε αντίθεση με άλλα καύσιμα. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε υδρογόνο, πολλές πηγές προτείνουν ότι η αμμωνία θα μπορούσε να θεωρηθεί μια μελλοντική επιλογή καυσίμου στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Προκειμένου το έργο μας να είναι βιώσιμο, η αμμωνία θα πρέπει να παράγεται με την ηλεκτροχημική διαδικασία HB

που χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως πρώτη ύλη (Soloveichik, 2019). Ο τρόπος που παράγεται το υδρογόνο είναι κρίσιμος για να γίνει η μέθοδος HB φιλική προς το περιβάλλον. Βασικός του αντίπαλος, στο μέλλον, φαίνεται να είναι η εφαρμογή του υδρογόνου αποθηκευμένου σε υγρή κατάσταση. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην αξιολόγηση των προοπτικών της αμμωνίας ως καινοτόμου καυσίμου για τη ναυτιλιακή βιομηχανία σε αντίθεση με άλλα καύσιμα.

Το συγκριτικό πλεονέκτημα της αμμωνίας έναντι του υδρογόνου ως καυσίμου είναι ότι μπορεί να αποθηκευτεί σε <<πίεση περιβάλλοντος>> και σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία σε υγρή μορφή. Ωστόσο, η τοξικότητα και η ευφλεκτότητά του θέτουν σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά την ασφάλεια και την αποθήκευση που θα πρέπει να αντιμετωπίσει το έργο μας.

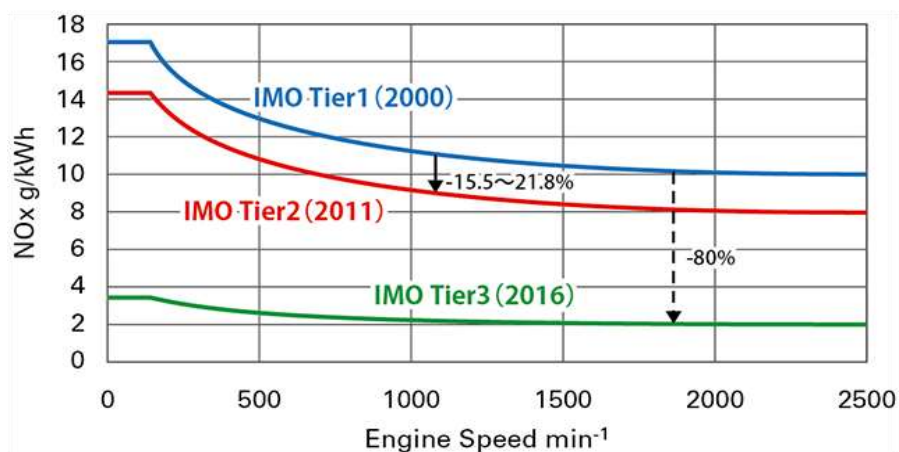
Επιπλέον, θα διερευνηθεί ένα συγκεκριμένο πλοίο και θα συζητηθούν συμπεράσματα με βάση τα αποτελέσματα. Ειδικότερα, η αμμωνία θα χρησιμοποιηθεί σε φορηγό χύδην φορτίου 38.000 DWT, το οποίο ακολουθεί εμπορική διαδρομή, δηλαδή από τη Σαουδική Αραβία προς την Ιαπωνία. Προκειμένου να εκτιμηθεί πόσο εφικτό και νέο μπορεί να είναι αυτό το σενάριο, θα σχεδιαστεί ένας κινητήρας διπλού καυσίμου για αμμωνία (ME-LGI, ο οποίος καίει μεθανόλη ως κύριο καύσιμο) (μέσω του λογισμικού MAN CEAS) για σύγκριση της εναλλακτικής τεχνολογίας της αμμωνίας με τις μηχανές του σήμερα. Λόγω πολλών κοινών χαρακτηριστικών της αμμωνίας με την μεθανόλη, ο κατασκευαστής MAN τονίζει πως αυτός ο κινητήρας θα μπορέσει να χρησιμοποιήσει την αμμωνία ως καύσιμο στο μέλλον με μερικές μετατροπές.

Τέλος, για την ολοκλήρωση της έρευνας θα παρουσιαστούν οι επιπτώσεις της αμμωνίας, όχι μόνο στο περιβάλλον, αλλά και σε πολιτικές και κοινωνικές πτυχές. Επιπλέον, οι οικονομικές εκτιμήσεις θα δείξουν εάν η αμμωνία είναι πράγματι μια βιώσιμη οικονομικά λύση και μέσω της αξιολόγησης κινδύνου θα διερευνηθούν όλες οι πιθανές απειλές.

## 1. IMO Regulations

Ο Διεθνής Οργανισμός IMO για την προφύλαξη από την ατμοσφαιρική μόλυνση, γνωστός και ως MARPOL, είναι η σημαντικότερη διεθνής ναυτιλιακή σύμβαση που ρυθμίζει τις εκπομπές πλοίων στο περιβάλλον. Το παράρτημα VI του MARPOL ορίζει τα παγκόσμια όρια και τα όρια του ECA για τα SO<sub>x</sub> και NO<sub>x</sub>. Από το 2020 και μετά, τα παγκόσμια ποσοστά θείου στα καύσιμα μειώθηκαν από 3,5% σε 0,5% (m/m) Η χρήση των Scrubbers θα επιτρέπεται βάσει αυτής της

πολιτικής. Από τον Ιανουάριο του 2015, τα πλοία που πλέουν σε SOx ECAs, δηλαδή SECAs, έχουν αναμένεται να χρησιμοποιούν καύσιμα με περιεκτικότητα σε θείο 0,1% (m/m) ή μικρότερη, ή παρόμοια διαδικασία όπως επεξεργασία καυσαερίων ή υποκατάστατα καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Η SECA της Βόρειας Ευρώπης, η ECA της Βόρειας Αμερικής και της Καραϊβικής των ΗΠΑ είναι οι τρεις υπάρχουσες SECA. Στην εικόνα I, απεικονίζονται αυτές οι τρεις περιοχές ECA. Νέα ECA θα μπορούσαν να αναπτυχθούν τα επόμενα χρόνια στο Μεξικό, την Τουρκία (Θάλασσα του Μαρμαρά) και τη Μεσόγειο Θάλασσα γενικότερα. Τα Scrubbers είναι εγκεκριμένα ως απαραίτητοι καθαριστές των καυσαερίων HFO. (IMO 2019)



Γράφημα 1 : Βαθμίδες εκπομπών NOx σε ECAs (Daihatsu Diesel)

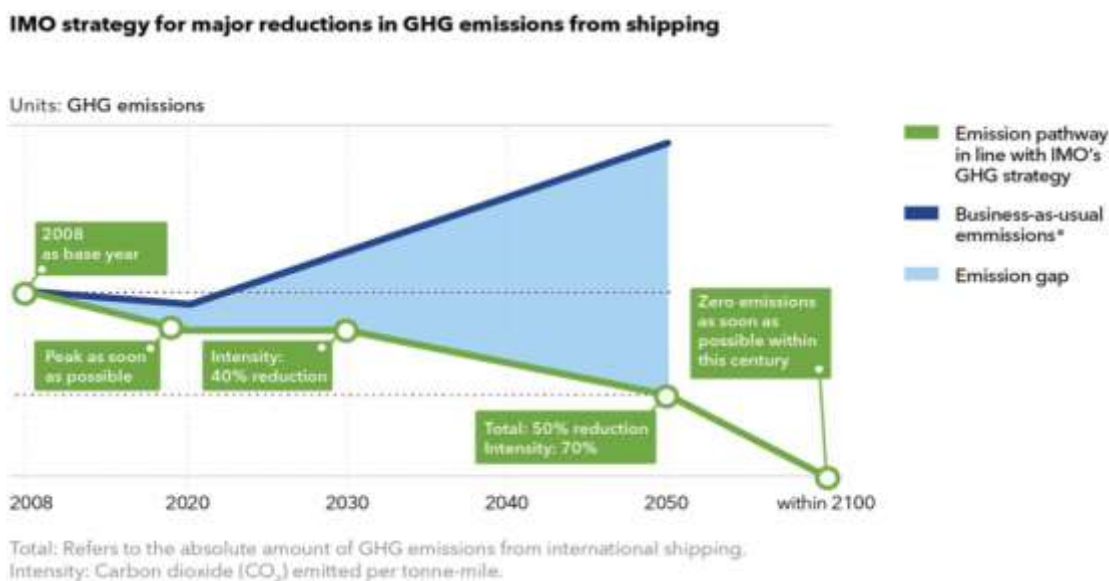
Επιπλέον, το παράρτημα VI της MARPOL καθορίζει οριακές τιμές NOx για κινητήρες ντίζελ πλοίων με ισχύ μεγαλύτερη από 130 kW, οι οποίες βασίζονται στη μέση ταχύτητα στροφείου του κινητήρα και την ημερομηνία κατασκευής του σκάφους. Η ημερομηνία που ξεκινάει η κατασκευή του πλοίου (keel laid) καθορίζει πότε ένα σκάφος πληροί τις προϋποθέσεις για τους κανονισμούς Βαθμίδων I, II ή III:

- Το Tier I περιλαμβάνει σκάφη των οποίων οι καρίνες τοποθετήθηκαν μεταξύ 1ης Ιανουαρίου 2000 και 1ης Ιανουαρίου 2011
- Το Tier II περιλαμβάνει σκάφη των οποίων οι καρίνες τοποθετήθηκαν μετά την 1η Ιανουαρίου 2011
- Η βαθμίδα III περιλαμβάνει σκάφη των οποίων οι καρίνες τοποθετήθηκαν μετά την 1η Ιανουαρίου 2016 και λειτουργούν στο ECA της Καραϊβικής ή στο ECA της Βόρειας Αμερικής

Σύμφωνα με τον IMO, για τις εκπομπές SOx και NOx, ο IMO επιβάλλει κανονισμούς που τείνουν να περιορίζουν τις εκπομπές από τα πλοία και να οδηγούν σε ένα περιβάλλον απαλλαγμένο από



τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Υπάρχει συμφωνία για τη μείωση των εκπομπών GHG από τη ναυτιλιακή βιομηχανία κατά 50% έως το 2050 και των εκπομπών άνθρακα (CO<sub>2</sub>) κατά 40% έως το 2030 και 70% έως το 2050, σε σχέση με το 2008 (IMO 2018 ), (Hansson, Brynolf, Fridell, & Lehtveer, 2020). Με βάση τους περιορισμούς που εφαρμόζει ο IMO, έχει διεξαχθεί μια ζωτικής σημασίας ακαδημαϊκή έρευνα για τη χρήση τεχνολογιών που συμμορφώνονται με τους κανονισμούς του IMO, μαζί με εργασίες και δημοσιεύσεις σε γνωστά περιοδικά.



Γράφημα 2 : Χάσμα εκπομπών GHG μεταξύ της στρατηγικής του IMO GHG και των εκπομπών BAU (DNV-GL 2019)

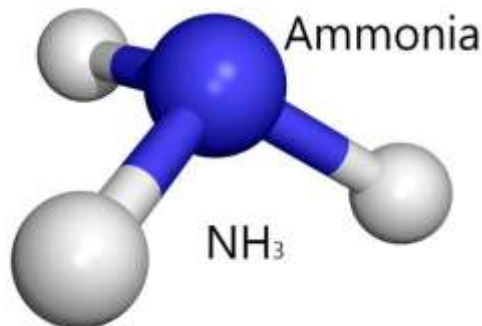
Οι ναυτιλιακές εταιρείες θα πρέπει να αναζητήσουν εναλλακτικά καύσιμα πλοίων για να μπορέσουν να ακολουθήσουν αυτές τις αυστηρές οδηγίες. Η αμμωνία μπορεί να αποδειχθεί ως πιθανή και αποτελεσματική λύση σε αυτό το πρόβλημα, όπως συζητείται στο τρέχον έργο.

## 2. Αμμωνία

### 2.1 Ιδιότητες της Αμμωνίας

Η αμμωνία είναι μια χημική ένωση με τον χημικό τύπο NH<sub>3</sub>. Δεδομένου ότι είναι χημική ένωση χωρίς άτομα άνθρακα, η κατανάλωση του σε ένα ICE (MEK), δεν οδηγεί σε εκπομπές CO<sub>2</sub>. Επιπλέον, η αμμωνία μετατρέπεται σε καύσιμο μηδενικού άνθρακα όταν κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας βιώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, δηλαδή η πράσινη αμμωνία ή τα ορυκτά καύσιμα με τεχνολογίες CCS, δηλαδή η Blue Ammonia. Θεωρείται ένα πολλά υποσχόμενο καύσιμο τελευταίας τεχνολογίας στη ναυτιλιακή βιομηχανία, καθώς μπορεί να υποσχεθεί ένα φιλικό προς το περιβάλλον μέλλον σύμφωνα με τους ισχύοντες

κανονισμούς του IMO, ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν προϋποθέσεις για την κάλυψη των υπερβολικά αυξανόμενων αναγκών σε καύσιμα στη ναυτιλιακή βιομηχανία.



Εικόνα 1: Συμβολική αναπαράσταση του μορίου της αμμωνίας, NH<sub>3</sub> (Πηγή : <https://studiousguy.com/ammonia-nh3-uses-benefits/>)

Επιπλέον, δεδομένου ότι η αμμωνία δεν περιέχει καθόλου θείο, δεν υπάρχει η ανάγκη να χρησιμοποιηθεί τεχνολογία αφαίρεσης εκπομπών SO<sub>x</sub> που να ακολουθεί τους κανονισμούς περί ρύπανσης του θείου, και ανεξάρτητα από το πόσα NO<sub>x</sub> απελευθερώνονται κατά την καύση της αμμωνίας, μπορούν να εξαλειφθούν από τα καυσαέρια χρησιμοποιώντας την τεχνολογία SCR. Με τη μετάβαση από την αμμωνία που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα στην πράσινη αμμωνία, το αποτύπωμα CO<sub>2</sub> μπορεί να μειωθεί ενώ εξακολουθεί να πληροί τα πρότυπα εκπομπών θείου.

Η αμμωνία είναι μια ένωση αζώτου και υδρογόνου και σε ατμοσφαιρική πίεση και κανονικές θερμοκρασίες είναι ένα άχρωμο αέριο με χαρακτηριστική έντονη μυρωδιά. Είναι ιδιαίτερα τοξική. Σε υψηλότερες πιέσεις η αμμωνία γίνεται υγρό, καθιστώντας ευκολότερη τη μεταφορά και την αποθήκευση. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη της αμμωνίας είναι παρόμοια με της μεθανόλης. Είναι μια υγροσκοπική ένωση, η οποία υποδηλώνει ότι έχει ισχυρή έλξη για το νερό. Είναι ελαφρύτερη από τον αέρα στην αέρια μορφή του. Ωστόσο, λόγω των υγροσκοπικών της ιδιοτήτων, η απελευθερωμένη άνυδρη αμμωνία (δηλαδή χωρίς την παρουσία νερού στη φυσική της κατάσταση) μπορεί να απορροφήσει γρήγορα την υγρασία από τον αέρα και να δημιουργήσει ένα παχύ και ορατό λευκό σύννεφο με πυκνότητα μεγαλύτερη από αυτή του αέρα (Ammonia as a marine fuel, Safety Handbook, 2020).

Η αμμωνία μπορεί επίσης να διαλυθεί εύκολα στο νερό για να παραχθεί υδροξείδιο του αμμωνίου (NH<sub>4</sub>OH). Θεωρείται διαβρωτική και έχει αλκαλικές ιδιότητες, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να διαβρώσει υλικά υψηλής αντοχής, π.χ. χυτοσίδηρο, μπρούτζο, ορείχαλκο και κράματα χαλκού. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται προσεκτική επιλογή υλικού.

Η αμμωνία είναι επίσης εύφλεκτη, αν και είναι δύσκολο να καεί. Σε εξωτερικούς χώρους, οι ατμοί αμμωνίας είναι απίθανο να προκαλέσουν πυρκαγιά, αλλά σε εσωτερικούς χώρους και σε κλειστούς χώρους, η πιθανότητα καύσης είναι μεγαλύτερη, ιδιαίτερα εάν το λάδι και άλλα εύφλεκτα υλικά βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Όταν εκτίθεται σε υψηλή θερμοκρασία, υπάρχει πιθανότητα οι δεξαμενές πίεσης που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της αμμωνίας, να πιάσουν φωτιά. Δεδομένου ότι η αμμωνία αποστέλλεται σε υγρή μορφή, πρέπει να συμπυκνωθεί, να ψυχθεί ή να γίνει ένα μείγμα όλων. Σε περιβαλλοντική πίεση, δηλαδή 1 bar, η αμμωνία πλήρως ψυγμένη αποθηκεύεται σε υγρή μορφή στους -33°C, ενώ οι δεξαμενές πλήρους πίεσης έχουν αναπτυχθεί για 18 bar, η οποία παλινδρομεί στην πίεση ατμών αμμωνίας στους 45°C.

Πίνακας 1 : Βασικές ιδιότητες της αμμωνίας σε σύγκριση με το MGO ( Πηγή : European Maritime Safety Agency (EMSA) )

Item	Ammonia	MGO
Energy density (MJ/L)	12.9	35.95
Latent heat of vapourisation (LHV) (MJ/kg)	18.8	42.8
Heat of vapourisation (kJ/kg)	1371	250-450
Autoignition temperature (°C)	651	250
Liquid density (kg/m <sup>3</sup> )	696 (at -33 °C)	840 (at 15 °C)
Adiabatic flame temperature at 1 bar (°C)	1800	2000
Molecular weight (g/mol)	17.031	54
Melting point (°C)	-77.7	-26
Boiling point (°C)	-33	154
Flash point (°C)	132	60
Critical temperature (°C)	132.25	654.85
Critical pressure (bar)	113	30
Flammable range in dry air (%)	15.15 to 27.35	0.7 - 5
Minimum ignition energy (mJ)	8	0.23
Cetane number	0	40
Octane number	~130	15-25

Όπως με τα περισσότερα εναλλακτικά καύσιμα, έχει χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τα καύσιμα μαζούτ, επομένως η παραγωγή του ίδιου ενεργειακού περιεχομένου θα απαιτούσε περίπου 2,4 φορές περισσότερο όγκο σε σύγκριση με τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο. Οι ιδιότητες της αμμωνίας παρατίθενται στον παραπάνω πίνακα τον Πίνακα, συγκριτικά με το MGO.

Μεταξύ των ιδιοτήτων της υγρής αμμωνίας είναι η ενεργειακή της πυκνότητα περίπου 18,6 MJ/kg. Είναι σημαντικά χαμηλότερο από τα σημερινά καύσιμα πλοίων καθώς και από το φυσικό αέριο και το υγραέριο. Άρα η αμμωνία έχει σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα. Επίσης δεν έχει ικανοποιητική θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης, οπότε χρειαζόμαστε βοηθητικά καύσιμα

(Pilot Fuels) για να κάνουμε τη δουλειά. Καταλαβαίνουμε ότι είναι μύθος ότι η αμμωνία θα είναι ελεύθερη σε άνθρακα, καθώς τα βοηθητικά καύσιμα παράγουν CO<sub>2</sub> όταν καίγονται.

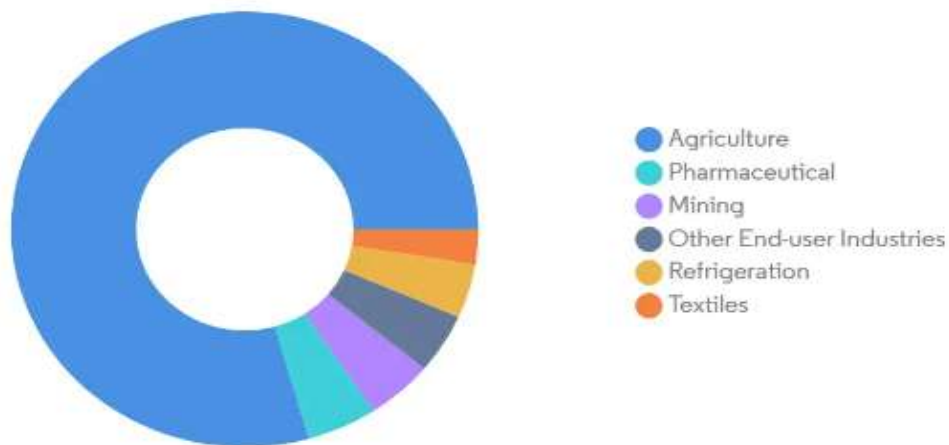
## 2.2 Η αγορά σήμερα

Τα τελευταία χρόνια, η Αμμωνία διατίθεται στο εμπόριο ως άνυδρη αμμωνία, η οποία είναι αδιάλυτη, δηλαδή, εξαιρετικά ξηρή αμμωνία υψηλής καθαρότητας. Παρέχεται είτε ως συμπιεσμένο ή κρυογονικό υγρό, είτε ως διάλυμα αμμωνίας ή υδατικής αμμωνίας διαλυμένη σε διάφορες ποσότητες με νερό (Ammonia Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 - 2026), 2021). Η άνυδρη αμμωνία ταξινομείται ως επικίνδυνο προϊόν και πρέπει να μεταφέρεται σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς. Δεδομένου ότι η αμμωνία λέγεται ότι είναι ένα τοξικό αέριο, θα πρέπει να αντιμετωπίζεται και να χειρίζεται προσεκτικά κατά τη μεταφορά. Οι μεταφορείς αερίου πολλαπλών φορτίων (Multi-cargo gas carriers) χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά αμμωνίας ως φορτίου (GL, Energy Transition Outlook 2018: A global and regional forecast to 2050, 2019). Πιο συγκεκριμένα, οι κύριες χρήσεις της αμμωνίας στη σημερινή αγορά είναι οι εξής:

- **Χρήση άνυδρης αμμωνίας για γεωργικούς σκοπούς:** Περίπου το 80% - 85% της παγκόσμιας παραγωγής αμμωνίας χρησιμοποιείται στην παραγωγή λιπασμάτων, συχνά είτε ως ουρία είτε ως νιτρικό αμμώνιο, το οποίο διατίθεται σε διάφορες ποιότητες. Η υγρή αμμωνία μπορεί επίσης να εφαρμοστεί απευθείας στη γη. Κάθε χρόνο, 670.000 τόνοι του περιγραφόμενου είδους αμμωνίας, για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται στη γεωργία αποκλειστικά στο Ιλινόις. Επιτυγχάνεται εύκολα, καθώς τα επιβεβλημένα προστατευτικά πρωτόκολλα είναι επιτυχή στην αποφυγή σχετικών τραυματισμών σε σημαντικό βαθμό (Fecke, Garner, & Cox, 2016).
- **Αξιοποίηση της αμμωνίας μέσω ψύξης:** Η NH<sub>3</sub> έχει αποτελεσματικές θερμοδυναμικές ιδιότητες και ως εκ τούτου, είναι βιώσιμο να χρησιμοποιηθεί ως ψυκτικό μέσο. Περίπου 360.000 μετρικοί τόνοι NH<sub>3</sub> χρησιμοποιούνται στη Βόρεια Αμερική σε ετήσια βάση (Fecke, Garner, & Cox, 2016). Δεδομένου ότι η αμμωνία χρησιμοποιείται συνήθως σε κλειστούς χώρους, παρόμοιο με τη χρήση της στο πλοίο, πρέπει να εξεταστούν πώς μπορούν να αντιμετωπιστούν τα θέματα ασφάλειας με τη χρήση της αμμωνίας ως ψυκτικού μέσου.

- **Άλλες χρήσεις της αμμωνίας:** Εκτός από τις προαναφερθείσες χρήσεις της αμμωνίας στην τρέχουσα αγορά ως ψυκτικό μέσο και λίπασμα στη γεωργική βιομηχανία, η αμμωνία χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, στον φαρμακευτικό τομέα και σε άλλες βιομηχανίες «τελικού χρήστη». Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι η αμμωνία χρησιμοποιείται σήμερα στον κλάδο της ναυτιλίας, καθώς τεράστιες ποσότητες αμμωνίας μεταφέρονται ετησίως ως εμπόρευμα. Πιο συγκεκριμένα, προς το παρόν, 170 πλοία είναι ικανά να μεταφέρουν αμμωνία ως φορτίο, με τα 40 από αυτά να το μεταφέρουν σε τακτική βάση (Brown, 2019). Προφυλάξεις που σχετίζονται με ομοιόμορφη ασφάλεια για φορείς υγραερίου, ενσωματώνουν διαδικασίες ανίχνευσης διαρροών, απελευθέρωση αερίου, έρμα και πλύσιμο φορτίου, διαδικασίες έκτακτης ανάγκης και εκπαίδευση του πληρώματος. Ειδικότερα, για το άνυδρο NH<sub>3</sub>, το σκάφος χρειάζεται εγκατεστημένα συστήματα για την παρακολούθηση των δυνητικά επικίνδυνων ατμών σε περίπτωση μεταφοράς άνυδρης αμμωνίας (DNV GL, 2016)

Ammonia Market, Volume (%), by End-user Industry, Global, 2021



Γράφημα 3 Η αγορά της αμμωνίας σήμερα ( Πηγή : Mordor Intelligence)

### 2.3 Παραγωγή Αμμωνίας

Προς το παρόν, η κύρια πηγή παραγωγής αμμωνίας είναι σύμφωνα με τη βιομηχανική προσέγγιση. Όσον αφορά αυτόν τον τύπο προσέγγισης, η συμβατική αμμωνία μπορεί να παράγεται από ορυκτά καύσιμα ή από μπλε αμμωνία από φυσικό αέριο, μέσω της διαδικασίας

ΗΒ, αλλά πρέπει να αντιμετωπιστούν αρκετές οικονομικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις. Η παγκόσμια παραγωγή αμμωνίας ανέρχεται σε περίπου 150 εκατομμύρια τόνους το 2016, με την Κίνα να αντιπροσωπεύει περίπου το 30% και τη Ρωσία, την Ινδία και τις ΗΠΑ σχεδόν το 10% η καθεμία (Giddey, Badwal, Munnings, & Dolan, 2017). Η αμμωνία αποτελεί επίσης διεθνές εμπόριο και επί του παρόντος εξάγεται κυρίως από υδρογόνο και άζωτο με βάση τα ορυκτά καύσιμα από τον αέρα σε εργοστάσια επεξεργασίας μεγάλης κλίμακας (έως περίπου 3.000 τόνους την ημέρα).

Παρόλο που η πράσινη και η συμβατική αμμωνία έχουν διαφορετικά αποτυπώματα άνθρακα (carbon footprints), το φυσικό προϊόν είναι σχεδόν το ίδιο. Από βιομηχανικής άποψη, τόσο η συμβατική όσο και η πράσινη αμμωνία, μαζί με κάθε πιθανό συνδυασμό τους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο πλοίων. Επειδή η αμμωνία είναι ένα κοινό προϊόν που διατίθεται στο εμπόριο σε τεράστιες ποσότητες, μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο επένδυσης χρημάτων σε ένα πλοίο με αμμωνία.

Πρόκειται για έναν κύκλο τεχνολογικής έρευνας που έχει σημαντικό αντίκτυπο όχι μόνο στη ναυτιλιακή βιομηχανία, αλλά και σε ολόκληρη την κοινωνία. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι περισσότερες από τις προκλήσεις της πράσινης αμμωνίας ως εναλλακτικού καυσίμου έχουν μετριαστεί, η πράσινη αμμωνία μπορεί να γίνει μια έξυπνη λύση όσον αφορά τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται για πολλά πλοία.

Οι ναυτιλιακές εταιρείες θέλουν να συμμορφωθούν με τους κανονισμούς του IMO 2050, οι οποίοι αναφέρουν συνοπτικά ότι οι μηδενικές εκπομπές άνθρακα θα είναι υποχρεωτικές για τους στόλους τους. Ειδικότερα, μετά την επιτυχή εφαρμογή της αμμωνίας ως εναλλακτικό καύσιμο, το EEDI (Energy Efficiency Design Index) και το SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) θα βελτιωθούν, σε σύγκριση με τα σημερινά καύσιμα.

### 2.3.1 Συμβατική Αμμωνία

Η συμβατική NH<sub>3</sub> παράγεται πολλές φορές τακτικά από φυσικό αέριο ή από άνθρακα.. Ενώ οι σύγχρονες υποδομές υψηλής απόδοσης έχουν σημαντικά χαμηλό αποτύπωμα, δηλαδή 1,6 τόνους CO<sub>2</sub> ανά τόνο αμμωνίας, οι σημερινές είναι συνήθως κοντά στους 2 τόνους CO<sub>2</sub> ανά τόνο αμμωνίας. Επιπλέον, στην περίπτωση των μονάδων με βάση τον άνθρακα, το αποτύπωμα μπορεί να φτάσει τους 3 τόνους CO<sub>2</sub> ανά τόνο αμμωνίας. Το κόστος της συμβατικής αμμωνίας είναι περίπου 250 USD/MT, που συμπίπτει με τη μέση τιμή των προηγούμενων ετών.

### 2.3.2 Μπλε Αμμωνία

Η «πράσινη ναυτιλία» ως γενικό σχέδιο είναι αυτό που ωθεί κάθε εμπλεκόμενο τομέα στα όριά του, όπως βιομηχανίες πετρελαίου, βιομηχανίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περιβαλλοντικές οργανώσεις, κοινωνίες, χώρες και ναυτιλιακές εταιρείες. Οι ιδέες και οι τεχνολογίες τους ήταν πάντα καινοτόμες και πάντα ένα βήμα μπροστά. Με βάση αυτό, το έργο «Μπλε Αμμωνία» θεωρείται ως μία από αυτές τις ιδέες και ως μία από τις πιο επίκαιρες τεχνολογίες που ενδέχεται να προσαρμοστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια στους νέους κανονισμούς του IMO που θα αλλάξουν τον ναυτιλιακό κλάδο όπως είναι γνωστός μέχρι τώρα. Η παραγωγή αμμωνίας με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν θα είναι προφανώς η μόνη λύση στο πρόβλημα αλλά είναι από τις πιο εφικτές και ταυτόχρονα καινοτόμες. Νέες τεχνολογίες θα εφευρεθούν, θα αναπτυχθούν και θα χρησιμοποιηθούν. Περισσότεροι ανανεώσιμοι πόροι ενέργειας, λιγότερα GHG (Greenhouse Gases), νέες διαδρομές για τα πλοία θα σχεδιαστούν, ακόμη και νέες οικονομίες θα έρθουν στο φως.

Παράγεται βασικά όπως το συμβατικό NH<sub>3</sub> εκτός από το γεγονός ότι το CO<sub>2</sub> που οφείλεται στην παραγωγή δεσμεύεται, υγροποιείται και αποστέλλεται σε μια μακροπρόθεσμη εγκατάσταση για αποθήκευση, γνωστή ως CCS (Carbon Capture and Storage). Με βάση όσα προαναφέρθηκαν, το ισοδύναμο αποτύπωμα CO<sub>2</sub> ανά τόνο παραγωγής αμμωνίας ισούται με το αντίστοιχο αποτύπωμα που παράγεται από σύγχρονες μονάδες υψηλής απόδοσης (high-efficiency plants), που παράγουν συμβατική αμμωνία από καύση LNG, δηλαδή 1,6 τόνους διοξείδιο του άνθρακα ανά τόνο αμμωνίας.

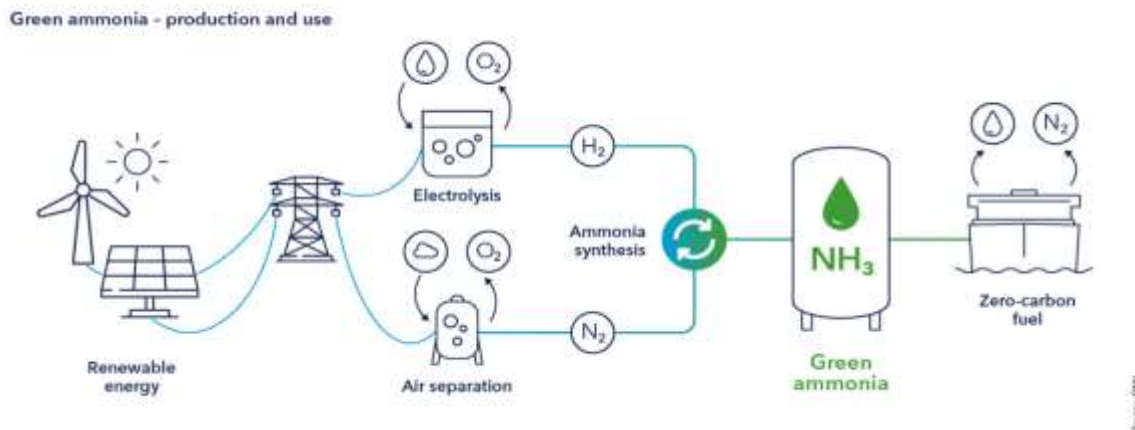
Η αναμενόμενη τιμή της μπλε αμμωνίας είναι από 350 έως 400 USD/MT NH<sub>3</sub> που είναι η εμπορική τιμή του συμβατικού NH<sub>3</sub> συν το κόστος δέσμευσης, υγροποίησης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 2 : Παραγωγή μπλε αμμωνίας (Πηγή : CF)

### 2.3.3 Πράσινη Αμμωνία

Η πράσινη αμμωνία - ή αμμωνία που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας - παράγεται αποκλειστικά από βιώσιμους πόρους ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ηλιακούς, αιολικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Το αποτύπωμά του άνθρακα υποτίθεται ότι είναι μηδενικό, γιατί δυνητικά, θα μπορούσε να είναι σε ένα μέλλον όπου όλα τα βιομηχανικά και μεταφερόμενα τμήματα κινούνται προς τη βιωσιμότητα, παραμελώντας πλήρως το LCA (Life-Cycle Assessment) , που θα παρεμποδίσει την κατασκευή και την απομάκρυνση του εργοστασίου στο χώρο ανεφοδιασμού. Οι αρχικές εκτιμήσεις της συρρίκνωσης των εκπομπών του κύκλου ζωής για την πράσινη αμμωνία είναι μεγαλύτερη από 90% για την αμμωνία που βασίζεται στην αιολική ενέργεια και μεγαλύτερη από 75% για την αμμωνία με βάση τα φωτοβολταϊκά. Η μείωση θα αυξηθεί σταδιακά, καθώς οι εκπομπές του κύκλου ζωής λόγω των βιώσιμων ενεργειακών πόρων μειώνονται με την περαιτέρω λειτουργία της βιώσιμης ενέργειας σε ανεμογεννήτριες και παραγωγή φωτοβολταϊκών.

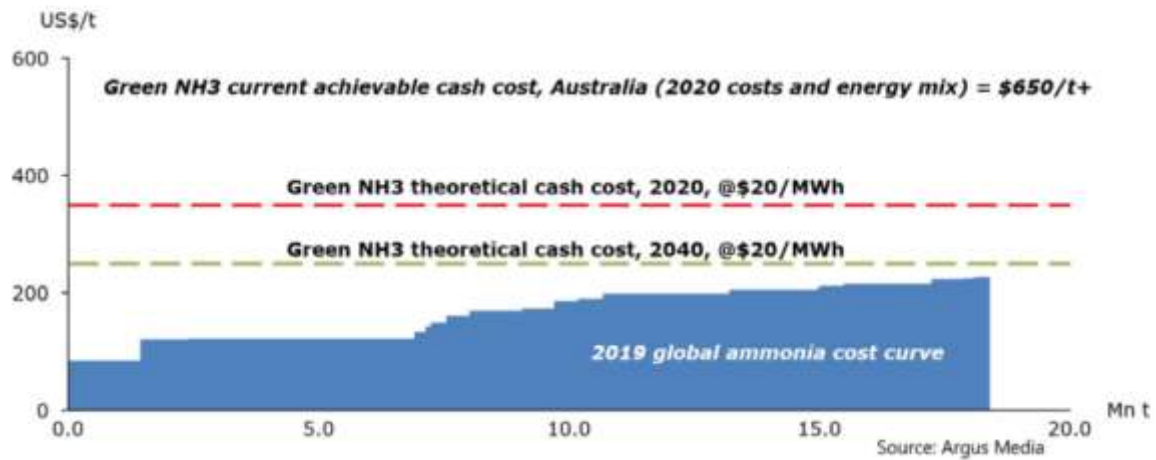


Εικόνα 3 : Παραγωγή πράσινης αμμωνίας ( Πηγή : DNV )

Ως εκ τούτου, αναμένεται να φτάσουν μικρότερα εργοστάσια μέχρι το 2025 και να αυξήσουν το κόστος της πράσινης αμμωνίας σε ένα εύρος 650-850 USD/MT. Μέχρι το 2030, προβλέπεται να εμφανιστούν μεγαλύτερα εργοστάσια και το αντίστοιχο κόστος θα μειωθεί σε ένα εύρος από 400 έως 600 USD/MT, και από το 2040 προβλέπεται να φτάσει το κόστος σε ένα πιο λογικό εύρος από 275 έως 450 USD /MT.



**Figure 5: Global ammonia cost curve and green ammonia cost estimates**



Γράφημα 4 :Καμπύλη κόστους αμμωνίας και εκτιμήσεις κόστους πράσινης αμμωνίας ( Πηγή : Ammonia Energy Association )

Λόγω των τεράστιων ποσοτήτων καυσίμων πλοίων που καταναλώνονται από τους ναυτιλιακούς στόλους παγκοσμίως, απαιτείται σημαντική αλλά πρακτική επέκταση της ικανότητας παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Η παρούσα κατανάλωση καυσίμων πλοίων είναι περίπου 250 εκατομμύρια τόνοι. Υπολογίζεται ότι το 25-50% της κατανάλωσης καυσίμου θα αντικατασταθεί από αμμωνία έως το 2050. Η παροχή 30% της τρέχουσας κατανάλωσης καυσίμου πλοίων ως ανανεώσιμη αμμωνία, για παράδειγμα, θα συνεπαγόταν την παραγωγή περίπου 135 εκατομμυρίων τόνων αμμωνίας, λαμβάνοντας υπόψη το LHV (lower heating value) .

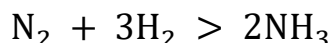
Υποθέτοντας ότι αυτοί οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής θα λειτουργούν ετησίως χωρίς διακοπές, η συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για 1.350 TWh θα παραχθεί, σύμφωνα με την τρέχουσα έρευνα. Λόγω της πιο αποδοτικής τεχνολογίας ηλεκτρόλυσης, η ενεργειακή απόδοση της διαδικασίας ισχύος προς αμμωνία προβλέπεται να αυξηθεί έως και 20% την επόμενη δεκαετία (GL, Maritime forecast to 2050, 2018).

Η πράσινη αμμωνία πρέπει να παράγεται με την ηλεκτροχημική διαδικασία HB που χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως πρώτη ύλη (Soloveichik, 2019). Αυτή η μέθοδος μπορεί να βελτιώσει το αποτύπωμα άνθρακα μειώνοντας τους ατμοσφαιρικούς ρύπους και επίσης μειώνοντας το CAPEX και το OPEX των βιομηχανικών διαδικασιών.

### 2.3.4 Haber Bosch

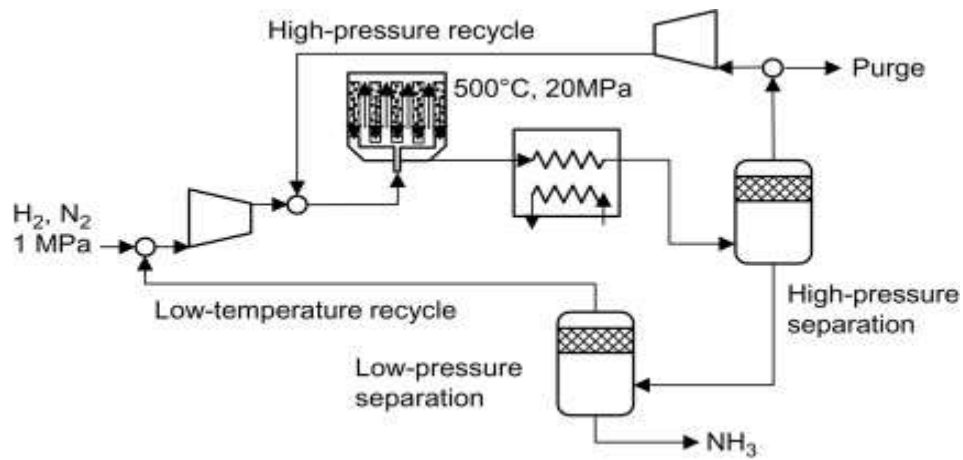
Η διαδικασία Haber-Bosch ήταν μια από τις πιο επιτυχημένες και καλά μελετημένες αντιδράσεις και πήρε το όνομά της από τον Fritz Haber (1868-1934) και τον Carl Bosch (1874-1940). Ο Haber πρότεινε για πρώτη φορά τη χρήση μιας τεχνικής αντίδρασης υψηλής πίεσης. Η διαδικασία Haber-Bosch έχει αποτρέψει τη μαζική ασιτία τον περασμένο αιώνα και μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην οικονομία του υδρογόνου.

Η αμμωνία παράγεται από H<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>, παραδοσιακά με τη διαδικασία HB:

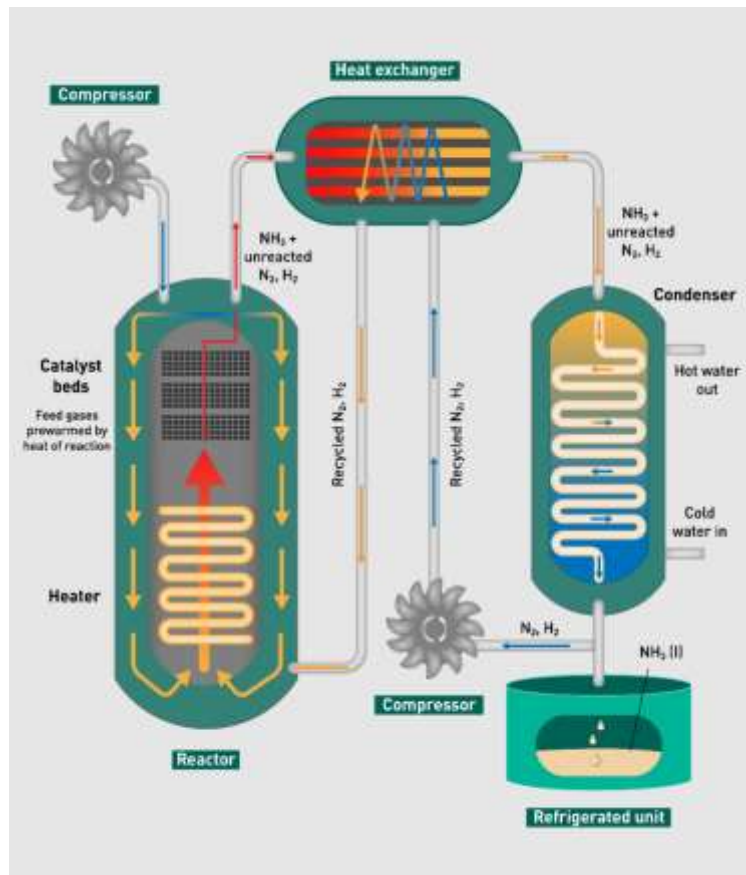


Η σύνθεση Haber-Bosch είναι μια εξώθερμη διαδικασία που χρησιμοποιεί υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (400-500 °C) και πιέσεις (150-300 bar). Στη διαδικασία, το άζωτο και το υδρογόνο συνδυάζονται άμεσα. Αυτή η διαδικασία επιταχύνεται από την παρουσία ενός μεταλλικού καταλύτη. Η διαδικασία μετατρέπει το ατμοσφαιρικό άζωτο (N<sub>2</sub>) σε αμμωνία (NH<sub>3</sub>) μέσω μιας αντίδρασης με υδρογόνο (H<sub>2</sub>) χρησιμοποιώντας έναν μεταλλικό καταλύτη υπό υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Αυτή η αντίδραση είναι ελαφρώς εξώθερμη (δηλαδή απελευθερώνει ενέργεια), που σημαίνει ότι η αντίδραση ευνοείται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερες πιέσεις. Μειώνει την εντροπία, περιπλέκοντας τη διαδικασία. Το υδρογόνο παράγεται μέσω αναμόρφωσης ατμού, ακολουθούμενο από έναν επαναληπτικό κλειστό κύκλο για την αντίδραση του υδρογόνου με το άζωτο για την παραγωγή αμμωνίας. Το N<sub>2</sub> για τη διεργασία HB παράγεται από τον αέρα είτε μέσω του σταδίου αναμόρφωσης είτε μιας ξεχωριστής διαδικασίας διαχωρισμού αέρα που εκμεταλλεύεται μια κρυογονική απόσταξη, διαχωρισμού με μεμβράνη πολυμερούς ή απορρόφηση εναλλαγής πίεσης.

Η εμπορική παραγωγή αμμωνίας απαιτεί βαρύ εξοπλισμό για την αντιμετώπιση των απαιτούμενων υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων. Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται για την προθέρμανση των αντιδρώντων και για την ψύξη του μίγματος ισορροπίας πριν από την ψύξη για τη συμπύκνωση της αμμωνίας



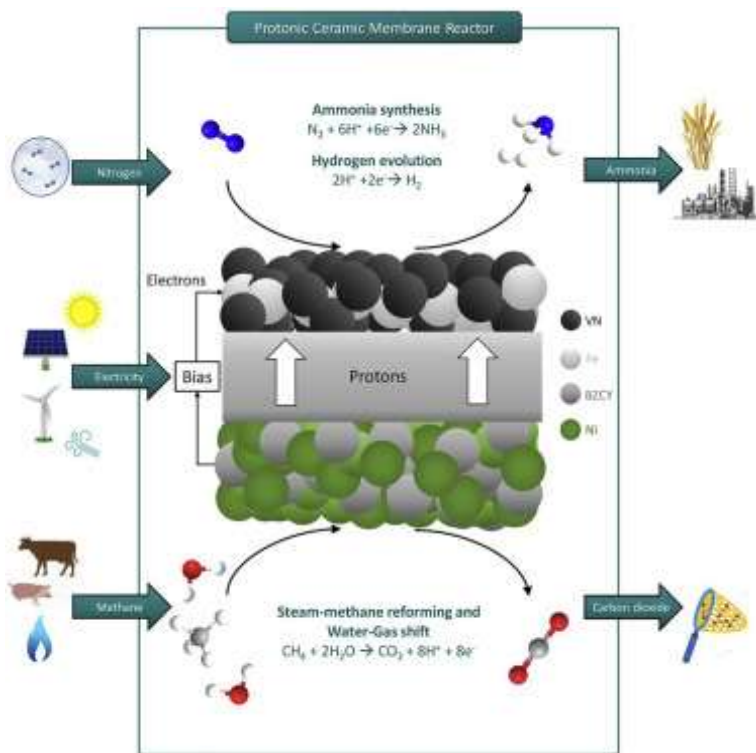
Εικόνα 4 : Συμβατική ροή της διαδικασίας Haber-Bosch (Πηγή : Science Direct)



Εικόνα 5 : Διαδικασίας Haber-Bosch (Πηγή : Flexim)

Άλλες εφικτές οδοί παραγωγής  $NH_3$  ενσωματώνουν ηλεκτροχημική σύνθεση κατά την οποία η αμμωνία συντίθεται σε έναν αυτόνομο ηλεκτροχημικό αντιδραστήρα χρησιμοποιώντας νερό ή ατμό,  $N_2$  και ηλεκτρισμό. Πραγματοποιείται σε ένα εύρος θερμοκρασιών που κλιμακώνονται από τη θερμοκρασία δωματίου έως τους  $800^\circ C$ , ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται,

αλλά δεν είναι εμπορικά διαθέσιμος (Giddey, Badwal, Munnings, & Dolan, 2017). Οι ρυθμοί παραγωγής NH<sub>3</sub> από αυτές τις παρόμοιες διαδικασίες εξακολουθούν να είναι σχετικά χαμηλοί. Ωστόσο, περαιτέρω ανάπτυξη και έρευνα υπόσχονται να επιτευχθούν ικανοποιητικά υψηλά ποσοστά για εμπορευματοποίηση (Soloveichik, 2019).

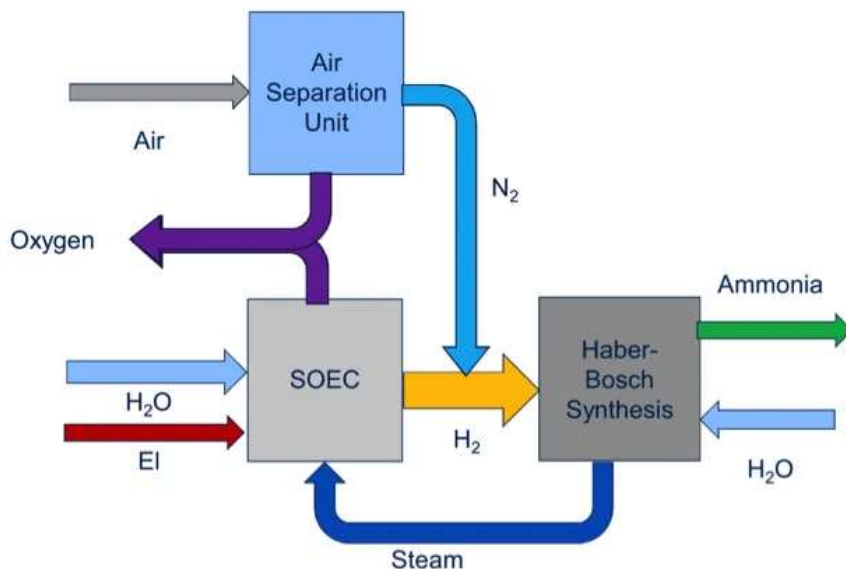


Εικόνα 6 : Ηλεκτροχημική σύνθεση αμμωνίας μέσω HB (Πηγή : Science Direct)

Η διαδικασία HB αναμένεται να διερευνηθεί διεξοδικά τα επόμενα χρόνια, προκειμένου οι οδοί ηλεκτροχημικής παραγωγής αμμωνίας να γίνουν πιο ρεαλιστικές και εφαρμόσιμες (Soloveichik, 2019). Πιθανά πλεονεκτήματα του ηλεκτροχημικού HB εισάγουν μείωση στη χρήση ενέργειας, επεκτασιμότητα, δηλ. την ικανότητα περιορισμού της διακοπτόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μειωμένη ζήτηση καθαρότητας εισόδου N<sub>2</sub> (Soloveichik, 2019). Ωστόσο, οι προσεγγίσεις παραγωγής για την ανανεώσιμη αμμωνία δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί και διερευνηθούν.

Σύμφωνα με τους (Zhang & Brown, 2019), μια καινοτόμα ιδέα για βιώσιμη NH<sub>3</sub> είναι η καινοτόμος τεχνολογία της Haldor Topsøe, η οποία χρησιμοποιεί μια κυψέλη ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου για την παραγωγή H<sub>2</sub> και N<sub>2</sub> από νερό και αέρα και στη συνέχεια τροφοδοτείται στη διαδικασία HB. Αντιπροσωπεύει μια αφομοίωση τόσο της συσκευής ηλεκτρόλυσης όσο και

των μονάδων HB, χωρίς να χρειάζεται μονάδα διαχωρισμού αέρα, και ενδεχομένως να έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο κόστος και χρήση ενέργειας. Η ζήτηση ενέργειας εκτιμάται ότι βρίσκεται στο ίδιο ή καλύτερο εύρος των σύγχρονων μονάδων NH<sub>3</sub> που καταναλώνουν φυσικό αέριο. Αυτή η ιδέα αναμένεται να εμφανιστεί στην αγορά μέχρι το 2030 (Zhang & Brown, 2019).



Εικόνα 7 : Διάγραμμα ροής διεργασίας για εμφάνιση κυψέλης ηλεκτρόλυσης στερεού οξειδίου και μονάδας διαχωρισμού αέρα που τροφοδοτεί τη μονάδα Haber-Bosch. (Πηγή: Haldor Topsøe)

## 2.4 Ασφάλεια και Κίνδυνοι

Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν πολλές διαφορετικές πτυχές που μπορεί να είναι προκλητικές όσον αφορά την επικινδυνότητα της αμμωνίας. Οι ιδιότητες της αμμωνίας οδηγούν σε κινδύνους αναφλεξιμότητας, τοξικότητας και διάβρωσης. Η διαρροή αμμωνίας επίσης, οδηγεί σε θαλάσσια και ατμοσφαιρική ρύπανση, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε καταστροφή του οικοσυστήματος. Η βλάβη συστημάτων τροφοδοσίας καυσίμων και έλλειψη εξοπλισμού διασφάλισης ασφάλειας λόγω ανεπαρκούς τροποποίησης των υφιστάμενων σχεδίων πλοίων είναι και αυτό πολύ πιθανό σενάριο. Η έλλειψη εκπαίδευσης για το πλήρωμα των πλοίων νέας ενέργειας οδηγεί επίσης σε πολλά προβλήματα όπως η κακή συντήρηση του εξοπλισμού και η ανακριβής εμφάνιση του εξοπλισμού παρακολούθησης.

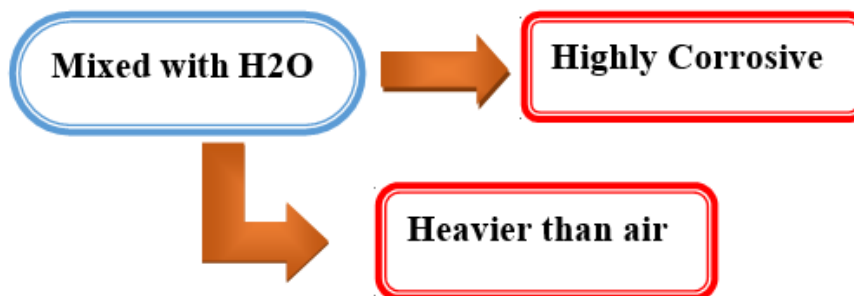
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι γενικοί κίνδυνοι της αμμωνίας :

Πίνακας 2 : Γενικοί κίνδυνοι αμμωνίας

Γενικοί Κίνδυνοι
Διαροή της Αμμωνίας
Ευφλεκτότητα
Ρύπανση της θάλασσας
Ρύπανση του αέρα
Τοξικότητα
Διάβρωση
Βλάβη του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου
Αστοχία εξοπλισμού ανίχνευσης
Έλλειψη συστημάτων και κανονισμών ασφάλειας
Έλλειψη συντήρησης μηχανημάτων

### 2.4.1 Τοξικότητα και Διάβρωση

Η αμμωνία είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και διαθέσιμη στο εμπόριο χημική ουσία και βρίσκεται στη φύση και τοξική σε συμπυκνωμένη μορφή. Η αμμωνία είναι πολύ τοξική για τον άνθρωπο. Η έκθεση στην αμμωνία πρέπει να περιορίζεται στα επιτρεπόμενα όρια για την ασφάλεια του προσωπικού στο πλοίο. Η άνυδρη αμμωνία είναι μια υδροσκοπική ένωση, που σημαίνει ότι αναζητά νερό από την πλησιέστερη πηγή, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπινου σώματος. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις, η αμμωνία μπορεί να είναι ερεθιστική για τα μάτια, τους πνεύμονες και το δέρμα και σε υψηλές συγκεντρώσεις ή μέσω άμεσης επαφής είναι άμεσα απειλητική για τη ζωή. Όταν αναμειγνύεται με νερό, γίνεται πολύ διαβρωτικό και επίσης πιο βαρύ από τον αέρα, επομένως αποτελεί κίνδυνο για την υγεία.



Εικόνα 8 : Ανάμιξη αμμωνίας με νερό

Η αμμωνία είναι ασυμβίβαστη με διάφορα βιομηχανικά υλικά και με παρουσία υγρασίας αντιδρά και διαβρώνει τον χαλκό, τον ορείχαλκο, τον ψευδάργυρο και διάφορα κράματα σχηματίζοντας

ένα πρασινωπό/μπλε χρώμα. Η αμμωνία είναι ένας αλκαλικός αναγωγικός παράγοντας και αντιδρά με οξέα, αλογόνα και οξειδωτικά μέσα. Τα υλικά πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά όταν χρησιμοποιείται αμμωνία σε ένα σκάφος. Σίδηρος, χάλυβας και ειδικά μη σιδηρούχα κράματα ανθεκτικά στην αμμωνία θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για δεξαμενές, αγωγούς και δομικά εξαρτήματα όπου χρησιμοποιείται αμμωνία. Η διάβρωση λόγω καταπόνησης προκαλείται και εξελίσσεται γρήγορα σε υψηλές θερμοκρασίες στον χάλυβα όταν εισάγονται επίπεδα οξυγόνου άνω των λίγων ppm σε υγρή αμμωνία. Ο κώδικας IGC περιγράφει τις απαιτήσεις για εξαρτήματα σωληνώσεων, δεξαμενές φορτίου και εξοπλισμό σε επαφή με υγρό ή ατμό αμμωνίας. Στην εικόνα μπορούμε να δούμε τι μπορεί να συμβεί με τη διάβρωση, εάν χρησιμοποιήσουμε ένα ασυμβίβαστο υλικό.

Η καύση της αμμωνίας μπορεί να σχηματίσει τοξικά οξείδια του αζώτου. Αναγνωρίζεται ότι το NO<sub>2</sub> από άλλες πηγές μπορεί να επιδεινώσει καρδιαγγειακές και αναπνευστικές ασθένειες, με εκτίμηση 23.500 πρόωρων θανάτων ετησίως μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο. Παρόλο που έχει διεξαχθεί σημαντική έρευνα για την κατανόηση της διαδικασίας σχηματισμού αυτού του ρύπου, ο σχηματισμός και η κατανάλωσή του κατά τις διεργασίες καύσης και μετά την καύση με χρήση αμμωνίας εξακολουθούν να βρίσκονται στον πυρήνα των ερευνητικών προγραμμάτων διαφόρων ερευνητικών ομάδων (Valera-Medina et al., 2018).

#### 2.4.2 Φωτιά και Ευφλεκτότητα

Η αμμωνία είναι ένα εύφλεκτο αέριο με στενό εύρος ευφλεκτότητας. Το εύφλεκτο εύρος του σε ξηρό αέρα είναι μεταξύ 15,15% και 27,35% και έχει θερμοκρασία αυτόματης ανάφλεξης 651 °C. Ο κίνδυνος πυρκαγιάς λόγω αμμωνίας είναι χαμηλότερος σε σύγκριση με άλλα καύσιμα λόγω του στενού εύρους αναφλεξιμότητας, της σχετικά υψηλής ενέργειας ανάφλεξης (2-3 τάξεις μεγέθους υψηλότερη από τους κοινούς υδρογονάνθρακες) και του χαμηλού ρυθμού καύσης (πάνω από τέσσερις φορές μικρότερη από το μεθάνιο [ $< 0,010$  m/s] και επίσης λιγότερο από το υδρογόνο). Ωστόσο, υπάρχει πιθανότητα πυρκαγιών λόγω αμμωνίας υπό τις κατάλληλες συνθήκες και οι αρχές ασφαλείας απαιτούν την απομόνωση της αμμωνίας από οποιοσδήποτε πηγές ανάφλεξης. Οι κίνδυνοι πυρκαγιάς από αμμωνία όταν αναμιγνύεται με άλλα καύσιμα (ένα παράδειγμα είναι τα πιλοτικά καύσιμα) και τα λιπαντικά πρέπει να διερευνηθούν εκτός από την καύση καθαρής αμμωνίας. Τέτοια μείγματα καυσίμων μπορεί να έχουν πολύ ευρύτερο εκρηκτικό εύρος.

Θεωρούνται όλες οι απαιτήσεις του Κώδικα IGF που αποσκοπούν στην προστασία των δεξαμενών αποθήκευσης από την εισροή θερμότητας ως σχετικές και για τις δεξαμενές αμμωνίας. Προκειμένου να προστατεύονται οι δεξαμενές αμμωνίας από την υπερβολική εισροή θερμότητας σε περίπτωση πυρκαγιάς, θα πρέπει να διαχωρίζονται από χώρους με υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς όπως π.χ. μηχανοστάσια κατηγορίας Α και να προστατεύονται από σύστημα ψεκασμού νερού για ψύξη εάν βρίσκονται σε ανοιχτό κατάστρωμα.

## 2.5 Τεχνικοί Κανονισμοί και Κανονισμοί Ασφάλειας

Σήμερα τα εναλλακτικά καύσιμα με σημείο ανάφλεξης κάτω των 60°C, θεωρούνται Καύσιμα Χαμηλού Σημείου Ανάφλεξης. Για το λόγο αυτό, ο κώδικας IGF παρέχει συγκεκριμένα και διεθνή πρότυπα, προκειμένου τα πλοία που χρησιμοποιούν αυτά τα καύσιμα να συμμορφώνονται με όλους τους κανονισμούς ασφαλείας. Λόγω του γεγονότος ότι η αμμωνία δεν είναι επί του παρόντος καθιερωμένο καύσιμο για τη ναυτιλιακή βιομηχανία, ο κώδικας IGF δεν περιλαμβάνει ακόμη συγκεκριμένους κανόνες για αυτό (Ammonia as a marine fuel, Safety Handbook, 2020).

Για την ίδρυση ενός τέτοιου νέου καυσίμου όπως η αμμωνία, είναι υποχρεωτική η συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφαλείας και τις εγκρίσεις όχι μόνο από τα μέλη του IACS αλλά και από τις αρχές σημαίας. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα μελέτη πρόκειται να συμμορφωθεί με τις κατευθυντήριες γραμμές των ABS και DNV για καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης καθώς και με τον Καν. SOLAS. II-1/55 Εναλλακτικός σχεδιασμός & διευθετήσεις και οδηγίες που δημοσιεύθηκαν στα MSC.1/Circular.1212 και MSC.1/Circular.1455 (Hariharan, 2020).

Όπως προαναφέρθηκε δεν υπάρχει συγκεκριμένο ρυθμιστικό πλαίσιο για την αμμωνία. Κατά συνέπεια, οι κατευθυντήριες γραμμές και οι κανονισμοί που πρέπει να ακολουθούνται είναι αρκετά παρόμοιοι με αυτούς του LNG και της μεθανόλης. Με βάση τα (Η αμμωνία ως καύσιμο πλοίων, Εγχειρίδιο Ασφαλείας, 2020) και (Hariharan, 2020) οι κύριες πτυχές της ανεφοδιασμού, της αποθήκευσης και του χειρισμού της αμμωνίας παρουσιάζονται παρακάτω.



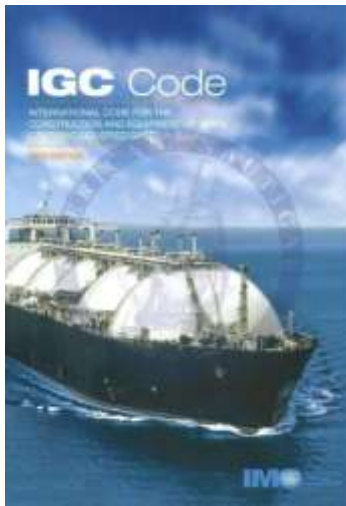
## IGF & IGC Code

Ο ΙΜΟ έχει υιοθετήσει έναν υποχρεωτικό κώδικα ασφαλείας για πλοία που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης. Ο Διεθνής Κώδικας Ασφάλειας για Πλοία που χρησιμοποιούν Αέρια ή άλλα Καύσιμα Χαμηλού Σημείου Ανάφλεξης (IGF Code) παρέχει ένα διεθνές πρότυπο για πλοία, εκτός από τα πλοία που καλύπτονται από τον Κώδικα IGC, που λειτουργούν με αέριο ή υγρά χαμηλού σημείου ανάφλεξης ως καύσιμο. Ο κώδικας παρέχει υποχρεωτικά κριτήρια για τη διάταξη και την εγκατάσταση μηχανημάτων, εξοπλισμού και συστημάτων για πλοία που λειτουργούν με αέριο ή υγρά χαμηλού σημείου ανάφλεξης ως καύσιμο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος για το πλοίο, το πλήρωμά του και το περιβάλλον.



*Εικόνα 9: Κώδικας IGF*

Ο Διεθνής Κώδικας Κατασκευής και Εξοπλισμού Πλοίων που Μεταφέρουν Υγροποιημένα Αέρια Χύδην, που συχνά αναφέρεται και συντομογραφείται ως Κώδικας IGC, είναι το πρότυπο του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (ΙΜΟ) που αφορά τη μεταφορά φορτίου υγροποιημένων αερίων στις θαλάσσιες μεταφορές. Ο Κώδικας καλύπτει τα αέρια που μεταφέρονται από αερομεταφορείς στη θάλασσα και τα φορτία περιλαμβάνουν το υγροποιημένο φυσικό αέριο και το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου.



Εικόνα 10 : Κώδικας IGC

### 2.5.1 Ανεφοδιασμός Αμμωνίας

Η άνυδρη αμμωνία είναι αέριο υπό συνθήκες περιβάλλοντος. Πρέπει να υγροποιηθεί για να επιτευχθεί μεγαλύτερη ογκομετρική πυκνότητα με συμπίεση, ψύξη ή και με τα δύο. Η διαδικασία ανεφοδιασμού αμμωνίας θα σχεδιαστεί με βάση την αρχή ότι χρησιμοποιείται ως κορεσμένο υγρό. Η αλλαγή φάσης της αμμωνίας από υγρή σε αέρια, και αντίστροφα, συμβαίνει όταν προστίθεται ή αποσύρεται θερμότητα ή πίεση. Αυτό θα απαιτήσει πρόσθετα λειτουργικά βήματα και ενέργεια κατά τη διαδικασία ανεφοδιασμού καυσίμων.

Για τον ανεφοδιασμό της αμμωνίας λαμβάνονται υπόψιν και πρέπει να ισχύουν :

- Οι ρυθμίσεις για τις διαδικασίες ανεφοδιασμού καυσίμων για την ασφάλεια του συστήματος και του προσωπικού πρέπει να ακολουθούνται σύμφωνα με το Κεφάλαιο 14 του Κώδικα IGC.
- Οι “γραμμές” επιστροφής υγρών και ατμών που είναι υπεύθυνες για τη φόρτωση του υγρού απαιτούν κατάλληλα μέτρα ασφαλείας, όπως βαλβίδες απομόνωσης.
- Τα συστήματα διακοπής λειτουργίας έκτακτης ανάγκης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την αποφυγή ατυχημάτων από βλάβες του συστήματος κατά τη διαδικασία ανεφοδιασμού καυσίμων, όπως διαρροή.
- Σύστημα χειρισμού εύκαμπτων σωλήνων για την αποφυγή αστοχιών κατά τη μεταφορά υγρών, ατυχήματα προσωπικού και περιβαλλοντικά.

- Λόγω του κινδύνου διαρροής αμμωνίας, η γραμμή παροχής ανεφοδιασμού θα πρέπει να καθαρίζεται με αδρανές αέριο, δηλαδή άζωτο, κατά τη διάρκεια των διαδικασιών ανεφοδιασμού.
- Κατάλληλα PPE (Personal Protective Equipment) λόγω της τοξικής φύσης της Αμμωνίας, της χαμηλής θερμοκρασίας του υγρού και των πιθανοτήτων πυρκαγιάς. δηλ. γάντια, γυαλιά ή ασπίδες προσώπου κ.λπ

### 2.5.2 Αποθήκευση Αμμωνίας

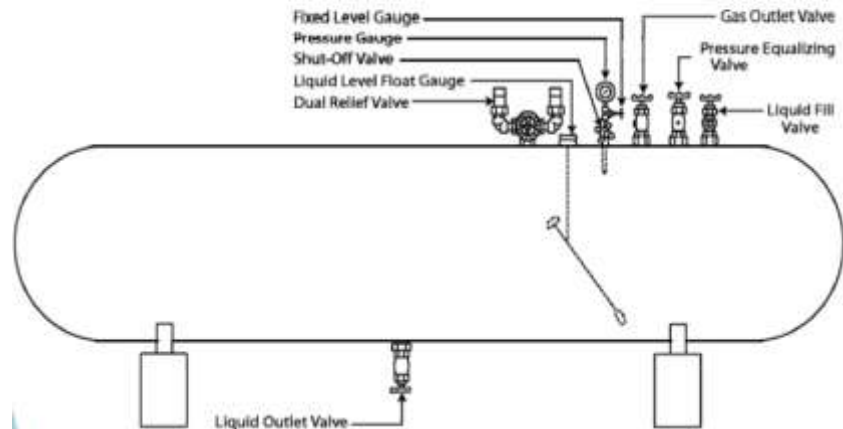
Η αμμωνία αποθηκεύεται ως υγρό από τότε που ξεκίνησε η παραγωγή αμμωνίας σε βιομηχανική κλίμακα πριν από περίπου 100 χρόνια. Η αμμωνία αποθηκεύτηκε αρχικά σε συστήματα υπό πίεση, όπως τα σφαιρικά δοχεία Horton (Horton Sphere Tank). Συνήθως, οι σφαίρες χρησιμοποιήθηκαν για την αποθήκευση έως και 2.000 τόνων. Σήμερα, οι δεξαμενές αποθήκευσης ατμοσφαιρικής αμμωνίας χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση έως και 50.000 τόνων αμμωνίας σε εργοστάσια και τερματικούς σταθμούς διανομής.

Η αποθήκευση αμμωνίας σε χαμηλή πίεση έχει γίνει ευρέως αποδεκτή για δύο λόγους. Πρώτον, απαιτεί πολύ λιγότερο κεφάλαιο ανά μονάδα όγκου. Δεύτερον, είναι ασφαλέστερο από την αποθήκευση σφαίρας που χρησιμοποιεί πιέσεις υψηλότερες από την ατμοσφαιρική. Με τη μεγάλη κλίμακας βιομηχανική παραγωγή αμμωνίας, έχει γίνει κοινή η αποθήκευση αμμωνίας σε ατμοσφαιρική πίεση και στους  $-33^{\circ}\text{C}$ .

Για την αποθήκευση και τροφοδοσία της αμμωνίας ισχύουν τα παρακάτω :

- **Δεξαμενές καυσίμου :** Οι δεξαμενές αποθήκευσης αμμωνίας πλήρως ψυγμένες διατηρούν το υγρό καύσιμο στους  $-33^{\circ}\text{C}$  και σε πίεση 1 bar. Η επιλογή της δεξαμενής καυσίμου θα πρέπει να γίνεται όσον αφορά τη συμβατότητα με πιθανούς σταθμούς ανεφοδιασμού όσον αφορά τη θερμοκρασία και την πίεση.

## TYPICAL HORIZONTAL ANHYDROUS AMMONIA STORAGE TANK



Εικόνα 11 : Τυπική οριζόντια δεξαμενή αποθήκευσης καυσίμου (Πηγή : Mackinaw Associates Super Safe NH<sub>3</sub> Storage Infrastructure )

- **Αντλίες τροφοδοσίας καυσίμου :** Η παροχή καυσίμου αμμωνίας στον κύριο κινητήρα πρέπει να είναι στα 70 bar, χρησιμοποιώντας αντλίες παροχής υψηλής πίεσης.
- **Μονάδα εναλλάκτη θερμότητας :** Για εναλλάκτες θερμότητας, απαιτείται σύστημα θέρμανσης με γλυκόλη νερού για την εξισορρόπηση της απαιτούμενης θερμοκρασίας του καυσίμου αμμωνίας πριν από την είσοδο στον κύριο κινητήρα. Επιπλέον, για να μειωθούν τα πιθανά στερεά σωματίδια που εισέρχονται στον κινητήρα, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα φίλτρα.
- **Βαλβίδες καυσίμου :** Οι βαλβίδες ασφαλείας διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στο σύστημα παροχής καυσίμου αμμωνίας. Συγκεκριμένα, είναι υπεύθυνες για την απομόνωση της διαδρομής του σωλήνα στην οποία μεταφέρεται το καύσιμο προς/από τον κινητήρα.
- **Θέση δεξαμενών καυσίμου :** Οι δεξαμενές καυσίμου πρέπει να βρίσκονται και να προστατεύονται με τρόπο που να μην επηρεάζει τις λειτουργίες φορτίου. Σχετικά με τον κωδικό IGF δεν υπάρχει συγκεκριμένη θέση των δεξαμενών αλλά λόγω κανόνων ασφαλείας δεν πρέπει να είναι αρκετά κοντά στον κύριο κινητήρα. Ωστόσο, το κατάλληλο σύστημα τροφοδοσίας και επιστροφής σωληνώσεων θα πρέπει να σχεδιαστεί για τη μείωση των πιθανών κινδύνων (δηλαδή κακή μόνωση, διαρροή κ.λπ.). Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μηχανική προστασία με κατάλληλα υλικά γύρω από τις δεξαμενές.

### 2.5.3 Χειρισμός Αμμωνίας και Ασφάλεια στο πλοίο

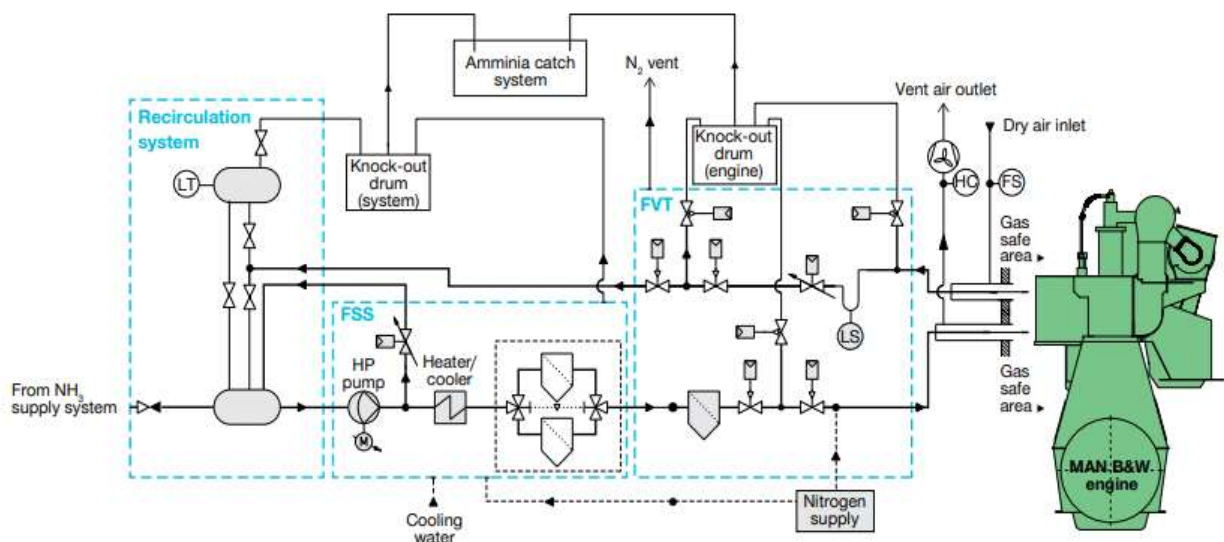
Όσον αφορά τον ασφαλή χειρισμό της αμμωνίας εν πλω, υπάρχουν κάποια συστήματα, αισθητήρες και διαχωρισμοί που απομονώνουν την αμμωνία και ανιχνεύουν αμέσως την οποιαδήποτε ανεπιθύμητη αλλαγή :

- Το σύστημα καυσίμου πρέπει να είναι εντελώς ξεχωριστό από όλα τα άλλα συστήματα σωληνώσεων επί του σκάφους.
- **Knock out drums:** Αυτά τα συστήματα είναι απαραίτητα για τη διαδικασία τροφοδοσίας και επιστροφής καυσίμου, επειδή είναι ο τόπος όπου συλλέγεται η εκλυόμενη υγρή αμμωνία που προέρχεται από την ανακουφιστική βαλβίδα.
- **Συστήματα εξαερισμού:** Ο αερισμός είναι ζωτικής σημασίας όχι μόνο για τη λειτουργία του σκάφους αλλά και για το μηχανοστάσιο, το σύστημα σωληνώσεων και τις διαδικασίες ανεφοδιασμού καυσίμων.
- **Αισθητήρες συστήματος:** Οι αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι στα απαιτούμενα συστήματα μπορούν να ανιχνεύσουν αμμωνία και να δώσουν λεπτομερείς και πληροφορίες σχετικά με πιθανή πυρκαγιά, μη αποδεκτή υψηλή/χαμηλή πίεση, υψηλές/χαμηλές θερμοκρασίες κ.λπ.
- **Σύστημα αζώτου:** Η χρήση αζώτου βοηθά στα συστήματα παροχής καυσίμου της αμμωνίας στον καθαρισμό της αμμωνίας ειδικά κατά τη διάρκεια εργασιών ανεφοδιασμού καυσίμων και συντήρησης όταν βρίσκεται σε λειτουργία. Πριν από οποιαδήποτε διαδικασία καθαρισμού καυσίμου, πρέπει να διακοπεί η παροχή καυσίμου στους κύριους κινητήρες.

### 2.5.4 Κύρια στοιχεία ενός κινητήρα για την αμμωνία

Επί του παρόντος δεν υπάρχουν πλοία σε υπηρεσία που χρησιμοποιούν αμμωνία ως καύσιμο. Οι κινητήρες με αμμωνία δεν είναι ακόμη διαθέσιμοι στο εμπόριο και κανένα υπάρχον σκάφος δεν είναι εξοπλισμένο για πρόωση αμμωνίας. Ωστόσο, οι δίχρονοι και τετράχρονοι κινητήρες με

αμμωνία βρίσκονται υπό ανάπτυξη, όπως και οι κανονισμοί για το χειρισμό της αμμωνίας ως καυσίμου.



Εικόνα 12 : Συστήματος παροχής αμμωνίας που δείχνει τα κύρια εξαρτήματα και την παροχή καυσίμου (Πηγή : MAN)

Σίγουρα, πρέπει να υπάρχουν τα παρακάτω στοιχεία για να λειτουργήσει σωστά ένα πλοίο με μηχανή αμμωνίας :

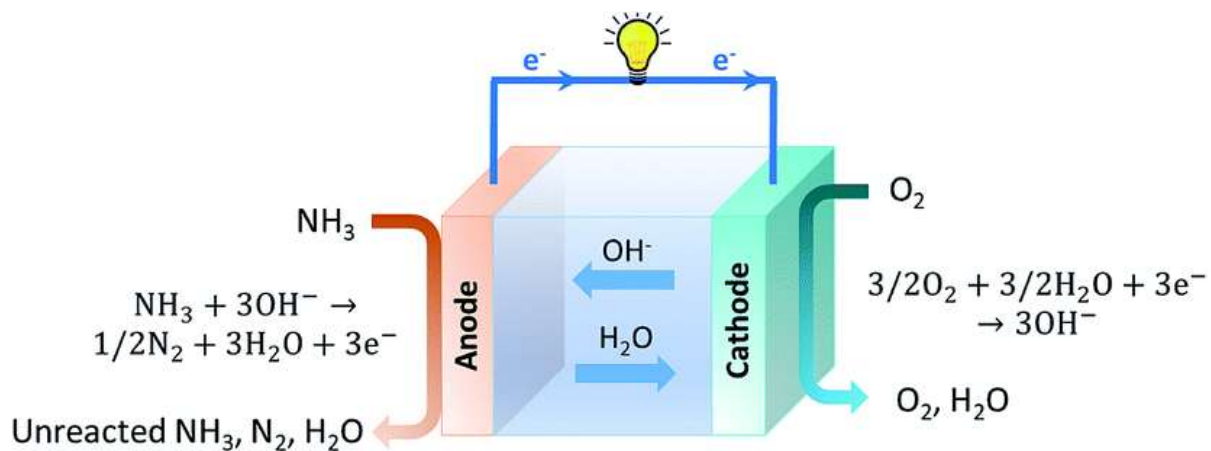
- Για την αποφυγή διαρροής καυσίμου στο μηχανοστάσιο, απαιτούνται μέτρα μόνωσης, συστήματα δέσμευσης αμμωνίας και εξαερισμός για την προστασία του κινητήρα και των βοηθητικών συστημάτων στο μηχανοστάσιο.
- Η συντήρηση και η λίπανση των ψεκαστήρων υψηλής πίεσης (high-pressure injectors) είναι αρκετά σημαντική για την έγκαιρη και ακριβή έγχυση του καυσίμου.
- Λόγω της χαμηλής κατώτατης θερμογόνος δύναμης της αμμωνίας (18,6 MJ/Kg) η ανάγκη βοηθητικού καυσίμου (pilot fuel) είναι υποχρεωτική για την αύξηση της απόδοσης της καύσης
- Απαιτούνται συστήματα διακοπής λειτουργίας έκτακτης ανάγκης στον κινητήρα ME-LGI (προτεινόμενος κινητήρας από MAN) επειδή σε περίπτωση διαρροής καυσίμου αμμωνίας ή τεχνικών προβλημάτων στη γραμμή τροφοδοσίας, χρησιμοποιείται VLSFO αντί για Αμμωνία.
- Για να αποφευχθεί το μη αποδεκτό συμβάν ολίσθησης αμμωνίας (Ammonia slip), θα πρέπει να γίνεται έγχυση υψηλής πίεσης κατά τη διάρκεια της καύσης στο θάλαμο καύσης.

- Οι σωληνώσεις διπλού τοιχώματος είναι ένα σημαντικό μέτρο ασφαλείας για τα συστήματα του κινητήρα λόγω της υψηλής διαβρωτικής ικανότητας της υγρής αμμωνίας. Επιπλέον, σχεδιασμός διπλού τοιχώματος για εξαερισμό και σωληνώσεις τείνουν επίσης να αποτρέπουν ατυχήματα λόγω διαρροών

### 2.5.5 Fuel Cell Ammonia και ShipFc

Οι κυψέλες καυσίμου αμμωνίας (Ammonia Fuel Cell) είναι ένας τύπος κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούν την αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) ως πηγή ενέργειας. Η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική. Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου αμμωνίας, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις περιλαμβάνουν τη μετατροπή της χημικής ενέργειας που αποθηκεύεται στην αμμωνία σε ηλεκτρική ενέργεια.

Οι κυψέλες καυσίμου αμμωνίας λειτουργούν με παρόμοια αρχή με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, όπως οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Η αμμωνία, η οποία είναι μια ένωση που αποτελείται από άζωτο και υδρογόνο, χρησιμοποιείται ως καύσιμο και υφίσταται μια σειρά αντιδράσεων εντός της κυψέλης καυσίμου. Το καύσιμο αμμωνίας συνήθως παρέχεται στην άνοδο, όπου διασπάται σε αέριο άζωτο ( $\text{N}_2$ ), ιόντα υδρογόνου ( $\text{H}^+$ ) και ηλεκτρόνια ( $\text{e}^-$ ). Τα ιόντα υδρογόνου ( $\text{H}^+$ ) μεταναστεύουν μέσω μιας μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) στην κάθοδο, ενώ τα ηλεκτρόνια ( $\text{e}^-$ ) ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Στην κάθοδο, το οξυγόνο από τον αέρα συνδυάζεται με τα ιόντα υδρογόνου και τα ηλεκτρόνια για να παράγει νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ως υποπροϊόν. Συνολικά, η κυψέλη καυσίμου αμμωνίας μετατρέπει τη χημική ενέργεια της αμμωνίας σε ηλεκτρική ενέργεια, με το νερό να είναι το μόνο απόβλητο προϊόν.



Εικόνα 13 : Από σχέδιο για ένα Ammonia Fuel Cell

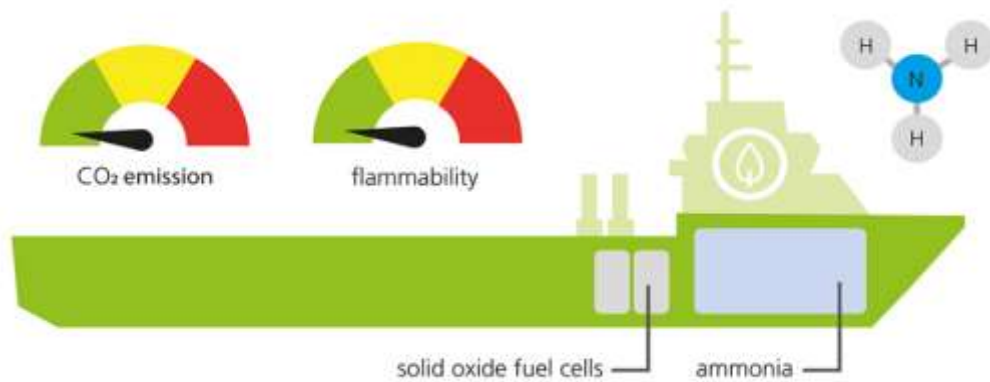
Οι κυψέλες καυσίμου αμμωνίας προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου. Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις που σχετίζονται με τις κυψέλες καυσίμου αμμωνίας που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Μια σημαντική πρόκληση είναι η ανάπτυξη αποτελεσματικών και ανθεκτικών καταλυτών για τις αντιδράσεις οξειδωσης αμμωνίας και μείωσης του οξυγόνου που συμβαίνουν εντός της κυψέλης καυσίμου. Οι καταλύτες είναι ζωτικής σημασίας για τη διευκόλυνση αυτών των αντιδράσεων και η έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη για την εύρεση οικονομικά αποδοτικών και υψηλής απόδοσης καταλυτικών υλικών. Επιπλέον, πρέπει να αντιμετωπιστούν ζητήματα που σχετίζονται με την αποθήκευση και την ασφάλεια της αμμωνίας για να διασφαλιστεί η πρακτική και ασφαλής εφαρμογή των κυψελών καυσίμου αμμωνίας.

Συνοπτικά, οι κυψέλες καυσίμου αμμωνίας είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που χρησιμοποιεί την αμμωνία ως πηγή καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως άφθονη διαθεσιμότητα, υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις και να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό των κυψελών καυσίμου αμμωνίας για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, της παραγωγής ενέργειας και της αποθήκευσης ενέργειας.

Το ShipFc είναι ένα Project, το οποίο χρησιμοποιεί μια τεχνολογία αιχμής που έχει φέρει επανάσταση στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αντιπροσωπεύει το Ship Fuel Cell, ένα εξαιρετικά αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον σύστημα ισχύος που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία. Το ShipFc προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα πρόωσης, όπως μειωμένες εκπομπές ρύπων, βελτιωμένη



ενεργειακή απόδοση και πιο αθόρυβες λειτουργίες. Χρησιμοποιώντας υδρογόνο ή άλλα καθαρά καύσιμα, το ShipFc ελαχιστοποιεί σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, συμβάλλοντας σε ένα πιο πράσινο και πιο βιώσιμο μέλλον για τον ναυτιλιακό τομέα. Ο πρωτοποριακός σχεδιασμός και η προηγμένη μηχανική του καθιστούν το ShipFc μια πολλά υποσχόμενη λύση για την τροφοδοσία πλοίων διαφόρων μεγεθών και τύπων, ανοίγοντας το δρόμο προς μια καθαρότερη και πιο περιβαλλοντικά υπεύθυνη ναυτιλιακή βιομηχανία.



Εικόνα 14 : Παράδειγμα- project για πλοίο <<ShipFc>> (Πήγη : Fraunhofer IMM)

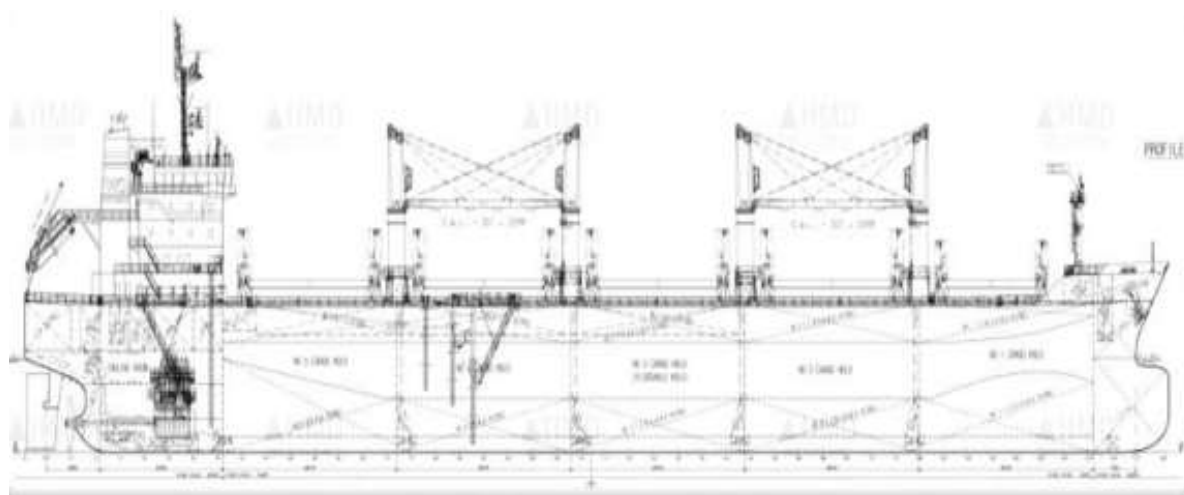
### 3. Μελέτη Περίπτωσης

#### 3.1 Κύρια στοιχεία του πλοίου

Σε αυτή την μελέτη , θα χρησιμοποιηθεί ένα συγκεκριμένο πλοίο προκειμένου να πραγματοποιηθούν διάφορες αναλύσεις και να καταλήξουμε σε διαφορετικά αποτελέσματα και συμπεράσματα. Το πλοίο της μελέτης περίπτωσης είναι ένα νεοκατασκευασμένο πλοίο μεταφοράς χύδην Handysize (Bulk Carrier) χωρητικότητας 37.000 DWT που σχεδιάζεται και κατασκευάζεται από την Hyundai Mipo Dockyard Co., Ltd. Το συγκεκριμένο πλοίο θα λειτουργεί υπό την Bureau Veritas και θα πλέει με 20 έως 25 μέλη πληρώματος, , ανάλογα με τη σημαία που επιλέγεται να λειτουργεί. Πλέει σε παγκόσμια κλίμακα δρομολογίων και μεταφέρει σίδηρο, αλουμίνιο ή άλλα χαλύβδινα πηνία, αλλά για τη μελέτη περίπτωσης θα επιλεγεί μια συγκεκριμένη διαδρομή.

Πληροφορίες που λαμβάνονται από τα γενικά σχέδια (General Arrangement) του πλοίου υποδεικνύουν σκάφος με μήκος (Loa) 186,96m, μήκος μεταξύ καθέτων (Lpp) 178,00m, πλάτος 28,60m και βάθος 15,60m. Διαθέτει 5 αμπάρια (cargo holds) και 4 γεραμούς με SWL 30T. Το σύστημα πρόωσης του σκάφους αποτελείται από έναν κύριο κινητήρα διπλού καυσίμου σχεδιασμένο από το λογισμικό MAN CEAS: 7G50ME-C9.6-LGI-HPSCR και 3 σετ γεννητριών ντίζελ.

Ο κύριος κινητήρας έχει ισχύ εξόδου 10.240 kW στις 85 σ.α.λ. και συμμορφώνεται με τα πρότυπα Tier II και Tier III. Οι γεννήτριες ντίζελ έχουν απόδοση ισχύος 1.320 kW, 900 rpm η καθεμία, Tier II σύμφωνα με τους κανονισμούς του IMO, όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 15 : General Arrangement Μελέτης Περίπτωσης πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου (37.000 DWT) (Πηγή : BV )

### 3.2 Επιλογή ταξιδιού και υποδομές σε λιμάνια για την Αμμωνία

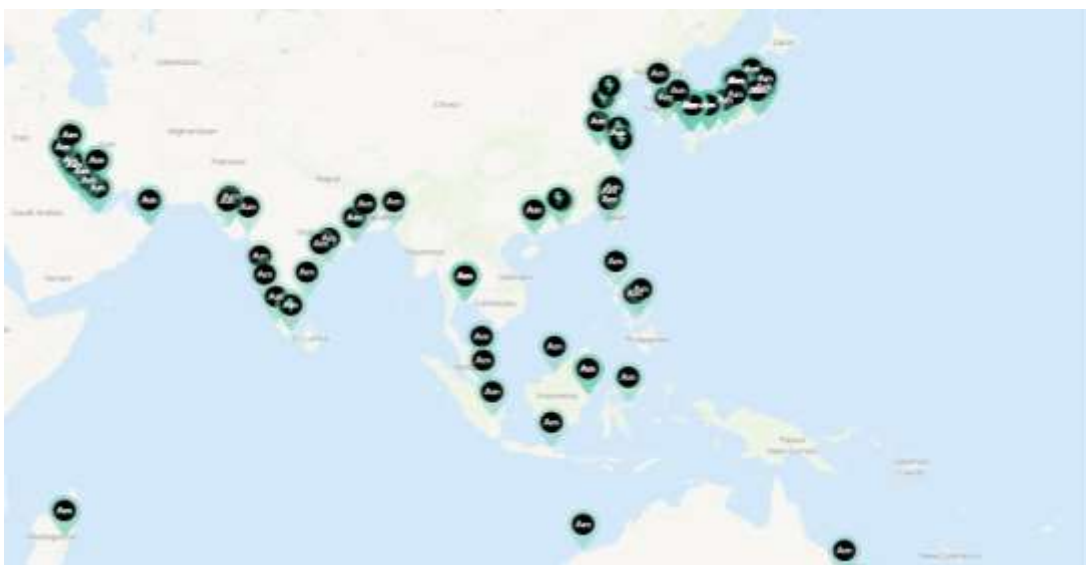
Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα πολλών μεγάλων ναυτιλιακών και ενεργειακών εταιρειών, το ένα τρίτο του παγκόσμιου εμπορικού στόλου θα μπορούσε να λειτουργήσει με τη χρήση πράσινης αμμωνίας στο μέλλον. Η πράσινη αμμωνία αξιολογείται από εταιρείες όπως η Vestas και η Haldor Topsøe στη Δανία για την περαιτέρω απαλλαγή από τον άνθρακα της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Με βάση την εμπειρία του κλάδου, πιστεύεται ότι η αμμωνία είναι ένα ελκυστικό και χαμηλού κινδύνου ναυτιλιακό καύσιμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στη μετάβαση σε πιο φιλική προς το περιβάλλον ναυτιλία όσο και ως μακροπρόθεσμη λύση. Όσον αφορά τις απαιτήσεις παραγωγής που αναλύθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια για την αμμωνία ως καύσιμο πλοίων, δείχνει ότι οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης θα αυξηθούν ραγδαία τα επόμενα χρόνια. Εξάλλου, τα

σημερινά νούμερα δείχνουν ότι 120 λιμάνια ασχολούνται ήδη με την εισαγωγή και την εξαγωγή του προϊόντος και μερικές φορές μπορούν να βασίζονται στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης τους (ALFA LAVAL et al., 2020). Αυτές οι υποδομές αποτελούν ένα εξαιρετικό σημείο εκκίνησης για τη διασφάλιση της διαθεσιμότητας της αμμωνίας ως καυσίμου για αυτά τα πλοία.



Εικόνα 16 : Υποδομές αμμωνίας παγκοσμίως (Πηγή : DNV AFI)

Με βάση τη ζήτηση των καυσίμων που θα απαιτηθούν για την κάλυψη του δυνητικού 30% του εμπορικού στόλου, έχουν ήδη πραγματοποιηθεί επενδύσεις σε εμπορικά λιμάνια όπως αυτά που επιλέχθηκαν για τη μελέτη περίπτωσης μας. Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι τα λιμάνια που διαθέτουν πλέον τερματικούς σταθμούς Αμμωνίας μπορούν να αποτελέσουν το θεμέλιο του δικτύου διανομής αμμωνίας ως καυσίμου πλοίων στο μέλλον. Σύμφωνα με όλες αυτές τις πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν και καθώς εκεί γίνονται οι μεγαλύτερες επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές και πράσινη αμμωνία, η μελέτη περίπτωσης μας θα επικεντρωθεί σε μια διαδρομή για το πλοίο μας που εκτελείται στην περιοχή του Περσικού Κόλπου, στον Ινδικό Ωκεανό μέχρι την Ιαπωνία. Λιμάνι που θα περάσει το πλοίο θα είναι το Al Jubail στη Σαουδική Αραβία, στη Σιγκαπούρη και στη συνέχεια στη Γιοκοχάμα της Ιαπωνίας.



Εικόνα 17 : Τερματικά λιμάνια με αμμωνία στην μελέτη περίπτωση μας (Πηγή : DNV AFI)

Οι ExxonMobil, Hoegh LNG, MAN Energy Solutions Singapore, Jurong Port, PSA Singapore, American Bureau of Shipping (ABS) και ITOCHU Group με τους εταίρους τους, είναι αρχικοί εταίροι του έργου, που συνεισφέρουν τεχνικές πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση θαλάσσιων καυσίμων, τη μεταφορά από σκάφος σε πλοίο, και ανεφοδιασμός καυσίμων στο λιμάνι της Σιγκαπούρης. (Joint Study to Explore the Potential for Ammonia as a Marine Fuel in Singapore, ABS 2021)

Η Aramco, απολύτως μια από τις πιο κερδοφόρες εταιρείες στον κόσμο, με πάνω από εκατό κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, έστειλε ένα σαφές μήνυμα ότι σκοπεύει να παράγει και να πουλήσει την αμμωνία ως ενεργειακό εμπόρευμα χωρίς άνθρακα. Η Acwa Power, η οποία αναπτύσσει ένα εργοστάσιο παραγωγής αμμωνίας με βάση το πράσινο υδρογόνο 5 δισεκατομμυρίων δολαρίων στην έξυπνη πόλη Neom της Σαουδικής Αραβίας, σχεδιάζει να «αντιγράψει» το έργο αλλού, δήλωσε ανώτατο στέλεχος. Το Project <<NEOM>> θα αρχίσει να παράγει 1,2 εκατομμύρια τόνους πράσινης αμμωνίας ετησίως στη Σαουδική Αραβία έως το 2025. (thenationalnews.gr) Η ανακοίνωση της NEOM έδειξε ότι η μεγάλης κλίμακας παραγωγή 100% ανανεώσιμων καυσίμων ήταν εφικτή. Εξάλλου, ο γαλλικός πολυεθνικός ενεργειακός κολοσσός Total συμφώνησε να αποκτήσει μερίδιο 20% στην ινδική εταιρεία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας Adani Green Energy, σε μια προσπάθεια να διαφοροποιηθεί από τις πετρελαϊκές της δραστηριότητες. Επιπλέον, με βάση τους κανονισμούς ABS, το λιμάνι της Σιγκαπούρης έχει ήδη λάβει την έγκριση ως πρατήριο καυσίμων αμμωνίας, τα επόμενα χρόνια (Crolius, 2021).

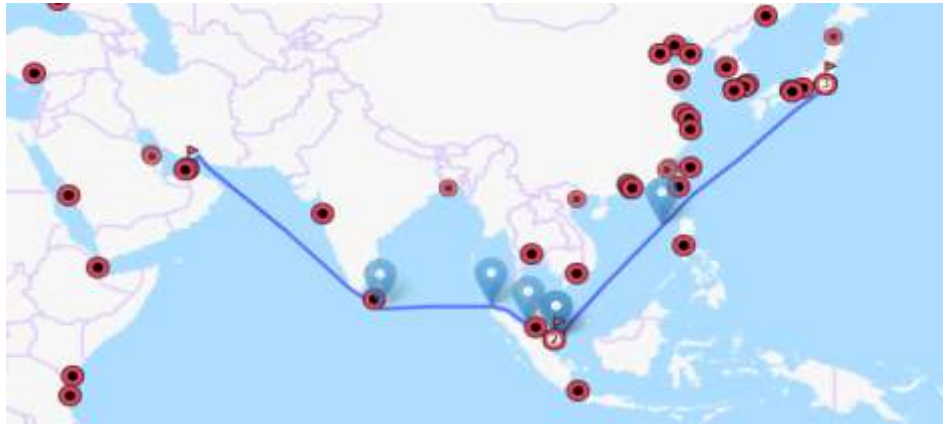
Θα ακολουθηθεί εμπορική διαδρομή από τον Περσικό Κόλπο μέχρι την Ιαπωνία. Τα δύο προφίλ του πλοίου μας θα είναι πλήρως φορτωμένα και σε κατάσταση έρματος. Με την επιχειρησιακή ταχύτητα που επιλέχθηκε για τη μελέτη περίπτωσης μας, το πλοίο περνά περίπου 40 ημέρες στη θάλασσα για ένα ταξίδι μετ' επιστροφής και 3 έως 4 ημέρες σε κάθε λιμάνι για φορτίο προς φόρτωση και εκφόρτωση. Αυτή η διαδρομή επιλέχθηκε λόγω του γεγονότος ότι ένα από τα μέλη του IACS ABS, έχει ήδη εγκρίνει το λιμάνι της Σιγκαπούρης ως πρατήριο καυσίμων αμμωνίας, ένα λιμάνι που θα χρησιμοποιηθεί για το ανεφοδιασμό μας και επίσης το Al Jubail, ένα λιμάνι που θα παράγει επίσης αμμωνία και διαθέτει και αποθηκευτικούς χώρους.

Πραγματοποιήθηκαν και υπολογίστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια για το ίδιο ταξίδι σε μια περίοδο ενός ολόκληρου έτους. Αυτά τα σενάρια έγιναν για να προσδιοριστεί η διαφορά μεταξύ VLSFO και Αμμωνίας ως καυσίμων και οι συνολικές ετήσιες καταναλώσεις τους. Στον κινητήρα ME LGI ως πιλοτικό καύσιμο, θεωρείται το VLSFO που είναι το ίδιο που χρησιμοποιείται και για τα βοηθητικά συστήματα.

Πίνακας 3 : Συνθήκες ταξιδιού

Loaded				
Ports : Al Jubail ---> Yokoyama				
Distance (nm)	Days of Voyage	Speed (kn)	Days at Port	Trips per Year
6645	19.1	14.5	3.5	4
Ballast				
Ports : Yokohama ---> Al Jubail				
Distance (nm)	Days of Voyage	Speed (kn)	Days at Port	Trips per Year
6645	21.3	13	3.5	3

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, σε μια περίοδο μελέτης περίπτωσης ολόκληρου έτους, το σκάφος θα πραγματοποιήσει περίπου επτά ταξίδια. Τέσσερα σε φορτισμένη κατάσταση από τη S. Arabia και το λιμάνι Al Jubail με ταχύτητα λειτουργίας στους 14,5 κόμβους μέχρι Yokohama, Ιαπωνία που καλύπτει 6645nm. Από την άλλη πλευρά, στο ταξίδι επιστροφής, το σκάφος θα είναι σε κατάσταση έρματος και θα διανύσει την ίδια απόσταση σε δύο ακόμη ημέρες λόγω της ταχύτητας λειτουργίας που θα είναι σε 13 κόμβους για να μειώσει επίσης τη συνολική κατανάλωση καυσίμου.



Εικόνα 18 : Περιγραφή ταξιδιού

### 3.3 Σταθμοί ανεφοδιασμού καυσίμων

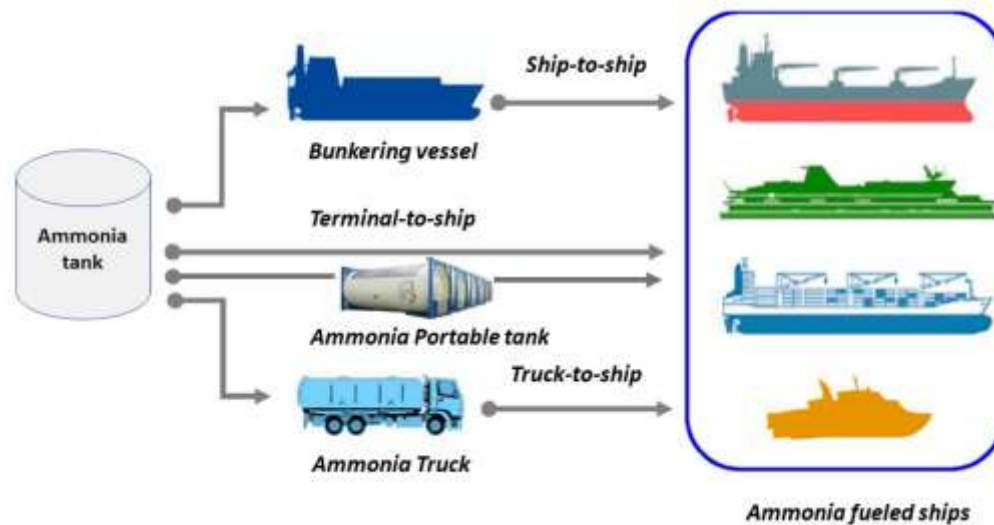
Η περίπτωση ενός πλοίου που μεταφέρει αμμωνία ως φορτίο είναι η πιο απλή. Με βάση την προηγούμενη εμπειρία του LNG, της μεθανόλης και του LPG, αναμένουμε ότι αυτά τα πλοία θα είναι τα πρώτα που θα το χρησιμοποιήσουν ως καύσιμο. Η διαθεσιμότητα αμμωνίας ως τροφοδοσία κινητήρα, καθώς και οι εργασίες ανεφοδιασμού του φορτίου, δεν αποτελούν ανησυχία για αυτά τα πλοία. Ο εξοπλισμός φόρτωσης και αποθήκευσης αμμωνίας επί του πλοίου πρέπει να είναι εγκατεστημένος στην περίπτωση που το πλοίο δεν περιέχει αμμωνία ως φορτίο, κάτι που επίσης περιλαμβάνεται στη μελέτη περίπτωσης.

Ο σχεδιασμός και η ασφάλειά τους αναμένεται να ρυθμίζονται από τον Κώδικα IGF μαζί με την περιγραφή των διαδικασιών για την ασφαλή φόρτωση, αποθήκευση και λειτουργία ολόκληρου του συστήματος αμμωνίας επί του πλοίου. Για τα πλοία που δεν μεταφέρουν αμμωνία ως φορτίο, δύο συγκεκριμένες πτυχές πρέπει να εξεταστούν προσεκτικά: η διαθεσιμότητα εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού καυσίμων στα λιμάνια και ο πιθανός αντίκτυπος στον χρόνο λειτουργίας του φορτίου.

Επί του παρόντος, στη ναυτιλιακή βιομηχανία, η αμμωνία είναι ένα εμπόρευμα χύδην που φορτώνεται/εκφορτώνεται συχνά από τερματικούς σταθμούς αερίου σε πλοία και από πλοία σε τερματικούς σταθμούς αερίου. Η λειτουργία αυτή είναι σαν τις κοινές διαδικασίες ανεφοδιασμού καυσίμων και η διαφορά είναι ότι η αμμωνία μεταφέρεται σε ειδική δεξαμενή αποθήκευσης αντί για δεξαμενή καυσίμου. Η αμμωνία μπορεί να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή υπό πίεση, ημι-ψυγείο ή πλήρως καταψύκτη ανάλογα με τον απαιτούμενο όγκο για ασφαλή αποθήκευση, που ποικίλλει

από μικρές υπό πίεση δεξαμενές (nurse tanks) 1.000 γαλονιών, έως υγροποιημένες δεξαμενές αποθήκευσης 100.000 τόνων στα τερματικά διανομής. Λόγω των παρόμοιων φυσικών ιδιοτήτων, οι επιχειρησιακές εμπειρίες σχετικά με την ανεφοδιασμό υγραερίου θα παρέχουν πρόσθετη χρήσιμη καθοδήγηση στη δημιουργία διαδικασιών ανεφοδιασμού αμμωνίας. Προβλέπονται τρεις τρόποι μελλοντικού ανεφοδιασμού αμμωνίας μέσω φορητού, δεξαμενής ή πλοίου (ABS, 2020).

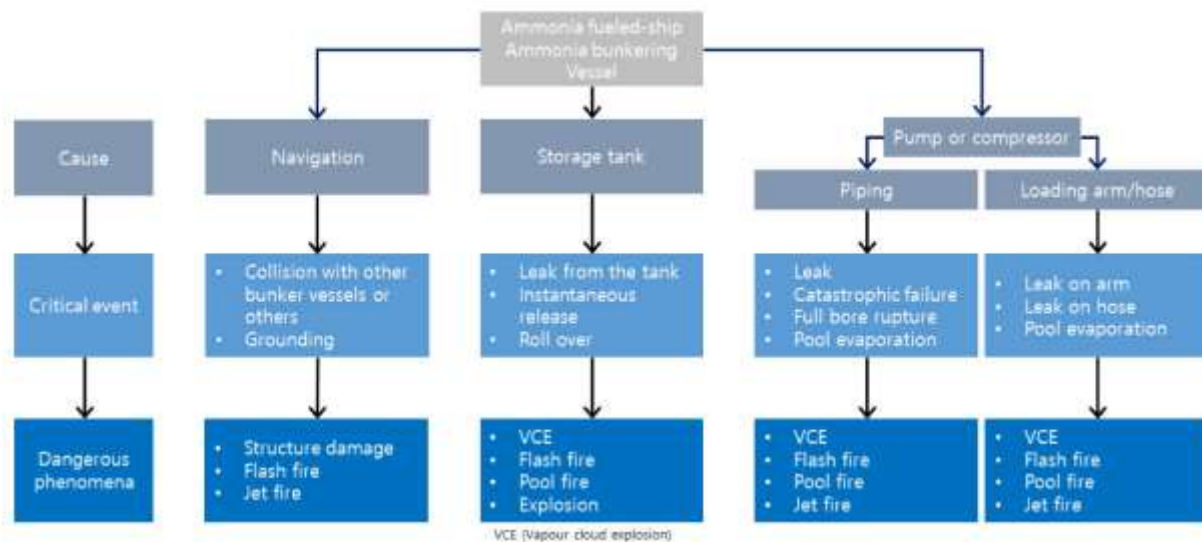
Προς το παρόν, οι πιο συνηθισμένοι κινητήρες διπλού καυσίμου λειτουργούν με την επιλογή LNG ως καύσιμο. Ωστόσο, σύμφωνα με την έρευνα και την προσέγγισή της μελέτης περίπτωσης μας, η πράσινη αμμωνία θα μπορούσε να είναι μια βιώσιμη λύση με τον ίδιο σημαντικό αντίκτυπο με το LNG. Κατά συνέπεια, οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης, διανομής και ανεφοδιασμού έχουν ήδη εγκατασταθεί και δεν θα είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που θα εφαρμοστεί ως νέα τεχνολογία (Hansson, Brynolf, Fridell, & Lehtveer, 2020). Ως αποτέλεσμα, η Πράσινη Αμμωνία ως ναυτιλιακό καύσιμο δίνει στους πλοιοκτήτες την ευκαιρία να χτυπήσουν τον ανταγωνισμό μεταξύ των αντιπάλων τους, όσον αφορά τη μείωση τόσο του CAPEX όσο και του OPEX.



Εικόνα 19 : Τρόποι ανεφοδιασμού (bunkering) αμμωνίας (Πηγή : Safety Assessment of the Ammonia Bunkering Process in the Maritime Sector: A Review (paper) )

Για την ταχεία ανάπτυξη ανεφοδιασμού αμμωνίας, ο ανεφοδιασμός από πλοίο σε πλοίο, όπου η αμμωνία τροφοδοτείται από άλλο πλοίο ή φορητήδα αγκυροβολημένη δίπλα στο σκάφος παραλαβής, θα χρειαζόταν καλύτερος χειρισμός εύκαμπτων σωλήνων αποθήκης. Ο ανεφοδιασμός της αμμωνίας είναι θεωρητικά δυνατός παράλληλα με τη λειτουργία φόρτωσης/εκφόρτωσης φορτίου. Αλλά αυτό πρέπει να εγκριθεί από το λιμεναρχείο. Εάν όχι, αυτό θα καταλήξει σε επιπλέον χρόνο στο λιμάνι που είναι και επιπλέον κόστος για το πλοίο.

Πίνακας 4: Ανάλυση κινδύνου σε μορφή δέντρου, για ανεφοδιασμό της αμμωνίας ( Πηγή : Safety Assessment of the Ammonia Bunkering Process in the Maritime Sector: A Review (paper) )



Αξίζει επίσης να αναφέρουμε ότι σύμφωνα με τους χάρτες DNV-GL για την Αμμωνία (<https://afi.dnvgl.com/Map>), το τερματικό Al Jubail Ammonia έχει ήδη τοπική χωρητικότητα αποθήκευσης σε λειτουργία έως 100.000 τόνους και η Yokohama, Ιαπωνία έως το 2000 τόνους.

#### 4. Μελέτη Περίπτωσης : Τεχνικές Λεπτομέρειες

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι τεχνικές λεπτομέρειες της μελέτης περίπτωσης. Από τεχνική άποψη, η επιλογή της αμμωνίας ως καυσίμου θα μπορούσε να είναι μια καινοτόμος λύση με πιθανή εφαρμογή και προσαρμογή στις απαιτήσεις του IMO. Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, υπάρχουν αρκετοί κίνδυνοι και αβεβαιότητες που χρήζουν διευκρίνισης και λεπτομερέστερης διερεύνησης. Για τη μελέτη περίπτωσης αυτής της έρευνας, ο κινητήρας ME-LGI της MAN πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως ο κύριος κινητήρας.



Πίνακας 5 : Πίνακας με την σύγκριση κρίσιμων σημείων μεταξύ αμμωνίας και μεθανόλης για την επιλογή κινητήρα ( Πηγή : An innovative tool for the evaluation and comparison of different fuels and technologies onboard ships)

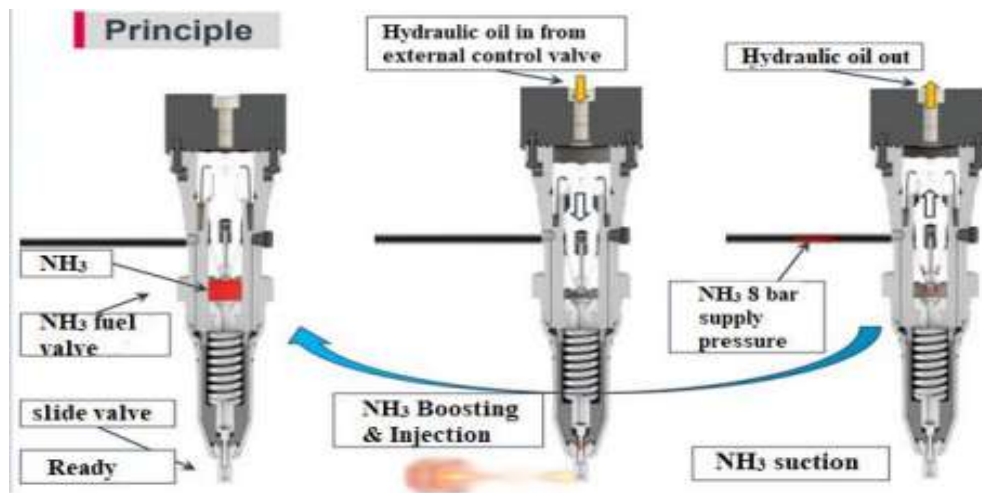
<b>Chemical composition</b>	<b>CH<sub>3</sub>OH</b>	<b>NH<sub>3</sub></b>
Boiling temperature [°C] at 1 bar	65	-33
LHV [MJ/kg]	20	22.5
Energy density [MJ/l]	15.7	15.7
Volume required factor (compared with HFO)	2.55	2.55
kg CO <sub>2</sub> /kWh <sub>el</sub>	0.25	-
kg CO <sub>2</sub> /kWh <sub>el</sub> reduction (compared with HFO)	-11%	-100%

#### 4.1 ME-LGI Κινητήρας

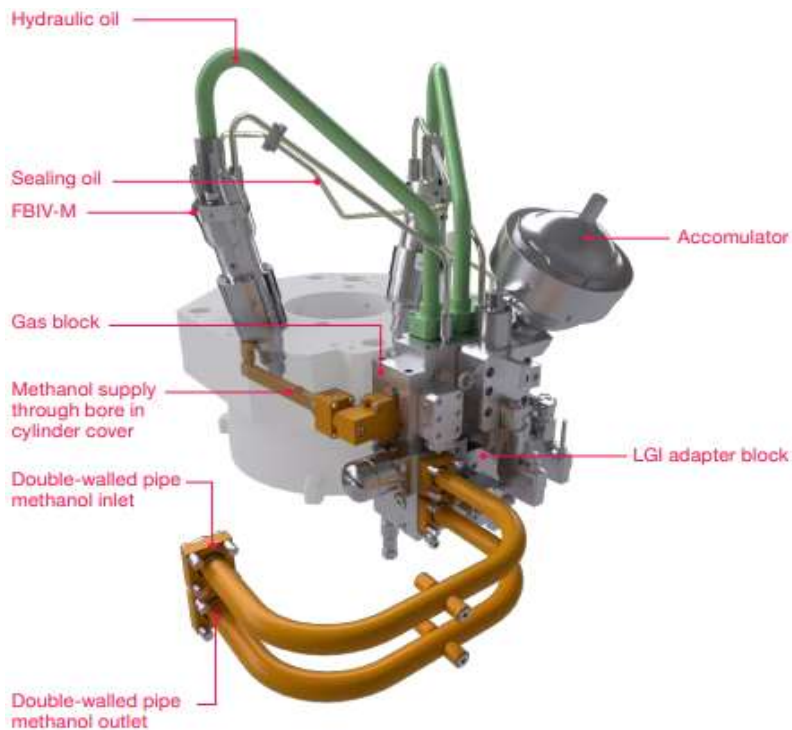
Ο κινητήρας ME-LGI δεν είναι τυχαία επιλογή. Είναι γεγονός ότι στις μέρες μας δεν υπάρχει στο εμπόριο κύριος κινητήρας που να καίει Αμμωνία ως καύσιμο. Συγκεκριμένα, αυτός ο κινητήρας διπλού καυσίμου επιτρέπει στην αμμωνία να εισέλθει στον ναυτιλιακό τομέα ως ζωτικής σημασίας λύση για κάθε πλοίο που πρέπει να συμμορφωθεί με τους κανονισμούς απανθρακοποίησης του IMO για το 2050. Ωστόσο, από τεχνική άποψη, πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετές προκλήσεις και αβεβαιότητες . Η επιλογή του κινητήρα ME LGI έχει μια σημαντική σχέση με το πλοίο μελέτης περίπτωσης, ένα πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου 38.000 DWT που απαιτεί ισχύ 10.240 kW. Ο κινητήρας ME-LGI έχει εύρος λειτουργίας μεταξύ 8.600 kW – 16.020 kW.

Αυτή η τεχνική πτυχή ήταν ένας από τους λόγους για τους οποίους αυτό το πλοίο είναι κατάλληλο για αυτή τη μελέτη περίπτωσης. Γενικά, οι κινητήρες ME-LGI είναι κοινώς γνωστοί ως κινητήρες διπλού καυσίμου που καίνε ντίζελ και μεθανόλη ή υγραέριο. Ωστόσο, τη λύση σε αυτή την πρόκληση δίνει ο κατασκευαστής MAN που υποστηρίζει ότι αυτή η τεχνολογία είναι κατάλληλη για αμμωνία αντί για μεθανόλη. Ειδικότερα, μικρές τεχνικές τροποποιήσεις στο

σύστημα παροχής καυσίμου (Εικόνα 18) για την παροχή αμμωνίας στα 70 bar και την έγχυση της στον κύλινδρο στα 600-700 bar, θα μπορούσαν να μετατρέψουν το ME-LGI σε κινητήρα με αμμωνία (ABS, 2020).



Εικόνα 20 : Αρχές ψεκασμού καυσίμου αμμωνίας (Ammonia fuel injection) (Πηγή : ABS)



Εικόνα 21 : Συστήματα αμμωνίας σε κάθε κύλινδρο (Πηγή : MAN)

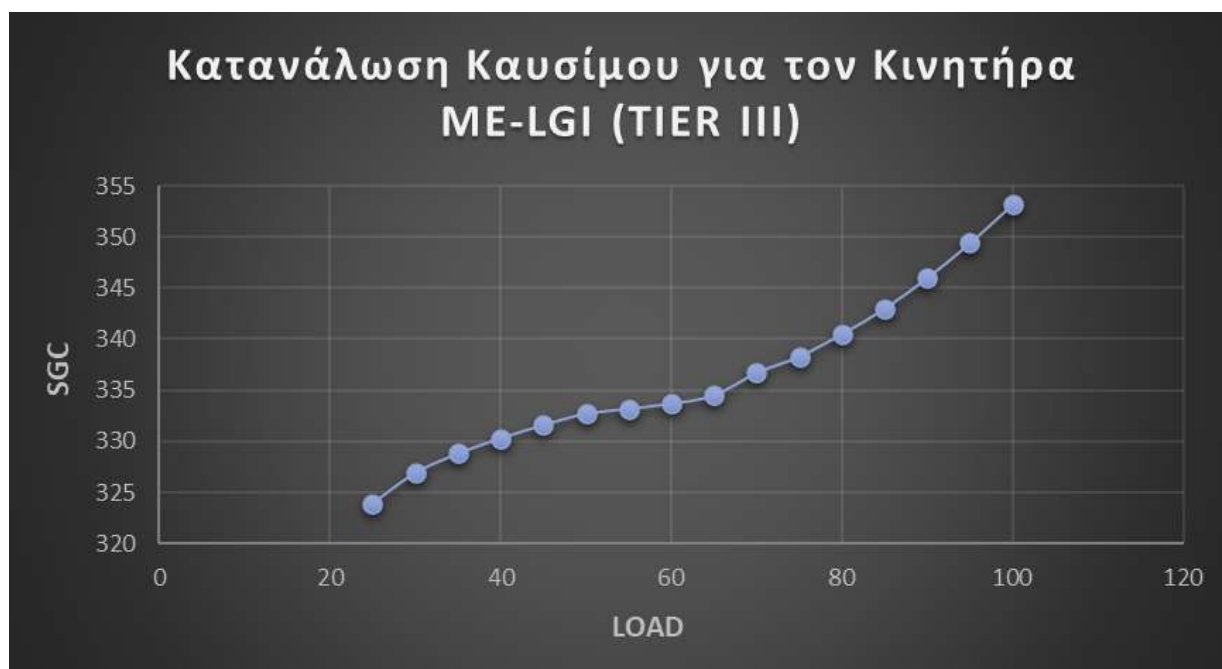
Κατά την καύση της αμμωνίας, διάφορες τεχνικές προκλήσεις ενδέχεται να επηρεάσουν όχι μόνο την ενεργειακή απόδοση του κινητήρα ME-LGI αλλά και το περιβάλλον όσον αφορά τις εκπομπές. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι ότι η αμμωνία θεωρείται καύσιμο χαμηλού σημείου ανάφλεξης.

Συγκεκριμένα, η αργή ταχύτητα φλόγας (slow flame velocity), η θερμοκρασία ανάφλεξης, το στενό εύρος αναφλεξιμότητας και η χαμηλή θερμότητα καύσης είναι ζητήματα που επηρεάζουν έντονα την ανάφλεξη με αμμωνία, και αυτός είναι ο λόγος που χρειάζεται δύο φορές μεγαλύτερο όγκο από το VLSFO για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας. Λαμβάνοντας όλα αυτά υπόψη και ότι έχει χαμηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο από τα τρέχοντα εμπορικά καύσιμα όπως το VLSFO ή το MDO, η προσέγγιση που μπορεί να μετριάσει αυτές τις προκλήσεις είναι η σημαντική χρήση και επιλογή του πιλοτικού-βοηθητικού καυσίμου (pilot fuel). Πιθανώς, το μείγμα υδρογόνου με αμμωνία όχι μόνο κατά την αποθήκευση αλλά και ως βοηθητικό καύσιμο (με πυρόλυση αμμωνίας – ammonia cracking) στον θάλαμο καύσης, θα μπορούσε να αυξήσει την ενεργειακή απόδοση και να περιορίσει το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της αμμωνίας και άλλων εμπορικών καυσίμων. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής κατανάλωσης πιλοτικού-βοηθητικού καυσίμου, το VLSFO θα χρησιμοποιηθεί ως βοηθητικό καύσιμο για αυτή τη μελέτη περίπτωσης.

Ο κατασκευαστής MAN δίνει την ευκαιρία σε ιδιώτες, να πειραματιστούν με πολυάριθμους υπολογισμούς και διαφορετικές επιλογές σχεδιασμού με τον πιο εύκολο τρόπο. Για να συμβεί αυτό, η MAN προτείνει το λογισμικό υπολογισμών CEAS Engine (<https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas>). Σε αυτό το λογισμικό ο καθένας έχει πρόσβαση σε πολλαπλές επιλογές για επιλογή μεταξύ κινητήρων MAN (μοντέλα) και βοηθητικών συστημάτων (EGR, SCR, αριθμός υπερσυμπιεστών κ.λπ.). Η πιο σημαντική γεγονός, είναι ότι είναι δωρεάν και προσβάσιμο λογισμικό για οποιονδήποτε έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο. Επιπλέον, μετά το τέλος των υπολογισμών, ο χρήστης μπορεί να κατεβάσει τα αποτελέσματα σε φόρμες PDF και Excel και στη συνέχεια να τα τροποποιήσει όπως φαίνεται στους Πίνακες 4, 5 και στα Γραφήματα 5, 6. Στα Παραρτήματα, μπορείτε να βρείτε περισσότερα στοιχεία που σχετίζονται με το περιβάλλον του λογισμικού CEAS.

Πίνακας 6 : Αποτελέσματα από το Λογισμικό CEAS για TIER III

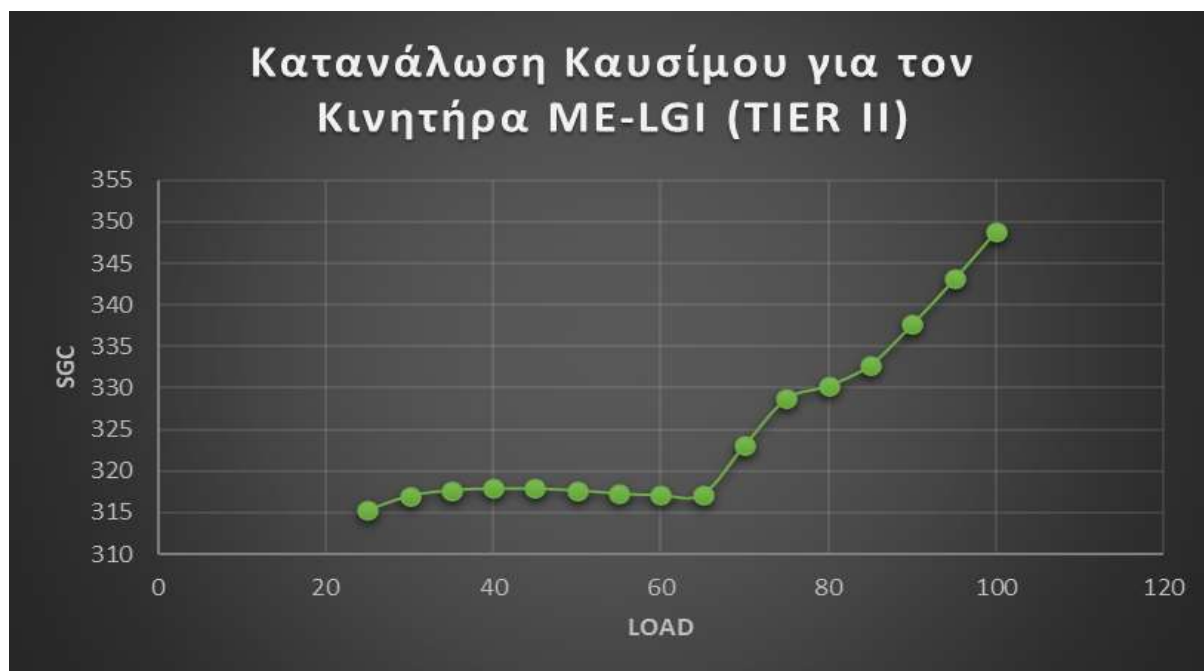
7G50ME-C9.6-LGIM-EGRBP							
Load	Power	Speed	SPOC	SGC	Exh.gas amount	Exh.gas temp	Steam
%SMCR	kW	r/min	g/kWh	g/kWh	kg/s	°C	kg/h
100	12040	100	8,4	353,2	22,8	225	1581
95	11438	98,3	8,7	349,4	21,9	216	1304
90	10836	96,5	9	346	20,9	210	1080
85	10234	94,7	9,4	343	20	204	904
80	9632	92,8	9,7	340,5	19,2	200	761
75	9030	90,9	10,2	338,3	18,4	196	650
70	8428	88,8	10,7	336,7	17,2	196	603
65	7826	86,6	11,2	334,5	15,9	197	586
60	7224	84,3	11,8	333,7	14,7	200	602
55	6622	81,9	12,5	333,2	13,4	204	639
50	6020	79,4	13,3	332,7	12	211	689
45	5418	76,6	14,3	331,6	10,7	219	740
40	4816	73,7	15,5	330,3	9,3	228	786
35	4214	70,5	16,9	328,8	6,6	266	933
30	3612	66,9	18,7	326,9	5,6	273	841
25	3010	63	21,2	323,9	4,7	273	678



Γράφημα 5 : Γράφημα κατανάλωσης Καυσίμου αμμωνίας, με δεδομένα από το λογισμικό CEAS, για TIER III

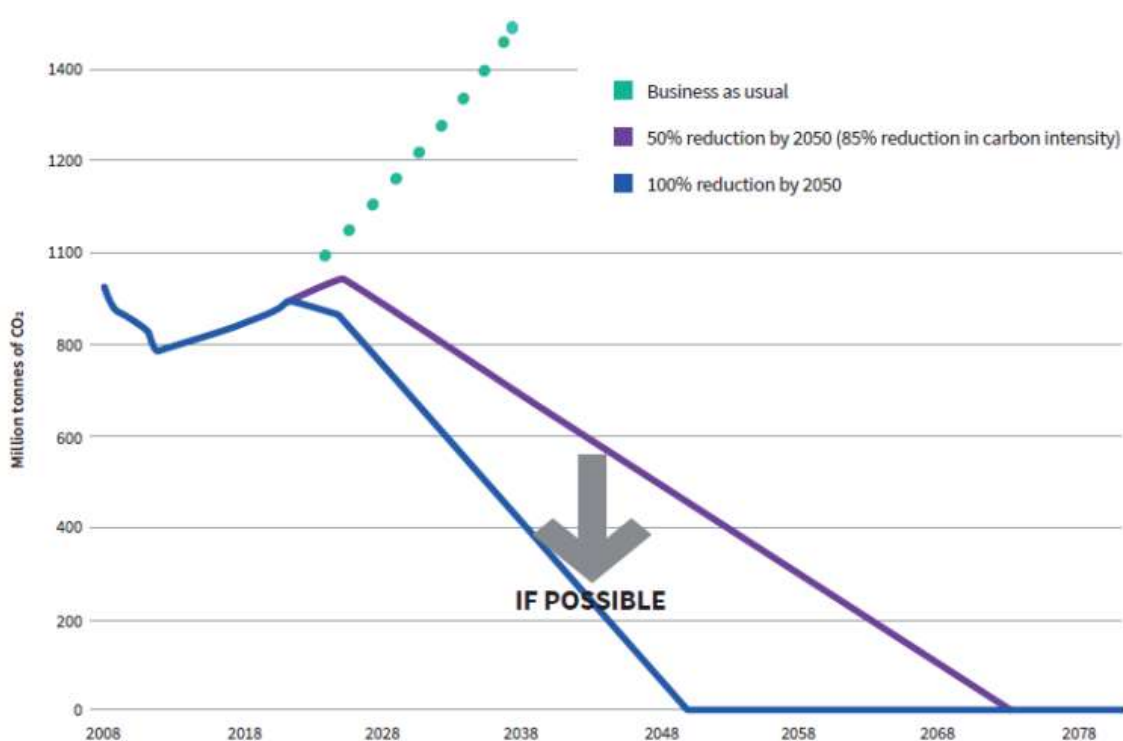
Πίνακας 7 : Αποτελέσματα από το Λογισμικό CEAS για TIER II

7G50ME-C9.6-LGIM-EGRBP							
Load	Power	Speed	SPOC	SGC	Exh.gas amount	Exh.gas temp	Steam
%SMCR	kW	r/min	g/kWh	g/kWh	kg/s	°C	kg/h
100	12040	100	8,4	348,9	23,9	277	3142
95	11438	98,3	8,7	343,1	23	262	2640
90	10836	96,5	9	337,7	22	249	2199
85	10234	94,7	9,4	332,8	21	238	1826
80	9632	92,8	9,7	330,3	20,2	229	1538
75	9030	90,9	10,2	328,7	19,4	221	1301
70	8428	88,8	10,7	323,1	18	220	1189
65	7826	86,6	11,2	317,2	16,6	219	1105
60	7224	84,3	11,8	317,1	15,6	221	1089
55	6622	81,9	12,5	317,3	14,5	224	1089
50	6020	79,4	13,3	317,7	13,3	229	1101
45	5418	76,6	14,3	317,9	12,2	232	1065
40	4816	73,7	15,5	317,9	11	236	1040
35	4214	70,5	16,9	317,7	9,8	242	1020
30	3612	66,9	18,7	317	8,5	251	1005
25	3010	63	21,2	315,3	8,8	212	514



Γράφημα 6 : Γράφημα κατανάλωσης Καυσίμου αμμωνίας, με δεδομένα από το λογισμικό CEAS, για TIER II

Από περιβαλλοντική άποψη, η χρήση της αμμωνίας ως καυσίμου πλοίων δεν είναι τόσο αθώα όσο φαίνεται. Κατά τη διάρκεια της καύσης ελλοχεύει ο κίνδυνος ολίσθησης της αμμωνίας στην περίπτωση της βαλβίδας εξαγωγής. Ως αποτέλεσμα, η άκαυστη αμμωνία μπορεί να απελευθερωθεί και να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα όχι μόνο στα υλικά που θα έρθουν σε επαφή αλλά και στους ανθρώπους και το περιβάλλον όσον αφορά την τοξική της φύση. Η λύση σε αυτή την πρόκληση προέρχεται από την επιλογή του συστήματος ME-LGI, στο οποίο το σύστημα άμεσου ψεκασμού υψηλής πίεσης θα εγχύσει καύσιμο αμμωνίας αργότερα, στη διαδρομή συμπίεσης στο ANΣ (Ανώτατο Νεκρό Σημείο) . Ως αποτέλεσμα, η διαφυγή της αμμωνίας δεν θα είναι τέτοιο θέμα. Εκτός από την ολίσθηση αμμωνίας, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η παραγωγή NOx κατά την καύση. Οι τελευταίες μελέτες έχουν δείξει ότι η αμμωνία μπορεί να παράγει σχεδόν ίση ποσότητα NOx με το VLSFO. Ως αποτέλεσμα, η διαχείριση των NOx είναι αρκετά σημαντική και η χρήση του συστήματος SCR είναι υποχρεωτική και όπως περιγράφεται παρακάτω, θεωρείται ως μια ζωτική λύση.



Γράφημα 7: Στόχοι μείωσης των εκπομπών CO2 (Πηγή : Lloyd's Register)

Από οικονομική άποψη, η επιλογή του κινητήρα ME-LGI όσον αφορά την αμμωνία ως καύσιμο διαφέρει για τα τρέχοντα οικονομικά που μπορεί να έχει ένας κινητήρας ME. Για τη μελέτη

περίπτωσης μας, θα εξεταστεί το σενάριο μιας νέας κατασκευής σκάφους. Η χρήση της αμμωνίας στο πλοίο απαιτεί αρκετά σημαντικά μέτρα ασφαλείας (δηλαδή σωληνώσεις διπλού τοιχώματος κ.λπ.) για την πρόληψη της τοξικής φύσης του καυσίμου. Εξάλλου, τα βοηθητικά συστήματα στα οποία θα γίνει η επεξεργασία του καυσίμου πρόκειται να αυξήσουν το CAPEX σε σύγκριση με έναν κινητήρα ME. Επίσης, λόγω της χαμηλής ενεργειακής φύσης της αμμωνίας, το OPEX θα είναι υψηλότερο, σε σύγκριση με το VLSFO ή το LNG, επειδή χρειάζεται περισσότερο καύσιμο για συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του κινητήρα. Επιπλέον, η εκπαίδευση του πληρώματος και η τιμή των καυσίμων θα αποτελέσουν επίσης παράγοντες ενεργοποίησης που θα μπορούσαν να διαδραματίσουν υποχρεωτικό ρόλο στην αξιολόγηση του OPEX, σε σύγκριση με τα σημερινά εμπορικά πρότυπα.

## 4.2 Αρχές λειτουργίας καυσίμου αμμωνίας

Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει στον καθορισμό των αρχών λειτουργίας της αμμωνίας ως καυσίμου, σε κινητήρα διπλού καυσίμου, μέσα από λεπτομερή περιγραφή κάθε συστήματος. Ακολουθώντας τις συστάσεις της MAN και συγκεκριμένα (MAN Energy Solutions, 2021), το καύσιμο θα περάσει από διάφορα στάδια και συστήματα πριν φτάσει στον προορισμό, τον κύριο κινητήρα.

Πριν από την περιγραφή της παροχής καυσίμου στον κινητήρα, είναι ζωτικής σημασίας να γίνει κατανοητό ότι το πεδίο εφαρμογής για το καύσιμο αμμωνίας είναι να φτάσει στον κύριο κινητήρα, από τις δεξαμενές αποθήκευσης που βρίσκονται στο αμπάρι, σε αυτή τη μελέτη περίπτωσης. Για να επιτευχθεί αυτό, το σύστημα παροχής καυσίμου θα πρέπει να χειρίζεται το καύσιμο αποτελεσματικά. Αρχικά, μια καλή παρατήρηση είναι ότι μια μικρή ποσότητα καυσίμου ανακυκλώνεται στο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου και για το λόγο αυτό έχει σχεδιαστεί ένα συγκεκριμένο σύστημα για αυτήν την εργασία. Επιπλέον, ένα από τα πλεονεκτήματα των κινητήρων διπλού καυσίμου είναι η δυνατότητα λειτουργίας και σε λειτουργία diesel, η οποία προσαρμόζεται στους κανονισμούς Tier II.

Πριν από την ανάφλεξη και την εκκίνηση του κινητήρα, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί δοκιμή στεγανότητας. Πιο συγκεκριμένα, αυτός ο έλεγχος χρειάζεται άζωτο για να πιέσει τα συστήματα. Ως αποτέλεσμα, και λόγω της υψηλής πίεσης, το καύσιμο αμμωνίας φεύγει από τον κινητήρα και καταλήγει στο σύστημα ανακυκλοφορίας.

Μετά από κάθε λειτουργία καυσίμου αμμωνίας, οι σωληνώσεις διπλού τοιχώματος και τα συστήματα εξαερισμού εγγυώνται μέσω αισθητήρων ότι δεν υπάρχει διαρροή αμμωνίας και εάν ναι, το καύσιμο απομονώνεται σε ένα σύστημα δέσμευσης αμμωνίας.

#### 4.2.1 Πεδίο εφαρμογής του συστήματος ανακυκλοφορίας καυσίμου

Το σύστημα ανακυκλοφορίας έχει σχεδιαστεί για να απομονώνει το θερμό ανακυκλωμένο καύσιμο αμμωνίας που προέρχεται από τον κύριο κινητήρα, μέσω μιας ανεξάρτητης γραμμής σωληνώσεων ανακυκλοφορίας, όταν τελειώνει ή σταματά η λειτουργία διπλού καυσίμου. Με αυτή τη διαδικασία, μετριάζεται ο κίνδυνος μόλυνσης από το πετρέλαιο με αμμωνία.

#### 4.2.2 Σύστημα Παροχής Καυσίμου

Η αρχή του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου είναι η παροχή καυσίμου αμμωνίας από τις δεξαμενές καυσίμου (Τύπου-C) στον κινητήρα στην απαιτούμενη πίεση, θερμοκρασία και ιξώδες. Για να επιτευχθεί αυτό, το FSS πρέπει να σχεδιαστεί με την κατάλληλη αντλία τροφοδοσίας, εναλλάκτες θερμότητας, φίλτρα και βαλβίδες. Στην περίπτωση του υδρογόνου ως πιλοτικού καυσίμου, απαιτούνται πρόσθετα συστήματα πυρόλυσης με αμμωνία.

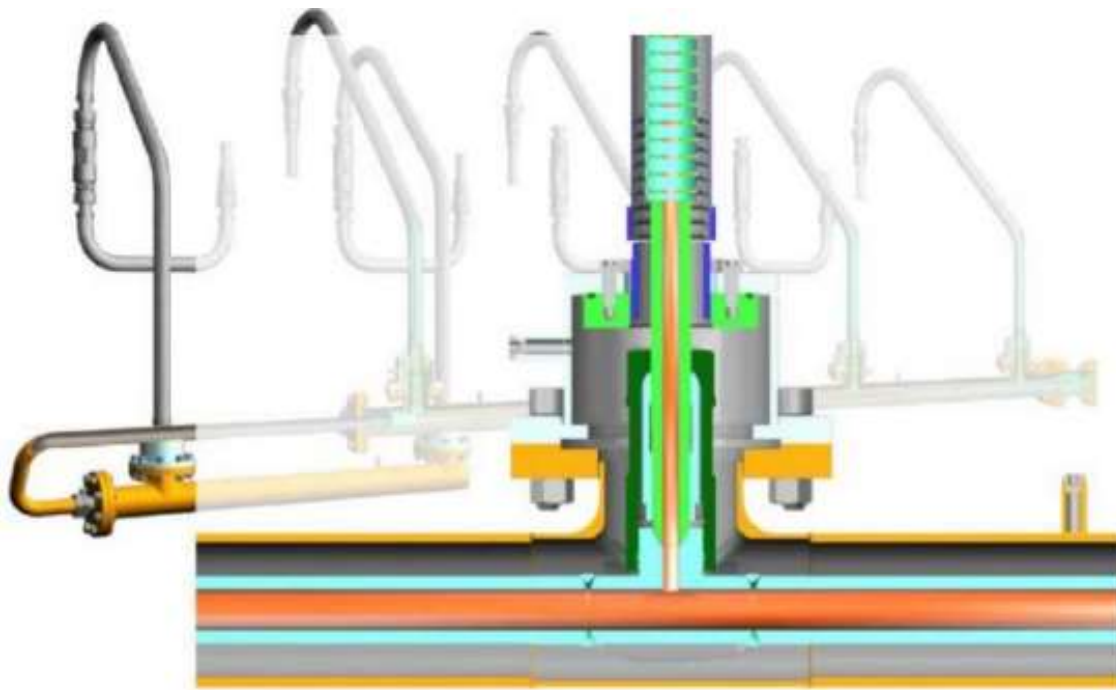
#### 4.2.3 Σύστημα αζώτου & FVT

Ο ρόλος του αζώτου είναι αρκετά σημαντικός, καθώς χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του συστήματος σωληνώσεων του κινητήρα διπλού καυσίμου. Συγκεκριμένα, πριν από τις διαδικασίες συντήρησης του κινητήρα ο καθαρισμός με άζωτο είναι σημαντική απαίτηση. Επίσης, το άζωτο θα πρέπει να παρέχεται με μεγαλύτερη πίεση από την ήδη υπάρχουσα μέσα στη δεξαμενή σέρβις. Ένα άλλο ζωτικής σημασίας μέτρο ασφαλείας πριν από τον καθαρισμό αζώτου, είναι η χρήση του FVT (fuel valve train) που είναι υπεύθυνο για την απομόνωση του κύριου κινητήρα μετά το σβήσιμο.



#### 4.2.4 Σύστημα σωληνώσεων & εξαερισμού διπλού τοιχώματος

Για την πρόληψη των ατυχημάτων που μπορεί να συμβούν, όχι μόνο στο μηχανοστάσιο αλλά και γύρω από τις δεξαμενές καυσίμου, η χρήση σωληνώσεων διπλού τοιχώματος είναι ζωτικής σημασίας (Εικόνα 20). Αυτός ο σχεδιασμός είναι σημαντικός για το σύστημα παροχής καυσίμου. Επιπλέον, το σύστημα εξαερισμού του μηχανοστασίου πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς με φρέσκο αέρα στον εξωτερικό σωλήνα όπως απαιτούν οι κανονισμοί.

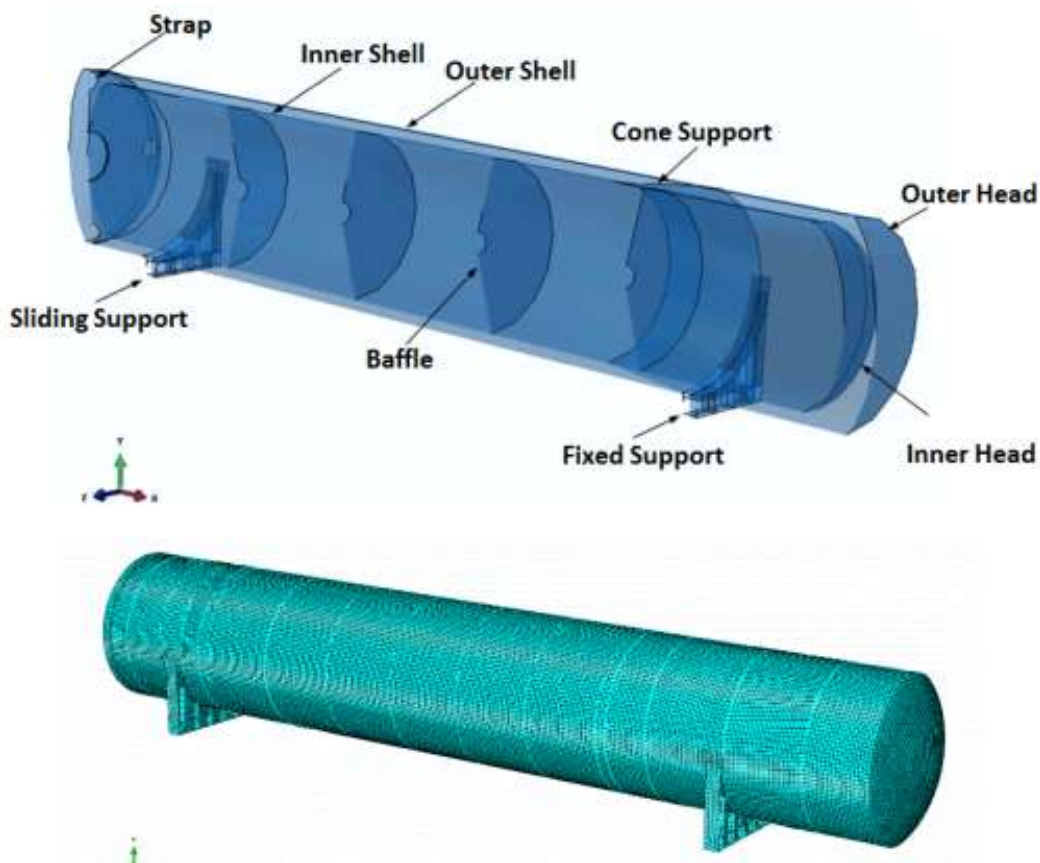


Εικόνα 22 : Λειτουργία σωληνώσεων διπλού τοίχου για αποφυγή διαρροής (Πηγή : Κοκαράκης 2019)

#### 4.3 Ενσωματωμένες δεξαμενές αποθήκευσης Αμμωνίας

Αρκετοί τύποι δεξαμενών είναι κατάλληλοι για αποθήκευση αμμωνίας ως καύσιμο. Ανεξάρτητες δεξαμενές τύπου A, πρισματικές ή σφαιρικές δεξαμενές τύπου B, δεξαμενές μεμβράνης ή ανεξάρτητες δεξαμενές τύπου C. Για τη μελέτη αυτή επιλέχθηκε ανεξάρτητη δεξαμενή τύπου C. Το πιο οικονομικό σύστημα για την αποθήκευση της αμμωνίας σε πλοία με περιορισμένες διαδρομές και εγκατεστημένη ισχύ φαίνεται να είναι μια δεξαμενή υπό πίεση τύπου C. Αυτή η δεξαμενή μπορεί να αποθηκεύσει το προϊόν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε δεν απαιτείται κανένα σύστημα εκ νέου υγροποίησης. Τα καθιερωμένα πρότυπα για το σχεδιασμό των

δεξαμενών πίεσης και οι απαιτήσεις από τους κώδικες IGF μπορούν να ακολουθηθούν για το σχεδιασμό της δεξαμενής. Αρκετές θέσεις λήφθηκαν υπόψη για τις δεξαμενές καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του χώρου του μηχανοστασίου, του πίσω μέρους του καταλύματος, των χώρων που γειτνιάζουν με τον χώρο διαμονής καθώς και της μπροστινής περιοχής του σκάφους. Ένα από τα βασικά ζητήματα είναι να αποφευχθεί η εγγύτητα στο συγκρότημα καταλυμάτων. Ωστόσο, αυτό πρέπει να εξισορροπηθεί με την απαίτηση μείωσης του μήκους των σωληνώσεων παροχής/επιστροφής καυσίμου και ελαχιστοποίησης τυχόν δρομολόγησης σωλήνων στην περιοχή φορτίου.



Εικόνα 23 : Δεξαμενές καυσίμου τύπου C με μόνωση κενού (Πηγή : ABS)

Επίσης, ακολουθώντας τις απαιτήσεις του κώδικα IGF, οι δεξαμενές τοποθετούνται σε προστατευτική θέση και οι χώροι αποθήκευσης δεξαμενών διαχωρίζονται από τον χώρο του μηχανήματος με κατάλληλα δομικά μέτρα πυρασφάλειας. Εκτιμώμενη χωρητικότητα δεξαμενής καυσίμου αμμωνίας  $6500m^3$  θα απαιτηθεί για να πραγματοποιηθεί ένα ταξίδι μετ' επιστροφής. Δύο δεξαμενές καυσίμου τύπου C το καθένα με χωρητικότητα αποθήκευσης  $3250m^3$ . Η

εκτιμώμενη μείωση της κυβικής χωρητικότητας του συνολικού όγκου φορτίου του σκάφους, λόγω εγκατάστασης δεξαμενής καυσίμου στο πίσω αμπάρι, είναι περίπου 5% έως 8% (Hariharan, 2020).

Η αμμωνία διατηρείται σε υγρή κατάσταση είτε στους  $-33,6^{\circ}\text{C}$  και 1 bar ή  $8,6\text{bar}$  και  $20^{\circ}\text{C}$ . Η αποθήκευση σε βιομηχανική κλίμακα χρησιμοποιεί χαμηλές θερμοκρασίες, οι οποίες απαιτούν ενέργεια για να διατηρηθούν. Αυτή η επιλογή μπορεί να έχει χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου από την πίεση σε ορισμένες περιπτώσεις, λόγω των χαμηλότερων πιέσεων σχεδιασμού αποθήκευσης. Ωστόσο, η αποθήκευση υπό πίεση σε δεξαμενές τύπου C (περίπου 18 bar) μπορεί να είναι μια βολική θαλάσσια λύση και θα εξαλείφει την ανάγκη για επιπλέον εξοπλισμό επανα-υγροποίησης που θα εγκατασταθεί στο πλοίο. Λόγω της διαβρωτικότητας της αμμωνίας, θα πρέπει να τηρούνται οι ειδικές απαιτήσεις στον Κώδικα IGC για υλικά που χρησιμοποιούνται σε δεξαμενές αποθήκευσης αμμωνίας και σε συναφή συστήματα. Για να μειωθεί ο κίνδυνος τυχαίας απελευθέρωσης αμμωνίας, η θέση της δεξαμενής θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά σε σχέση με τυχόν εξωτερικά συμβάντα που θα μπορούσαν ενδεχομένως να βλάψουν τη δεξαμενή. Οι δεξαμενές αμμωνίας θα πρέπει κατά προτίμηση να βρίσκονται μακριά από την έκθεση σε πλοία και εργασίες φορτίου.

#### 4.4 Σύστημα SCR

Η ναυτιλιακή βιομηχανία είναι υποχρεωμένη να βρει μια ζωτική λύση για τη μείωση των εκπομπών. Η αμμωνία ως καύσιμο θα μπορούσε να είναι η απάντηση στο ερώτημα ποια είναι η πιο εφικτή λύση για το παρόν και το κοντινό μέλλον. Ωστόσο, κατά την καύση της αμμωνίας, η παραγωγή οξειδίων του αζώτου, γνωστά ως  $\text{NO}_x$ , χρειάζεται περαιτέρω προσοχή, όχι μόνο λόγω των κανονισμών του IMO αλλά και για τις επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει στους ανθρώπους και το περιβάλλον (δηλαδή, όξινη βροχή, αιθαλομίχλη, PM παραγωγή).

Για να είμαστε πιο συγκεκριμένοι σχετικά με το γιατί είναι τόσο σημαντικό να μειωθούν τα  $\text{NO}_x$ , μια καλή προσέγγιση θα ήταν να περιγραφεί πώς παράγεται αυτή η εκπομπή. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της καύσης παρατηρούνται αρκετά υψηλές θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό και επίσης τις ιδιότητες του καυσίμου, την αναλογία αέρα/καυσίμου και τις απαιτήσεις ταχύτητας του κινητήρα, συμβαίνει το φαινόμενο Zeldovich (μηχανισμός

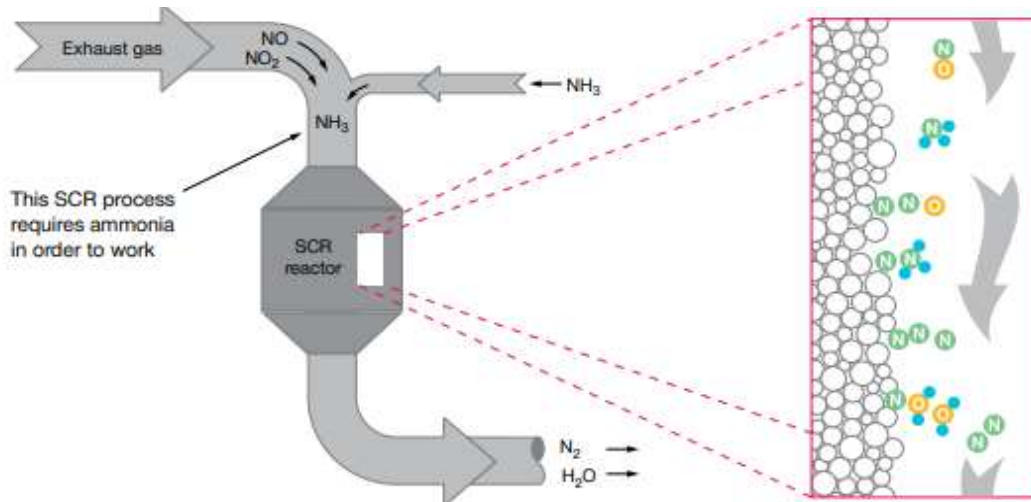
χημικής κινητικής Zeldovich που αναλύει πως παράγεται το NO<sub>x</sub> ) και το N<sub>2</sub> αντιδρά με τον αέρα. (Erik Fridell Erica Steen, B1766 December 2007).

Ο κινητήρας της μελέτης περίπτωσης, ME-LGI, θεωρείται κινητήρας εσωτερικής καύσης. Αυτό σημαίνει ότι κατά την καύση της αμμωνίας προκύπτουν προϊόντα όπως NO<sub>x</sub>, άκαυστη αμμωνία, άζωτο και νερό (ABS, 2020). Στην περίπτωση της άκαυτης αμμωνίας, γνωστής ως Ammonia slip, μια μικρή ποσότητα καυσίμου που δεν καταναλώνεται εξ ολοκλήρου κατά την καύση, απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα ως από τα καυσαέρια. Το γεγονός αυτό θεωρείται απαράδεκτο λόγω του καταστροφικού αποτελέσματος που μπορεί να έχει στα υλικά (δηλαδή τη διάβρωση) και το περιβάλλον. Ωστόσο, η βιομηχανία έχει ήδη βιώσει παρόμοιες καταστάσεις με το καύσιμο LNG και συγκεκριμένα με την διαφυγή μεθανίου (ABS, 2020). Ως αποτέλεσμα, οι λύσεις ήρθαν γρήγορα από τον κατασκευαστή MAN, ο οποίος πρότεινε την καθυστέρηση της έγχυσης καυσίμου αμμωνίας στον θάλαμο καύσης με τη χρήση εγχυτήρα τεχνολογίας υψηλής πίεσης (ABS, 2020).

Η έγχυση υψηλής πίεσης μπορεί να είναι η λύση για την ολίσθηση της αμμωνίας, αλλά δυστυχώς, είναι επίσης ένας παράγοντας αύξησης των NO<sub>x</sub>. Συγκεκριμένα, η αμμωνία έχει σχεδόν τον ίδιο ρυθμό σχηματισμού NO<sub>x</sub> με τον τρέχοντα κινητήρα που καίει ντίζελ. Ωστόσο, η αμμωνία είναι γνωστή για την υψηλή θερμοκρασία εξάτμισης. Τελικά, μετά την έγχυση, το μείγμα καυσίμου θα είναι πιο ψυχρό και ο κύλινδρος θα έχει χαμηλότερη θερμοκρασία στην αρχή της καύσης. Ως αποτέλεσμα, η δημιουργία NO<sub>x</sub> θα είναι χαμηλότερη.

Για τη μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> απαιτείται τεχνολογία επεξεργασίας καυσαερίων. Οι κύριες επιλογές είναι τα συστήματα EGR και SCR που είναι κοινώς γνωστά σε αρκετούς κλάδους και έχουν ήδη δείξει κάποια θετικά αποτελέσματα και στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Για τη μελέτη περίπτωσης, η τεχνολογία μείωσης που θα χρησιμοποιηθεί είναι η SCR. Πιο αναλυτικά, είναι ένα σύστημα μετεπεξεργασίας που χρησιμοποιεί καταλυτική αντίδραση με ουρία και μετατρέπει τα NO<sub>x</sub> σε N<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O από τα καυσαέρια. Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης SCR ενώ χρησιμοποιείται η αμμωνία ως καύσιμο είναι ότι η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καταλυτικός παράγοντας και να αντικαταστήσει την ουρία με μικρό αντίκτυπο στην κατανάλωση του καυσίμου (MAN Energy Solutions, 2021). Το SCR μπορεί να λειτουργήσει ως αυτόνομη καινοτομία (που δεν απαιτεί επιπλέον εξειδικευμένα τεχνολογικά εξαρτήματα και μπορεί να μειώσει τα NO<sub>x</sub> κατά 80% ή περισσότερο. Από τώρα χρησιμοποιείται ευρέως κατά την άφιξη λόγω του ψηλού επιπέδου αταλάντευτης ποιότητας και στιβαρότητας του. Δύο τύποι SCR χρησιμοποιούνται συνήθως, SCR χαμηλής πίεσης και SCR υψηλής πίεσης. Επιπλέον, τα συστήματα SCR υψηλής πίεσης πρόκειται να εγκατασταθούν πριν από τον στροβιλοσυμπιεστή

της μελέτης περίπτωσης ME-LGI επειδή τα καυσαέρια στον αντιδραστήρα έχουν υψηλότερη και θερμοκρασία (Fridell & Steen, 1766).



Εικόνα 24 Αναλυτικά η διαδικασία SCR (Πηγή : MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia )

Το κόστος του συστήματος SCR σχετικά με το (Kim, Roh, Kim, & Chun, 2020) είναι 44 \$/kW ως κεφαλαιουχικό κόστος και 3% του CAPEX ως λειτουργικό κόστος.

Κατά τη χημική αντίδραση με τον καταλύτη, πραγματοποιούνται οι ακόλουθες μετατροπές NH<sub>3</sub> και NO<sub>x</sub> και δίνουν N<sub>2</sub> και νερό:

- ❖  $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- ❖  $6\text{NO}_2 + 8\text{NH}_3 \rightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$

#### 4.5 Τροποποίηση συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου

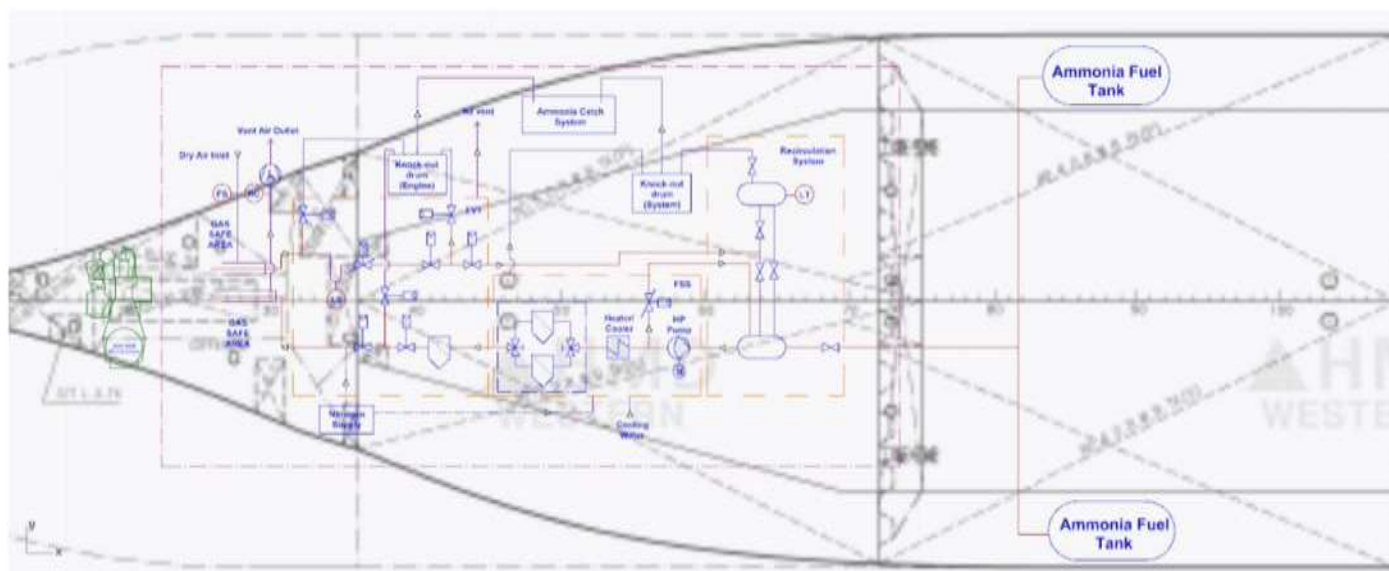
Όσον αφορά τις προτάσεις (MAN Energy Solutions, 2021), θα πρέπει να σχεδιαστεί ένα νέο, ασφαλές και εφικτό σύστημα παροχής καυσίμου. Μια χρήσιμη προσέγγιση αυτού του συστήματος, στη μελέτη περίπτωσης του 38.000 DWT Bulk Carrier παρουσιάζεται παρακάτω.

Ο σχεδιασμός ακολούθησε τους κανονισμούς και τις απαιτήσεις του κώδικα IGF. Επιπλέον, ο (ABS, 2020) χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά. Το λογισμικό στο οποίο έχει πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός είναι το Rhinoceros 5.

Οι αρχές των συστημάτων έχουν ήδη παρουσιαστεί αναλυτικά παραπάνω. Ωστόσο, είναι καλό να αναφέρουμε ότι οι κόκκινες γραμμές των σχεδίων αντιπροσωπεύουν τη σωληνώσεις διπλού τοιχώματος που είναι ένα ζωτικό μέτρο ασφαλείας.

Επιπλέον, ένα ροζ πρότυπο χρησιμοποιείται για να δείξει μια βαθύτερη και πιο λεπτομερή μεγεθυνόμενη προοπτική του συστήματος, ενώ προσαρμόζεται επί του σκάφους.

Τα σχέδια του νεότευκτου σκάφους δίνονται από τα ναυπηγεία DSME και τον νηογνώμονα Bureau Veritas.



Εικόνα 25 : Ενσωματωμένο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου αμμωνίας

## 5 Αξιολόγηση Κινδύνου

Η ασφάλεια είναι ένας σημαντικός παράγοντας σε ένα έργο και γι' αυτό πρέπει να προσδιοριστούν οι πιθανές απειλές και οι κίνδυνοι. Η αξιολόγηση κινδύνου είναι η διαδικασία κατά την οποία εντοπίζονται πιθανοί κίνδυνοι και κίνδυνοι και με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων μετριάζονται όσο το δυνατόν περισσότερο. Σχετικά με το πλαίσιο αυτού του έργου, έχει αναπτυχθεί αρχικά ένα HAZOP και στη συνέχεια ένα FMEA για το FSS που προτάθηκε να χρησιμοποιηθεί.

## 5.1 HAZOP

Το HAZOP είναι ένα ποσοτικό εργαλείο αξιολόγησης κινδύνου που στοχεύει στον εντοπισμό του τρόπου με τον οποίο ένα εξάρτημα ή ένα σύστημα αποκλίνει από την αρχική του σχεδίαση και πώς αυτή η απόκλιση θα επηρεάσει, όσον αφορά την υγεία και την ασφάλεια, το προσωπικό που περιλαμβάνεται στη λειτουργία του μηχανήματος. Στην εφαρμογή αυτού του έργου, η HAZOP σκοπεύει να προσδιορίσει πιθανές απειλές για το πλήρωμα του σκάφους της υπόθεσής μας (Crawley & Tyler, 2015). Το HAZOP που αναπτύχθηκε εμφανίζεται στο Παράρτημα III: HAZOP.

## 5.2 FMEA & FSS

Και στα αυτοκίνητα και στα σταθερά συστήματα, οι κινητήρες διπλού καυσίμου παίζουν σημαντικό ρόλο (Nunney, 1998). Η διαδικασία σχεδιασμού έχει σημαντικό αντίκτυπο στα έξοδα του κύκλου ζωής αυτού του τύπου κινητήρων και έχει επίσης σημαντική επίδραση στην εγγενή αξιοπιστία τους. Οι σχετικοί κινητήρες διπλού καυσίμου με εκτενή τεκμηρίωση `` χρησιμοποιούνται συνήθως ως κατευθυντήριες γραμμές για την ανίχνευση προτεραιότητας και την αξιολόγηση κινδύνου των τρόπων αστοχίας στο FMEA για την αύξηση της αξιοπιστίας του κινητήρα.

Το FMEA είναι μια διαδικασία για τον εντοπισμό πιθανών τρόπων αστοχίας για το εξάρτημα, το οποίο εξετάζεται, αξιολογώντας τους κινδύνους που σχετίζονται με τέτοιους τρόπους αστοχίας, ταξινομώντας τα προβλήματα ως προς τη σοβαρότητα και την εφαρμογή διορθωτικών μέτρων για την επίλυση των πιο κρίσιμων τρόπων αστοχίας. Οι τρόποι αστοχίας μπορούν να εφαρμοστούν τόσο στη διαδικασία σχεδιασμού όσο και στη διαδικασία παραγωγής και μπορεί να είναι πιθανοί ή πραγματικοί τρόποι αστοχίας. Η εξέταση των αποτελεσμάτων τέτοιων αστοχιών αναφέρεται ως ανάλυση επιπτώσεων. Το FMEA χρησιμοποιείται συνήθως στη μεταποιητική βιομηχανία κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος (Bowles & Bonnell, 1998).

Το FMEA χρησιμοποιείται συνήθως στη ναυτιλιακή βιομηχανία, ειδικά στις βιομηχανίες σχεδιασμού και κατασκευής. Ο στόχος ενός FMEA κινητήρα θαλάσσης είναι να εντοπίσει πιθανούς τρόπους αστοχίας και να κάνει βελτιώσεις στο σχεδιασμό, καθώς και να αποτρέψει

κρίσιμες λειτουργίες αστοχίας και να μειώσει το κόστος συντήρησης ενώ ο κινητήρας είναι σε λειτουργία.

Το FMEA είναι ένα δυναμικό πλαίσιο που μπορεί να αναλυθεί και να αναθεωρηθεί καθώς εξελίσσεται το έργο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φωνή των σχολίων των πελατών στην καθορισμένη φάση του σχεδίου καθορισμού, αξιολόγησης, ανάλυσης, ανάπτυξης και ελέγχου, αλλά γενικότερα αναπτύσσεται στη φάση μέτρησης, εξετάζεται στα στάδια ανάλυσης και βελτίωσης και είναι σημαντικό μέρος της διαδικασίας ελέγχου. Το FMEA είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές στρατηγικές χαμηλού κινδύνου για την αντιμετώπιση προβλημάτων και τον εντοπισμό πιο οικονομικά αποδοτικών τρόπων μετριασμού τους.

Για τη δημιουργία του FMEA, διενεργήθηκε πρώτα μια έρευνα για τα χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου, καθώς και για τους τρόπους αστοχίας και τις συνέπειές του. Στη μελέτη περίπτωσης μας, επιλέχθηκε ένας κινητήρας διπλού καυσίμου ME-LGI. Ο κύριος κινητήρας αυτού του σκάφους θα καίει αμμωνία ως κύριο καύσιμο, ενώ οι βοηθητικοί κινητήρες και το πιλοτικό σύστημα θα χρησιμοποιούν VLSFO. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για αυτόν τον τύπο κινητήρα διπλού καυσίμου σε αυτή τη μελέτη περίπτωσης είναι επί του παρόντος γνωστό και χρησιμοποιείται σε κινητήρες διπλού καυσίμου που χρησιμοποιούν Diesel ως κύριο καύσιμο και μεθανόλη ή LPG για πιλοτική χρήση ή βοηθητικούς κινητήρες. Η τρέχουσα εκτίμηση κινδύνου βασίζεται σε μια ήδη υπάρχουσα τεχνολογία διπλού καυσίμου με αντικατάσταση της μεθανόλης με αμμωνία και παρουσιάζεται στο Παράρτημα IV: FMEA για FSS.

## 6 Οικονομικά στοιχεία της μελέτης περίπτωσης

### 6.1 Οικονομική ανάλυση

Σύμφωνα με τη διαδρομή του πλοίου μας, σε αυτό το κεφάλαιο πρόκειται να αναλυθεί και να υπολογιστεί το λειτουργικό και οικονομικό προφίλ του σκάφους της μελέτης περίπτωσης. Διαφορετικά καύσιμα, VLSFO και NH<sub>3</sub>, για την ίδια διαδρομή σε μια περίοδο ενός ολόκληρου έτους πρόκειται να εξεταστούν. Ο λόγος πίσω από αυτό είναι να κατανοήσουμε πόσο εφικτή είναι η αμμωνία ως καύσιμο, από οικονομική άποψη. Όπως φαίνεται στον πίνακα 7 και στον πίνακα 8 παρακάτω, ελήφθησαν υπόψη διαφορετικά σενάρια καυσίμων. Η ίδια προσέγγιση πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των ετών για το 2030 και το 2040 με διαφορετικές



διακυμάνσεις στις τιμές των καυσίμων όπως διαπιστώνεται στη βιβλιογραφία (Lloyd's Register, 2020).

Πίνακας 8 : Προφίλ λειτουργίας και κατανάλωση κινητήρα με VLSFO

<b>VLSFO (Scenario for 2025)</b>						
	<b>Cargo Loading/Unloading</b>	<b>Manoeuring</b>	<b>&lt;10 kn</b>	<b>10 kn</b>	<b>13 kn</b>	<b>14,5 kn</b>
<b>Time (Hours/Year)</b>	1260	24	160	70,8	3578	3667,2
<b>Propulsion Power (kW)</b>	0	948.2	1484,8	1999,6	4247,7	6446,5
<b>Load (%)</b>	0	9,3	14,5	19,5	41,5	63
<b>SFOC (g/kWh)</b>	0	198,9	178,7	168,2	163	159
<b>Fuel Consumption (t)</b>	0	4,5	42,4	23,8	2477,3	3758,8
<b>Total Annual Fuel Consumption (mt)</b>	6306,9					
<b>VLSFO \$/mt (Regarding the literature)</b>	500					
<b>Total Annual Fuel Cost (\$)</b>	3153468,8					

Στον πίνακα 8 και στον πίνακα 9, εκτελέστηκε η ίδια προσέγγιση και για τα δύο σενάρια που περιλαμβάνουν το VLSFO και το NH<sub>3</sub> ως καύσιμο. Οι πρώτες σειρές υποδεικνύουν τον χρόνο σε ώρες και την ισχύ του συστήματος πρόωσης σε kW, εκ των οποίων το πλοίο ξοδεύει σε έναν ολόκληρο χρόνο. Συνεχίζοντας, η ειδική κατανάλωση υπολογίστηκε σε g/kWh σε κάθε συνθήκη με ένα πρώτο συμπέρασμα να δείξει ότι η αμμωνία απαιτεί 1,8 φορές περισσότερο καύσιμο για την ίδια ταχύτητα και απόσταση. Τέλος, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως με την τιμή του καυσίμου που βρέθηκε στη βιβλιογραφία, υπολογίστηκε η συνολική ετήσια κατανάλωση καυσίμου και το συνολικό ετήσιο καύσιμο παρουσιάζοντας μια τεράστια διαφορά τα πρώτα χρόνια.

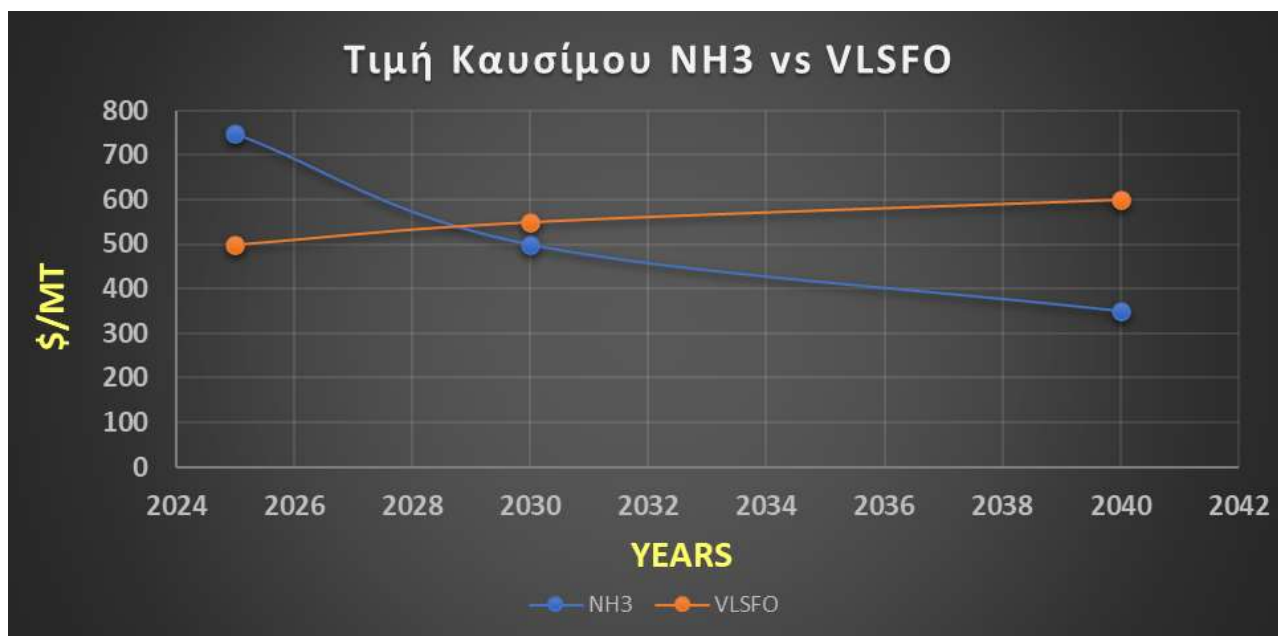
Πίνακας 9 : Προφίλ λειτουργίας κινητήρα και κατανάλωση με NH<sub>3</sub> Προφίλ λειτουργίας κινητήρα και κατανάλωση με NH<sub>3</sub>

<b>NH3 (Scenario for 2025)</b>						
	<b>Cargo Loading/Unloading</b>	<b>Manoeuring</b>	<b>&lt;10 kn</b>	<b>10 kn</b>	<b>13 kn</b>	<b>14,5 kn</b>
<b>Time (Hours/Year)</b>	1260	24	160	70,8	3578	3667,2
<b>Propulsion Power (kW)</b>	0	948,2	1484,8	1999,6	4247,7	6446,5
<b>Load (%)</b>	0	9,3	14,5	19,5	41,5	63
<b>SGC (g/kWh)</b>	0	308	311	314	317,3	316,8
<b>SPOC (g/kWh)</b>	0	29	27	23	15,2	11,3
<b>Pilot Fuel Consumption (t)</b>	0	0,7	6,4	3,3	231	267,1
<b>Fuel Consumption (t)</b>	0	7	73,9	44,5	4822,4	7489,3
<b>Total Annual Pilot Fuel Consumption (mt)</b>	508,5					
<b>Total Annual Fuel Consumption (mt)</b>	12437,1					
<b>NH<sub>3</sub>/mt (Regarding the Literature)</b>	750					
<b>Total Annual Fuel Cost (\$)</b>	9327791,4					

Η ίδια προσέγγιση εφαρμόστηκε για τα έτη 2030 και 2040, λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό CAPEX και OPEX του κινητήρα και των μηχανημάτων που απαιτούνται. Ο Πίνακας 9 απεικονίζει έναν αναλυτικό πίνακα με το κόστος, τις διακυμάνσεις των τιμών των καυσίμων, τις τιμές λειτουργίας και συντήρησης (Lloyd's Register, 2020), (Kim, Roh, Kim, & Chun, 2020).

Πίνακας 10 : Οικονομικά δεδομένα για μελέτη περίπτωσης διαδρομής και πλοίου

		\$	2025	2030	2040
<b>CAPEX</b>	<b>ME-LGI Engine Cost (CAPEX)</b>		6041600	6041600	6041600
	<b>Type-C Fuel Tanks Storage (CAPEX)</b>		108000	108000	108000
	<b>Genset (Total CAPEX)</b>		1386000	1386000	1386000
	<b>SCR (CAPEX)</b>		4506040	4506040	4506040
<b>FUEL OPEX</b>	<b>Total annual Fuel Consumption for VLSFO (OPEX)</b>		3153468,76	4183428,73	4563740,43
	<b>Total annual Fuel Consumption for NH3 (OPEX)</b>		9327791,37	7002952,74	5208705,85
	<b>Total annual Fuel Consumption for VLSFO (AUX) (OPEX)</b>		713113,78	784425,16	855739,54
<b>FUEL PRICE</b>	<b>Fuel Price NH3 (\$/mt)</b>		750	500	350
	<b>Fuel Price VLSFO (\$/mt)</b>		500	550	600
<b>O&amp;M OPEX</b>	<b>ME-LGI Engine O&amp;M Cost per year (OPEX)</b>		53248	53248	53248
	<b>Type C Fuel Tanks Storage O&amp;M Cost per year (OPEX)</b>		1080	1080	1080
	<b>Genset O&amp;M Cost per year (Total OPEX)</b>		20592	20592	20592
	<b>SCR O&amp;M Cost (OPEX)</b>		135181,2	135181,2	135181,2



Γράφημα 8 : Σύγκριση τιμών VLSFO και NH3

Ένα σημαντικό πράγμα που πρέπει να αναφερθεί είναι πώς αλλάζουν οι τιμές για το VLSFO και το NH<sub>3</sub> με την πάροδο των ετών. Ένα πρώτο συμπέρασμα θα ήταν ότι μετά το 2040 η αμμωνία που φτάνει στην τιμή των 350\$ ανά τόνο φαίνεται να είναι μια εφικτή λύση από οικονομική άποψη, καθώς η τιμή του VLSFO αυξάνεται. Με βάση αυτές τις τιμές, οι συνολικές καταναλώσεις υπολογίστηκαν και σε αυτό το τμήμα και παρόλο που η αμμωνία απαιτεί περισσότερους τόνους ως καύσιμο η συνολική κατανάλωση OPEX φτάνει τα επίπεδα του VLSFO. Το γράφημα 8 παραπάνω, αντιπροσωπεύει τις διακυμάνσεις των τιμών από το 2025 έως το 2040.

## 6.2 Εκτίμηση αποπληρωμής

Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει να δείξει τη σκοπιμότητα της επένδυσης στην αμμωνία μέσω της εκτίμησης της αποπληρωμής (payback estimation). Όπως προαναφέρθηκε, η κύρια οικονομική πρόκληση της αμμωνίας είναι το κόστος λειτουργίας και συγκεκριμένα οι διακυμάνσεις της τιμής των καυσίμων, τα επόμενα χρόνια. Για τον υπολογισμό της απόσβεσης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένες υποχρεωτικές παράμετροι.

Η πρώτη παράμετρος που πρέπει να διευκρινιστεί είναι το κόστος της επένδυσης στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης. Ειδικότερα, ως νεόκτιστο-νέα κατασκευή που διαθέτει ME-LGI και γεννήτριες ως μέρος του πρωτογενούς σχεδιασμού και κόστους, το πραγματικό μέρος που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως επένδυση είναι οι δεξαμενές καυσίμου τύπου C και το σύστημα SCR. Ο λόγος για τον οποίο αυτά τα δύο είναι η πραγματική επένδυση είναι επειδή είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργία της αμμωνίας και θεωρούνται ως επιπλέον εξαρτήματα στην ήδη υπάρχουσα τεχνολογία που απαιτεί η ME LGI για να λειτουργεί κανονικά. Ο υπολογισμός του κόστους επένδυσης παρουσιάζεται στην εξίσωση παρακάτω :

$$\text{❖ Investment cost} = [\text{ME} - \text{LGI CAPEX} + \text{Gensets (Total CAPEX)}] - [\text{Type} - \text{C fuel Tanks (CAPEX)} + \text{SCR(CAPEX)}]$$

Η δεύτερη παράμετρος που είναι ζωτικής σημασίας για την εκτίμηση της απόσβεσης είναι η εξοικονόμηση που θα μπορούσε να έχει η επένδυση στην Αμμωνία. Υπολογίζοντας την εξοικονόμηση που θα μπορούσε να προκύψει στο κόστος O&M των επενδύσεων, οι δεξαμενές

τύπου C και η κατανάλωση καυσίμου NH<sub>3</sub> πρόκειται να μειώσουν το κόστος από την πρωτογενή κατανάλωση καυσίμου O&M και VLSFO. Το αποτέλεσμα της συνολικής εξοικονόμησης από αυτήν την επένδυση θα υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση :

$$\text{❖ Savings} = [\text{VLSFO fuel consumption} + \text{Gensets fuel consumption} + \text{ME} - \text{LGI O\&M} + \text{Genset O\&M}] - [\text{Type - C fuel Tanks O\&M} + \text{NH}_3 \text{ fuel consumption}]$$

Μετά την εφαρμογή του παραπάνω υπολογισμού, τα αποτελέσματα της επένδυσης και της αποταμίευσης παρουσιάζονται στο Παράρτημα II: Υπολογισμοί απόσβεσης . Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, οι διακυμάνσεις των τιμών των καυσίμων θα επηρεάσουν τις πιθανές εξοικονομήσεις από την επένδυση της Αμμωνίας. Τελικά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Παραρτήματος II: Υπολογισμοί απόσβεσης, η εκτίμηση της απόσβεσης μπορεί να είναι δυνατή μόνο μετά το σενάριο του 2040, επειδή η τιμή καυσίμου της αμμωνίας θα είναι χαμηλότερη από αυτή του VLSFO.

Για την επίτευξη καλύτερων και πιο εφικτών αποτελεσμάτων όσον αφορά την εκτίμηση της απόσβεσης, λαμβάνονται υπόψη διαφορετικά σενάρια απόσβεσης 5% (Πίνακας 11 ), 6% και 8% (Πίνακας 12). Επιπλέον, η κύρια αξία που δίνει το αποτέλεσμα για το πόσα χρόνια θα αρχίσει να είναι κερδοφόρα η επένδυση είναι το NPV. Ο υπολογισμός του NPV βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση, όπου  $R_t$  είναι οι Καθαρές ταμειακές εισροές-εκροές κατά τη διάρκεια μιας μεμονωμένης περιόδου  $t$ ,  $i$  είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο ή η απόδοση που θα μπορούσε να επιτευχθεί σε εναλλακτικές επενδύσεις και  $n$  είναι ο αριθμός των χρονικών περιόδων.

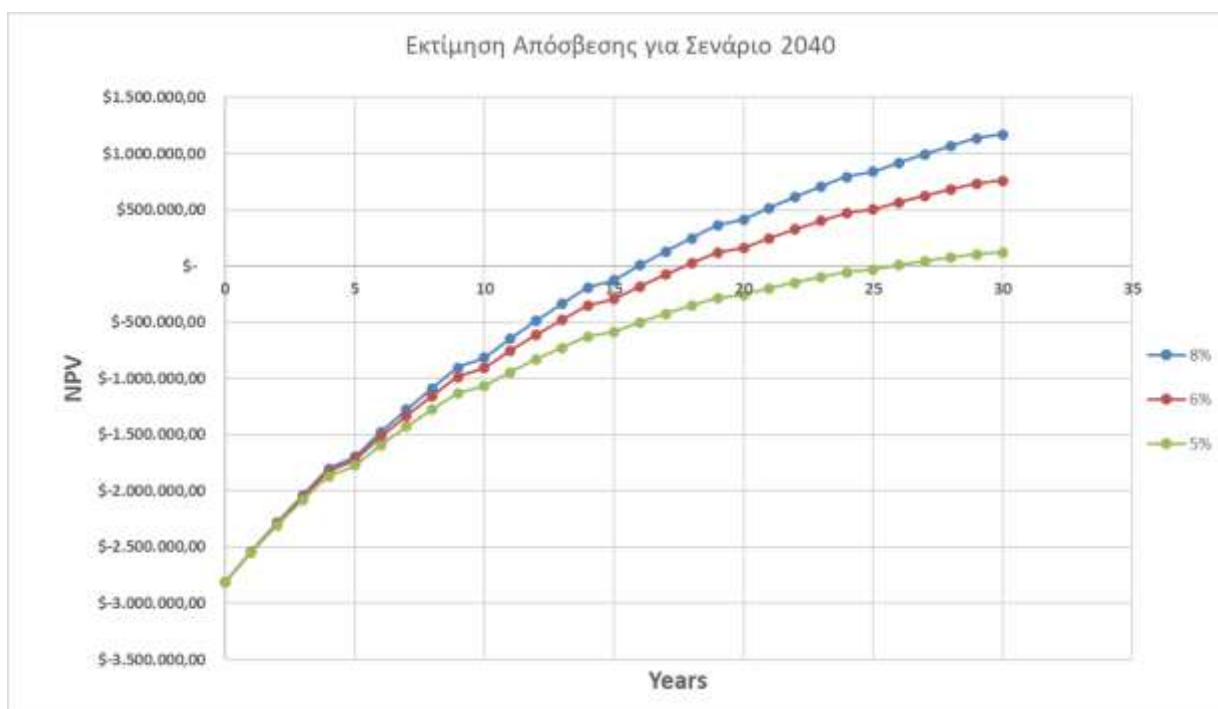
$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+i)^t}$$

Το αποτέλεσμα είναι ότι η επένδυση στην αμμωνία θα μπορούσε να είναι εφικτή μόνο μετά το 2040 και ο χρόνος απόσβεσης ποικίλλει ανάλογα με την αξία απόσβεσης. Συγκεκριμένα, για το σενάριο της απόσβεσης 5% ο χρόνος απόσβεσης είναι στα 16 έτη, για το σενάριο της απόσβεσης 6% ο χρόνος απόσβεσης είναι στα 18 έτη και για το σενάριο της απόσβεσης 8% ο χρόνος απόσβεσης είναι στα 26 έτη. Το πιο εφικτό σενάριο είναι στα 16 έτη με απόσβεση 5% και το χειρότερο σενάριο είναι στα 26 έτη με απόσβεση 8%. Ο πίνακας υπολογισμού βρίσκεται στα

Παράρτηματα και το Γράφημα 9 αντιπροσωπεύει μια γραφική προοπτική των εκτιμήσεων απόσβεσης.

Πίνακας 11 :Σενάρια υποτίμησης και Απόσβεσης (συνέχεια πίνακα 10)

<b>DEPRECIATION SCENARIOS</b>	<b>Depreciation Scenario 1</b>	5%	5%	5%
	<b>Depreciation Scenario 2</b>	6%	6%	6%
	<b>Depreciation Scenario 3</b>	8%	8%	8%
		<b>2025</b>	<b>2030</b>	<b>2040</b>
<b>PAYBACK</b>	<b>Investement</b>	\$ 2.813.560,00	\$ 2.813.560,00	\$ 2.813.560,00
	<b>Savings</b>	\$ -5.388.448,82	\$ -1.962.338,85	\$ 283.531,12



Γράφημα 9 : Εκτίμηση Απόσβεσης για Σενάριο 2040 με διαφορετικά σενάρια υποτίμησης

## 7 Συμπεράσματα

Αυτή η διπλωματική παρέχει σαφή και εφικτά στοιχεία και ανάλυση για την προώθηση της μελέτης της αμμωνίας ως εναλλακτικού καυσίμου για πλοία. Καλύπτονται όλες οι πτυχές της χρήσης της αμμωνίας ως καυσίμου. Από μια ανάλυση βήμα προς βήμα της κατάστασης της παραγωγής, αποθήκευσης και προμήθειας των ιδιοτήτων του καυσίμου αμμωνίας έως τη χρήση της αμμωνίας στην καύση, μια ανάλυση των περιβαλλοντικών και οικονομικών αποδόσεων της καύσης, καθώς και ζητήματα ασφάλειας και εκτίμηση κινδύνου σε όλη την έκταση. Πραγματοποιήθηκαν ποιοτικές αλλά και ποσοτικές αναλύσεις για το πλοίο υπόθεσης, έγιναν νέες και αξιόπιστες τεχνικές προτάσεις για νέο σχεδιασμό των βασικών πτυχών της προμήθειας καυσίμου και της επεξεργασίας μείωσης των ρύπων, με βάση την υπάρχουσα τεχνική διαδρομή. Παρέχεται μια ολοκληρωμένη κατανόηση και καθοδήγηση για τη χρήση της αμμωνίας ως μελλοντικής πηγής καθαρής ενέργειας.

Προσδιορίζει τη χρήση της πράσινης αμμωνίας ως μια βιώσιμη και καθαρή ενεργειακή λύση για την παραγωγή αμμωνίας χρησιμοποιώντας τη διαδικασία HB, ενώ προτείνει την ανάλυση και την εξερεύνηση νέων τεχνολογιών. Ελλείπει συγκεκριμένου πλαισίου για την εποπτεία της αμμωνίας επί του παρόντος, προτείνονται χωριστά ειδικά μέτρα για την προμήθεια, αποθήκευση, χρήση και ανάκτηση αμμωνίας και την προσθήκη εξοπλισμού ασφαλείας, με αναφορά στον κώδικα IFG. Η επιλογή μιας δεξαμενής C εξοπλισμένης με πυροσβεστικό μηχανισμό για αποθήκευση αμμωνίας σε διαφορετικές θερμοκρασίες, χωρίς την ανάγκη εκ νέου υγροποίησης, και η εγκατάσταση δεξαμενής καυσίμου στην πρύμνη του σκάφους επέτρεψαν τη λύση της ογκομετρικής ενέργειας της αμμωνίας. πρόκληση να οδηγήσει σε μείωση μόνο κατά 5% έως 8% του όγκου φορτίου. Επιλέχθηκε πλοίο συμβατό με τα Tier II και Tier III, καθώς και ο κινητήρας διπλού καυσίμου MAN ME-LGI τροποποιήθηκε για καύση αμμωνίας και σχεδιάστηκε ένα νέο σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου χρησιμοποιώντας το λογισμικό Rhino 5, μαζί με ένα σύστημα FVT και σύστημα εξαερισμού για την εξασφάλιση την ασφάλεια της παροχής και χρήσης αμμωνίας. Στη συνέχεια επιλέχθηκε η διαδρομή από τον Περσικό Κόλπο στην Ιαπωνία για τον υπολογισμό της κατανάλωσης καυσίμου και τη συγκριτική ανάλυση των δεδομένων του βοηθητικού συστήματος χρησιμοποιώντας το πακέτο κινητήρων CEAS της MAN. σύμφωνα με τους μελλοντικούς κανονισμούς για την καθαρή ενέργεια. Η ανάλυση των δεδομένων του βοηθητικού συστήματος είχε ως αποτέλεσμα την επιλογή ενός συστήματος SCR για τη μείωση των εκπομπών NOx μεταξύ 60% και 80% στο μέγιστο φορτίο. Αυτή η περίπτωση αντιμετωπίστηκε επίσης με αξιολόγηση κινδύνου χρησιμοποιώντας HAZOP και FMEA για τη χρήση αμμωνίας, με αποτέλεσμα συστάσεις

και στοιχεία ασφάλειας. Αυτό κατέληξε σε μια οικονομική ανάλυση και εκτίμηση αποπληρωμής με περίοδο απόσβεσης μεταξύ 15-25 ετών, καθώς το νέο πλοίο αερίου Αμμωνίας σχεδιάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία.

Όσον αφορά περαιτέρω εργασίες και προοπτικές, λόγω των νέων ενεργειακών χαρακτηριστικών της Αμμωνίας, δεν υπάρχουν πραγματικά πλοία με αμμωνία σε λειτουργία ως αναφορά και οι περιορισμοί αυτής της έρευνας αφορούν κυρίως τωρινά δεδομένα και προβλέψεις. Οι προτάσεις για περαιτέρω μελέτη περιλαμβάνουν προσομοίωση της μηχανής πραγματικής σχεδίασης και χρήση πειραματικών δεδομένων για τη λήψη των πιο αποτελεσματικών και αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με τη θερμοκρασία και την πίεση αποθήκευσης, παροχής και καύσης αμμωνίας. Ταυτόχρονα, με τα πρώτα πλοία που θα χρησιμοποιούν αμμωνία, οι περιβαλλοντικοί υπολογισμοί για τις εκπομπές θα είναι πιο ακριβείς για τη βελτιστοποίηση του συστήματος SCR. Συμπερασματικά, τα πλοία με αμμωνία αποτελούν πλέον μία πολύ καλή επιλογή για το μέλλον της καθαρής πράσινης ενέργειας, και καθώς διατίθενται όλο και πιο ρεαλιστικά δεδομένα, η βελτιστοποίηση της καύσης και των εκπομπών είναι απαραίτητο θέμα για το μέλλον.

## 8 Βιβλιογραφικές Αναφορές

2020. *Ammonia as a marine fuel, Safety Handbook*. [online] Available at: <<https://grontskipsfartsprogram.no/wp-content/uploads/2021/01/Ammonia-as-a-Marine-Fuel-Safety-Handbook.pdf?t=1612522923242>> [Accessed 3 May 2021].
- ABS, 2020. *GUIDE FOR GAS AND OTHER LOW-FLASHPOINT FUEL READY VESSELS*.
- ABS, 2020. *PATHWAYS TO SUSTAINABLE SHIPPING*.
- ABS, 2020. *SUSTAINABILITY WHITEPAPER, AMMONIA AS MARINE FUEL*.
- ALFA LAVAL, HAFNIA, HALDOR TOPSØE, VESTAS and SIEMENS GAMESA, 2020. *Ammonfuel An industrial view of ammonia as a marine fuel*.
- Bowles, J. B., & Bonnell, R. D. (1998). Failure Mode Effects and Criticality Analysis: What it is and How to use it. *TOPIC IN RELIABILITY AND MAINTAINABILITY AND STATISTICS, ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM*.
- Brown, T., 2019. *MAN Energy Solutions: an ammonia engine for the maritime sector - Ammonia Energy Association*. [online] Ammonia Energy Association. Available at: <<https://www.ammoniaenergy.org/articles/man-energy-solutions-an-ammonia-engine-for-the-maritime-sector/>> [Accessed 3 May 2021].
- Crawley, F., & Tyler, B. (2015). *HAZOP: Guide to best practice*. Elsevier.
- Crolius, S., 2021. *Singapore Emerges as a Maritime Ammonia Center - Ammonia Energy Association*. [online] Ammonia Energy Association. Available at: <<https://www.ammoniaenergy.org/articles/singapore-emerges-as-a-maritime-ammonia-center/>> [Accessed 3 May 2021].
- DNV GL, 2016. *Rules for Classification and Construction Ship Technology*. [ebook] Available at: <[http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/gl/maritimerrules/gl\\_i-0-0\\_e\\_new.pdf](http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/gl/maritimerrules/gl_i-0-0_e_new.pdf)> [Accessed 3 May 2021].
- Fecke, M., Garner, S., & Cox, B. (2016). Review of global regulations for anhydrous ammonia production, use, and storage. *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser., 2016*, σσ. 1–11.
- Fridell, E., & Steen, E. (1766). Ammonia slip measurements on ships with NO<sub>x</sub> converters. *IVL Report*.
- Giddey, S., Badwal, S. P., Munnings, C., & Dolan, M. (2017). Ammonia as a renewable energy transportation media. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5, 10231–10239.
- GL, D. N. (2018). Maritime forecast to 2050. *Energy Transition Outlook, 2018*.
- GL, D. N. (2019). Energy Transition Outlook 2018: A global and regional forecast to 2050. *Det Norske Veritas Group, Høvik, Norway, White paper*.
- Lloyd's Register, 2020. *Techno-economic assessment of zero-carbon fuels*.
- Hariharan, S., 2020. 'Ammonia: The Green Fuel' - An Assessment of Practical Aspects.
- Hansson, J., Brynolf, S., Fridell, E., & Lehtveer, M. (2020). The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis. *Sustainability*, 12, 3265.
- Kim, K., Roh, G., Kim, W., & Chun, K. (2020). A preliminary study on an alternative ship propulsion system fueled by ammonia: Environmental and economic assessments. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 183.



Kokarakis, J., 2019. *Dual Fuel Engines*.

MAN Energy Solutions, 2021. *The Methanol fuelled MAN B&W LGIM Engine*.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J. (2013). Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *K., Tignor, M., Allen, SK, Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, PM, Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*

Nunney, M. J. (1998). Automotive technology. *Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1998. 666.*

Researchandmarkets.com. 2021. *Ammonia Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 - 2026)*. [online] Available at: <[https://www.researchandmarkets.com/reports/4773617/ammonia-market-growth-trends-covid-19-impact?utm\\_source=BW&utm\\_medium=PressRelease&utm\\_code=prhpml&utm\\_campaign=1281569++Global+Ammonia+Market+Growth%2c+Trends%2c+and+Forecasts+2019-2024+-+Agriculture+Industry+Dominates+the+Market&utm\\_exec=chdo54prd](https://www.researchandmarkets.com/reports/4773617/ammonia-market-growth-trends-covid-19-impact?utm_source=BW&utm_medium=PressRelease&utm_code=prhpml&utm_campaign=1281569++Global+Ammonia+Market+Growth%2c+Trends%2c+and+Forecasts+2019-2024+-+Agriculture+Industry+Dominates+the+Market&utm_exec=chdo54prd)> [Accessed 3 May 2021].

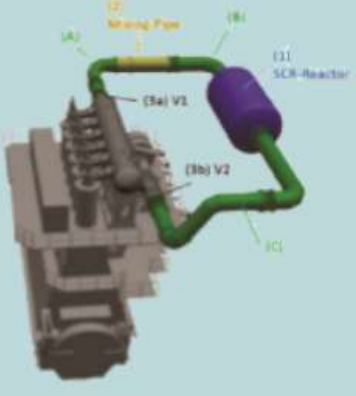
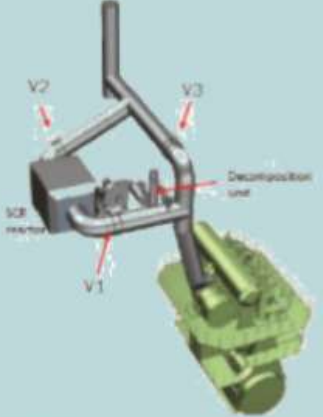
Soloveichik, G. (2019). Electrochemical synthesis of ammonia as a potential alternative to the Haber–Bosch process. *Nature Catalysis, 2, 377–380.*

WinGD. (2018). *Selective Catalytic Reduction FAQ*. Switzerland: Winterthur Gas & Diesel Ltd.

Zhang, X., & Brown, R. C. (2019). Introduction to Thermochemical Processing of Biomass into Fuels, Chemicals, and Power. Στο *Thermochemical Processing of Biomass* (σσ. 1-16). John Wiley & Sons, Ltd. doi:<https://doi.org/10.1002/9781119417637.ch1>

## 9 Παραρτήματα

### 9.1 Παράρτημα 1 : Μηχανήματα, εξαρτήματα και ισχύοντες κανονισμοί

HP SCR	LP SCR
The reactor is before the turbocharger. The exhaust gas in the reactor has a higher pressure (max 4 bar (g)) and temperature.	The reactor is after the turbocharger. The exhaust gas in the reactor has a relatively lower pressure (about 0.6 bar (g)) and temperature.
 <p>An HP SCR system has 3 main design features. The SCR reactor (1), a pipe section, known as the Evaporation or Mixing Pipe for urea injection and evaporation (2), and the interface valves to the engine (3a/3b)</p>	 <p>An LP SCR system has the following design features: the SCR reactor, the decomposition unit for ammonia generation and the control valves (V1, V2, V3)</p>

Εικόνα 26: Αρχές LPSCR & HPSCR (Πηγή : WinGD, 2018)

HP SCR	LP SCR
Urea Tank	Urea Tank
Compressed air bottle tank	Compressed air bottle tank
Compressed air system	Compressed air system
Urea supply	Urea supply
Soot blowing system	Soot blowing system
SCR valves	SCR valves
-	Burner
-	Blower

Εικόνα 27: Εξαρτήματα SCR (Πηγή : WinGD, 2018)

### Ammonia generation

HP SCR	LP SCR
Urea is injected into the mixed piping with high temperature exhaust gas, no energy consumption	Through ammonia generation using a fuel oil burner

### Minimum working temperature

HP SCR	LP SCR
Exhaust gas temperature before turbocharger: • 310°C for fuel <0.1%S	Exhaust gas temperature after turbocharger: • 230°C for fuel <0.1%S

### Fuel penalties

HP SCR	LP SCR
≈ 0-3 g/kWh between 25-40% of engine power	≈ 0-3 g/kWh between 25-50% of engine power ≈ 0-2 g/kWh between 50-80% of engine power

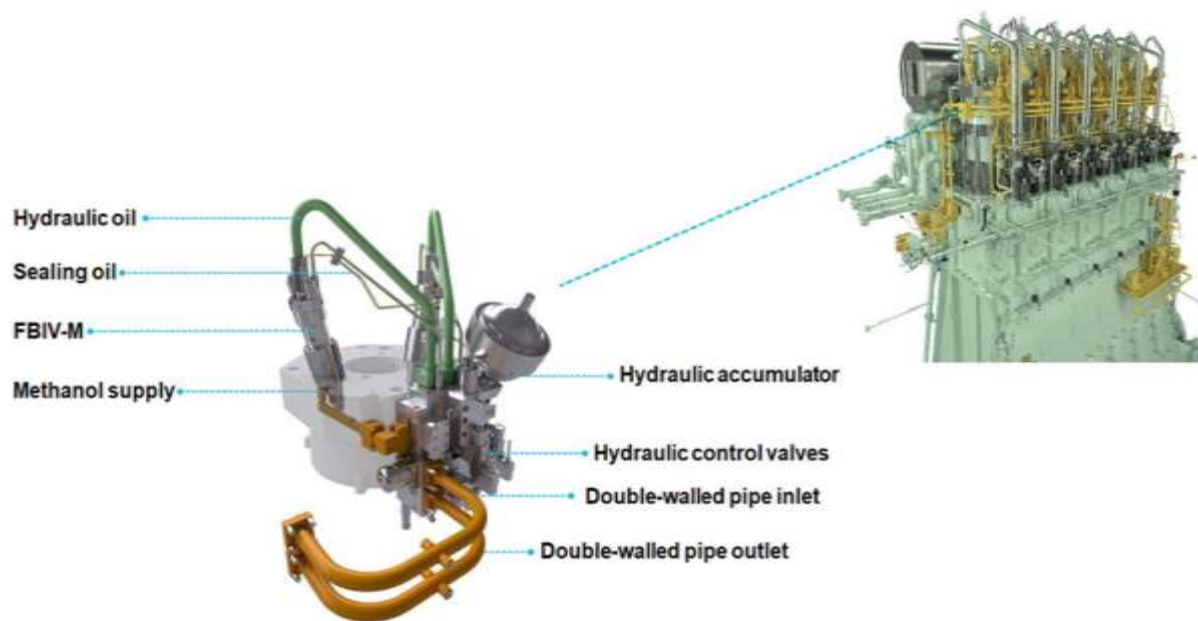
### Engine interfaces

HP SCR	LP SCR
Engine mechanical modifications: • Exhaust gas manifold • Engine gallery • Turbocharger connections	No engine modification
SCR bypass valves controlled by the engine control system	SCR bypass valves controlled by the SCR system control

Εικόνα 28 : Πίνακες Σύγκρισης (Πηγή : WinGD, 2018)

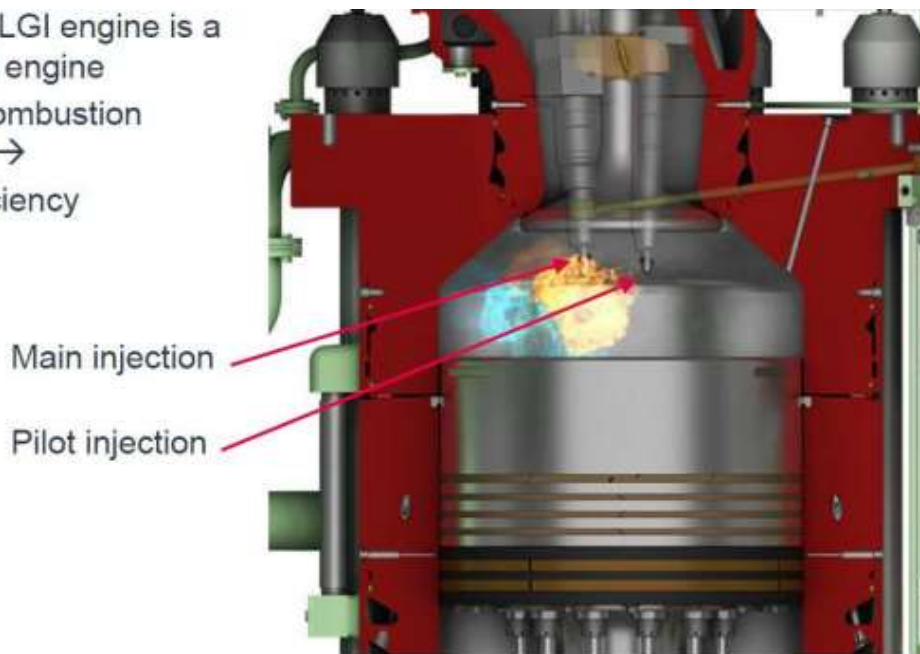


Εικόνα 29 : Μέρη κινητήρα ME-LGIM (Πηγή : MAN)



Εικόνα 30: Εξαρτήματα και σωληνώσεις που τοποθετήθηκαν στον κύλινδρο του κινητήρα ME-LGIM (Πηγή : MAN)

- The ME-LGI engine is a dual fuel engine
- Diesel combustion process →
- High efficiency



Εικόνα 31 : : Έγχυση κύριου και πιλοτικού καυσίμου στον κινητήρα ME;LGIM (Πηγή : ME-LGIM)

## 9.2 Παράρτημα 2 : Εκτιμήσεις Απόσβεσης

Πίνακας 12 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (5%)

Payback Estimation (2040 Scenario) (5%)														
Years	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CAPEX	\$ -2.813.560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -
OPEX	\$ -	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12
PV (5%)		\$ 270.029,64	\$ 257.171,09	\$ 244.924,84	\$ 233.261,76	\$ 116.236,05	\$ 211.575,29	\$ 201.500,28	\$ 191.905,02	\$ 182.766,69	\$ 91.073,98	\$ 165.774,77	\$ 157.880,74	\$ 150.362,61
NPV (5%)	\$ -2.813.560,00	\$ -2.543.530,36	\$ -2.286.359,27	\$ -2.041.434,43	\$ -1.808.172,67	\$ -1.691.936,63	\$ -1.480.361,34	\$ -1.278.861,06	\$ -1.086.956,04	\$ -904.189,35	\$ -813.115,37	\$ -647.340,59	\$ -489.459,85	\$ -339.097,25

Πίνακας 13 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (5%) (συνέχεια πίνακα 12)

Payback Estimation ( 2040 Scenario 5%)																
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20
\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12
\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92
\$ 143.202,48	\$ 71.358,85	\$ 129.888,87	\$ 123.703,69	\$ 117.813,04	\$ 112.202,89	\$ 55.911,53	\$ 101.771,33	\$ 96.925,08	\$ 92.309,60	\$ 87.913,90	\$ 43.808,14	\$ 79.740,50	\$ 75.943,33	\$ 72.326,99	\$ 68.882,84	\$ 34.324,83
\$ -195.894,76	\$ -124.535,91	\$ 5.352,96	\$ 129.056,65	\$ 246.869,69	\$ 359.072,58	\$ 414.984,11	\$ 516.755,44	\$ 613.680,51	\$ 705.990,11	\$ 793.904,01	\$ 837.712,16	\$ 917.452,66	\$ 993.395,99	\$ 1.065.722,98	\$ 1.134.605,82	\$ 1.168.930,65

Πίνακας 14: Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (6%)

Payback Estimation (2040 Scenario) (6%)														
Years	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CAPEX	\$ -2.813.560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -
OPEX	\$ -	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12
		\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12
PV (6%)		\$ 267.482,19	\$ 252.341,69	\$ 238.058,20	\$ 224.583,21	\$ 110.855,69	\$ 199.878,25	\$ 188.564,39	\$ 177.890,93	\$ 167.821,64	\$ 82.837,82	\$ 149.360,66	\$ 140.906,28	\$ 132.930,45
NPV (6%)	\$ -2.813.560,00	\$ -2.546.077,81	\$ -2.293.736,12	\$ -2.055.677,92	\$ -1.831.094,72	\$ -1.720.239,03	\$ -1.520.360,77	\$ -1.331.796,38	\$ -1.153.905,45	\$ -986.083,81	\$ -903.245,99	\$ -753.885,33	\$ -612.979,05	\$ -480.048,60

Πίνακας 15 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (6%) (συνέχεια πίνακα 14)

Payback Estimation (2040 for Scenario 6%)																
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20
\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12
\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92
\$ 125.406,09	\$ 61.901,24	\$ 111.610,97	\$ 105.293,37	\$ 99.333,37	\$ 93.710,72	\$ 46.256,21	\$ 83.402,21	\$ 78.681,33	\$ 74.227,67	\$ 70.026,10	\$ 34.565,33	\$ 62.322,98	\$ 58.795,27	\$ 55.467,23	\$ 52.327,58	\$ 25.829,22
\$ -354.642,51	\$ -292.741,27	\$ -181.130,30	\$ -75.836,93	\$ 23.496,44	\$ 117.207,17	\$ 163.463,37	\$ 246.865,59	\$ 325.546,92	\$ 399.774,59	\$ 469.800,69	\$ 504.366,02	\$ 566.689,01	\$ 625.484,27	\$ 680.951,51	\$ 733.279,09	\$ 759.108,31

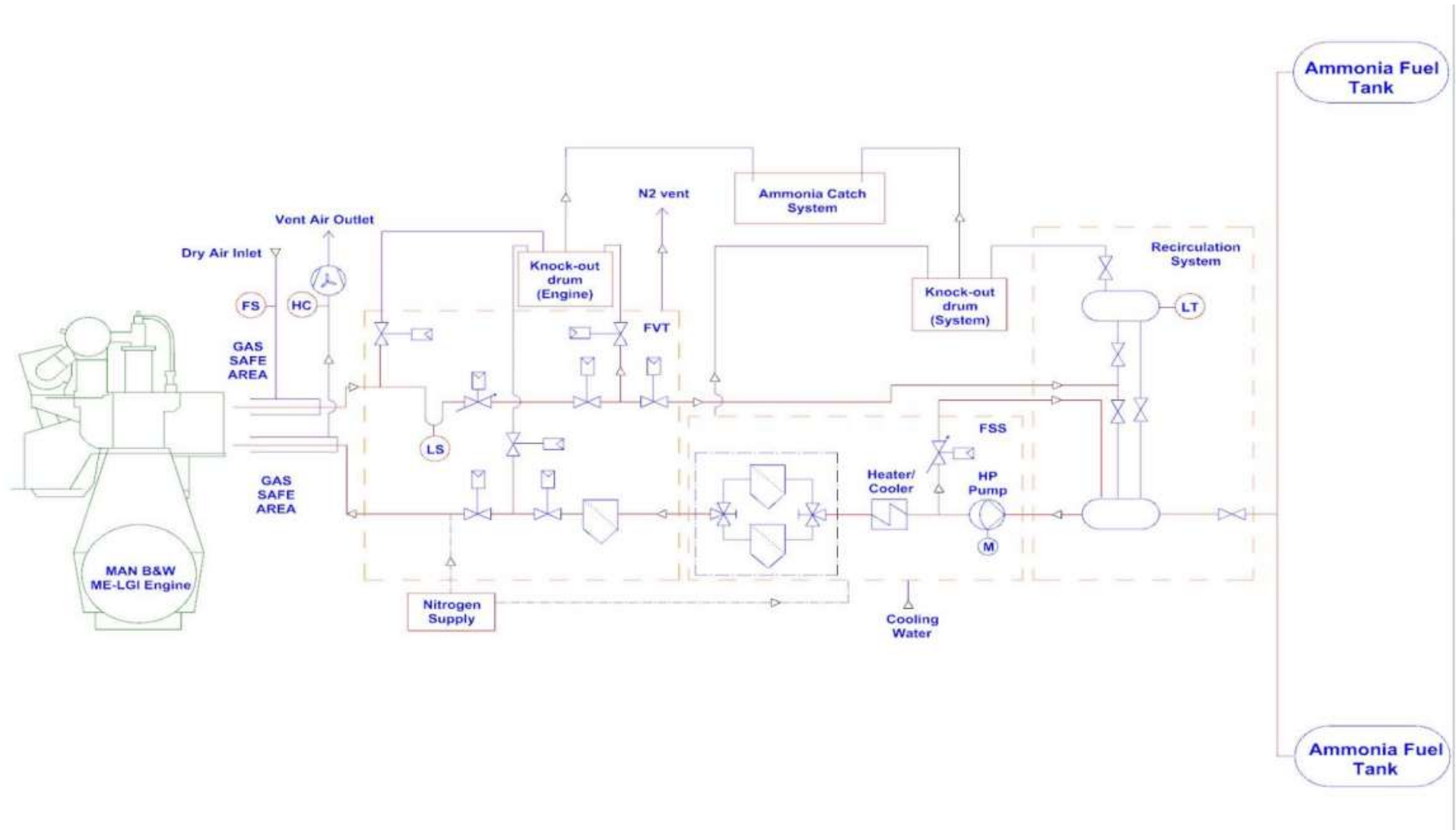
Πίνακας 16 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (8%)

Payback Estimation (2040 Scenario) (8%)														
Years	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CAPEX	\$ -2.813.560,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -
OPEX	\$ -	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12
		\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12
PV (8%)		\$ 262.528,82	\$ 243.082,24	\$ 225.076,15	\$ 208.403,84	\$ 100.964,46	\$ 178.672,70	\$ 165.437,69	\$ 153.183,04	\$ 141.836,15	\$ 68.714,72	\$ 121.601,64	\$ 112.594,11	\$ 104.253,81
NPV (8%)	\$ -2.813.560,00	\$ -2.551.031,18	\$ -2.307.948,95	\$ -2.082.872,80	\$ -1.874.468,96	\$ -1.773.504,50	\$ -1.594.831,79	\$ -1.429.394,11	\$ -1.276.211,06	\$ -1.134.374,91	\$ -1.065.660,20	\$ -944.058,56	\$ -831.464,45	\$ -727.210,64

Πίνακας 17 : Εκτίμηση Απόσβεσης / Σενάριο 2040 (8%) (συνέχεια πίνακα 16)

Payback Estimation (2040 Scenario) (8%)																
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -135.181,20
\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12
\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 283.531,12	\$ 148.349,92
\$ 96.531,30	\$ 46.766,08	\$ 82.760,03	\$ 76.629,66	\$ 70.953,39	\$ 65.697,58	\$ 31.828,21	\$ 56.325,09	\$ 52.152,86	\$ 48.289,68	\$ 44.712,67	\$ 21.661,74	\$ 38.333,91	\$ 35.494,36	\$ 32.865,15	\$ 30.430,69	\$ 14.742,62
\$ -630.679,34	\$ -583.913,26	\$ -501.153,23	\$ -424.523,57	\$ -353.570,18	\$ -287.872,60	\$ -256.044,39	\$ -199.719,30	\$ -147.566,44	\$ -99.276,76	\$ -54.564,09	\$ -32.902,34	\$ 5.431,56	\$ 40.925,92	\$ 73.791,07	\$ 104.221,76	\$ 118.964,38

### 9.3 Παράρτημα 3 : Σχέδιο FSS



Εικόνα 32 : Σχέδιο συστήματος παροχής καυσίμου