



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Πολυκριτηριακή αξιολόγηση ναυτιλιακών καυσίμων

Multi-criteria decision analysis of marine fuels

Συγγραφέας:

Αντώνιος Δ. Καλογερόπουλος

A.M.: 51116033

Επιβλέπουσα: Δρ. Στράντζαλη Ελένη

Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ

Αιγάλεω, 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Πολυκριτηριακή αξιολόγηση ναυτιλιακών καυσίμων

Συγγραφέας

Αντώνιος Δ. Καλογερόπουλος (Α.Μ.: 51116033)

Επιβλέπουσα

Στράντζαλη Ελένη Ακ. Υπότροφος ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

20/2/2023

Εξεταστική Επιτροπή

Ελένη Στράντζαλη,
Ακ. Υπότροφος ΠΑ.Δ.Α.

Γεώργιος Λιβανός,
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

Δημήτριος - Νικόλαος
Παγώνης,
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καλογερόπουλος Αντώνιος του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 51116033 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 Δηλών



Αντώνιος Καλογερόπουλος

Στον αδελφό μου Χρήστο

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια κυρία Ελένη Στράντζαλη για την εξαιρετική συνεργασία μας καθώς η πολύτιμη βοήθειά της, μου έδωσε τη δυνατότητα να ανταπεξέλθω στις όποιες δυσκολίες συνάντησα κατά τη διαδικασία αυτή.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του τμήματος, καθώς μέσω των διαλέξεών τους που είχα την ευκαιρία να παρακολουθήσω, μου κέντρισαν το ενδιαφέρον στο μέγιστο βαθμό για τη ναυπηγική αλλά και για όλες τις επιστήμες που σχετίζονται με αυτή. Επίσης, είμαι ευγνώμων για τις γνώσεις που απέκτησα και το τρόπο σκέψης που με βοήθησαν να εξελίξω, επειδή αυτοί είναι οι δύο βασικοί πυλώνες στους οποίους θα στηριχτώ για να πραγματοποιήσω τα πρώτα μου βήματα στην επαγγελματική μου καριέρα.

Τέλος, όσον αφορά την οικογένειά μου, ένα ευχαριστώ είναι λίγο για ανταποδώσει τη στήριξη και τις θυσίες που έχουν κάνει όλα αυτά τα χρόνια για εμένα.

Περίληψη

Η παγκόσμια τάση για τη μείωση των εκπομπών του άνθρακα σε συνδυασμό με τους νέους και πιο αυστηρούς κανονισμούς στη ναυτιλία, φανερώνουν την ανάγκη υιοθέτησης εναλλακτικών καυσίμων στα πλοία. Για την επιλογή και αξιοποίηση ενός εναλλακτικού ναυτιλιακού καυσίμου, πρέπει να ληφθούν υπόψη μια πληθώρα κριτηρίων. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε πολυκριτηριακή ανάλυση και συγκεκριμένα η μεθοδολογία, PROMETHEE II. Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν τα ναυτιλιακά καύσιμα μεθανόλη, αμμωνία, υγροποιημένο φυσικό αέριο και υδρογόνο και αξιολογήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη έξι σενάρια με βάση τις προτιμήσεις των ενδιαφερόντων. Τα σενάρια αυτά αναφέρονται στους πλοιοκτήτες, παραγωγούς καυσίμων, κατασκευαστές κινητήρων, κυβερνητικές αρχές καθώς και στα σενάρια συνδυασμού και ισοτιμίας. Τα κριτήρια της αξιολόγησης ανταποκρίνονται σε οικονομικά, περιβαλλοντικά, τεχνικά και κοινωνικά θέματα. Συνολικά λαμβάνονται υπόψη 9 κριτήρια: εκπομπές καυσαερίων, μείωση φορτίου, αξιοπιστία παροχής καυσίμου, κανονισμοί, κόστος επένδυσης, κόστος συντήρησης και λειτουργίας, εκτιμώμενο κόστος καυσίμου το 2030, ρίσκο προληπτικών μέτρων και ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών. Η διαδικασία της αξιολόγησης οδηγεί στην κατάταξη των εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων. Τέλος, τα αποτελέσματα που προκύπτουν, περιλαμβάνουν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τη χρήση των ναυτιλιακών καυσίμων.

Λέξεις κλειδιά: Μεθανόλη, αμμωνία, υγροποιημένο φυσικό αέριο, υδρογόνο, πολυκριτηριακή αξιολόγηση

Abstract

The global decarbonization movement combined with the increasingly stringent shipping emissions regulations lead to the adoption of alternative fuels in the shipping industry. The alternative fuel selection process is a problem that should take into consideration various criteria. Multi-criteria analysis was used for the alternative fuel evaluation process, and specifically the PROMETHEE II methodology. In this thesis, the marine fuels methanol, ammonia, liquefied natural gas and hydrogen were studied and evaluated considering six scenarios, based on stakeholders' preferences. The examined scenarios include the influence of ship owners, fuel producers, engine manufacturers, government authorities, and, also, taking into account a combination and parity scenario. The selected criteria cover economic, environmental, technical and social aspects. In total, 9 criteria are considered: emissions, load reduction, reliability of fuel supply, regulations, investment cost, maintenance and operation cost, estimated fuel cost in 2030, risk of preventive measures and risk in case of disasters. The application of the evaluation process has as a result the ranking of alternative marine fuels. The results include useful conclusions regarding the use of marine fuels.

Keywords: Methanol, ammonia, liquefied natural gas, hydrogen, multi-criteria evaluation

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	5
1.1. Αντικείμενο Μελέτης	5
1.2. Στάδια Υλοποίησης	6
1.3. Δομή της εργασίας.....	7
Κεφάλαιο 2. Ναυτιλιακά καύσιμα	8
2.1. Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG).....	9
2.2. Υδρογόνο	11
2.3. Μεθανόλη	12
2.4. Αμμωνία.....	13
Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία πολυκριτηριακής ανάλυσης	15
3.1. Μεθοδολογίες MCDM.....	15
3.2. Πολυκριτηριακά προβλήματα	16
3.3. Αρχικές παράμετροι των μεθόδων PROMETHEE	20
3.3.1. Αρχικές παράμετροι μεταξύ των κριτηρίων – Μέθοδος Simos	21
3.3.2. Συναρτήσεις κριτηρίων.....	24
3.4. Βασικές έννοιες των μεθόδων PROMETHEE	27
3.4.1. Συνολικοί δείκτες προτίμησης.....	27
3.4.2. Ροές κατάταξης.....	28
3.5. Μέθοδος πλήρους κατάταξης PROMETHEE II	29
Κεφάλαιο 4. Αξιολόγηση ναυτιλιακών καυσίμων.....	30
4.1. Διαδικασία κατάταξης ναυτιλιακών καυσίμων	30
4.2. Κριτήρια αξιολόγησης.....	31

4.2.1.	Κόστος επένδυσης	32
4.2.2.	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας.....	33
4.2.3.	Κόστος καυσίμου το 2030	33
4.2.4.	Μείωση φορτίου	34
4.2.5.	Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών.....	35
4.2.6.	Ρίσκο προληπτικών μέτρων.....	42
4.2.7.	Αξιοπιστία παροχής καυσίμου.....	45
4.2.8.	Κανονισμοί	46
4.2.9.	Καυσαέρια	52
4.3.	Τιμές αξιολόγησης.....	53
4.4.	Βαρύτητες κριτηρίων, κατώφλια προτίμησης και αποτελέσματα.....	55
4.4.1.	Βαρύτητες κριτηρίων.....	55
4.4.2.	Κατώφλια προτίμησης.....	62
4.4.3.	Αποτελέσματα	63
	Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και προτάσεις.....	68
5.1.	Συμπεράσματα	68
5.2.	Προτάσεις	69
	Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία	71

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Γενική μορφή πίνακα αξιολόγησης πολυκριτηριακού προβλήματος (Brans and De Smet 2016).....	17
Πίνακας 2 Γενική μορφή πίνακα κριτηρίων – βαρυτήτων σημαντικότητας (Brans and De Smet 2016).....	21
Πίνακας 3 Τύποι συναρτήσεων προτίμησης (Brans και De Smet 2016).....	26
Πίνακας 4 Σύνολο κριτηρίων που εντοπίστηκε στη βιβλιογραφία	31
Πίνακας 5 Κριτήρια αξιολόγησης.....	32
Πίνακας 6 Κόστη επένδυσης καυσίμων (Hansson, Månsson, και συν. 2019)	32
Πίνακας 7 Κόστη συντήρησης και λειτουργίας καυσίμων (Hansson, Brynolf, και συν. 2020), (Hansson, Månsson, και συν. 2019)	33
Πίνακας 8 Κόστη καυσίμων το 2030 (Hansson, Brynolf, και συν. 2020), (Hansson, Månsson, και συν. 2019).....	34
Πίνακας 9 Ενεργειακές πυκνότητες καυσίμων (Carvalho, και συν. 2021), (DNV GL AS Maritime 2019)	35
Πίνακας 10 Θέματα αξιολόγησης ρίσκου (Together in Safety 2022)	37
Πίνακας 11 Βαθμοί ποιοτικής αξιολόγησης.....	41
Πίνακας 12 Ποσότητες εμφάνισης καυσίμων στις ζώνες ρίσκου σε περίπτωση βλάβης / καταστροφής (Together in Safety 2022).....	41
Πίνακας 13 Ποιοτική αξιολόγηση καυσίμων ως προς το ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών.....	41
Πίνακας 14 Θέματα αξιολόγησης μέτρων προφύλαξης (Together in Safety 2022).....	43
Πίνακας 15 Ποσότητες εμφάνισης καυσίμων στις ζώνες ρίσκου σε περίπτωση έλλειψης προληπτικών μέτρων ασφαλείας (Together in Safety 2022).....	45
Πίνακας 16 Ποιοτική αξιολόγηση καυσίμων ως προς το ρίσκο έλλειψης προληπτικών μέτρων	45
Πίνακας 17 Ποιοτική αξιολόγηση αξιοπιστίας παροχής καυσίμων (Hansson, Brynolf, και συν. 2020) (Hansson, Månsson, και συν. 2019)	46

Πίνακας 18 Κανονισμοί καυσίμων (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021)	47
Πίνακας 19 Ποιοτική αξιολόγηση κανονισμών των καυσίμων (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021).....	51
Πίνακας 20 Ποσοστά μείωσης των εκπομπών άνθρακα των καυσίμων σε συνάρτηση με το MGO (E. L. Lindstad 2021), (Lindstad, και συν. 2021).....	53
Πίνακας 21 Τιμές αξιολόγησης	54
Πίνακας 22 Κατάταξη κριτηρίων για το κάθε σενάριο	56
Πίνακας 23 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο των πλοιοκτητών	57
Πίνακας 24 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο των παραγωγών καυσίμων	58
Πίνακας 25 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο των κατασκευαστών κινητήρων	59
Πίνακας 26 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο των κυβερνητικών αρχών.....	60
Πίνακας 27 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο του συνδυασμού	61
Πίνακας 28 Βαρύτητες κριτηρίων ανά σενάριο.....	62
Πίνακας 29 Κατώφλια προτίμησης P	63
Πίνακας 30 Αποτελέσματα αξιολόγησης / κατάταξη καυσίμων σύμφωνα με τις συνολικές ροές Φ.....	65
Πίνακας 31 Ποσότητες εμφάνισης των καυσίμων στις βαθμίδες της κατάταξης	65

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Στάδια υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας	7
Εικόνα 2 MF Hydra (Chetkovich 2021)	9
Εικόνα 3 Ποσοστά παραγωγής του LNG ανά πρώτη ύλη (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021)	10
Εικόνα 4 Ποσοστά παραγωγής του υδρογόνου ανά πρώτη ύλη (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021).....	12
Εικόνα 5 Ποσοστά παραγωγής της μεθανόλης ανά πρώτη ύλη (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021).....	13
Εικόνα 6 Ποσοστό παραγωγής της αμμωνίας ανά πρώτη ύλη (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021).....	14
Εικόνα 7 Ταξινόμηση των μεθόδων MCDM (Gebre, et al., 2021)	16
Εικόνα 8 Αρχικά βήματα μεθοδολογίας Simos (Figueira and Roy 2002).....	23
Εικόνα 9 Υπολογισμός των βαρών με τη μεθοδολογία Simos (Figueira and Roy 2002)	24
Εικόνα 10 Τυπική μορφή συνάρτησης προτίμησης (Brans και De Smet 2016).....	25
Εικόνα 11 Διαδικασία κατάταξης ναυτιλιακών καυσίμων	30
Εικόνα 12 Ενεργειακές πυκνότητες καυσίμων (DNV GL AS Maritime 2019)	35
Εικόνα 13 Εκπομπές GHG καυσίμων (Lindstad, και συν. 2021).....	53
Εικόνα 14 Διάγραμμα αράχνης συνολικών ροών Φ ανά σενάριο	66

Αλφαβητικό Ευρετήριο

MCDA ή MCDM: multiple criteria decision analysis ή multiple criteria decision making (πολυκριτηριακή ανάλυση / λήψη απόφασης)

GHG: greenhouse gases (αέρια του θερμοκηπίου)

IMO: international maritime organization (διεθνής οργανισμός ναυσιπλοΐας)

MADM: multi-attribute decision-making (λήψη απόφασης πολλαπλών παραμέτρων)

MODM: multiple-objective decision-making (λήψη απόφασης πολλαπλών συστημάτων)

AHP: analytic hierarchy process (διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας)

ANP: analytic network process (ανάλυση δικτύου)

PROMETHEE: preference ranking organization method for enrichment evaluation (διαδικασία κατάταξης των δράσεων για αξιολόγηση της πιο επωφελούς επιλογής)

HFO: heavy fuel oil (βαρύ μαζούτ)

MDO: marine diesel oil (πετρέλαιο ντίζελ)

ABS: American bureau shipping (αμερικανικός νηογνώμονας)

CCS: Carbon capture and storage (εγκλωβισμός και αποθήκευση άνθρακα)

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο Μελέτης

Στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αξιολόγηση πολλών παραμέτρων στα εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα όπως η μεθανόλη, η αμμωνία, το LNG και το υδρογόνο. Μέσα από τη διαδικασία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης επιλέγονται τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης των καυσίμων. Συγκεκριμένα, τα κριτήρια αυτά είναι: τα καυσαέρια, η μείωση φορτίου, η αξιοπιστία παροχής καυσίμου, οι κανονισμοί, η ασφάλεια (ρίσκο προληπτικών μέτρων και ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/ καταστροφών) και τα επιμέρους κόστη (εκτιμώμενο κόστος καυσίμου το 2030, κόστος συντήρησης/λειτουργίας και κόστος επένδυσης). Η μέθοδος με την οποία θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση ονομάζεται μέθοδος πλήρους κατάταξης PROMETHEE II και ανήκει στη κατηγορία των μεθόδων επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων μέσω της κατάταξης (outranking). Η επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων αποτελεί θέμα υψίστης σημασίας καθώς μέσω αυτής της διαδικασίας, ο χρήστης θα είναι σε θέση να γνωρίζει ποια είναι η βέλτιστη επιλογή από την οποία θα αποκομίσει το μέγιστο όφελος. Μερικά από τα αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής καυσίμου μπορούν να είναι το μικρότερο κόστος, η εξοικονόμηση χρόνου, η αύξηση της απόδοσης, η μεγαλύτερη ασφάλεια κ.ά.. Τα καύσιμα αποτελούν μείζον θέμα τα τελευταία χρόνια στο χώρο της ναυτιλίας εξαιτίας των περιβαλλοντολογικών προβλημάτων και κατ' επέκταση των απαιτήσεων που έχουν αυξηθεί. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η ζήτηση σε εναλλακτικά καύσιμα που προσφέρουν λύσεις στα αναφερθέντα ζητήματα, έχει σημειώσει σημαντική άνοδο.

1.2. Στάδια Υλοποίησης

Τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

Στάδιο 1^ο: Βιβλιογραφική αναζήτηση πληροφοριών και επισκόπηση υπάρχουσας κατάστασης

Πραγματοποιήθηκε μία αρχική συλλογή δεδομένων ως προς τα εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα, τα πολυκριτηριακά προβλήματα και τις μεθόδους επίλυσής τους.

Στάδιο 2^ο: Μεθοδολογία PROMETHEE

Μελετήθηκαν οι υφιστάμενες μεθοδολογίες πολυκριτηριακής ανάλυσης και επιλέχθηκε η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του πολυκριτηριακού προβλήματος.

Στάδιο 3^ο: Σενάρια, κριτήρια και τιμές καυσίμων

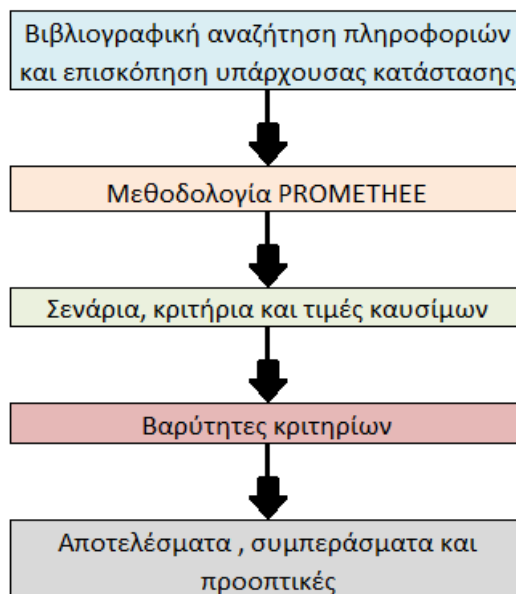
Στο παρόν στάδιο, αναζητήθηκαν πληροφορίες σχετικά με τα σενάρια και τα κριτήρια της αξιολόγησης και έγινε εκτενής έρευνα ως προς την εύρεση τιμών για τα ναυτιλιακά καύσιμα.

Στάδιο 4^ο: Βαρύτητες κριτηρίων

Μελετήθηκε αρχικά η θεωρία Simos, και στη συνέχεια παρήχθησαν οι βαρύτητες των κριτηρίων για το κάθε σενάριο.

Στάδιο 5^ο: Αποτελέσματα, συμπεράσματα και προοπτικές

Στο τελευταίο στάδιο πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματά της, προέκυψαν και τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Επίσης, έγινε αναφορά σε ορισμένες προτάσεις και προοπτικές σχετικά με τα θέματα που παρουσιάστηκαν στη διπλωματική εργασία.



Εικόνα 1 Στάδια υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας

1.3. Δομή της εργασίας

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στο αντικείμενο μελέτης, στα στάδια υλοποίησης και στη δομή της διπλωματικής εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τα εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα. Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται μια γενική αναφορά στα πολυκριτηριακά προβλήματα και στις μεθόδους επίλυσής τους. Στη συνέχεια, η εργασία επικεντρώνεται στις μεθόδους PROMETHEE και ειδικότερα στη PROMETHEE II με την οποία θα γίνει η αξιολόγηση των ναυτιλιακών καυσίμων. Βασικά στοιχεία των μεθόδων που αναφέρονται είναι οι αρχικοί παράμετροι και ορισμένες βασικές έννοιες όπως οι συνολικοί δείκτες προτίμησης οι βαρύτητες και οι συνολικές ροές κατάταξης. Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται: η διαδικασία κατάταξης των ναυτιλιακών καυσίμων, τα κριτήρια αξιολόγησης και δίνονται οι τιμές των καυσίμων για το κάθε κριτήριο αντίστοιχα. Επίσης, υπολογίζονται οι βαρύτητες των κριτηρίων, τα κατώφλια προτίμησης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης. Τέλος, στο Κεφάλαιο 5, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, παράγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα καθώς και ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνες που θα μπορούσαν να βασιστούν στη παρούσα εργασία όπως επίσης και εναλλακτικές μεθόδους υλοποίησης της αξιολόγησης.

Κεφάλαιο 2. Ναυτιλιακά καύσιμα

Η παρούσα ενότητα αναφέρεται στα εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα τα οποία θα υποβληθούν σε αξιολόγηση. Το 2018 παρατηρήθηκε αύξηση σε σύγκριση με το 2012, στις εκπομπές των καυσαερίων που οφειλόταν στη παγκόσμια ναυτιλία. Ειδικότερα, έγινε αύξηση κατά 9.6% και 9.3% σε αέρια του θερμοκηπίου (GHG) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) αντίστοιχα. Αύτη η αύξηση μεταφράζεται σε ένα εκατομμύριο τόνους καυσαερίων που αντιστοιχεί στο 2.89% των συνολικών ανθρώπινων εκπομπών. Την ίδια χρονιά (2018), ο IMO και ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών, αποφάσισαν να γίνει ενίσχυση των προσπαθειών αντιμετώπισης της αύξησης των καυσαερίων (Ampah, et al. 2021). Συγκεκριμένα, όρισαν ως βασικό στόχο τη μείωση αυτών των εκπομπών κατά 80%-95% μέχρι το 2050 (Luciana, Gasparotti και Rusu 2021). Μια από τις βασικές λύσεις που έθεσαν για το ζήτημα, ήταν η χρήση εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Μερικά από αυτά τα ναυτιλιακά καύσιμα είναι η μεθανόλη, η αμμωνία, το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και το υδρογόνο (Ampah, και συν. 2021).

Όσον αφορά τη μεθανόλη, δεν είναι λίγες οι ερευνητικές μελέτες που έχουν λάβει χώρα σε πλοία τα τελευταία χρόνια, με τη πρώτη εξ αυτών να χρονολογείται από το 2006 έως το 2009 με την ονομασία METHAPU. Το πιο πρόσφατο ερευνητικό πρόγραμμα ονομαζόταν SUMMETH και πραγματοποιήθηκε το 2018. Βασικός στόχος του προγράμματος ήταν η διεύρυνση της χρήσης ναυτιλιακών καυσίμων από μεθανόλη όπως και η εφαρμογή του εν λόγω καυσίμου σε μικρούς κινητήρες (250-1200 kW). Το 2015 η Stena Line παρουσίασε το πρώτο πλοίο που χρησιμοποιούσε τη μεθανόλη ως καύσιμο με αποτέλεσμα να αυξηθεί το ενδιαφέρον και η ζήτηση για αυτού του είδους τη καινοτομία. Το 2018 είχαν ήδη κατασκευαστεί και ήταν σε λειτουργία επτά πλοία μεθανόλης παγκοσμίως (Ampah, et al. 2021) .

Η Νορβηγία ήταν η πρώτη χώρα που καινοτόμησε στα εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα και συγκεκριμένα στο υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Ειδικότερα, η νορβηγική εταιρία Fjord Line ήταν υπεύθυνη το 2000 για τη κατασκευή του πρώτου πλοίου το οποίο χρησιμοποιούσε ως καύσιμο το LNG. Το πλοίο αυτό φέρει την ονομασία MF Glutra και ανήκει στο κατηγορία επιβατηγών – οχηματαγωγών. Στη συνέχεια ακολούθησε η κατασκευή περισσότερων πλοίων αυτής της τεχνολογίας και στις υπόλοιπες κατηγορίες όπως πλοία ξηρού φορτίου χύδην (bulk carriers), container ships και δεξαμενόπλοια (tankers). Μετά από 13 χρόνια το ναυτιλιακό καύσιμο LNG διαδόθηκε εκτός του νορβηγικού στόλου (Laribi and Guy 2022) .

Αξίζει να σημειωθεί πως το πρώτο παγκοσμίως επιβατηγό – οχηματαγωγό που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το υδρογόνο είναι νορβηγικής προέλευσης και φέρει την ονομασία MF Hydra (βλ. Εικόνα 2). Κατασκευάστηκε καλοκαίρι του 2021 στο ναυπηγείο του Westcon και σχεδιάστηκε από την εταιρία LMG Marin (Bahtić 2021).



Εικόνα 2 MF Hydra (Chetkovich 2021)

2.1. Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)

Το LNG αποτελείται από 91% - 97% μεθάνιο, 1% - 5% αιθάνιο, περίπου 1% προπάνιο και 1% από αέρια όπως βουτάνιο και άζωτο. Επίσης το LNG έχει 600 φορές μικρότερη τιμή ειδικού όγκου από το φυσικό αέριο (Herdzik 2012). Είναι πλέον ένα διαδομένο ναυτιλιακό καύσιμο καθώς είναι διαθέσιμο στους περισσότερους μεγάλους σταθμούς ανεφοδιασμού. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των πλοίων που χρησιμοποιούν LNG ως κύριο καύσιμο είναι ο διαθέσιμος χώρος που απαιτείται για τη τοποθέτηση των δεξαμενών καυσίμου και των σχετικών συστημάτων. Ειδικότερα, εξαιτίας της χαμηλότερης ενεργειακής πυκνότητας του

LNG σε σύγκριση με εκείνη του μαζούτ, χρειάζονται μεγαλύτερες δεξαμενές για να αποδοθεί η ίδια εμβέλεια. Επιπροσθέτως, για τη διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας του καυσίμου είναι αναγκαία και η τοποθέτηση ειδικών συστημάτων και μόνωσης με αποτέλεσμα την επιπλέον ανάγκη διαθέσιμου χώρου στο πλοίο (DNV 2021). Σύμφωνα με τον DNV υπάρχουν σε λειτουργία 316 πλοία τροφοδοτούμενα με LNG παγκοσμίως και 511 σε επιβεβαιωμένες παραγγελίες (LNG Prime Staff 2022). Χαρακτηριστικό πλεονέκτημα του LNG είναι το μειωμένο κόστος συντήρησης της μηχανής καθώς η καύση είναι αρκετά πιο καθαρή σε σύγκριση με τα καύσιμα HFO και MDO (Salakria and Golabi 2021).

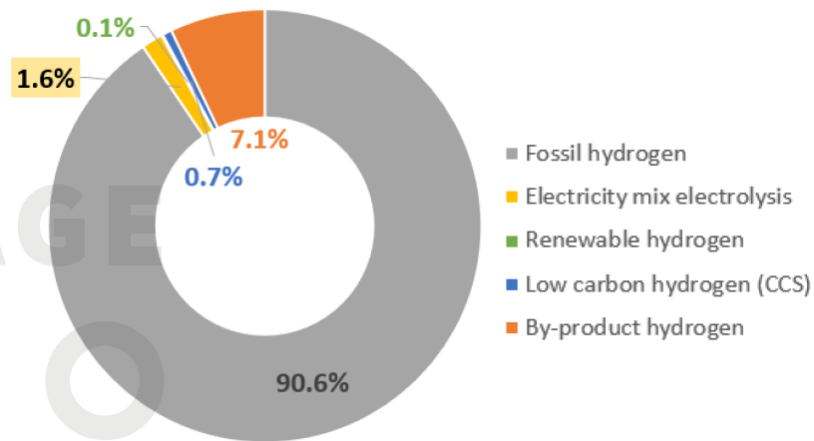
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, η παγκόσμια παραγωγή του LNG στηρίζεται σχεδόν εξολοκλήρου στο ορυκτό φυσικό αέριο το οποίο δεν αντιμετωπίζει προβλήματα ως προς τη διαθεσιμότητα. Στη παρούσα χρονική στιγμή η χρήση εναλλακτικών πρώτων υλών παραγωγής LNG δεν είναι αρκετά διαδεδομένη καθώς υπάρχουν ορισμένα ζητήματα ως προς τη προμήθεια και κατ' επέκταση την ικανοποίηση της ζήτησης. Αυτά τα ζητήματα αναμένεται να επιλυθούν στο μέλλον. Για τη παραγωγή e-LNG υπάρχει άμεση εξάρτηση από τη τοπική διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ποσότητα της παγκόσμιας παραγωγής LNG που προέρχεται από φυσικό αέριο ανέρχεται σε 355.41 mill tons (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021). Στην αξιολόγηση των καυσίμων θα ληφθεί υπόψη μόνο το LNG που αποτελεί προϊόν ορυκτού φυσικού αερίου.



Εικόνα 3 Ποσοστά παραγωγής του LNG ανά πρώτη ύλη (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021)

2.2. Υδρογόνο

Τη σημερινή εποχή υπάρχουν διάφορα εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα τα οποία μπορούν να συμβάλλουν δραστικά στη μείωση των εκπομπών άνθρακα από τα πλοία. Ο αμερικανικός νηογνώμονας ABS μέσω δημοσιεύσεών του, έχει κατηγοριοποιήσει τα εν λόγω καύσιμα μεταξύ των οποίων δεν λείπει και το υδρογόνο (υδροποιημένο LH₂ ή αέριο H₂). Με τη χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο, παράγονται χαμηλές έως και μηδενικές εκπομπές άνθρακα με αποτέλεσμα η συμβολή του να είναι σημαντική ως προς την επίτευξη του στόχου του IMO για το 2050 σχετικά με τη μείωση των εκπομπών άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Επίσης, το υδρογόνο εκτός από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε κυψέλες καυσίμου. Για την απόκτηση του υδρογόνου από φυσικές πηγές, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί διάσπαση στο νερό ή στο μεθάνιο μέσω της ηλεκτρόλυσης. Για την παραγωγή του υδρογόνου γίνεται μετατροπή του φυσικού αερίου σε αέριο υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα (ABS 2021). Το υδρογόνο που παράγεται με πρώτη ύλη το νερό με τη βοήθεια της ηλεκτρόλυσης, ονομάζεται πράσινο υδρογόνο ενώ εκείνο που παράγεται από φυσικό αέριο ονομάζεται μπλε ή γκρι υδρογόνο. Να τονιστεί πως η ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση, μπορεί να αποκτηθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τον εκμηδενισμό των ρύπων. Αξίζει να σημειωθεί πως η βασική διαφορά του μπλε υδρογόνου με το γκρι, είναι πως στη περίπτωση του μπλε γίνεται η χρήση CCS που βοηθάει στον εγκλωβισμό και την αποθήκευση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα (Donnelly 2021). Δεν αποτελεί εξαίρεση πως και στη περίπτωση του υδρογόνου το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής οφείλεται σε ορυκτές πρώτες ύλες (βλ. Εικόνα 4). Όσον αφορά την ηλεκτρόλυση του νερού, δεν υπάρχουν όρια στη παραγωγή, αλλά ορισμένες περιοχές διαθέτουν μεγαλύτερη προοπτική ως προς τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έναντι κάποιων άλλων (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021). Η ποσότητα παγκόσμιας παραγωγής του πράσινου υδρογόνου ανέρχεται σε 2.2 mill tons ενώ του γκρι/μπλε σε 26.4 mill tons (DNV GL AS Maritime 2019). Μερικά από τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου σε τυπικές συνθήκες είναι η αχρωμία, η ανοσμία, η έλλειψη τοξικότητας και το ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας. Με γνώμονα τους ρύπους, η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης για τη παραγωγή του υδρογόνου αποτελεί την ιδανικότερη επιλογή (ABS 2021). Τα καύσιμα που θα ληφθούν υπόψη στην αξιολόγηση είναι το γκρι/μπλε και πράσινο υδρογόνο.

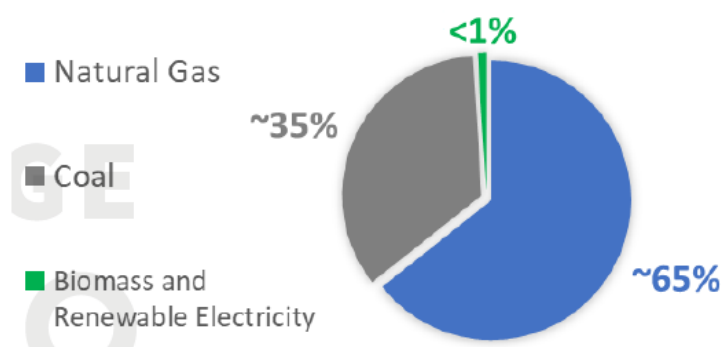


Εικόνα 4 Ποσοστά παραγωγής του υδρογόνου ανά πρώτη ύλη (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021)

2.3. Μεθανόλη

Η παραγωγή σε εμπορικό επίπεδο της μεθυλικής αλκοόλης ή αλλιώς μεθανόλης, πραγματοποιείται μέσω του φυσικού αερίου. Οι εναλλακτικές μέθοδοι παραγωγής είναι εκείνη που βασίζεται στη βιομάζα ως πρώτη ύλη (βιομεθανόλη) ή εκείνη της ηλεκτρόλυσης με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα και πράσινου υδρογόνου ως πρώτη ύλη (e-methanol) (ABS (2) 2021), (Bureau Veritas n.d.). Η μεθανόλη που παράγεται από φυσικό αέριο ονομάζεται γκρι μεθανόλη ενώ η βιομεθανόλη και η e-methanol ονομάζονται πράσινη μεθανόλη (Bureau Veritas n.d.). Οι ορυκτές πρώτες ύλες όπως το φυσικό αέριο και ο άνθρακας, αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής όσον αφορά τη μεθανόλη (βλ. Εικόνα 5). Όπως στο LNG έτσι και εδώ οι περιορισμοί παραγωγής των εναλλακτικών πρώτων υλών αναμένεται να ξεπεραστούν τα επόμενα χρόνια. Ως προς τις ποσότητες της παγκόσμια παραγωγής, η τιμή της γκρι μεθανόλης ανέρχεται σε 63.90 mill tons ενώ της πράσινης σε λιγότερο από 0.98 mill tons. (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021). Σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, η μεθανόλη βρίσκεται σε υγρή μορφή και χαρακτηρίζεται από έντονη οσμή και αχρωμία. Οι απαιτήσεις για τη χρήση μεθανόλης είναι λιγότερες σε σύγκριση με εκείνες του υδρογόνου και του LNG παρά το γεγονός πως η αποθήκευσή της είναι πιο απλή.

Ως προς το περιβαλλοντικό αντίκτυπο, η μεθανόλη είναι ένα εύκολα βιοδιασπώμενο καύσιμο τόσο σε υδάτινο όσο και σε αερόβιο περιβάλλον. Η μεθανόλη μπορεί να αξιοποιηθεί με δύο τρόπους, είτε ως καύσιμο σε κινητήρα εσωτερικής καύσης είτε σε κυψέλες καυσίμου. Το συγκεκριμένο ναυτιλιακό καύσιμο βρίσκεται σε μεγάλο αριθμό λιμανιών ανά το κόσμο, κάνοντας έτσι την πρόσβαση σε αυτό ακόμα πιο εύκολη. Είναι μια τοξική ουσία και ιδιαίτερα επιβλαβής για τον άνθρωπο καθώς μπορεί να προκαλέσει τύφλωση, κώμα και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στο θάνατο σε περίπτωση κατάποσης. Επίσης, σε περίπτωση εισπνοής υψηλών συγκεντρώσεων ατμού, μπορεί να προκληθεί ασφυξία. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, είναι αναγκαίος ο προσεκτικός χειρισμός του εν λόγω καυσίμου ώστε να αποφεύγονται τυχόν διαρροές (ABS (2) 2021). Στην πολυκριτηριακή αξιολόγηση θα ληφθούν υπόψη οι τιμές της γκρι και πράσινης μεθανόλης.



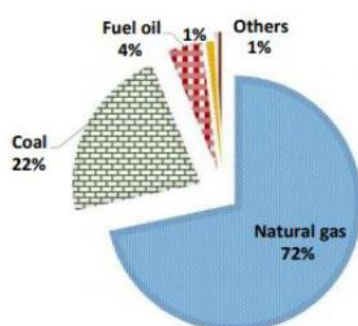
Εικόνα 5 Ποσοστά παραγωγής της μεθανόλης ανά πρώτη ύλη (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021)

2.4. Αμμωνία

Η αμμωνία με χημικό τύπο NH_3 , παράγεται από τη σύνθεση υδρογόνου με αζώτου και ως ναυτιλιακό καύσιμο προσφέρει τη δυνατότητα αξιοποίησής του τόσο σε μηχανές εσωτερικής καύσης όσο και σε κυψέλες καυσίμου. Είναι ιδιαίτερα διαβρωτική οπότε είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η εν λόγω ιδιότητά της κατά το σχεδιασμό των συστημάτων καυσίμων των πλοίων. Η τοξικότητα της αμμωνίας την καθιστά ένα καύσιμο που χρίζει ιδιαίτερης προσοχής καθώς σε υψηλές συγκεντρώσεις και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μπορούν να προκληθούν σοβαρά ζητήματα στην υγεία του ανθρώπου. Επίσης, στην περίπτωση άμεσης

έκθεσης με θαλάσσιους οργανισμούς είναι πολύ πιθανή η πρόκληση μακροπρόθεσμων επιπτώσεων. Όταν η αμμωνία έρχεται σε επαφή με το νερό τότε γίνεται μετατροπή της σε ιόντα αμμωνίου, ενώ όταν απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα αραιώνεται και στη συνέχεια εξατμίζεται λόγω της χαμηλής της πυκνότητας. Βασικά θέματα ασφαλείας της αμμωνίας ως ναυτιλιακό καύσιμο είναι οι επιπτώσεις της στο περιβάλλον και στους ζωντανούς οργανισμούς σε περίπτωση διαρροής της. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη θέσπισης ειδικών κανονισμών. Οι κανονισμοί αυτοί και τα μέτρα ασφαλείας έχουν άμεσο αντίκρυσμα στα συστήματα διαχείρισης ανεφοδιασμού και λειτουργίας, αυξάνοντας ενδεχομένως το κόστος και μειώνοντας τους χώρους του πλοίου.

Η ενεργειακή πυκνότητα της αμμωνίας είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη του υδρογόνου καθώς δεν είναι απαραίτητη η κρυογονική αποθήκευση αλλά είναι χαμηλότερη από του LNG και της μεθανόλης εξαιτίας της ανάγκης της για αποθήκευση σε μονωμένες δεξαμενές υπό πίεση. Η μείωση των χώρων του πλοίου συνδέεται με την ενεργειακή πυκνότητα όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια (Hansson, Brynolf, et al. 2020). Η μπλε αμμωνία παράγεται από ορυκτές πηγές και γίνεται χρήση CCS ενώ η πράσινη παράγεται από πράσινο υδρογόνο μέσω της ηλεκτρόλυσης (DNV (2) 2022). Όπως στη μεθανόλη, έτσι και στην αμμωνία η πιο κοινή επιλογή πρώτης ύλης για τη παραγωγή της είναι εκείνη των ορυκτών πηγών με το μεγαλύτερο ποσοστό να χρεώνεται στο φυσικό αέριο και τον άνθρακα. (βλ. Εικόνα 6). Βασικός στόχος είναι η αύξηση παραγωγής της πράσινης αμμωνίας καθώς η ηλεκτρόλυση του υδρογόνου καταλαμβάνει μόλις το 1% σε σχέση με τις υπόλοιπες πρώτες ύλες. Οι ποσότητες της παγκόσμιας παραγωγής της μπλε και πράσινης αμμωνίας είναι 172.8 mill tons και 2.4 mill tons αντίστοιχα (Machaj, et al. 2022), (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021). Στην αξιολόγηση των καυσίμων θα ληφθούν υπόψη και τα δύο αναφερθέντα είδη της αμμωνίας.



Εικόνα 6 Ποσοστό παραγωγής της αμμωνίας ανά πρώτη ύλη (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021)

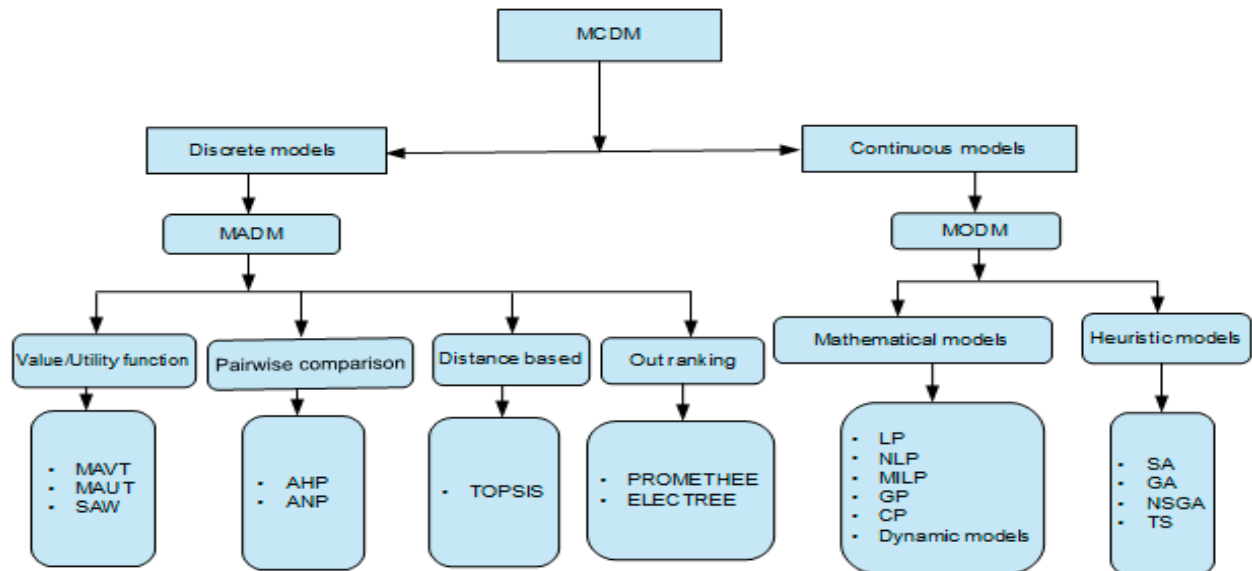
Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία πολυκριτηριακής ανάλυσης

Στη παρούσα ενότητα, θα γίνει αναφορά στις μεθόδους λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια (MCDM) και στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση στα πολυκριτηριακά προβλήματα και στις μεθοδολογίες PROMETHEE.

3.1. Μεθοδολογίες MCDM

Οι μέθοδοι MCDM, είναι οι ιδανικότεροι τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων πολλών παραμέτρων. Επίσης, είναι οι πιο ευρέως γνωστοί μέθοδοι, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αρκετά πεδία όπως προστασία του περιβάλλοντος, παραγωγή ενέργειας, διαχείριση projects κλπ.. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό είναι πως ο τομέας MCDM, αποτελεί αντικείμενο έρευνας εδώ και αρκετές δεκαετίες. Υπάρχει διαθέσιμη μια πληθώρα υπολογιστικών προτύπων που δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει εκείνο που τον εξυπηρετεί καλύτερα, σύμφωνα με τις ανάγκες του προβλήματος που καλείται να επιλύσει. Να σημειωθεί πως στις MCDM μπορεί να γίνει ανάλυση χρησιμοποιώντας τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά κριτήρια. Ως MCDM ορίζονται όλες οι μεθοδολογίες που αποσκοπούν στην αντιμετώπιση πολυπαραμετρικών προβλημάτων. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται οι μέθοδοι MCDM, στην MADM και στην MODM. Οι μεθοδολογίες MADM χρησιμοποιούνται σε προβλήματα με πεπερασμένες δράσεις και συγκεκριμένο αριθμό θέσεων στις κατατάξεις προτίμησης. Ειδικότερα, κατά την ανάλυση οι δράσεις αυτές είναι συγκεκριμένες όπως και οι παράμετροι στις οποίες έχει ορισθεί μια βαρύτητα προτίμησης. Οι δράσεις είναι οι εναλλακτικές λύσεις τις οποίες επιθυμεί ο χρήστης να υποβάλει σε αξιολόγηση. Μερικές από τις μεθοδολογίες MADM που υπάρχουν είναι: η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP), η Αναλυτική Δικτυακή Διαδικασία (ANP), η διαδικασία κατάταξης των δράσεων (outranking) για αξιολόγηση της πιο επωφελούς επιλογής (PROMETHEE) κ.ά. . Σε αντίθεση με τις μεθόδους MADM, οι MODM είναι ιδανικές στην αντιμετώπιση ζητημάτων συνεχούς ανάλυσης, που οι δράσεις είναι άπειρες. Δηλαδή, οι εναλλακτικές λύσεις δεν είναι προκαθορισμένες, αλλά υπάρχουν στη θέση τους ορισμένες αντικειμενικές συναρτήσεις. Σκοπός της διεργασίας αυτής είναι η βελτιστοποίηση των

αντικειμενικών συναρτήσεων σε συσχέτιση με τα κριτήρια που έχουν οριστεί από τον χρήστη (Gebre, Cattrysse and Orshoven 2021) .



Εικόνα 7 Ταξινόμηση των μεθόδων MCDM (Gebre, et al., 2021)

3.2. Πολυκριτηριακά προβλήματα

Σχεδόν η συντριπτική πλειοψηφία των προβλημάτων που καλείται να αντιμετωπίσει ο άνθρωπος, έχουν πολυκριτηριακό χαρακτήρα. Ο χρήστης πάντα επιθυμεί να λαμβάνει τη βέλτιστη λύση στο πρόβλημά του, με την οποία θα αποκομίσει το μέγιστο όφελος. Για να το επιτύχει αυτό, είναι επιτακτική ανάγκη να λάβει υπόψη όλους του απαραίτητους περιορισμούς και να μην αρκεστεί μόνο σε έναν. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι πιο σημαντικοί παράμετροι είναι η τεχνολογία, η οικονομική βιωσιμότητα, η επίπτωση στο περιβάλλον και το κοινωνικό αντίκτυπο.

Για τη καλύτερη κατανόηση των προβλημάτων αυτών, θα ληφθεί υπόψη το παρακάτω μαθηματικό μοντέλο:

$$\max\{g_1(a), g_2(a), \dots, g_r(a), \dots, g_s(a) | a \in A\}, \quad (1)$$

Όπου το A εκφράζει ένα πεπερασμένο αριθμό δράσεων $\{a_1, a_2, \dots, a_m, \dots, a_n\}$ και τα $\{g_1(\cdot), g_2(\cdot), \dots, g_r(\cdot), \dots, g_s(\cdot)\}$ εκφράζουν τις παραμέτρους αξιολόγησης των δράσεων. Υπάρχουν παράμετροι που η ιδανική έκβαση για το χρήστη, είναι η ελαχιστοποίηση των τιμών τους (π.χ. το κόστος) και υπάρχουν παράμετροι που στόχος είναι η μεγιστοποίησή τους (π.χ. ανθεκτικότητα). Στο παραπάνω μαθηματικό πρόβλημα, είναι αδύνατο να βρεθεί κάποια δράση που να έχει τις βέλτιστες τιμές σε όλα τα κριτήρια. Για παράδειγμα, δεν γίνεται να υπάρξει ένα πλοίο που να έχει ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη ταχύτητα, τη μεγαλύτερη μεταφορική ικανότητα, τη μεγαλύτερη πολυτέλεια στους χώρους ενδιαίτησης, τη μικρότερη κατανάλωση καυσίμου και το μικρότερο κόστος κατασκευής. Για το λόγο αυτό γίνεται η ανάλυση των δράσεων. Επίσης, είναι αδύνατο να υπάρξει αντικειμενικά βέλτιστη λύση σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα, καθώς τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από τις προτιμήσεις του χρήστη. Δηλαδή, π.χ. κατά την αγορά ενός πλοίου, δεν θα δοθεί η ίδια βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια από τους χρήστες, επειδή ο καθένας θα ορίσει το ποσοστό βαρύτητας στο κάθε κριτήριο σύμφωνα με τις προσδοκίες του, την κριτική του σκέψη και τη προσωπική του αντίληψη. Επιπροσθέτως, σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα της αξιολόγησης κατέχουν και οι τιμές που έχει η κάθε δράση για το κάθε κριτήριο (Brans και De Smet 2016). Ένας τυπικός πίνακας αξιολόγησης έχει την παρακάτω μορφή:

Πίνακας 1 Γενική μορφή πίνακα αξιολόγησης πολυκριτηριακού προβλήματος (Brans and De Smet 2016)

a	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	...	$g_r(\cdot)$	...	$g_s(\cdot)$
a_1	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	...	$g_r(a_1)$	...	$g_s(a_1)$
a_2	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	...	$g_r(a_2)$	...	$g_s(a_2)$
...
a_m	$g_1(a_m)$	$g_2(a_m)$	...	$g_r(a_m)$	...	$g_s(a_m)$
...
a_n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	...	$g_r(a_n)$	...	$g_s(a_n)$

Οι πιθανές σχέσεις μεταξύ δύο δράσεων $(c, d) \in A$ είναι οι εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} \exists t: g_t(c) > g_t(d) \\ \exists v: g_v(c) < g_v(d) \end{array} \right\} \leftrightarrow cRd \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall m: g_m(c) \geq g_m(d) \\ \exists n: g_n(c) > g_n(d) \end{array} \right\} \leftrightarrow cPd \quad (3)$$

$$\forall z: g_z(c) = g_z(d) \leftrightarrow cId \quad (4)$$

Στις παραπάνω σχέσεις (βλ. Εξισώσεις (2)-(4)) το R δηλώνει την αδυναμία σύγκρισης μεταξύ των δράσεων, το P την προτίμηση και το I την αδιαφορία. Στη περίπτωση που υπάρχουν δύο κριτήρια και η μια δράση έχει καλύτερη τιμή από την άλλη στο ένα κριτήριο και το αντίστροφο, θα ήταν αδύνατο να γίνει σύγκριση μεταξύ αυτών των δράσεων από τη στιγμή που δεν θα ήταν γνωστοί ορισμένοι παράμετροι για τα κριτήρια. Αν μια δράση έχει καλύτερες τιμές από μία άλλη σε όλα τα κριτήρια, τότε είναι προφανές πως θα προτιμηθεί η δράση με τις καλύτερες τιμές. Όταν δύο δράσεις έχουν ίσες τιμές για τα ίδια κριτήρια, τότε είναι αδιάφορο το ποια δράση από τις δύο θα επιλεγεί. Σε ένα πίνακα αξιολόγησης όλες οι δράσεις ή σχεδόν όλες, θα είναι αποδοτικές λύσεις του προβλήματος. Αποδοτική λύση σημαίνει ότι μια δράση δεν θα είναι κατώτερη μιας άλλης σε όλες τις παραμέτρους. Στην πλειοψηφία των σχέσεων μεταξύ δύο δράσεων, συναντάται η αδυναμία σύγκρισης και σε πιο σπάνιες περιπτώσεις η προτίμηση και η αδιαφορία.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για την αντιμετώπιση της αδυναμίας σύγκρισης μεταξύ των δράσεων, είναι απαραίτητη η χρήση ορισμένων αρχικών παραμέτρων. Οι αρχικές παράμετροι αυτοί μπορεί να είναι: η χρήση βαρύτητας προτίμησης, περιορισμός στα όρια των τιμών που διαθέτει η κάθε δράση για το κάθε κριτήριο, συνάρτηση γενίκευσης όλων των κριτηρίων σε ένα, κ.ά.. Κύρια διαφορά των μεθόδων ανάλυσης είναι το ποιες και πόσες από αυτές τις παραμέτρους χρησιμοποιούν. Βασικός σκοπός των μεθόδων ανάλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων είναι η μείωση των αδυναμιών σύγκρισης (R) έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μια πιο αξιόπιστη αξιολόγηση.

Οι μεθοδολογίες PROMETHEE χαρακτηρίζονται για την απλότητα στη χρήση τους, καθώς οι αρχικές παράμετροι που απαιτούν να οριστούν είναι εύκολα κατανοητές. Να τονιστεί πως οι μέθοδοι PROMETHEE βασίζονται στη θεωρία σχέσεων υπεροχής (outranking relations approach). Η δομή μιας πολυκριτηριακής μεθόδου, περιλαμβάνει τις παρακάτω απαιτήσεις (Brans and De Smet 2016):

Απαίτηση 1^η

Είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη οι αποκλίσεις που θα παρουσιάζουν οι δράσεις μεταξύ τους για ένα κριτήριο.

$$d_k(c, d) = g_k(c) - g_k(d) \quad (5)$$

Απαίτηση 2^η

Το αποτέλεσμα μιας ανάλυσης δεν θα είναι αποδεκτό στη περίπτωση που έχει υπάρξει επίδραση του φαινομένου της κλιμάκωσης (scaling effect). Το κάθε κριτήριο χαρακτηρίζεται από τις δικές του μονάδες μέτρησης και σε αυτές τις μονάδες εκφράζονται αντίστοιχα οι τιμές των δράσεων.

Απαίτηση 3^η

Κατά τη σύγκριση δύο δράσεων, η μέθοδος αξιολόγησης που ακολουθείται, οφείλει να διαθέτει τις εξής σχέσεις:

Το c και d είναι μη συγκρίσιμα

Το c προτιμάται από το d

Το c και το d είναι αδιάφορα

Απαίτηση 4^η

Κάθε μεθοδολογία ανάλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων διαφέρει από τις υπόλοιπες καθώς μπορεί να χρησιμοποιεί διαφορετικές παραμέτρους είτε διαφορετικές υπολογιστικές μεθόδους έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να λαμβάνει και διαφορετικές λύσεις. Για αυτό το

λόγο, είναι αναγκαίο να αναπτύσσονται μεθοδολογίες οι οποίες θα είναι εύκολες στη κατανόησή τους από το χρήστη.

Απαίτηση 5^η

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται δεν πρέπει να περιλαμβάνει τεχνικές παραμέτρους οι οποίες δεν έχουν κάποια χρησιμότητα στο χρήστη.

Απαίτηση 6^η

Πρέπει να παρέχονται στο χρήστη πληροφορίες σχετικά με τα αντικρουόμενα κριτήρια.

Απαίτηση 7^η

Στη πλειοψηφία των μεθόδων γίνεται χρήση βαρών προτίμησης στα κριτήρια. Τα ποσοστά βαρύτητας παίζουν σημαντικό ρόλο για την έκβαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Για αυτό το λόγο, η μέθοδος πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη εύκολης και γρήγορης αλλαγής των βαρών ώστε να μπορεί να προχωρήσει σε περαιτέρω αξιολογήσεις.

3.3. Αρχικές παράμετροι των μεθόδων PROMETHEE

Όσον αφορά τις μεθοδολογίες κατάταξης, PROMETHEE, και συγκεκριμένα τις PROMETHEE I και PROMETHEE II, αποτελούν στοιχεία έμπνευσης του J.P. Brans, ο οποίος τις παρουσίασε το 1982 στο πανεπιστήμιο Laval, στο Quebec του Καναδά. Οι μέθοδοι PROMETHEE αποτελούν μερικές από τις πιο σύγχρονες μεθόδους που ανήκουν στην κατηγορία MCDA. Αξίζει να σημειωθεί πως αργότερα αναπτύχθηκαν περισσότερες μέθοδοι για την αντιμετώπιση πιο πολύπλοκων προβλημάτων αξιολόγησης και απόφασης. Μερικές από αυτές είναι: η PROMETHEE III (διάταξη των διαστημάτων), η PROMETHEE IV (γενίκευση των I και II στη περίπτωση που οι αποδεκτές λύσεις δεν είναι πεπερασμένες), η PROMETHEE V (πρόσθετοι περιορισμοί στις δράσεις), η PROMETHEE VI (προβολή του

ανθρώπινου εγκεφάλου), η PROMETHEE GDSS (τμηματική λήψη αποφάσεων) και η GAIA (γραφικές αναπαραστάσεις) (Behzadian, και συν. 2010).

Οι μέθοδοι PROMETHEE έχουν αναπτυχθεί για να παρέχουν λύσεις σε πολυκριτηριακά προβλήματα της μορφής του γενικού μαθηματικού μοντέλου (βλ. Εξίσωση (1)) και του αντίστοιχου πίνακα αξιολόγησης που παρουσιάστηκαν παραπάνω (βλ. Πίνακας 1). Για τη χρήση των μεθόδων PROMETHEE απαιτείται από το χρήστη να εισάγει ορισμένες αρχικές παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτοί είναι δεδομένα που αφορούν τις σχέσεις μεταξύ των κριτηρίων και δεδομένα για τα ίδια τα κριτήρια (Brans και De Smet 2016).

3.3.1. Αρχικές παράμετροι μεταξύ των κριτηρίων – Μέθοδος Simos

Σε κάθε κριτήριο ορίζεται η βαρύτητα σημαντικότητας από το χρήστη η οποία είναι ένας θετικός αριθμός που δεν έχει μονάδα μέτρησης. Όσο υψηλότερος είναι αυτός ο αριθμός, τόσο μεγαλύτερη είναι και η σημαντικότητα του κριτηρίου. Η γενική μορφή ενός πίνακα κριτηρίων – βαρυτήτων σημαντικότητας παρουσιάζεται ως εξής:

Πίνακας 2 Γενική μορφή πίνακα κριτηρίων – βαρυτήτων σημαντικότητας (Brans and De Smet 2016)

$g_1(\blacksquare)$	$g_2(\blacksquare)$	...	$g_r(\blacksquare)$	...	$g_s(\blacksquare)$
w_1	w_2	...	w_r	...	w_s

Συνίσταται τα βάρη να είναι κανονικοποιημένα. Δηλαδή το άθροισμά τους να είναι ίσο με τη μονάδα όταν παρουσιάζονται σε μορφή ποσοστού (Brans and De Smet 2016).

$$\sum_{r=1}^s w_r = 1 \quad (6)$$

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει τις τιμές των βαρών σύμφωνα με ορισμένες μεθόδους όπου το άθροισμά τους να είναι ίσο με τη μονάδα (ή 100%) (Brans και De Smet 2016).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η μέθοδος με την οποία θα προσδιοριστούν τα βάρη των κριτηρίων ονομάζεται Simos. Βασικό χαρακτηριστικό της εν λόγω μεθόδου είναι η αντιστοίχιση του κάθε κριτηρίου με μια «κάρτα» η οποία φέρει ένα μοναδικό γράμμα του αγγλικού αλφάβητου και έναν αριθμό (π.χ. C1). Τα βήματα της μεθοδολογίας έχουν ως εξής:

1. Το πλήθος (n) των καρτών (εξαιρούνται οι «λευκές κάρτες») είναι ίσο με το πλήθος (n) των κριτηρίων καθώς η αντιστοίχισή τους είναι ένα προς ένα.
2. Κατάταξη των καρτών (κριτηρίων) από τη λιγότερο προς την περισσότερο σημαντική κατά την κρίση του χρήστη. Στην περίπτωση που κάποια κριτήρια έχουν τον ίδιο βαθμό σημαντικότητας τότε δημιουργείται μια συστάδα κριτηρίων στο συγκεκριμένο τμήμα της κατάταξης. Συνεπώς, το πλήθος των τμημάτων της κατάταξης δεν είναι απαραίτητο να είναι ίσο με το πλήθος των κριτηρίων.
3. Ορισμός των «λευκών καρτών» μεταξύ δύο διαδοχικών τμημάτων της κατάταξης. Οι «λευκές κάρτες» δηλώνουν το πόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός σημαντικότητας του επόμενου κριτηρίου (ή συστάδας κριτηρίων) σε σύγκριση με το προηγούμενο. Όσο πιο σημαντικό θεωρείται ένα κριτήριο από το προηγούμενο τόσες περισσότερες «λευκές κάρτες» θα υπάρχουν ανάμεσά τους. Ειδικότερα, με την απουσία «λευκής κάρτας» η διαφορά σημαντικότητας είναι μικρή ενώ με την ύπαρξη μίας «λευκής κάρτας» η σημαντικότητα είναι δύο φορές μεγαλύτερη. Με δύο «λευκές κάρτες» η σημαντικότητα είναι τρεις φορές μεγαλύτερη κ.ο.κ.. Να τονιστεί πως ο βαθμός σημαντικότητας συσχετίζεται έμμεσα με τη βαρύτητα των κριτηρίων.
4. Καταγραφή σε μια στήλη του πλήθους των καρτών που υπάρχουν σε ένα τμήμα (συμπεριλαμβανομένου και των λευκών) καθώς και το άθροισμά τους.
5. Σύμφωνα με την κατάταξη που πραγματοποιήθηκε στο βήμα 2, δημιουργείται μια στήλη όπου σε κάθε τμήμα της κατάταξης αναγράφονται οι θέσεις των καρτών (συμπεριλαμβανομένου και των λευκών) ως προς το σύνολό τους. Επίσης υπολογίζεται το άθροισμα όλων των θέσεων των καρτών (πλην των λευκών).

6. Υπολογισμός του μέσου όρου των θέσεων σε κάθε τμήμα της κατάταξης (πλην των λευκών). Τα αποτελέσματα του παρόντος βήματος ονομάζονται μη κανονικοποιημένα βάρη.
7. Υπολογισμός κανονικοποιημένων βαρών. Διαιρούνται τα κανονικοποιημένα βάρη με το άθροισμα των θέσεων που υπολογίστηκαν στο βήμα 5 και στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται με το 100. Τα κανονικοποιημένα βάρη δηλώνουν το βάρος του κάθε κριτηρίου. Τα κριτήρια που ανήκουν στο ίδιο τμήμα της κατάταξης έχουν την ίδια βαρύτητα.
8. Υπολογισμός του συνόλου των βαρών στο κάθε τμήμα της κατάταξης. Γίνεται πολλαπλασιασμός των κανονικοποιημένων βαρών με το πλήθος των καρτών που υπάρχουν στο συγκεκριμένο τμήμα. Η μέθοδος Simos ολοκληρώνεται με τον έλεγχο του αθροίσματος όλων των συνόλων που υπολογίστηκαν, το οποίο πρέπει να είναι ίσο με το 100 (Figueira and Roy 2002).

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται ένα λυμένο παράδειγμα της μεθοδολογίας Simos με σκοπό τη καλύτερη κατανόηση των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω.

Rank	Subset of <i>ex aequo</i>	Number of cards according to the rank
1	{ <i>c, g, l</i> }	3
2	{ <i>d</i> }	1
3	White card	1
4	{ <i>b, f, i, j</i> }	4
5	{ <i>e</i> }	1
6	{ <i>a, h</i> }	2
7	{ <i>k</i> }	1

Εικόνα 8 Αρχικά βήματα μεθοδολογίας Simos (Figueira and Roy 2002)

Subsets of <i>ex aequo</i>	Number of cards	Positions	Non-normalized weights	Normalized weights	Total
{c, g, l}	3	1, 2, 3	$\frac{1+2+3}{3} = 2$	$\frac{2}{86} \times 100 \approx 2.326 \rightarrow 2$	$3 \times 2 = 6$
{d}	1	4	4	$\frac{4}{86} \times 100 \approx 4.651 \rightarrow 5$	$1 \times 5 = 5$
White	1	(5)	...	...	...
{b, f, i, j}	4	6, 7, 8, 9	$\frac{6+7+8+9}{4} = 7.5$	$\frac{7.5}{86} \times 100 \approx 8.721 \rightarrow 9$	$4 \times 9 = 36$
{e}	1	10	10	$\frac{10}{86} \times 100 \approx 11.628 \rightarrow 12$	$1 \times 12 = 12$
{a, h}	2	11, 12	$\frac{11+12}{2} = 11.5$	$\frac{11.5}{86} \times 100 \approx 13.372 \rightarrow 13$	$2 \times 13 = 26$
{k}	1	13	13	$\frac{13}{86} \times 100 \approx 15.116 \rightarrow 15$	$1 \times 15 = 15$
Sum	13	86*	...	...	100

Εικόνα 9 Υπολογισμός των βαρών με τη μεθοδολογία Simos (Figueira and Roy 2002)

3.3.2. Συναρτήσεις κριτηρίων

Η ανάλυση που εξάγουν οι μέθοδοι PROMETHEE βασίζονται στις αξιολογήσεις των δράσεων κατά ζεύγη. Δηλαδή, οι τιμές που έχουν δύο δράσεις για το ίδιο κριτήριο αφαιρούνται και η απόκλισή τους ορίζει την προτίμηση. Για μικρές αποκλίσεις ορίζεται μικρή προτίμηση ή και καθόλου, ενώ όσο αυξάνεται η απόκλιση τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η προτίμηση. Οι τιμές των προτιμήσεων είναι πραγματικοί αριθμοί και κυμαίνονται μεταξύ του μηδενός και της μονάδας. Σύμφωνα με τα παραπάνω, για κάθε κριτήριο υπάρχει μια συνάρτηση προτίμησης η οποία είναι συνάρτηση των αποκλίσεων (Brans και De Smet 2016) .

$$P_r(c, d) = F_r[d_r(c, d)] , \forall c, d, \in A , \quad (7)$$

,όπου:

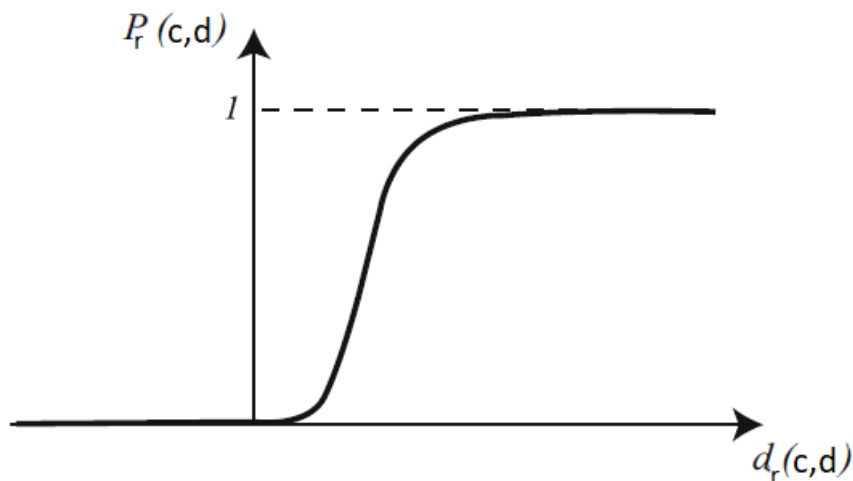
$$d_r(c, d) = g_r(c) - g_r(d) \quad (8)$$

$$0 \leq P_r(c, d) \leq 1 \quad (9)$$

Η παραπάνω συνάρτηση (βλ. Εξίσωση (7)) δηλώνει την προτίμηση της δράσης c έναντι της d για το κριτήριο $g_r(\cdot)$. Επίσης, η συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμοποιείται στην περίπτωση που επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της δράσης για το κριτήριο που εξετάζεται. Όταν η απόκλιση δύο δράσεων είναι αρνητική, τότε η προτίμηση είναι ίση με μηδέν (Brans και De Smet 2016).

$$P_r(c, d) > 0 \Rightarrow P_r(d, c) = 0 \quad (10)$$

Μια συνάρτηση προτίμησης έχει τη παρακάτω τυπική μορφή:



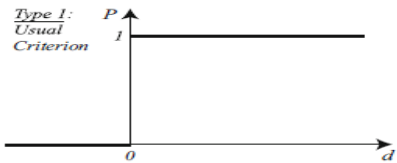
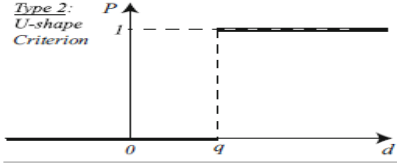
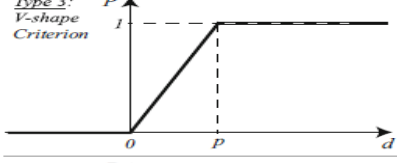
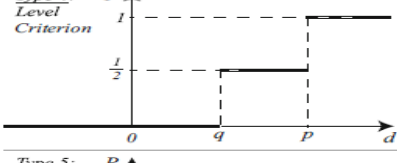
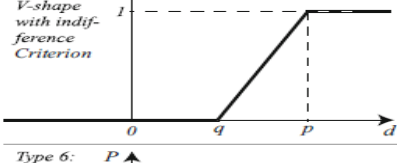
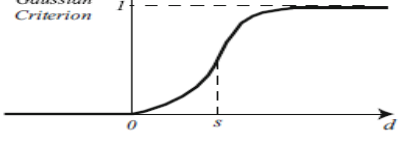
Εικόνα 10 Τυπική μορφή συνάρτησης προτίμησης (Brans και De Smet 2016)

Στην περίπτωση που επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της δράσης για το κριτήριο που εξετάζεται, τότε η συνάρτηση προτίμησης γράφεται ως εξής:

$$P_r(c, d) = F_r[-d_r(c, d)] \quad (11)$$

Σε κάθε κριτήριο της ανάλυσης πρέπει να ορίζεται το γενικευμένο κριτήριο το οποίο είναι το ζεύγος $\{g_r(\cdot), P_r(c, d)\}$. Για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην αξιολόγηση, έχουν αναπτυχθεί έξι τύποι συναρτήσεων προτίμησης, οι οποίοι παρουσιάζονται ως εξής:

Πίνακας 3 Τύποι συναρτήσεων προτίμησης (Brans και De Smet 2016)

Generalized criterion	Definition
<p>Type 1: Usual Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$
<p>Type 2: U-shape Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$
<p>Type 3: V-shape Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$
<p>Type 4: Level Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$
<p>Type 5: V-shape with indif- ference Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$
<p>Type 6: Gaussian Criterion</p> 	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$

Ο κάθε τύπος έχει ως απαίτηση τον ορισμό μέχρι δύο παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί είναι το q (όριο αδιαφορίας), το p (όριο προτίμησης ($P(c,d)=1$)) και το s (ενδιάμεση τιμή των q και p). Η παράμετρος q εκφράζει τη μεγαλύτερη απόκλιση η οποία θεωρείται αμελητέα από το χρήστη ενώ η παράμετρος p εκφράζει τη μικρότερη απόκλιση η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κατάσταση προτίμησης. Για τη χρήση της συνάρτησης Gaussian συνιστάται πρώτα να προσδιοριστούν οι παράμετροι q , p και στη συνέχεια να επιλεγεί η τιμή s , η οποία επηρεάζει το σημείο καμπής της συνάρτησης. Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή s στη παράμετρο q , τόσο θα αυξάνεται το εύρος των ισχυρών προτιμήσεων για μικρότερες αποκλίσεις. Ενώ όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή s στη παράμετρο p , τόσο θα μειώνεται το εύρος των ισχυρών προτιμήσεων (Brans and De Smet 2016).

Η συνάρτηση προτίμησης που θα επιλεγεί σε ένα κριτήριο, εξαρτάται από το αν το συγκεκριμένο κριτήριο είναι ποσοτικό ή ποιοτικό (π.χ. κλίμακα 5 βαθμών). Στα ποιοτικά κριτήρια θα χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση προτίμησης Usual, ενώ στα ποσοτικά θα χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση V-Shape. Όσον αφορά τη V-Shape, ο χρήστης οφείλει να προσδιορίσει το κατώφλι προτίμησης «P» (βλ. Πίνακας 3). Για τον υπολογισμό του «P» μπορεί να γίνει εφαρμογή της εμπειρικής συνάρτησης: $p_i = (V_{i_{\max}} - V_{i_{\min}}) / n$, όπου: $V_{i_{\max}}$ και $V_{i_{\min}}$ είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή αντίστοιχα που διαθέτει το κριτήριο και n είναι το πλήθος των δράσεων (Strantzali, Aravossis and Livanos 2017).

3.4. Βασικές έννοιες των μεθόδων PROMETHEE

Στην παρούσα υποενότητα, θα γίνει αναφορά σε ορισμένες βασικές έννοιες των μεθόδων PROMETHEE όπως τους συνολικούς δείκτες προτίμησης και τις ροές κατάταξης.

3.4.1. Συνολικοί δείκτες προτίμησης

Οι συνολικοί δείκτες προτίμησης για δύο δράσεις $(c, d) \in A$, διαθέτουν τους εξής γενικούς τύπους:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi(c, d) = \sum_{r=1}^s P_r(c, d)w_r \\ \pi(d, c) = \sum_{r=1}^s P_r(d, c)w_r \end{array} \right. \quad (12)$$

, όπου ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi(c, c) = 0 \\ 0 \leq \pi(c, d) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(d, c) \leq 1 \\ 0 \leq \pi(c, d) + \pi(d, c) \leq 1 \end{array} \right\} \quad (13)$$

Το πόσο ισχυρότερη είναι η προτίμηση της δράσης c έναντι της d για όλα τα κριτήρια της ανάλυσης, ορίζεται από τη σχέση $\pi(c,d)$. Αντίστοιχα, ο βαθμός προτίμησης της d έναντι της c ορίζεται από τη σχέση $\pi(d,c)$. Οι σχέσεις αυτές παίρνουν τιμές από μηδέν μέχρι ένα όπως και τα αθροίσματά τους (βλ. Εξίσωση (13)). Στη περίπτωση που η σχέση $\pi(c,d)$ είναι ίση με τιμές κοντά στο μηδέν, τότε δεν υπάρχει ισχυρή προτίμηση της δράσης c απέναντι στη d . Αντίστοιχα, στη περίπτωση που η σχέση $\pi(c,d)$ είναι ίση με τιμές κοντά στη μονάδα, τότε υπάρχει ισχυρή προτίμηση της δράσης c απέναντι στη d . Να σημειωθεί πως οι σχέσεις $\pi(c,d)$, $\pi(d,c)$, $P_r(c,d)$ και $P_r(d,c)$ είναι πραγματικοί αριθμοί, χωρίς μονάδες και ανεξάρτητοι από τις κλίμακες των κριτηρίων $g_k(\bullet)$ (Brans και De Smet 2016).

3.4.2. Ροές κατάταξης

Κατά την ανάλυση, κάθε δράση c κατατάσσεται ανάμεσα σε άλλες $(n-1)$ δράσεις που ανήκουν στο A . Το πόσο ψηλά ή χαμηλά βρίσκεται η δράση στην κατάταξη ορίζεται από τις ροές κατάταξης. Οι ροές είναι δύο και είναι οι εξερχόμενες ($\varphi^+(c)$) και οι εισερχόμενες ($\varphi^-(c)$). Οι εξερχόμενες ροές εκφράζουν την υπεροχή της δράσης απέναντι στις υπόλοιπες. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ($\varphi^+(c)$), τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η υπεροχή. Οι εισερχόμενες ροές εκφράζουν την κατωτερότητα της δράσης έναντι των υπολοίπων. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ($\varphi^-(c)$), τόσο πιο χαμηλά θα βρίσκεται η δράση στη κατάταξη. Συμπερασματικά, η ιδανική κατάσταση για μια δράση είναι να διαθέτει υψηλές τιμές εξερχόμενων ροών και χαμηλές εισερχομένων. Παρακάτω αναγράφονται οι τύποι των ροών (Brans και De Smet 2016).

$$\begin{aligned} \varphi^+(c) &= \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(c, x) \\ \varphi^-(c) &= \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, c) \end{aligned} \quad (14)$$

3.5. Μέθοδος πλήρους κατάταξης PROMETHEE II

Η μέθοδος με την οποία θα αξιολογηθούν τα ναυτιλιακά καύσιμα στη παρούσα διπλωματική εργασία είναι η PROMETHEE II. Στη πλήρη κατάταξη οι σχέσεις των δράσεων μπορεί να είναι είτε σχέση προτίμησης (P^{II}) είτε σχέση αδιαφορίας (I^{II}). Ως μέτρο κατάταξης χρησιμοποιείται η καθαρή ροή πλήρους κατάταξης ($\varphi(c)$ ή Φ) η οποία είναι ίση με τη διαφορά της εξερχόμενης ροής με την εισερχόμενη. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της καθαρής ροής που έχει μια δράση έναντι των υπολοίπων, τόσο υψηλότερα θα βρίσκεται στη κατάταξη. Η δράση που βρίσκεται στην υψηλότερη θέση της κατάταξης θεωρείται πως είναι και η καλύτερη επιλογή (Brans και De Smet 2016).

$$\varphi(c) = \varphi^+(c) - \varphi^-(c) \quad (15)$$

,όπου:

$$\left\{ \begin{array}{l} -1 \leq \varphi(c) \leq 1 \\ \sum_{x \in A} \varphi(c) = 0 \end{array} \right\} \quad (16)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η καθαρή ροή λαμβάνει τιμές μεταξύ του -1 και 1. Επίσης, το άθροισμα των καθαρών ροών όλων των δράσεων είναι ίσο με μηδέν. Όταν μια δράση λαμβάνει καθαρή ροή μεγαλύτερη του μηδενός, τότε αναμένεται να βρίσκεται στις υψηλότερες θέσεις της κατάταξης, ενώ αντίστοιχα για καθαρή ροή με αρνητικό πρόσημο, αναμένεται να βρίσκεται στις χαμηλότερες. Για να υπάρξει προτίμηση μιας δράσης c ως προς τη d πρέπει η καθαρή ροή της c να είναι μεγαλύτερη της d και για να υπάρξει αδιαφορία πρέπει οι καθαρές ροές να είναι ίσες (Brans και De Smet 2016).

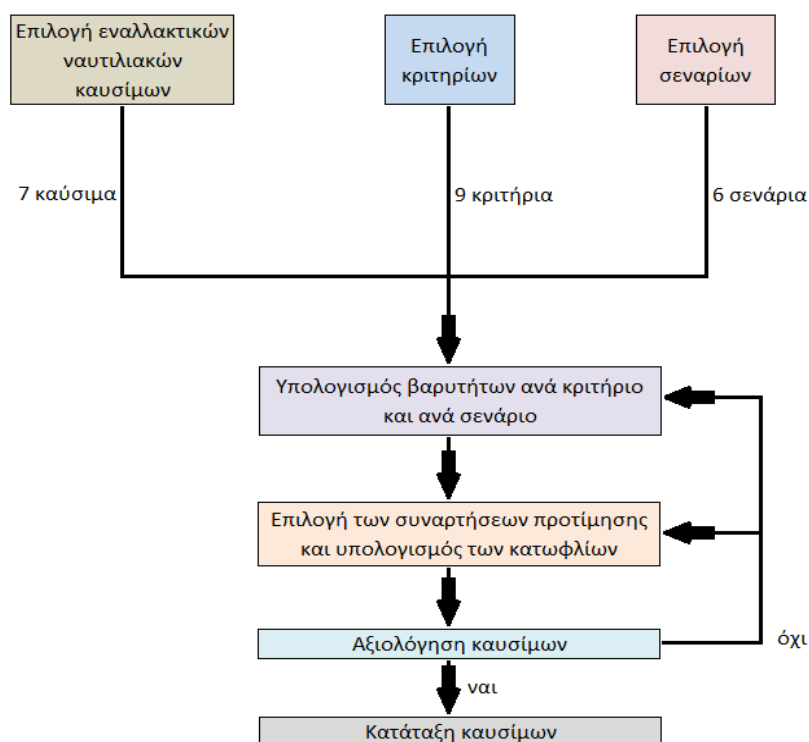
$$\left\{ \begin{array}{l} cP^{II}d \text{ if } \varphi(c) > \varphi(d) \\ cI^{II}d \text{ if } \varphi(c) = \varphi(d) \end{array} \right\} \quad (17)$$

Ένα από τα βασικά θετικά χαρακτηριστικά της εν λόγω μεθόδου, είναι η απλότητα στη χρήση της και η ευκολία στη κατανόησή της (Brans και De Smet 2016).

Κεφάλαιο 4. Αξιολόγηση ναυτιλιακών καυσίμων

4.1. Διαδικασία κατάταξης ναυτιλιακών καυσίμων

Στη παρούσα ενότητα, θα παρουσιαστεί συνοπτικά η διαδικασία της αξιολόγησης (βλ. Εικόνα 11). Αρχικά, επιλέχθηκαν τα δεδομένα της αξιολόγησης, τα οποία αποτελούνταν από 7 εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα, 9 κριτήρια και 6 σενάρια. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο συγκεκριμένο στάδιο της αξιολόγησης καθώς για να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα ήταν αναγκαίο όλα τα δεδομένα των καυσίμων να αναφέρονται στις ίδιες συνθήκες. Έπειτα, υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Simos οι βαρύτητες των κριτηρίων για το κάθε σενάριο. Στη συνέχεια έγινε η επιλογή της συνάρτησης προτίμησης και ο υπολογισμός του κατωφλίου προτίμησης για το κάθε κριτήριο. Η εξίσωση υπολογισμού του κατωφλίου προτίμησης, η επιλογή των Usual συναρτήσεων προτίμησης για τα ποιοτικά κριτήρια και V-Shape για τα ποσοτικά, βασίστηκε σε ερευνητικές πηγές. Στο τέταρτο στάδιο πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση μέσω της PROMETHEE II κατά την οποία παρήχθησαν συνολικές ροές Φ. Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του τέταρτου σταδίου υλοποιήθηκε η κατάταξη των καυσίμων.



Εικόνα 11 Διαδικασία κατάταξης ναυτιλιακών καυσίμων

4.2. Κριτήρια αξιολόγησης

Η παρούσα ενότητα αναφέρεται στα κριτήρια της αξιολόγησης και στις τιμές που διαθέτει το κάθε ναυτιλιακό καύσιμο σε αυτά. Για τη περάτωση της εν λόγω διαδικασίας, έγινε αναζήτηση στη βιβλιογραφία για ερευνητικές δημοσιεύσεις στο τομέα της αξιολόγησης ναυτιλιακών καυσίμων. Βρέθηκαν οκτώ δημοσιεύσεις όπου τα κριτήρια αξιολόγησης που συλλέχθηκαν είναι τα εξής: κόστος επένδυσης, κόστος συντήρησης και λειτουργίας, εκτιμώμενο κόστος καυσίμου το 2030, μείωση φορτίου, ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών, ρίσκο προληπτικών μέτρων, αξιοπιστία παροχής καυσίμου, κανονισμοί και καυσαέρια. Εντοπίστηκαν επιπλέον κριτήρια, για την αξιολόγηση όμως των καυσίμων επιλέχθηκαν εκείνα που ήταν κοινά στη πλειοψηφία των δημοσιεύσεων και ήταν εφικτή η ποσοτικοποίησή τους στη παρούσα εργασία. Στο παρακάτω πίνακα (βλ. Πίνακας 4) απεικονίζεται το σύνολο των κριτηρίων που εντοπίστηκαν στην βιβλιογραφία ενώ στο Πίνακας 5 απεικονίζονται τα κριτήρια που ελήφθησαν υπόψη στην αξιολόγηση των καυσίμων.

Πίνακας 4 Σύνολο κριτηρίων που εντοπίστηκε στη βιβλιογραφία

Κατηγορίες κριτηρίων	Κριτήρια
Περιβαλλοντικά	Καυσαέρια
Περιβαλλοντικά	Συνέπειες διαρροής καυσίμου
Τεχνικά	Μείωση φορτίου
Τεχνικά	Αξιοπιστία παροχής καυσίμου
Τεχνικά	Αφομοίωση σε ήδη υπάρχοντα πλοία
Τεχνικά	Διαθέσιμες υποδομές
Τεχνικά	Απόδοση
Τεχνικά	Παγκόσμια διαθεσιμότητα
Οικονομικά	Κόστος καυσίμου το 2030
Οικονομικά	Κόστος συντήρησης & λειτουργίας
Οικονομικά	Κόστος επένδυσης
Οικονομικά	Δημιουργία θέσεων εργασίας
Κοινωνικά	Κανονισμοί
Κοινωνικά	Ασφάλεια- Ρίσκο προληπτικών μέτρων
Κοινωνικά	Ασφάλεια- Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών
Κοινωνικά	Κοινή γνώμη

Πίνακας 5 Κριτήρια αξιολόγησης

Κατηγορίες κριτηρίων	Κριτήρια
Περιβαλλοντικά	Καυσαέρια
Τεχνικά	Μείωση φορτίου
Τεχνικά	Αξιοπιστία παροχής καυσίμου
Οικονομικά	Κόστος καυσίμου το 2030
Οικονομικά	Κόστος συντήρησης & λειτουργίας
Οικονομικά	Κόστος επένδυσης
Κοινωνικά	Κανονισμοί
Κοινωνικά	Ασφάλεια- Ρίσκο προληπτικών μέτρων
Κοινωνικά	Ασφάλεια- Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών

4.2.1. Κόστος επένδυσης

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες ή αλλιώς Capex (Capital expenditures) εκφράζουν το κόστος μιας επένδυσης στην οποία επρόκειτο να προχωρήσει μια επιχείρηση ή ένας οργανισμός με βασικό γνώμονα την αύξηση των εσόδων. Οι επενδύσεις αυτές στην πλειονότητα των περιπτώσεων σχετίζονται με την αγορά εξοπλισμού, μηχανημάτων ή ακόμα και με την αναβάθμιση ήδη υπαρχόντων συσκευών (Cheliotis, et al. 2021). Στο παρόν κριτήριο λαμβάνονται υπόψη τα κόστη των εγκαταστάσεων που σχετίζονται με την πρόωση του πλοίου ανά την εκλυόμενη ισχύ του κινητήρα. Συγκεκριμένα περιλαμβάνονται τα κόστη των κινητήρων, δεξαμενών καυσίμου, αγωγών, συστημάτων συναγερμού αερίων, επεξεργαστών καυσίμου κλπ. (Hansson, Månsson, et al. 2019).

Πίνακας 6 Κόστη επένδυσης καυσίμων (Hansson, Månsson, και συν. 2019)

Καύσιμα	Τιμές (\$/kW)
Πράσινη Μεθανόλη	5940
Γκρι Μεθανόλη	5940
LNG	6405
Πράσινο Υδρογόνο	9270
Γκρι/ Μπλε Υδρογόνο	9270
Πράσινη Αμμωνία	6455
Μπλε Αμμωνία	6455

4.2.2. Κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Οι λειτουργικές δαπάνες (Opex) εμπεριέχουν όλα τα κόστη που σχετίζονται με τη συντήρηση και λειτουργία των ναυτιλιακών καυσίμων. Επίσης στις Opex συμπεριλαμβάνονται και τα κόστη των καυσίμων. Για τη λήψη ορθότερων αποτελεσμάτων στην αξιολόγηση, θα ληφθούν υπόψη ξεχωριστά τα κόστη της συντήρησης και λειτουργίας (Operation & Maintenance) και ξεχωριστά τα κόστη των καυσίμων. Ειδικότερα, στο παρόν κριτήριο περιλαμβάνονται τα κόστη του πληρώματος και της εκπαίδευσής του, η ασφάλιση και η συντήρηση. Επίσης, η μονάδα μέτρησης με την οποία έχουν υπολογιστεί τα κόστη είναι \$/MWh, με έτος αναφοράς το 2015 (Hansson, Månsson, et al. 2019).

Πίνακας 7 Κόστη συντήρησης και λειτουργίας καυσίμων (Hansson, Brynolf, και συν. 2020), (Hansson, Månsson, και συν. 2019)

Καύσιμα	Τιμές (\$/MWh)
Πράσινη Μεθανόλη	6
Γκρι Μεθανόλη	6
LNG	9
Πράσινο Υδρογόνο	11
Γκρι/ Μπλε Υδρογόνο	11
Πράσινη Αμμωνία	10
Μπλε Αμμωνία	10

4.2.3. Κόστος καυσίμου το 2030

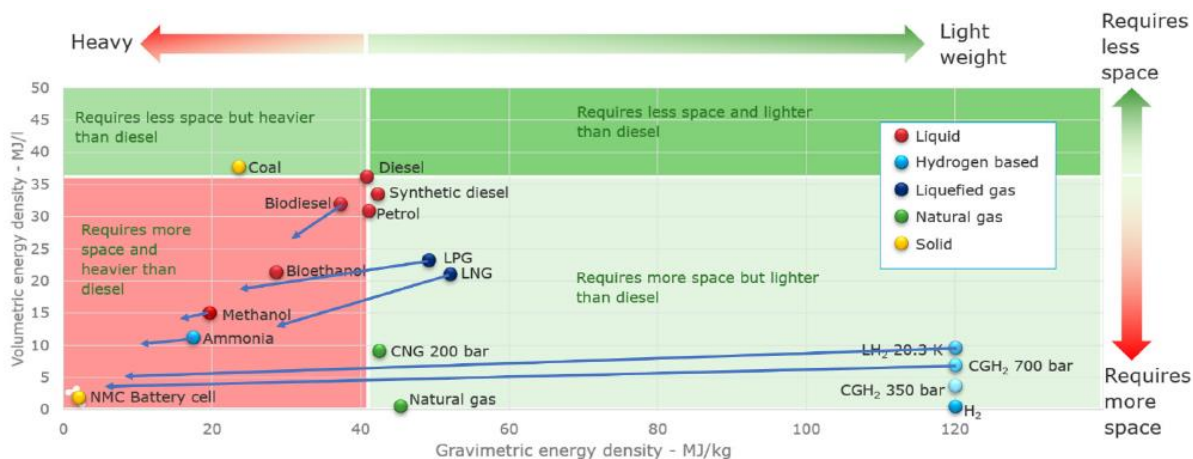
Σύμφωνα με τις δημοσιεύσεις (Hansson, Brynolf, και συν. 2020) και (Hansson, Månsson, και συν. 2019) φαίνονται στον παρακάτω πίνακα οι εκτιμώμενες τιμές των καυσίμων για το έτος 2030. Οι τιμές αυτές περιλαμβάνουν τα προβλεπόμενα κόστη παραγωγής, πρώτων υλών και απόδοσης της παραγωγής. Είναι σημαντικό τα κόστη των καυσίμων να αναφέρονται στο ίδιο έτος καθώς οι συγκεκριμένες τιμές μπορούν να παρουσιάσουν μεγάλη μεταβλητότητα σε διάστημα ενός έτους. Όπως στο προηγούμενο κριτήριο έτσι και στο παρόν, το νόμισμα με το οποίο έχουν υπολογιστεί τα κόστη είναι δολάρια εν έτη 2015 (Hansson, Månsson, και συν. 2019).

Πίνακας 8 Κόστη καυσίμων το 2030 (Hansson, Brynolf, και συν. 2020), (Hansson, Månsson, και συν. 2019)

Καύσιμα	Τιμές (\$/GJ)
Πράσινη Μεθανόλη	24
Γκρι Μεθανόλη	12
LNG	7
Πράσινο Υδρογόνο	36
Γκρι/ Μπλε Υδρογόνο	16
Πράσινη Αμμωνία	35
Μπλε Αμμωνία	27

4.2.4. Μείωση φορτίου

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι τιμές ενέργειας ανά μονάδα όγκου των καυσίμων. Όσο χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα διαθέτει ένα καύσιμο, τόσο μεγαλύτερες δεξαμενές καυσίμου χρειάζονται και κατ' επέκταση τόση μεγαλύτερη θα είναι και η απώλεια μεταφορικής ικανότητας του πλοίου (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021) Επίσης, η ενεργειακή πυκνότητα παίζει σημαντικό ρόλο στο κατά πόσο εφαρμόσιμο είναι ένα καύσιμο ως προς ορισμένους τύπους πλοίων και στις αντίστοιχες λειτουργίες τους. Στην Εικόνα 12 απεικονίζονται ορισμένα εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα ως προς την ογκομετρική και βαρυμετρική ενεργειακή τους πυκνότητα. Να σημειωθεί πως οι τιμές του παρόντος κριτηρίου αναφέρονται μόνο στις ιδιότητες των καυσίμων καθώς σε περίπτωση που ληφθούν υπόψη οι δεξαμενές αποθήκευσης και τα απαραίτητα συστήματα συντήρησης, η εικόνα του παρακάτω σχήματος ενδέχεται να αλλάξει αρκετά για ορισμένα καύσιμα (πχ. Υδρογόνο) (DNV GL AS Maritime 2019). Το παρόν κριτήριο συμπεριλαμβάνεται στη κατηγορία των τεχνικών κριτηρίων καθώς βασίζεται σε τεχνικό χαρακτηριστικό του καυσίμου το οποίο συγχρόνως παρουσιάζει άμεση επιρροή σε ορισμένα συστήματα και μηχανισμούς του πλοίου.



Εικόνα 12 Ενεργειακές πυκνότητες καυσίμων (DNV GL AS Maritime 2019)

Πίνακας 9 Ενεργειακές πυκνότητες καυσίμων (Carvalho, και συν. 2021), (DNV GL AS Maritime 2019)

Καύσιμα	Τιμές (MJ/L)
Μεθανόλη	16
LNG	21
Υδρογόνο	8.5
Αμμωνία	12

4.2.5. Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών

Η ασφάλεια χρήσης των ναυτιλιακών καυσίμων θα χωριστεί σε δύο υποκριτήρια. Στην αξιολόγηση ρίσκου σε περίπτωση βλάβης/καταστροφής και στο ρίσκο που υπάρχει κατά την έλλειψη προληπτικών μέτρων. Και στα δύο αυτά κριτήρια θα γίνει ποιοτική αξιολόγηση σε κλίμακα 5 βαθμών. Να τονιστεί πως το πραγματικό επίπεδο ρίσκου εξαρτάται από το τύπο του πλοίου και πως οι αξιολογήσεις που έχουν ληφθεί υπόψη είναι ενδεικτικές. Οι βαθμοί της ποιοτικής αξιολόγησης και οι σημασίες τους απεικονίζονται στο παρακάτω πίνακα (βλ. Πίνακας 11). Σύμφωνα με την αξιολόγηση ρίσκου που πραγματοποίησε η κοινοπραξία “Together in safety” (Πηγή), εξετάζονται 19 σενάρια πιθανών βλαβών ή κινδύνων που αφορούν τη χρήση εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων σε ένα tanker. Επίσης, αναφέρονται οι 32 αιτίες πρόκλησης των σεναρίων και 39 συνέπειες (βλ. Πίνακας 10). Σε αυτές τις 39 συνέπειες θα σημειωθεί για το κάθε ναυτιλιακό καύσιμο σε πόσες και ποιες ζώνες ανήκει (βλ.

Πίνακας 12) ώστε στη συνέχεια σύμφωνα με το συμπέρασμα που θα προκύψει, να γίνει η αξιολόγηση καυσίμων σε κλίμακα 5 βαθμών. Οι ζώνες στην αξιολόγηση ρίσκου είναι τέσσερις και είναι οι εξής: η πράσινη (ανεκτό ρίσκο), η πορτοκαλί (πιθανώς ανεκτό ρίσκο), η κόκκινη (μη ανεκτό ρίσκο) και η λευκή (απουσία ρίσκου). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Together in Safety 2022), η αξιολόγηση ρίσκου που πραγματοποιήθηκε, βασίστηκε σε δύο πρότυπα. Στο BS ISO 31000: 2009, Risk Management –Principles and Guidelines και στο BS ISO 31010: 2010, Risk Management –Risk Assessment Techniques. Επίσης η υλοποίηση της αξιολόγησης, έγινε από μια ομάδα ειδικών στο τομέα του ρίσκου (Together in Safety 2022).

Πίνακας 10 Θέματα αξιολόγησης ρίσκου (Together in Safety 2022)

Κατηγορίες περιπτώσεων εμφάνισης βλαβών/καταστροφών	Συμβάντα	Αιτίες	Συνέπειες
1. Πλοήγηση	Απώλεια ικανότητας ελιγμών στη θάλασσα	1. Αστοχία πρόωσης	1. Προσάραξη
			2. Σύγκρουση
			3. Αύξηση πίεσης της δεξαμενής
			4. Ακραίες κινήσεις
	Ακραίες κινήσεις στη θάλασσα	1. Απώλεια σταθεροποιητών πτερυγίων	1. Ακραίες κινήσεις
	Διακοπή ηλεκτρικού ρεύματος	1. Βλάβη κινητήρα / γεννήτριας	1. Επίδραση σε συστήματα διατήρησης πίεσης δεξαμενών
	Ακραίες περιστροφικές κινήσεις (roll και pitch) σε θάλασσα ή λιμάνι	1. Λανθασμένη φόρτωση / ερματισμός	1. Δυνατότητα σχηματισμού θύλακα αερίου
2. Προσάραξη		1. Μεγάλες κλίσεις που μπορούν να οδηγήσουν στην εκχύλιση καυσίμου από το σύστημα εξαερισμού	
3. Σύγκρουση που οδήγησε σε άνοιγμα στη γάστρα του πλοίου		1. Μεγάλες κλίσεις που μπορούν να οδηγήσουν στην εκχύλιση καυσίμου από το σύστημα εξαερισμού	

	Ανάγκη για ρυμούλκηση / παρουσία πλοίων υποστήριξης	1. Ανεφοδιασμός, τροφοδότηση / αποθήκευση καυσίμου	1. Δυνατότητα ανάφλεξης 2. Ζημιά στις σωληνώσεις 3. Ελευθέρωση τοξικών αναθυμιάσεων
	Προσάραξη πλοίου και καταστροφή στη δεξαμενή καυσίμου	1. Ανθρώπινο λάθος / βλάβη στο πηδάλιο / βλάβη στο σύστημα πρόωσης	1. Καταστροφή δεξαμενής καυσίμου
	Εγκατάλειψη σκάφους	1. Απώλεια ελέγχου πίεσης της δεξαμενής LNG / Ρήγμα της δεξαμενής LNG / αδυναμία ελέγχου της πρόωσης	1. Ελευθέρωση τοξικών αναθυμιάσεων / αύξηση πίεσης της δεξαμενής / ελευθέρωση καυσίμου στο περιβάλλον
2. Εξωτερικές επιρροές	Σύγκρουση πλοίων με επίδραση στις δεξαμενές καυσίμων	1. Άνοιγμα στη γάστρα του πλοίου	1. Απώλεια φορτίου 2. Αύξηση πίεσης της δεξαμενής 3. Πιθανές πηγές πρόκλησης πυρκαγιάς
	Πρόκληση πυρκαγιάς	1. Πετρελαιοκηλίδα / κατεστραμμένες σωληνώσεις / κεραυνός / κλπ.	1. Αύξηση πίεσης της δεξαμενής
3. Λειτουργικές διαδικασίες του πλοίου εκτός του ανεφοδιασμού καυσίμων	Εργασίες που αφορούν το φορτίο εξαιτίας των δεξαμενών καυσίμου και των σχετικών εξαρτημάτων	1. Λειτουργικές ανάγκες	1. Ζημιά στον εξοπλισμό
		2. Χρήση γερανού	1. Απρόσεκτη χρήση με πιθανή συνέπεια τη πρόκληση πυρκαγιάς

	Αλλαγή πληρώματος	1. Λειτουργικές ανάγκες	1. Προσωπικό με ελλιπής ενημέρωση και εμπειρία αναλαμβάνει τον έλεγχο
	Εξ' ολοκλήρου νέο πλήρωμα	1. Ελλιπής εξοικείωση του πληρώματος με το συγκεκριμένο πλοίο	1. Προσωπικό με ελλιπής ενημέρωση και εμπειρία αναλαμβάνει τον έλεγχο
	Πρόσβαση στο πλοίο ατόμων που δεν ελέγχονται από τον χειριστή του πλοίου	1. Μεταφορά ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε απαγορευμένες ζώνες	1. Πιθανή πηγή πρόκλησης πυρκαγιάς
		2. Είσοδος ατόμων σε τοξικό περιβάλλον	1. Έκθεση σε τοξικό περιβάλλον
4. Ανεφοδιασμός καυσίμων	Μη ακριβής ευθυγράμμιση με τον σταθμό ανεφοδιασμού	1. Έλεγχος πρόσδεσης	1. Τάση στις σωληνώσεις και στους συνδέσμους
		2. Τάση της γραμμής πρόσδεσης	1. Τάση στις σωληνώσεις και στους συνδέσμους
	Ακραίες κινήσεις πλοίου	1. Επερχόμενο πλοίο / καιρός	1. Τάση στις σωληνώσεις και στους συνδέσμους
		2. Λανθασμένη κατανομή γεμίσματος δεξαμενών	1. Μεγάλες κλίσεις που αποτρέπουν τον ανεφοδιασμό
	Απώλεια ελέγχου	1. Παροχή	1. Διαρροή / υπερπλήρωση
		2. Εσφαλμένη μέτρηση στάθμης	1. Διαρροή / υπερπλήρωση
		3. Διαχείριση BOG	1. Εξαερισμός
		4. Ανατροπή	1. Εξαερισμός
	Απώλεια / διαρροή καυσίμου	1. Υπερπλήρωση	1. Απώλεια καυσίμου
		2. Διαρροή στους συνδέσμους	1. Απώλεια καυσίμου

		3. Ακατάλληλη εφαρμογή συνδέσμων	1. Καταστροφή εξοπλισμού
		4. Εσφαλμένη πρόψυξη των γραμμών ανεφοδιασμού	1. Καταστροφή εξοπλισμού
5. Προετοιμασία καυσίμου , χρήση και έλεγχος	Απώλεια ελέγχου	1. Απώλεια ηλεκτρικού ρεύματος	1. Αυτόματος τερματισμός λειτουργίας
		2. Βλάβη αισθητήρων και συστημάτων	1. Αυτόματος τερματισμός λειτουργίας
6. Τέλος ζωής πλοίου	Scrapping	1. Ηλικία πλοίου	1. Πιθανά υπολείμματα αερίου στη δεξαμενή

Πίνακας 11 Βαθμοί ποιοτικής αξιολόγησης

1	Εξαιρετικά χαμηλή επίδοση
2	Χαμηλή επίδοση
3	Μέτρια επίδοση
4	Ικανοποιητική επίδοση
5	Εξαιρετικά υψηλή επίδοση.

Πίνακας 12 Ποσότητες εμφάνισης καυσίμων στις ζώνες ρίσκου σε περίπτωση βλάβης / καταστροφής (Together in Safety 2022)

	Ζώνες ρίσκου	Πράσινη	Πορτοκαλί	Κόκκινη	Λευκή
Καύσιμα					
Μεθανόλη		22	11	0	6
LNG		25	11	0	3
Υδρογόνο		24	13	0	2
Αμμωνία		10	21	6	2

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, η μεθανόλη διαθέτει το λιγότερο ρίσκο. Στη συνέχεια ακολουθούν το LNG, το υδρογόνο και τέλος η αμμωνία με το μεγαλύτερο ρίσκο. Τα εν λόγω αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα αν αναλογιστεί κανείς τις ιδιότητες των καυσίμων οι οποίες παίζουν βασικό ρόλο στην επικινδυνότητά τους. Με βάση τη μελέτη αυτή, προκύπτει η ποιοτική κατάταξη των εξεταζόμενων ναυτιλιακών καυσίμων ως προς το ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών:

Πίνακας 13 Ποιοτική αξιολόγηση καυσίμων ως προς το ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών

Καύσιμα	Τιμές
Μεθανόλη	5
LNG	4
Υδρογόνο	3
Αμμωνία	1

4.2.6. Ρίσκο προληπτικών μέτρων

Μερικές από τις ιδιότητες των καυσίμων όπως η τοξικότητα και η ευφλεκτότητα παίζουν σημαντικό ρόλο ως προς το ρίσκο που επιφυλάσσει ο χειρισμός τους. Στο παρόν κριτήριο θα γίνει ποιοτική αξιολόγηση ρίσκου σε 35 μέτρα προφύλαξης πάνω σε ένα tanker με την ίδια μέθοδο που ακολουθήθηκε στο προηγούμενο κριτήριο (βλ. 4.2.5) (Together in Safety 2022).

Πίνακας 14 Θέματα αξιολόγησης μέτρων προφύλαξης (Together in Safety 2022)

Κατηγορίες περιπτώσεων εμφάνισης μέτρων προφύλαξης	Μέτρα προφύλαξης
1. Πλοήγηση	Έπειτα από σύγκρουση ή προσάραξη του πλοίου, το πλήρωμα οφείλει να διενεργήσει επιπρόσθετους ελέγχους για διαρροές, ακόμα και σε περιοχές που δεν έχουν οριστεί ως επικίνδυνες, χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο εξοπλισμό ασφαλείας. Αυτό πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στο SMS (safety management system) του πλοίου
	Ειδική εκπαίδευση του πληρώματος για το LNG, την αμμωνία και το υδρογόνο
	Εκπαίδευση στους επιβαίνοντες για όλους του κινδύνους που σχετίζονται με το σύστημα καυσίμου
	Επιλογή δεξαμενής με γνώμονα τα δρομολόγια του σκάφους και τον αναμενόμενο χρόνο ανάκτησης σε περίπτωση βλάβης του συστήματος πρόωσης
	Εκπαίδευση του πληρώματος ως προς το σύστημα αποθήκευσης καυσίμου σε περίπτωση ακραίων κινήσεων του πλοίου
	Χορήγηση συναγερμών στο πλήρωμα ως προς τη πιθανότητα διαρροής αερίου σε περίπτωση ακραίων κινήσεων του πλοίου
	Εξειδικευμένη εκπαίδευση έκτακτης ανάγκης του πληρώματος σε περιπτώσεις ακραίων κινήσεων των πλοίου εξαιτίας εσφαλμένης φόρτωσης, σύγκρουσης ή προσάραξης η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει απελευθέρωση αερίων
	Οι χειριστές να διαθέτουν ειδικό φορητό εξοπλισμό ανίχνευσης και μέτρησης της συγκέντρωσης αερίου και στολή για τη προστασία σε περίπτωση έκθεσης
	Αν υπάρχει η δυνατότητα, να ελέγχεται και να παρακολουθείται εξ αποστάσεως η κατάσταση της δεξαμενής (π.χ. πίεση, θερμοκρασία κλπ.) το οποίο σύστημα θα μπορούσε να εφαρμοστεί στη περίπτωση εγκατάλειψης του πλοίου
	Ανάπτυξη ειδικού συστήματος αποστράγγισης σε περίπτωση απελευθέρωσης υψηλής ποσότητας υγρού από ακραίες κινήσεις του πλοίου
	Εκπαίδευση του πληρώματος ώστε να είναι σε εγρήγορση σε περίπτωση διαρροής και απελευθέρωσης αερίου από τις δεξαμενές
2. Εξωτερικές επιρροές	Εκπαίδευση του πληρώματος ως προς την επιτυχή αντιμετώπιση κάποιας διαρροής
	Σχεδιασμός της δεξαμενής λαμβάνοντας υπόψη και την εισχώρηση νερού στο περιβάλλοντα χώρο
	Επικοινωνία γέφυρας με πλησίον σκάφος ώστε να απομακρυνθεί από τη περιοχή σύγκρουσης στη περίπτωση που χρησιμοποιείται καύσιμο αμμωνίας
	Σχέδιο έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση σύγκρουσης σε επικίνδυνες ζώνες

	Σχέδιο επικοινωνίας συγκρουόμενων πλοίων κατά το οποίο απαιτείται από το συγκρουόμενο πλοίο να γίνουν ορισμένες ενέργειες ώστε να απομονωθούν και τα δύο πλοία
	Εκπαίδευση του πληρώματος ως προς την εκλύομενη θερμότητα στο σύστημα καυσίμου του πλοίου
3. Λειτουργικές διαδικασίες του πλοίου εκτός του ανεφοδιασμού καυσίμων	Εκπαίδευση του πληρώματος σχετικά με τον απαραίτητο εξοπλισμό στις επικίνδυνες ζώνες
	Εκπαίδευση του προσωπικού του λιμανιού σχετικά με τις συσκευές του συστήματος καυσίμου
	Εκπαίδευση του πληρώματος στη περίπτωση που καταστραφεί το σύστημα καυσίμου από τη σύγκρουσή του με κάποιο αντικείμενο
	Σχεδιασμός του συστήματος καυσίμου με γνώμονα τη προστασία του από δευτερεύοντες εργασίες όπως ανυψωτικές διαδικασίες
	Σχέδιο ενημέρωσης όλων των επιβατών σχετικά με τα μέτρα προφύλαξης και τους κινδύνους που αφορούν το σύστημα καυσίμου
	Εκπαίδευση και πιστοποίηση του πληρώματος σχετικά με το καύσιμο που χρησιμοποιείται, ώστε να μπορεί να επιβιβαστεί
	Το SMS οφείλει να λαμβάνει υπόψη το πλήρωμα, τις διαδικασίες και τους προκαθορισμένους χρόνους για το καύσιμο που χρησιμοποιείται
	Ο ειδικός του συστήματος καυσίμου θα πρέπει να έχει στη διάθεσή του αρκετό χρόνο για την αποτελεσματική παράδοση του συστήματος
	Διαδικασίες εξοικείωσης του πληρώματος με τις λειτουργικές παραμέτρους σε ένα νέο σύστημα καυσίμου
	Εκπαίδευση του πληρώματος σχετικά με την έλλειψη γνώσης των κινδύνων και συστημάτων ασφαλείας που μπορεί να διαθέτουν οι επισκέπτες
	Εκπαίδευση του πληρώματος σχετικά με την ενημέρωση των επισκεπτών σε θέματα ασφαλείας
	Διεθνείς φορείς για την διασφάλιση της ύπαρξης συναγερμών σχετικών με τα καύσιμα σε λιμάνια και πλοία
	4. Προετοιμασία καυσίμου και έλεγχος	Εκπαίδευση του πληρώματος σχετικά με τις επιπτώσεις διαφορετικής πυκνότητας καυσίμου στη περίπτωση του ανεφοδιασμού
Στα σχέδια έκτακτης ανάγκης είναι αναγκαίο να υπάρχει και το σχέδιο αντιμετώπισης υπερπλήρωσης καυσίμου	
Ο σχεδιασμός του συστήματος ανεφοδιασμού καυσίμου να περιλαμβάνει μέτρα ασφαλείας στη περίπτωση απώλειας ελέγχου	
Εκπαίδευση του πληρώματος ως προς τον εντοπισμό φωτιάς που έχει προκληθεί από μεθανόλη	
Έλεγχος τοξικών επιπέδων στο πλοίο	
Αξιολόγηση κινδύνου για τη διαδικασία ανεφοδιασμού καυσίμου όπου θα λαμβάνονται υπόψη τα σενάρια διαρροής	

Πίνακας 15 Ποσότητες εμφάνισης καυσίμων στις ζώνες ρίσκου σε περίπτωση έλλειψης προληπτικών μέτρων ασφαλείας (Together in Safety 2022)

	Ζώνες ρίσκου	Πράσινη	Πορτοκαλί	Κόκκινη	Λευκή
Καύσιμα					
Μεθανόλη		20	4	0	11
LNG		17	13	0	5
Υδρογόνο		15	17	0	3
Αμμωνία		8	16	9	2

Όπως στη προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ παρατηρείται το ίδιο μοτίβο, με τη μεθανόλη να παρουσιάζει το λιγότερο ρίσκο, ακολουθούμενο από το LNG, το υδρογόνο και τέλος την αμμωνία. Με βάση τη παραπάνω μελέτη, προκύπτει η ποιοτική κατάταξη των εξεταζόμενων ναυτιλιακών καυσίμων ως προς το ρίσκο στη περίπτωση έλλειψης προληπτικών μέτρων:

Πίνακας 16 Ποιοτική αξιολόγηση καυσίμων ως προς το ρίσκο έλλειψης προληπτικών μέτρων

Καύσιμα	Τιμές
Μεθανόλη	5
LNG	3
Υδρογόνο	2
Αμμωνία	1

4.2.7. Αξιοπιστία παροχής καυσίμου

Στο παρόν κριτήριο της αξιοπιστίας παροχής καυσίμου θα ληφθεί υπόψη ο μέσος όρος της ποιοτικής αξιολόγησης πέντε υποκριτηρίων (βλ. Πίνακας 17). Τα πέντε αυτά υποκριτήρια είναι: η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, η τρέχουσα ποσότητα παραγωγής, η τρέχουσα χρήση ως ναυτιλιακό καύσιμο, η ενεργειακή ασφάλεια που υποδεικνύεται από τη παγκόσμια κατανομή της δυναμικής των εφοδιαστικών μέσων και τη πολιτική σταθερότητα σε χώρες μεγάλης εφοδιαστικής δυνητικότητας (Hansson, Månsson, και συν. 2019). Οι τέσσερις βαθμοί της ποιοτικής αξιολόγησης είναι οι εξής: 1-κακό, 2-μέτριο, 3-σχεδόν καλό και 4-καλό. Η ποιοτική αξιολόγηση βασίστηκε στις μελέτες των Hansson, Brynolf, Månsson και συν. (Hansson, Brynolf, και συν. 2020).

Πίνακας 17 Ποιοτική αξιολόγηση αξιοπιστίας παροχής καυσίμων (Hansson, Brynolf, και συν. 2020) (Hansson, Månsson, και συν. 2019)

Καύσιμα	Διαθεσιμότητα πρώτων υλών	Τρέχουσα ποσότητα παραγωγής	Τρέχουσα χρήση ως ναυτιλιακό καύσιμο	Παγκόσμια κατανομή δυναμικής των εφοδιαστικών μέσων	Πολιτική σταθερότητα	Τιμές (μ.ο.)
Πράσινη Μεθανόλη	3	1	1	2	4	2
Γκρι Μεθανόλη	3	4	2	1	2	2
LNG	3	4	3	1	2	3
Πράσινο Υδρογόνο	4	1	1	4	4	3
Γκρι/ Μπλε Υδρογόνο	3	1	1	1	2	2
Πράσινη Αμμωνία	4	1	1	4	4	3
Μπλε Αμμωνία	3	4	1	1	2	2

4.2.8. Κανονισμοί

Στο παρόν κριτήριο θα γίνει ποιοτική αξιολόγηση σε κλίμακα 5 βαθμών ως προς τους κανονισμούς που έχουν οριστεί και ισχύουν από διάφορους οργανισμούς για τα ναυτιλιακά καύσιμα. Στη συγκεκριμένη αξιολόγηση θα ληφθούν υπόψη η ποσότητα των κανονισμών, η συμβατότητά τους με τα καύσιμα και αν βρίσκονται σε ισχύ. Είναι σημαντικό πλεονέκτημα ενός καυσίμου να πληροί όλους τους κανονισμούς που το αφορούν καθώς κατ' αυτό τον τρόπο διευκολύνεται σημαντικά η διαδικασία αφομοίωσής του σε ένα πλοίο.

Πίνακας 18 Κανονισμοί καυσίμων (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021)

Οργανισμός	Κανονισμοί	Υφιστάμενη Κατάσταση
Μεθανόλη		
IMO	Προσωρινές οδηγίες για την ασφάλεια των πλοίων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο τη μεθανόλη	Αναμονή έγκρισης σχεδίου
ISO	Προδιαγραφές τάξης καυσίμου	Υπό ανάπτυξη
CEN	CWA 17540:2020 Πλοία και θαλάσσια τεχνολογία – Προδιαγραφές ανεφοδιασμού πλοίων	Συμφωνία με το ναυπηγείο, δεν έχει ακόμα επισημοποιηθεί το πρότυπο
Methanol Institute	Τεχνικό δελτίο: Ασφάλεια χειρισμού και ελλιμενισμού	Διαθέσιμο
Fuel Suppliers	Ιδιόκτητη καθοδήγηση	Διαθέσιμο
LNG		
IMO	Κώδικας IGF (Διεθνής κώδικας ασφάλειας για πλοία που χρησιμοποιούν ως καύσιμο αέρια ή άλλα καύσιμα με χαμηλό σημείο ανάφλεξης) του IMO που εμπεριέχεται στη SOLAS. Ο παρόν κώδικας προτάθηκε στην επιτροπή ναυτικής ασφάλειας (MSC) του IMO το 2004 και παρουσιάζονται ορισμένες απαιτήσεις ως προς τη χρήση του καυσίμου LNG	Διαθέσιμο
	Η IMO STCW (Διεθνής σύμβαση για πρότυπα εκπαίδευσης, πιστοποίησης και τήρησης εποπτείας για τους ναυτικούς) περιλαμβάνει απαιτήσεις που αφορούν την εκπαίδευση και τα προσόντα του πληρώματος σε πλοία που υπόκεινται στο κώδικα IGF	Διαθέσιμο
ISO	Στο πρότυπο ISO 23306:2020 γίνεται αναφορά στις απαιτήσεις ποιότητας του ναυτιλιακού καυσίμου LNG	Διαθέσιμο
Class Society	Για τη χρήση του παρόντος ναυτιλιακού καυσίμου λαμβάνονται υπόψη οι κανόνες τάξης και από τους κανονισμούς (regulations)	Διαθέσιμοι οι κανόνες τάξης
SGMF	Ο οργανισμός Society for Gas as a Marine Fuel είναι ένας μη κυβερνητικός οργανισμός που παρέχει οδηγίες για τη λειτουργικότητα των πλοίων που χρησιμοποιούν LNG ως καύσιμο	Οι οδηγίες ανανεώνονται σε τακτικά χρονικά διαστήματα
Προμηθευτής	Πρότυπα του προμηθευτή	Διαθέσιμα από το προμηθευτή
Υδρογόνο		

IMO	Κώδικας IGF	Στη παρούσα έκδοση δεν συμπεριλαμβάνονται η αποθήκευση και η χρήση του καυσίμου. Για την αποθήκευση και τη χρήση είναι αναγκαίο να τηρηθεί η εναλλακτική προσέγγιση σχεδιασμού σύμφωνα με το κανονισμό II-1/55 της SOLAS. Για την αποθήκευση υγροποιημένων αερίων στα πλοία υπάρχουν οι κώδικες IGC και IGF, και για το υγροποιημένο υδρογόνο οι κανόνες C-tank
ISO	ISO/TR 15916:2015	Οδηγίες για τη χρήση και αποθήκευση των GH ₂ /LH ₂ όπου γίνεται αναφορά σε βασικά ζητήματα ασφαλείας, ρίσκου και κινδύνων καθώς επίσης και στις ιδιότητες του υδρογόνου που επιδρούν στην ασφάλεια
ISO	ISO 20519 – Πλοία και θαλάσσια τεχνολογία – Πρότυπα για τον ανεφοδιασμό πλοίων με αέριο	Υπό επεξεργασία για την τελική δημοσίευση. Τη δεδομένη χρονική στιγμή δεν υπάρχουν κανονισμοί που να αναφέρονται στον ανεφοδιασμό υδρογόνου ως καύσιμο σε πλοία. Υπάρχουν μόνο οι εθνικοί κανονισμοί με αποτέλεσμα να απαιτείται η αξιολόγηση ανά περίπτωση
ISO	ISO 14687	Κανονισμός ως προς τη καθαρότητα του υδρογόνου

DNVGL κανόνες τάξης	Πλοία – Μέρος 6 – Κεφάλαιο 2- Ενότητα 3 – Εγκαταστάσεις κυψελών καυσίμου	Δεν υπάρχουν διεθνείς ρυθμιστικοί κανονισμοί για εφαρμογές κυψελών καυσίμου οι οποίοι να είναι δεσμευτικοί αλλά οι παρόντες κανόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη κατάταξη πλοίων που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου ως προς FC(Ισχύς) ή FC(Ασφάλεια)
Αμμωνία		
IMO	Κώδικας IGF	<p>Η αμμωνία ως ναυτιλιακό καύσιμο εξαιρείται με βάση τον ισχύοντα κανονισμό ασφαλείας και δεν υπάρχει κανένα πιστοποιημένο πρότυπο καυσίμου το οποίο να είναι κοινό σε όλους τους οργανισμούς που θέτουν κανονισμούς</p> <p>Η επιτροπή καυσίμων ΑΕΑ έχει ξεκινήσει ορισμένες διαδικασίες καθώς έχει αναπτύξει ένα προσχέδιο ως προς τις προδιαγραφές του εν λόγω καυσίμου έτσι ώστε να γίνει η αποδοχή του πιο σύντομα</p> <p>Ο νηογνώμονας Lloyds έχει εγκρίνει σε αρχικό στάδιο ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και ένα δεξαμενόπλοιο Aframax</p>
IMO	Κώδικας IGC	Για το καθορισμό των προτύπων ασφαλείας της αμμωνίας παίζει σημαντικό ρόλο ο τύπος του πλοίου

		<p>καθώς ανάλογα το τύπο απαιτούνται και οι αντίστοιχες ενέργειες</p> <p>Πλοία που μεταφέρουν αμμωνία υπόκεινται στο κώδικα IGC ο οποίος πρέπει να τροποποιηθεί καθώς δεν επιτρέπει τη χρήση του τοξικού φορτίου της αμμωνίας ως καύσιμο</p> <p>Άλλοι τύποι πλοίων υπόκεινται στο κώδικα IGF με την απουσία όμως κάλυψης της αμμωνίας ως καυσίμου. Είναι αναγκαίο να οριστεί μια βάση καθοδήγησης με γνώμονα την ασφάλεια</p> <p>Η MAN ES έχει ξεκινήσει διαδικασίες για την απόκτηση έγκρισης από τη σημαία του κράτους για χρήση του ναυτιλιακού καυσίμου της αμμωνίας στο κώδικα IGC</p>
US Occupation Safety and Health Administration	Όρια έκθεσης στην αμμωνία	<p>Ο οργανισμός OSHA έχει προσδιορίσει το ανώτατο επίπεδο έκθεσης του ανθρώπου στην αμμωνία χωρίς τη πρόκληση μη αναστρέψιμων βλαβών στην υγεία (300 ppm). Σε όριο 8 ωρών 25 ppm και σε όριο 15 λεπτών 35 ppm</p>

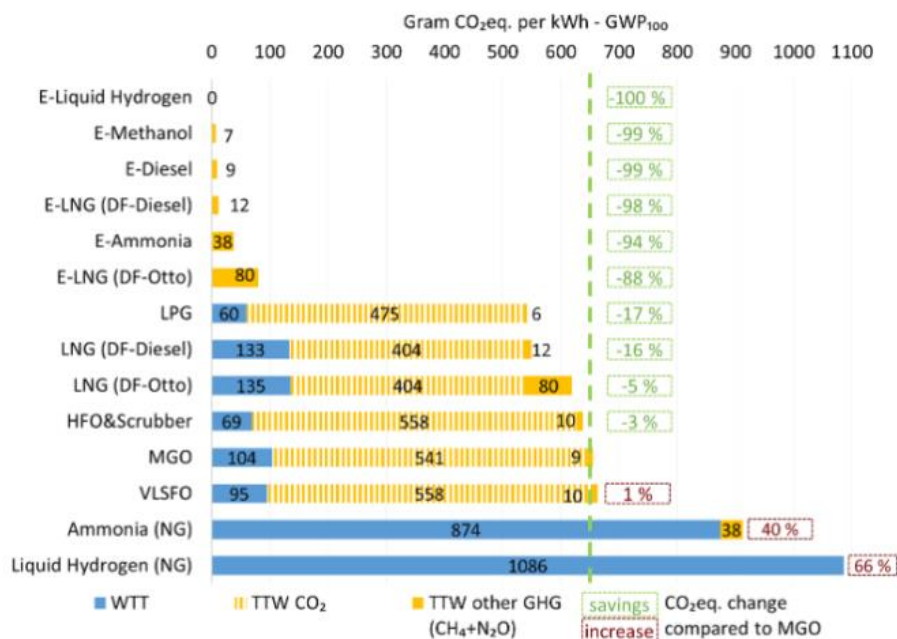
Σύμφωνα με το παραπάνω πίνακα, το LNG παρουσιάζει τη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα σε κανονισμούς και τα λιγότερο απαιτητικά ζητήματα προς επίλυση. Όμως το LNG δεν θα λάβει τη τιμή 5 στη ποιοτική αξιολόγηση καθώς το 5 θα το λάμβανε αν συμμετείχε στην αξιολόγηση το diesel. Όσον αφορά το diesel υπάρχουν λιγότεροι κανονισμοί οι οποίοι είναι λιγότερο απαιτητικοί και συγχρόνως είναι όλοι σε ισχύ. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί ο κανονισμός MARPOL Annex VI (Regulation 18) του IMO όπου αναφέρει πως οποιοδήποτε καύσιμο το οποίο δεν προέρχεται από διύλιση του πετρελαίου, οφείλει οι εκπομπές που παράγονται να μην ξεπερνούν τα όρια περιεκτικότητας σε θείο και τα όρια NOx. Αμέσως μετά παρατηρείται πως η μεθανόλη διαθέτει ισχυρή διαθεσιμότητα και πως είναι ήδη προς ανάπτυξη όποιος κανονισμός δεν έχει ακόμα οριστικοποιηθεί. Στο υδρογόνο υπάρχει ασθενής διαθεσιμότητα στους κανονισμούς αλλά ήδη δίνονται εναλλακτικές προσεγγίσεις οι οποίες αποσκοπούν στη διευκόλυνση της όλης διαδικασίας. Η αμμωνία παρουσιάζει ελάχιστη διαθεσιμότητα καθώς επίσης υπάρχουν πολλές δυσκολίες και ζητήματα που εκκρεμούν. Επίσης, το ρίσκο και οι κίνδυνοι που φέρει το εν λόγω καύσιμο περιπλέκει ακόμα περισσότερο την διαδικασία αφομοίωσής του. Παρακάτω απεικονίζεται η ποιοτική αξιολόγηση των καυσίμων σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν.

Πίνακας 19 Ποιοτική αξιολόγηση κανονισμών των καυσίμων (IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder 2021)

Καύσιμα	Τιμές
Μεθανόλη	3
LNG	4
Υδρογόνο	2
Αμμωνία	1

4.2.9. Καυσαέρια

Στο παρόν κριτήριο θα αξιολογηθούν τα καύσιμα ως προς το ποσοστό μείωσης των εκπομπών άνθρακα σε συνάρτηση με το MGO. Για να ληφθούν τα εν λόγω ποσοστά μείωσης, ήταν αναγκαίο να πραγματοποιηθεί μια αξιολόγηση του κύκλου ζωής των καυσίμων (LCA) όπως ορίζεται από τα πρότυπα ISO LCA (ISO 14040). Η LCA περιλαμβάνει τα GHG Well to Wake (WTW), τη χρήση ενέργειας και το κόστος από την παραγωγή καυσίμων (WTT) και από τη καύση τους (TTW). Επίσης, θα ληφθούν υπόψη οι εκπομπές WTW/kWh καθώς αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως για την αξιολόγηση καυσίμων ως προς τη μείωση των GHG. Στη συνέχεια ως τελικές τιμές για την αξιολόγηση του κριτηρίου θα αξιοποιηθούν τα ποσοστά μείωσης των εκπομπών άνθρακα σε συνάρτηση με το MGO όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Η συγκεκριμένη προσέγγιση χωρίζεται σε Well to Tank (WTT) και Tank to Wake (TTW). Όλα τα ποσοστά μείωσης βασίστηκαν σε χρονικό διάστημα 100 ετών (GWP100). Όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα, το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στις εκπομπές GHG Well to Tank, το πορτοκαλί ριγέ χρώμα αντιστοιχεί στις εκπομπές CO₂ Tank to Wake και το συμπαγές πορτοκαλί στις εκπομπές μεθανίου και υποξειδίου του αζώτου (CH₄ + N₂O). Για τη σύγκριση όλων των καυσίμων ως προς το MGO σε έναν δίχρονο κινητήρα, ορίζεται η διακεκομμένη πράσινη κάθετη γραμμή. Ένα καύσιμο που εκπέμπει χαμηλά ποσοστά καυσαερίου συμβάλει σημαντικά στη μείωση των GHG και είναι λιγότερο επιβλαβές στους ζωντανούς οργανισμούς. Το παρόν κριτήριο επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τελική αξιολόγηση ενός οικολογικού καυσίμου καθώς η ίδια η ύπαρξη των συγκεκριμένων καυσίμων οφείλεται στην ανάγκη μείωσης των καυσαερίων από την ατμόσφαιρα (Lindstad, και συν. 2021).



Εικόνα 13 Εκπομπές GHG καυσίμων (Lindstad, και συν. 2021)

Πίνακας 20 Ποσοστά μείωσης των εκπομπών άνθρακα των καυσίμων σε συνάρτηση με το MGO (E. L. Lindstad 2021), (Lindstad, και συν. 2021)

Καύσιμα	Τιμές (%)
Πράσινη Μεθανόλη	-99
Γκρι Μεθανόλη	+13
LNG	-16
Πράσινο Υδρογόνο	-100
Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	+66
Πράσινη Αμμωνία	-94
Μπλε Αμμωνία	+40

4.3. Τιμές αξιολόγησης

Σύμφωνα με τις τιμές των καυσίμων που δόθηκαν στις παραπάνω υποενότητες, παρουσιάζεται παρακάτω ο συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης (evaluation matrix), ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στη PROMETHEE II.

Πίνακας 21 Τιμές αξιολόγησης

Καύσιμα	Κριτήρια								
	Καυσαέρια C1 (%)	Μείωση φορτίου C2 (MJ/L)	Αξιοπιστία παροχής καυσίμου C3 (5-point)	Κόστος καυσίμου το 2030 C4 (\$/GJ)	Κόστος συντήρησης & λειτουργίας C5 (\$/MWh)	Κόστος επένδυσης C6 (\$/kW)	Κανονισμοί C7 (5-point)	Ρίσκο προληπτικών μέτρων C8 (5-point)	Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών / καταστροφών C9 (5-point)
Πράσινη Μεθανόλη	-99	16	2	24	6	5940	3	5	5
Γκρι Μεθανόλη	13	16	2	12	6	5940	3	5	5
LNG	-16	21	3	7	9	6405	4	3	4
Πράσινο Υδρογόνο	-100	8,5	3	36	11	9270	2	2	3
Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	66	8,5	2	16	11	9270	2	2	3
Πράσινη Αμμωνία	-94	12	3	35	10	6455	1	1	1
Μπλε Αμμωνία	40	12	2	27	10	6455	1	1	1

4.4. Βαρύτητες κριτηρίων, κατώφλια προτίμησης και αποτελέσματα

4.4.1. Βαρύτητες κριτηρίων

Στη παρούσα ενότητα θα γίνει αξιολόγηση των κριτηρίων ώστε να υπολογιστούν οι βαρύτητες προτίμησης που θα ληφθούν υπόψη στη PROMETHEE II. Η αξιολόγηση αυτή θα βασιστεί στο άρθρο (Hansson, Månsson, και συν. 2019). Ο καθορισμός της βαρύτητας ενός κριτηρίου εξαρτάται από την ιδιότητα που κατέχει το άτομο ή ο οργανισμός που πραγματοποιεί την αξιολόγηση. Για παράδειγμα διαφορετικές προτιμήσεις θα έχουν ένας πλοιοκτήτης σε σχέση με μια κυβερνητική αρχή. Οι εμπλεκόμενοι φορείς (stakeholders) που σχετίζονται με τα ναυτιλιακά καύσιμα είναι οι εξής: οι πλοιοκτήτες, οι παραγωγοί καυσίμων, οι κατασκευαστές κινητήρων και οι κυβερνητικές αρχές. Οπότε, για την επίτευξη μεγαλύτερης πληρότητας στην αξιολόγηση, θα εξεταστούν οι τέσσερις βασικές κατηγορίες των εμπλεκόμενων φορέων (4 βασικά σενάρια αξιολόγησης). Επιπρόσθετα, θα δημιουργηθούν ακόμα δύο σενάρια, όπου στο ένα θα αντιπροσωπεύεται ο συνδυασμός των τεσσάρων αρχικών (σενάριο συνδυασμού) και στο άλλο οι βαρύτητες όλων των κριτηρίων θα είναι ίσες (σενάριο ισότητας). Να σημειωθεί πως η σειρά προτίμησης των κριτηρίων που θα παρουσιαστεί στο σενάριο του συνδυασμού, βασίστηκε στο σταθμισμένο γεωμετρικό μέσο όρο των τιμών των τεσσάρων βασικών σεναρίων. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω υπάρχουν συνολικά 6 σενάρια.

Όσον αφορά τους πλοιοκτήτες, τους κατασκευαστές κινητήρων και τους παραγωγούς καυσίμων, τα οικονομικά κριτήρια κατέχουν τη πρώτη θέση στη σειρά κατάταξης, ακολουθούμενα από τα τεχνικά και κοινωνικά για τους κατασκευαστές και παραγωγούς, ενώ τα κοινωνικά και τεχνικά για τους πλοιοκτήτες. Οι κυβερνητικές αρχές εστιάζουν περισσότερο στα περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια σε σύγκριση με τα οικονομικά.

Έχοντας γίνει η κατάταξη των κατηγοριών των κριτηρίων, ακολουθεί η κατάταξη των ίδιων των κριτηρίων. Στα οικονομικά κριτήρια, το κόστος καυσίμου παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σημαντικότητα όπως αναμενόταν ενώ ακολουθούν τα κόστη επένδυσης και συντήρησης. Να τονιστεί πως οι ισορροπίες της αξιολόγησης είναι λεπτές όσον αφορά το προβλεπόμενο κόστος καυσίμου για το 2030, καθώς μια αλλαγή σε αυτές τις τιμές θα μπορούσε να προκαλέσει ανακατάταξη στα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής αξιολόγησης των καυσίμων. Από τα τεχνικά κριτήρια, η αξιοπιστία παροχής καυσίμου διαθέτει τη μεγαλύτερη βαρύτητα σε

σύγκριση με τη μείωση του φορτίου. Τα ανωτέρω αποτελέσματα ισχύουν για όλα τα σενάρια πλην το σενάριο της ισότητας. Στα κοινωνικά κριτήρια, η ασφάλεια είναι πιο σημαντική από τις νομοθεσίες/κανονισμούς για τον πλοιοκτήτη σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ομάδες (Hansson, Brynolf, και συν. 2020).

Στον Πίνακα 22 απεικονίζεται η κατάταξη των κριτηρίων με σειρά σημαντικότητας από κάτω προς τα πάνω για το κάθε σενάριο. Σε κάθε κριτήριο χρεώνεται ένα γράμμα με έναν αριθμό (κάρτα) για τη διευκόλυνση ανάγνωσης του πίνακα. Στο σενάριο της ισότητας αναγράφεται το ισότιμο ποσοστό βάρους για το κάθε κριτήριο.

Πίνακας 22 Κατάταξη κριτηρίων για το κάθε σενάριο

Κατηγορίες κριτηρίων	Κριτήρια	Κάρτες	Πλοιοκτ ήτες	Παραγωγοί καυσίμων	Κατασκευαστές κινητήρων	Κυβερνητικές αρχές	Σενάριο συνδυασμού	Ισότητ ας
Περιβαλλοντικά	Καυσάερια	C1	C1	C1	C1	C2	C1	11,11
Τεχνικά	Μείωση φορτίου	C2	C2	C8,C9	C8,C9	C3	C3	11,11
Τεχνικά	Αξιοπιστία παροχής καυσίμου	C3	C3	C7	C7	C5,C6	C2	11,11
Οικονομικά	Κόστος καυσίμου το 2030	C4	C7	C2	C3	C4	C8,C9	11,11
Οικονομικά	Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	C5	C8,C9	C3	C2	C8,C9	C7	11,11
Οικονομικά	Κόστος επένδυσης	C6	C5	C5	C5	C7	C6	11,11
Κοινωνικά	Κανονισμοί	C7	C6	C6	C6	C1	C5	11,11
Κοινωνικά	Ασφάλεια-Ρίσκο προληπτικών μέτρων	C8	C4	C4	C4		C4	11,11
Κοινωνικά	Ασφάλεια-Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών	C9						11,11

Σύμφωνα με τη θεωρία Simos που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα και την κατάταξη των κριτηρίων, θα παραχθούν οι βαρύτητες των πέντε πρώτων σεναρίων του ανωτέρου πίνακα. Οι λευκές κάρτες βασίστηκαν στη διαφορά σημαντικότητας που παρουσίαζαν τα κριτήρια στη δημοσίευση των Hansson και Brynolf (Hansson, Brynolf, και συν. 2020). Παρακάτω απεικονίζονται οι πίνακες με τις βαρύτητες των κριτηρίων για το κάθε σενάριο.

Πίνακας 23 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο των πλοιοκτητών

Πλοιοκτήτες								
Κριτήρια	Κάρτες	A/A	Κατάταξη	Αριθμ. Στοιχείων που ανήκουν στο ίδιο (r)	Θέσεις	Μη κανονικοποιημένα βάρη	Κανονικοποιημένα βάρη	Συνολικά βάρη
			(r)	n(r)		w(r) ή k(r,)	w(i)	w(r,)'
Καυσάερια	C1	1	C1	1	1	1	1,96	1,96
Μείωση φορτίου	C2	2	C2	1	2	2	3,92	3,92
Αξιοπιστία παροχής καυσίμου	C3	3	C3	1	3	3	5,88	5,88
Κόστος καυσίμου το 2030	C4	4	C7	1	4	4	7,84	7,84
Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	C5	5	White card	1	(5)	-	-	-
Κόστος επένδυσης	C6	6	C8,C9	2	6,7	6,5	12,75	25,49
Κανονισμοί	C7	7	C5	1	8	8	15,69	15,69
Ασφάλεια- Ρίσκο προληπτικών μέτρων	C8	8	C6	1	9	9	17,65	17,65
Ασφάλεια- Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών	C9	9	White card	1	(10)	-	-	-
			C4	1	11	11	21,57	21,57
				SUM=	51		SUM=	100,00

Πίνακας 24 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο των παραγωγών καυσίμων

Παραγωγοί καυσίμων								
Κριτήρια	Κάρτες	A/A	Κατάταξη	Αριθμ. Στοιχείων που ανήκουν στο ίδιο (r)	Θέσεις	Μη κανονικοποιημένα βάρη	Κανονικοποιημένα βάρη	Συνολικά βάρη
			(r)	n(r)		w(r) ή k(r,)	w(i)	w(r,)'
Καυσαέρια	C1	1	C1	1	1	1	1,92	1,92
Μείωση φορτίου	C2	2	C8,C9	2	2,3	2,5	4,81	9,62
Αξιοπιστία παροχής καυσίμου	C3	3	White card	1	(4)	-	-	-
Κόστος καυσίμου το 2030	C4	4	C7	1	5	5	9,62	9,62
Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	C5	5	C2	1	6	6	11,54	11,54
Κόστος επένδυσης	C6	6	C3	1	7	7	13,46	13,46
Κανονισμοί	C7	7	C5	1	8	8	15,38	15,38
Ασφάλεια- Ρίσκο προληπτικών μέτρων	C8	8	C6	1	9	9	17,31	17,31
Ασφάλεια- Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών	C9	9	White card	1	(10)	-	-	-
			C4	1	11	11	21,15	21,15
				SUM=	52		SUM=	100,00

Πίνακας 25 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο των κατασκευαστών κινητήρων

Κατασκευαστές κινητήρων								
Κριτήρια	Κάρτες	A/A	Κατάταξη	Αριθμ. Στοιχείων που ανήκουν στο ίδιο (r)	Θέσεις	Μη κανονικοποιημένα βάρη	Κανονικοποιημένα βάρη	Συνολικά βάρη
			(r)	n(r)		w(r) ή k(r,)	w(i)	w(r,)'
Καυσαέρια	C1	1	C1	1	1	1	1,92	1,92
Μείωση φορτίου	C2	2	C8,C9	2	2,3	2,5	4,81	9,62
Αξιοπιστία παροχής καυσίμου	C3	3	White card	1	(4)	-	-	-
Κόστος καυσίμου το 2030	C4	4	C7	1	5	5	9,62	9,62
Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	C5	5	C3	1	6	6	11,54	11,54
Κόστος επένδυσης	C6	6	C2	1	7	7	13,46	13,46
Κανονισμοί	C7	7	C5	1	8	8	15,38	15,38
Ασφάλεια- Ρίσκο προληπτικών μέτρων	C8	8	C6	1	9	9	17,31	17,31
Ασφάλεια- Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών	C9	9	White card	1	(10)	-	-	-
			C4	1	11	11	21,15	21,15
				SUM=	52		SUM=	100,00

Πίνακας 26 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο των κυβερνητικών αρχών

Κυβερνητικές αρχές								
Κριτήρια	Κάρτες	A/A	Κατάταξη	Αριθμ. Στοιχείων που ανήκουν στο ίδιο (r)	Θέσεις	Μη κανονικοποιημένα βάρη	Κανονικοποιημένα βάρη	Συνολικά βάρη
			(r)	n(r)		w(r) ή k(r,)	w(i)	w(r,)'
Καυσάερια	C1	1	C2	1	1	1	1,79	1,79
Μείωση φορτίου	C2	2	White card	1	(2)	-	-	-
Αξιοπιστία παραχής καυσίμου	C3	3	C3	1	3	3	5,36	5,36
Κόστος καυσίμου το 2030	C4	4	C5,C6	2	4,5	4,5	8,04	16,07
Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	C5	5	C4	1	6	6	10,71	10,71
Κόστος επένδυσης	C6	6	C8,C9	2	7,8	7,5	13,39	26,79
Κανονισμοί	C7	7	White card	1	(9)	-	-	-
Ασφάλεια- Ρίσκο προληπτικών μέτρων	C8	8	C7	1	10	10	17,86	17,86
Ασφάλεια- Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών	C9	9	White card	1	(11)	-	-	-
			C1	1	12	12	21,43	21,43
				SUM=	56		SUM=	100,00

Πίνακας 27 Βαρύτητες κριτηρίων για το σενάριο του συνδυασμού

Σενάριο συνδυασμού								
Κριτήρια	Κάρτες	A/A	Κατάταξη	Αριθμ. Στοιχείων που ανήκουν στο ίδιο (r)	Θέσεις	Μη κανονικοποιημένα βάρη	Κανονικοποιημένα βάρη	Συνολικά βάρη
			(r)	n(r)		w(r) ή k(r,)	w(i)	w(r,)'
Καυσάερια	C1	1	C1	1	1	1	2,17	2,17
Μείωση φορτίου	C2	2	C3	1	2	2	4,35	4,35
Αξιοπιστία παροχής καυσίμου	C3	3	C2	1	3	3	6,52	6,52
Κόστος καυσίμου το 2030	C4	4	C8,C9	2	4,5	4,5	9,78	19,57
Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	C5	5	C7	1	6	6	13,04	13,04
Κόστος επένδυσης	C6	6	C6	1	7	7	15,22	15,22
Κανονισμοί	C7	7	C5	1	8	8	17,39	17,39
Ασφάλεια- Ρίσκο προληπτικών μέτρων	C8	8	White card	1	(9)	-	-	-
Ασφάλεια- Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών	C9	9	C4	1	10	10	21,74	21,74
				SUM=	46		SUM=	100,00

Πίνακας 28 Βαρύτητες κριτηρίων ανά σενάριο

Κατηγορίες κριτηρίων	Κριτήρια	Κάρτες	Πλοιοκτήτες	Παραγωγοί καυσίμων	Κατασκευαστές κινητήρων	Κυβερνητικές αρχές	Σενάριο συνδυασμού	Ισότητα
Περιβαλλοντικά	Καυσάεργια	C1	1,96	1,92	1,92	21,43	2,17	11,11
Τεχνικά	Μείωση φορτίου	C2	3,92	11,54	13,46	1,79	6,52	11,11
Τεχνικά	Αξιοπιστία παροχής καυσίμου	C3	5,88	13,46	11,54	5,36	4,35	11,11
Οικονομικά	Κόστος καυσίμου το 2030	C4	21,57	21,15	21,15	10,71	21,74	11,11
Οικονομικά	Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	C5	15,69	15,38	15,38	8,04	17,39	11,11
Οικονομικά	Κόστος επένδυσης	C6	17,65	17,31	17,31	8,04	15,22	11,11
Κοινωνικά	Κανονισμοί	C7	7,84	9,62	9,62	17,86	13,04	11,11
Κοινωνικά	Ασφάλεια-Ρίσκο προληπτικών μέτρων	C8	12,75	4,81	4,81	13,39	9,78	11,11
Κοινωνικά	Ασφάλεια-Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών	C9	12,75	4,81	4,81	12,75	9,78	11,11

4.4.2. Κατώφλια προτίμησης

Σύμφωνα με τη θεωρία που αναλύθηκε παραπάνω (βλ. 3.3.2) και τις τιμές των καυσίμων για το κάθε ποσοτικό κριτήριο, θα υπολογιστούν τα κατώφλια προτίμησης P. Για την αξιόπιστη λήψη των αποτελεσμάτων, ο χρήστης οφείλει αρχικά να ορίσει σε ποια κριτήρια είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση των τιμών τους και σε ποια η ελαχιστοποίηση. Να σημειωθεί πως με πράσινο και κόκκινο χρώμα ορίζονται αντίστοιχα οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του κάθε κριτηρίου. προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 29 Κατώφλια προτίμησης P

Καύσιμα	Κριτήρια								
	Καυσαέρια	Μείωση φορτίου	Αξιοπιστία παροχής καυσίμου	Κόστος καυσίμου το 2030	Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	Κόστος επένδυσης	Κανονισμοί	Ρίσκο προληπτικών μέτρων	Ρίσκο σε περιπτώσεις βλαβών/καταστροφών
Max/Min	min	max	max	min	min	min	max	max	max
Πράσινη Μεθανόλη	-99	16	2	24	6	5940	3	5	5
Γκρι Μεθανόλη	13	16	2	12	6	5940	3	5	5
LNG	-16	21	3	7	9	6405	4	3	4
Πράσινο Υδρογόνο	-100	8,5	3	36	11	9270	2	2	3
Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	66	8,5	2	16	11	9270	2	2	3
Πράσινη Αμμωνία	-94	12	3	35	10	6455	1	1	1
Μπλε Αμμωνία	40	12	2	27	10	6455	1	1	1
Κατώφλια προτίμησης P									
		Καυσαέρια	Μείωση φορτίου	Κόστος καυσίμου το 2030	Κόστος συντήρησης & λειτουργίας	Κόστος επένδυσης			
		23,71	1,79	4,14	0,71	475,71			

4.4.3. Αποτελέσματα

Η βασική ιδέα της εργασίας ήταν να προσδιοριστεί σε ποιο εναλλακτικό ναυτιλιακό καύσιμο θα συνέφερε περισσότερο η εφαρμογή του σε ένα πλοίο με γνώμονα τα σημαντικότερα κριτήρια και την ιδιότητα που κατέχει ο χρήστης. Αρχικά, έγιναν αναφορές ως προς τα ναυτιλιακά καύσιμα που ελήφθησαν υπόψη στην αξιολόγηση και ως προς τα πολυκριτηριακά προβλήματα και τις μεθοδολογίες επίλυσής τους. Για την επίτευξη του στόχου έγινε αναλυτική περιγραφή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή της PROMETHEE II όπως και της Simos η οποία συνέβαλε σημαντικά παράγοντας τις βαρύτητες προτίμησης των κριτηρίων. Στη συνέχεια έγινε αναφορά στα κριτήρια της αξιολόγησης παρουσιάζοντας ορισμένα στοιχεία και πληροφορίες που χαρακτηρίζουν τη σημαντικότητά τους. Τέλος, λαμβάνοντας τις τιμές των καυσίμων για το κάθε κριτήριο και υπολογίζοντας τις βαρύτητες προτίμησης, υπήρχε

πλέον η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση και να εξαχθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται παρακάτω (βλ. Πίνακας 30,

Πίνακας 31 και Εικόνα 14).

Η κατάταξη των καυσίμων βασίστηκε στις συνολικές ροές «Φ» που παρήχθησαν μέσω της PROMETHEE II για κάθε ένα από τα σενάρια που ελήφθησαν υπόψη (βλ. Πίνακας 30). Στη συνέχεια κατεγράφησαν οι ποσότητες εμφάνισης των καυσίμων στη κάθε βαθμίδα της κατάταξης, έτσι ώστε να παραχθούν βασικά συμπεράσματα (βλ.

Πίνακας 31). Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τον Πίνακας 30, δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα αράχνης (βλ. Εικόνα 14) κατά το οποίο παρατηρείται μεγάλη απόκλιση μεταξύ των γκρι/πράσινη μεθανόλη και LNG με τα υπόλοιπα καύσιμα.

Πίνακας 30 Αποτελέσματα αξιολόγησης / κατάταξη καυσίμων σύμφωνα με τις συνολικές ροές Φ

RANK	Πλοιοκτίητες		Παραγωγοί καυσίμων	
		Φ		Φ
1	Γκρι Μεθανόλη	0,6551	LNG	0,6035
2	Πράσινη Μεθανόλη	0,5227	Γκρι Μεθανόλη	0,5238
3	LNG	0,5173	Πράσινη Μεθανόλη	0,3941
4	Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	-0,3419	Πράσινη Αμμωνία	-0,2749
5	Μπλε Αμμωνία	-0,418	Μπλε Αμμωνία	-0,3491
6	Πράσινη Αμμωνία	-0,4339	Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	-0,4155
7	Πράσινο Υδρογόνο	-0,5012	Πράσινο Υδρογόνο	-0,4819
RANK	Κατασκευαστές κινητήρων		Κυβερνητικές αρχές	
		Φ		Φ
1	LNG	0,6099	Πράσινη Μεθανόλη	0,5706
2	Γκρι Μεθανόλη	0,543	LNG	0,4596
3	Πράσινη Μεθανόλη	0,4133	Γκρι Μεθανόλη	0,425
4	Πράσινη Αμμωνία	-0,2909	Πράσινο Υδρογόνο	-0,1275
5	Μπλε Αμμωνία	-0,3427	Πράσινη Αμμωνία	-0,3093
6	Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	-0,4219	Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	-0,4298
7	Πράσινο Υδρογόνο	-0,5107	Μπλε Αμμωνία	-0,5886
RANK	Σενάριο συνδυασμού		Σενάριο ισότητας	
		Φ		Φ
1	Γκρι Μεθανόλη	0,6468	LNG	0,5232
2	LNG	0,5717	Πράσινη Μεθανόλη	0,4976
3	Πράσινη Μεθανόλη	0,5154	Γκρι Μεθανόλη	0,4619
4	Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	-0,3502	Πράσινη Αμμωνία	-0,2653
5	Μπλε Αμμωνία	-0,4129	Πράσινο Υδρογόνο	-0,2768
6	Πράσινη Αμμωνία	-0,4449	Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	-0,4623
7	Πράσινο Υδρογόνο	-0,5259	Μπλε Αμμωνία	-0,4783

Πίνακας 31 Ποσότητες εμφάνισης των καυσίμων στις βαθμίδες της κατάταξης

RANK	LNG	Γκρι Μεθανόλη	Πράσινη Μεθανόλη	Πράσινη Αμμωνία	Μπλε Αμμωνία	Γκρι/Μπλε Υδρογόνο	Πράσινο Υδρογόνο
1	3	2	1	0	0	0	0
2	2	2	2	0	0	0	0
3	1	2	3	0	0	0	0
4	0	0	0	3	0	2	1
5	0	0	0	1	4	0	1
6	0	0	0	2	0	4	0
7	0	0	0	0	2	0	4



Εικόνα 14 Διάγραμμα αράχνης συνολικών ρών Φ ανά σενάριο

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης και τις τελικές κατατάξεις των καυσίμων που παρήχθησαν ανά σενάριο, το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) αποτελεί την ιδανικότερη επιλογή σε σύγκριση με τα υπόλοιπα καύσιμα για τη δεδομένη χρονική στιγμή. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο και δικαιολογείται από το γεγονός πως το LNG βρίσκεται περισσότερο χρόνια στην αγορά και έχει εδραιωθεί σε μεγαλύτερο βαθμό έναντι των υπολοίπων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να έχουν πραγματοποιηθεί περισσότερες έρευνες και οι κανονισμοί να είναι λιγότερο αυστηροί καθώς είναι ένα καύσιμο που έχει χρησιμοποιηθεί και ελεγχθεί σε πραγματικές συνθήκες. Επίσης, το χαμηλό κόστος καυσίμου έπαιξε σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση καθώς στα περισσότερα σενάρια κατείχε το μεγαλύτερο ποσοστό βαρύτητας.

Στη δεύτερη και τρίτη θέση της κατάταξης, βρέθηκαν η γκρι και πράσινη μεθανόλη αντίστοιχα. Και τα δύο αυτά καύσιμα κατείχαν τις καλύτερες τιμές όπως και στο LNG, στα τέσσερα από τα εννιά κριτήρια. Ο λόγος κατά τον οποίο η μεθανόλη δεν βρέθηκε στη πρώτη θέση της κατάταξης είναι πως τα ποσοστά βαρύτητας των κριτηρίων στις οποίες κατείχε τις καλύτερες τιμές, ήταν χαμηλότερα από τα αντίστοιχα του LNG. Η γκρι μεθανόλη είχε χαμηλότερο κόστος καυσίμου έναντι της πράσινης αλλά η πράσινη είχε μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης των GHG.

Στα περισσότερα σενάρια το κόστος καυσίμου διαθέτει ισχυρότερο ποσοστό βαρύτητας προτίμησης έναντι των καυσαερίων και λόγω αυτού του γεγονότος η γκρι μεθανόλη βρίσκεται στη δεύτερη θέση της κατάταξης και η πράσινη στη τρίτη. Οι βασικές αιτίες κατά τις οποίες η μεθανόλη βρίσκεται τόσο υψηλά στη κατάταξη είναι οι ιδιότητές της, οι οποίες οδηγούν στην εύκολη διαχείρισή της και στις χαμηλές απαιτήσεις αποθήκευσης.

Στη τέταρτη θέση της κατάταξης βρέθηκε η πράσινη αμμωνία η οποία στα δύο σενάρια ρίσκου και κανονισμών κατείχε τις χαμηλότερες επιδόσεις, και στην αξιοπιστία παροχής καυσίμου τις υψηλότερες μαζί με το LNG και το πράσινο υδρογόνο. Στα υπόλοιπα κριτήρια είχε μέτριες επιδόσεις. Η επικινδυνότητα χρήσης σε συνδυασμό με τους υπό ανάπτυξη κανονισμούς, οδήγησαν το συγκεκριμένο καύσιμο σε πτώση θέσεων στη κατάταξη αλλά οι ουδέτερες επιδόσεις του στα υπόλοιπα κριτήρια δεν του επέτρεψαν να βρεθεί στις τελευταίες θέσεις.

Στη πέμπτη και έκτη θέση της κατάταξης βρέθηκαν το γκρι/μπλε υδρογόνο και η μπλε αμμωνία αντίστοιχα. Οι διαφορές τους ως προς τις επιδόσεις τους ήταν ελάχιστες με αποτέλεσμα και οι θέσεις που κατέλαβαν στη κατάταξη να κρίθηκαν στις λεπτομέρειες. Ειδικότερα, η μπλε αμμωνία είχε τις χαμηλότερες επιδόσεις σε τέσσερα κριτήρια ενώ το γκρι/μπλε υδρογόνο σε πέντε. Και σε αυτή τη περίπτωση έπαιξαν σημαντικό ρόλο οι βαρύτητες των κριτηρίων καθώς στο κριτήριο του κόστους καυσίμου που είχαν ουδέτερες επιδόσεις, το γκρι/μπλε υδρογόνο είχε λίγο υψηλότερες. Μπορεί το γκρι/μπλε υδρογόνο να μην είναι τόσο οικολογικό όσο η μπλε αμμωνία αλλά δεν υπάρχει τόσο μεγάλο ρίσκο κινδύνου κατά τη χρήση του και οι κανονισμοί είναι λίγο πιο επιεικείς.

Τέλος, στη τελευταία θέση της κατάταξης βρέθηκε το πιο οικολογικό καύσιμο, το πράσινο υδρογόνο. Το παρόν καύσιμο σε όλα τα κριτήρια του κόστους κατείχε τις χαμηλότερες επιδόσεις καθώς επίσης και στο κριτήριο μείωσης φορτίου. Το υψηλό κόστος οφείλεται στο ότι οι τεχνολογίες παραγωγής του και συντήρησής του, είναι καινούργιες και δεν έχουν ακόμα εξελιχθεί ώστε να γίνει το καύσιμο ανταγωνιστικό σε αυτούς τους τομείς. Επίσης, εξαιτίας της χαμηλής ενεργειακής του πυκνότητας και των μηχανισμών που απαιτούνται για τη συντήρησή του σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες και πιέσεις, έφεραν το πράσινο υδρογόνο στη τελευταία θέση όσον αφορά το κριτήριο μείωσης φορτίου.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και προτάσεις

5.1. Συμπεράσματα

Η ναυτιλία συνεχώς εξελίσσεται και η ανάγκη για αποδοτικότερα πράσινα εναλλακτικά καύσιμα αυξάνεται. Οι νέοι κανονισμοί, οι εκτιμήσεις κόστους των καυσίμων για το 2030 και οι έρευνες που έχουν διεξαχθεί και συνεχίζουν να πραγματοποιούνται αποτελούν αποδεικτικά στοιχεία την εν λόγω εξέλιξης. Είναι γνωστό πως ο ανταγωνισμός είναι μεγάλος στον κλάδο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει χώρος για λάθος επιλογές. Συγκεκριμένα, η πολυκριτηριακή αξιολόγηση εξασφαλίζει στο χρήστη πως η απόφαση που θα πάρει, θα είναι η ιδανικότερη ως προς το πρόβλημα που είχε εμφανιστεί.

Η πολυκριτηριακή αξιολόγηση αποτελεί ένα διαχρονικό εργαλείο επίλυσης ζητημάτων πολλαπλών παραμέτρων και η γνώση αυτής της μεθοδολογίας μπορεί να διευκολύνει τη ζωή του χρήστη σε επαγγελματικό και όχι μόνο επίπεδο. Τέλος, διαθέτουν πολύ σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση τα δεδομένα που θα εισαχθούν καθώς μια μικρή αλλαγή σε αυτά θα μπορούσε να οδηγήσει σε πλήρως διαφορετικά αποτελέσματα. Οπότε συνιστάται ιδιαίτερη προσοχή και ενδεδειγμένη αξιόπιστη έρευνα στο στάδιο συλλογής των δεδομένων.

5.2. Προτάσεις

Στη παρούσα ενότητα θα δοθούν ορισμένες προτάσεις πάνω στα θέματα των πολυκριτηριακών αξιολογήσεων και των ναυτιλιακών καυσίμων. Βασικός σκοπός είναι διεγερθεί το ενδιαφέρον του αναγνώστη ώστε να παροτρυνθεί, να προβληματιστεί και να ερευνήσει επιπρόσθετες ενότητες των εν λόγω θεμάτων.

Μια εναλλακτική πηγή ενέργειας για τη πρόωση των πλοίων είναι η πυρηνική. Ήδη χρησιμοποιείται με επιτυχία σε παγοθραυστικά και σε πλοία του πολεμικού ναυτικού όπως αεροπλανοφόρα και υποβρύχια. Το ενδιαφέρον για τη πυρηνική ενέργεια συνεχώς αυξάνεται με χώρες όπως η Αμερική, η Ρωσία, το Ηνωμένο βασίλειο, η Κίνα, η Γαλλία και η Ινδία να έχουν ήδη στη κατοχή τους πυρηνοκίνητα πλοία. Το βασικό ζήτημα που αξίζει να ερευνηθεί είναι το θέμα της ασφάλειας καθώς αυτός είναι και ο βασικός λόγος κατά τον οποίο δεν έχει εδραιωθεί και στους υπόλοιπους τύπους πλοίων η πυρηνική ενέργεια (Bayraktar and Pamik 2022).

Τα αιολικά και ηλιακά συστήματα ενέργειας χρησιμοποιούνται ήδη στη ναυτιλία και αποτελούν δύο υποσχόμενες λύσεις όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών καυσαερίου. Τα υβριδικά αυτά συστήματα πρόωσης επίσης προσφέρουν τη δυνατότητα εξοικονόμησης καυσίμων. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι το κόστος εγκατάστασης αλλά αναμένεται τα επόμενα χρόνια να μειωθεί (Nyanya, et al. 2021). Τα αποτελέσματα μιας πολυκριτηριακής αξιολόγησης μεταξύ των μεθόδων που αναφέρθηκαν θα παρουσίαζαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς θα μπορούσε να συμπεραθεί ποια μέθοδο και για ποιους λόγους θα συνέφερε περισσότερο η εφαρμογή της σε ένα πλοίο.

Στη περίπτωση που υπήρχαν περισσότερα στοιχεία για τα κριτήρια που δεν ελήφθησαν υπόψη στην αξιολόγηση, θα παρουσίαζε ιδιαίτερη σημασία αν χρησιμοποιούνταν και εκείνα καθώς θα δινόταν η δυνατότητα να παρατηρηθεί αν τελικά θα υπήρχε κάποια αλλαγή στη κατάταξη των καυσίμων και σε ποιο σενάριο.

Όσον αφορά τις πολυκριτηριακές μεθόδους, η ELECTRE III θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ίδιου τύπου προβλήματα όπως με εκείνα της PROMETHEE II καθώς ανήκουν στην ίδια κατηγορία μεθόδων και χρησιμοποιούν τα ίδια δεδομένα και παραμέτρους για την εφαρμογή τους. Η βασική διαφορά της ELECTRE III εντοπίζεται στον αλγόριθμο που εφαρμόζεται (Polatidis, Haralambidou and Haralambopoulos 2015). Τέλος, θα ήταν πολύτιμη η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών μεθόδων καθώς θα δινόταν η δυνατότητα εντοπισμού των

ομοιοτήτων και διαφορών τους και συγχρόνως ο χρήστης θα μπορούσε να καταλήξει σε πιο αξιόπιστα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 6. Βιβλιογραφία

- ABS (2). 2021. *METHANOL AS MARINE FUEL*. 26 February. <https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2021/02/Sustainability-Methanol-as-Marine-Fuel.pdf>.
- ABS. 2021. «Maritime Cyprus.» *Maritime Cyprus*. June. Πρόσβαση October 3, 2022. <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/06/ABS-hydrogen-as-marine-fuel.pdf>.
- Ampah, Jeffrey Dankwa, Abdulfatah Abdu Yusuf, Sandylove Afrane, Chao Jin, και Haifeng Liu. 2021. «Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector.» *Journal of Cleaner Production*, 20 October. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128871.
- Bahtić, Fatima. 2021. *Offshore Energy*. 26 July. Πρόσβαση Σεπτέμβριος 15, 2022. <https://www.offshore-energy.biz/worlds-1st-hydrogen-powered-ferry-delivered/>.
- Bayraktar, M., και M. Pamik. 2022. «Nuclear power as an alternative energy in the future based on icebreakers.» *Nuclear Engineering and Technology*, 7 July. doi:<https://doi.org/10.1016/j.net.2022.10.033>.
- Behzadian, Majid, R.B. Kazemzadeh, A. Albadvi, και M. Aghdasi. 2010. «PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications.» *European Journal of Operational Research*, 1 January: 198-215. doi:10.1016/j.ejor.2009.01.021.
- Brans, Jean - Pierre, και Yves De Smet. 2016. *PROMETHEE Methods*. Τόμ. 233, σε *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 187 - 219. New York. doi:10.1007/978-1-4939-3094-4_6.
- Bureau Veritas. n.d. *AN INSIDE LOOK AT METHANOL AS FUEL*. Πρόσβαση November 1, 2022. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/inside-look-methanol-fuel>.
- Carvalho, Francielle, Eduardo Müller Casseres, Matheus Poggio, Tainan Nogueira, Clarissa Fonte, Huang KenWei, Joana Portugal Pereira, Pedro R.R. Rochedo, Alexandre Szklo, και Roberto Schaeffer. 2021. «Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil.» *Journal of Cleaner Production*, 1 December. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129385>.
- Cheliotis, Michail, Evangelos Boulougouris, Nikoletta L Trivyza, Gerasimos Theotokatos, George Livanos, George Mantalos, Athanasios Stubos, Emmanuel Stamatakis, και

- Alexandros Venetsanos. 2021. «Review on the Safe Use of Ammonia Fuel Cells in the.» *Energies*, 26 April. doi:<https://doi.org/10.3390/>.
- Chetkovich, Torborg. 2021. *CapMan*. 8 September. Πρόσβαση Σεπτέμβριος 15, 2022. <https://www.capman.com/2021/09/29656/>.
- DNV (2). 2022. *Smells like sustainability: Harnessing ammonia as ship fuel*. 8 February. <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Harnessing-ammonia-as-ship-fuel.html>.
- DNV GL AS Maritime. 2019. «Comparison of Alternative Marine Fuels.» *Alternative marine fuels study*. Høvik, 5 July. https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2019/09/SEA-LNG-DNV-GL-Comparison-of-Alternative-Marine-Fuels-2019_09.pdf.
- DNV. 2021. *LNG as marine fuel*. 5 December. <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/>.
- Donnelly, Jack. 2021. *What is green and blue hydrogen for the ports industry?* 12 May. <https://www.porttechnology.org/news/what-is-green-and-blue-hydrogen-for-the-ports-industry/>.
- Figueira, José, και Bernard Roy. 2002. «Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure.» *European Journal of Operational Research*, 1 June: 317-326. doi:[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00370-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00370-8).
- Gebre, Sintayehu Legesse, Dirk Cattrysse, και Jos Van Orshoven. 2021. «Multi-Criteria Decision-Making Methods to Address Water Allocation Problems: A Systematic Review.» *Water*, 7 January. doi:10.3390/w13020125.
- Hansson, Julia, Selma Brynolf, Erik Fridell, και Mariliis Lehtveer. 2020. «The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis.» *Sustainability*, 15 March. doi:<https://doi.org/10.3390/su12083265>.
- Hansson, Julia, Stina Månsson, Selma Brynolf, και Maria Grahn. 2019. «Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders.» *Biomass and Bioenergy*, July: 159-173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008>.
- Herdzik, Jerzy. 2012. «Aspects of using LNG as a marine fuel.» *Journal of KONES*, 201-209.

- IMO-Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder. 2021. *Alternative Fuels and energy carriers for shipping*. March. doi:<https://greenvoyage2050.imo.org/workshop-packages/>.
- Laribi, Sofiane, και Emmanuel Guy. 2022. «Marine energy transition with LNG and electric batteries: a technological adoption analysis of Norwegian ferries.» *Maritime Business Review*, 14 March. doi:10.1108/MABR-11-2021-0086.
- Lindstad, Elizabeth Lindstad. 2021. *ALTERNATIVE MARINE FUELS IN LIGHT OF CARBON EMISSION REDUCTION TARGETS*. 2 April. <https://solvanship.no/wp-content/uploads/2021/10/Alternative-Fuel-PATHWAYS-Dr-Elizabeth-Lindstad-Chief-Scientist-2-Juni-002.pdf>.
- Lindstad, Elizabeth, Benjamin Lagemann, Agathe Rialland, Gunnar M. Gamlem, και Anders Valland. 2021. «Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels.» *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, December. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075>.
- LNG Prime Staff. 2022. *DNV: 13 LNG - powered vessels ordered in August*. 2 September. <https://lngprime.com/lng-as-fuel/dnv-13-lng-powered-vessels-ordered-in-august/60671/>.
- Luciana, Turcanu Andra, Carmen Gasparotti, και Eugen Rusu. 2021. «Green fuels - A new challenge for marine industry.» *Energy Reports*, September: 127-132. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.020>.
- Machaj, K., J. Kupecki, Z. Malecha, A. W. Morawski, M. Skrzypkiewicz, M. Stanclik, και M. Chorowski. 2022. «Ammonia as a potential marine fuel: A review.» *Energy Strategy Reviews*, November. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100926>.
- Nyanya, Mphatso N., Huy B. Vu, Alessandro Schonborn, και Aykut I. Olçer. 2021. «Wind and solar assisted ship propulsion optimisation and its application to a bulk carrier.» *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, October. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101397>.
- Polatidis, H., K. Haralambidou, και D. Haralambopoulos. 2015. «Multi-criteria Decision Analysis for Geothermal Energy: A Comparison Between the ELECTRE III and the PROMETHEE II Methods.» *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*. doi:<https://doi.org/10.1080/15567249.2011.565297>.

- Salakria, Mohammadreza, και Sa'id Golabi. 2021. «Liquefied Natrual Gas (LNG): Alternative Marine Fuel Restriction and Regulation Considerations,» *The Journal of Energy: Engineering & Management*, 44 - 59. doi:10.22052.10.4.44.
- Strantzali, Eleni, Konstantinos Aravossis, και Georgios A. Livanos. 2017. «Evaluation of future sustainable electricity generation alternatives: The case of a Greek island.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, September: 775-787. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.085>.
- Together in Safety. 2022. «Future Fuels Risk Assessment.» Risk Assessment. <https://togetherinsafety.info/wp-content/uploads/2022/06/Future-Fuels-Report.pdf>.