



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΑΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ”
(MSC IN OPERATIONS RESEARCH AND DECISION
MAKING) (ΠΔ 59 /2021, ΦΕΚ 145Α'/17.08.2021)

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

*Πολυκριτηριακή ανάλυση επιλογής εναλλακτικών καυσίμων,
στις θαλάσσιες μεταφορές, με στόχο τη βελτιστοποίηση των
εκπομπών αερίων ρύπων*



Νικόλαος Ε. Κοντάκης

Ιανουάριος 2024

- ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΗ ΚΕΝΗ -



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΑΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ”



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή

«Πολυκριτηριακή ανάλυση επιλογής εναλλακτικών καυσίμων, στις θαλάσσιες μεταφορές, με στόχο τη βελτιστοποίηση των εκπομπών αερίων ρύπων»

«Multi-criteria analysis of alternative fuel options, in maritime transportation, with the aim of optimizing gaseous pollutant emissions»

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Νικόλαος Ε. Κοντάκης

Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Φ. Ματσατσίνης

ΑΘΗΝΑ ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2024



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ”

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του Κοντάκη Ε. Νικόλαου (Α.Μ.: 2021018110)
εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής ΜΑΤΣΑΤΣΙΝΗΣ Νικόλαος (Επιβλέπων)

Καθηγητής ΔΑΡΑΣ Νικόλαος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ Νικόλαος Νικόλαος Παπαδάκης

- ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΗ ΚΕΝΗ -

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	6
Ευχαριστίες.....	8
Περίληψη.....	9
Abstract.....	10
Ευρετήριο Πινάκων.....	11
Ευρετήριο Σχημάτων	12
Ευρετήριο Διαγραμμάτων	13
Πίνακας Συντμήσεων	14
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	16
1.1 Ορισμός του προβλήματος	16
1.2 Σκοπός της εργασίας	16
1.3 Μεθοδολογία - Πλαίσιο υλοποίησης έρευνας.....	17
1.4 Διάρθρωση της διατριβής.....	21
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό υπόβαθρο - Μέρος 1ο . Το κανονιστικό πλαίσιο του ναυτιλιακού καύσιμου	23
2.1 Ναυτιλιακά καύσιμα.....	23
2.1.1 Ιστορική αναδρομή.....	23
2.1.2 Υφιστάμενοι τύποι ναυτιλιακών καυσίμων	25
2.1.3 Ιδιότητες ναυτιλιακών καυσίμων	30
2.2 Θεσμικό νομοθετικό πλαίσιο IMO - Υφιστάμενη κατάσταση.....	32
2.2.1 Παράρτημα VI της MARPOL.....	36
2.2.2 Κανονισμός IMO 2020 και ζητήματα συμμόρφωσης.....	39
2.2.3 Μέσα και εργαλεία μέτρησης για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους	41
2.2.3.1 Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI).....	41
2.2.3.2 Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP).....	42
2.2.3.3 Επιχειρησιακός Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης (EEOI).....	43
2.2.3.4 Δείκτης σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης πλοίων (EEXI).....	44
2.2.3.5 Δείκτης Έντασης Άνθρακα (CII).....	45
2.2.3.6 Σύστημα Συλλογής Δεδομένων (DCS)	45
2.3 Η στοχοθεσία της Ευρώπης για μείωση των εκπομπών αερίων GHG	46
2.3.1 Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών E.E. (EU ETS).....	47
2.3.2 Μηχανισμός Συνοριακής Προσαρμογής Άνθρακα (CBAM)	49
2.3.3 Μηχανισμός FuelEU Maritime.....	51
2.4 Εναλλακτικές μορφές καυσίμων	52
2.4.1 Υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas - LNG)	54
2.4.2 Υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (Liquefied Petroleum Gas LPG).....	56
2.4.3 Υδρογόνο - H ₂ (Hydrogen).....	56

2.4.4 Αμμωνία - NH ₃ (Ammonia).....	58
2.4.5 Μεθανόλη - CH ₃ OH (Methanol)	60
2.4.6 Βιοκαύσιμα (Biofuels) Βιοντήζελ (Biodiesel), Βιοαιθανόλη, Βιοαέριο(Biogas), Βιομεθανόλη	63
2.5 Συγκριτική παρουσίαση εναλλακτικών καυσίμων	66
Κεφάλαιο 3. Θεωρητικό υπόβαθρο - Μέρος 2ο . Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων	72
3.1 Εισαγωγή	72
3.2 Ιστορική αναδρομή	74
3.3 Πολυκριτηριακή Ανάλυση & Επιχειρησιακή Έρευνα	75
3.4 Μεθοδολογικό πλαίσιο πολυκριτηριακής ανάλυσης	77
3.5 Επιλογή κατάλληλης μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης	79
3.5.1 Επιλογή κριτηρίων και απόδοση βαρών	85
3.6 Μέθοδος UTASTAR.....	88
3.6.1 Αλγόριθμος UTASTAR.....	92
Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία - Μέρος 1ο . Εναλλακτικές επιλογές καυσίμων & κριτήρια επιλογής.....	94
4.1 Μεθοδολογία επίλυσης προβλήματος	94
4.2 Εναλλακτικές επιλογές καυσίμου	96
4.3 Κριτήρια επιλογής εναλλακτικών καυσίμων	96
Κεφάλαιο 5. Μεθοδολογία - Μέρος 2ο . Εφαρμογή πολυκριτηρίας μεθόδου και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	105
5.1 Σενάριο μελέτης περίπτωσης.....	105
5.2 Διαδικασία επίλυσης προβλήματος	106
5.3 Υπολογισμός UTASTAR - Συναρτήσεις αξίας - Βάρη κριτηρίων	111
5.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων	113
Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα	125
6.1 Διαπιστώσεις.....	125
6.2 Προτάσεις - προοπτικές.....	131
Βιβλιογραφία.....	136
Παράρτημα Ι.....	152
Παράρτημα ΙΙ	158
Παράρτημα ΙΙΙ.....	159
Παράρτημα ΙV	160
Παράρτημα V.....	163
Παράρτημα VI.....	184

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ανάθεσης εργασίας από το Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων και της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, στο πλαίσιο Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά :

- τον επιβλέπων καθηγητή της ατομικής μου διατριβής, κο. Ματσατσίνη Φρ. Νικόλαο, Καθηγητή Πληροφοριακών Συστημάτων και Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων στη Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης (ΠΚ), για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας αλλά και για την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την εκπόνηση αυτής, καθώς και την καθηγήτρια και Επιστημονικά Υπεύθυνη του Γραφείου Υποστήριξης Διδασκαλίας & Μάθησης (ΓΡΑ.ΔΙ.Μ.) του Πολυτεχνείου Κρήτης Κρασαδάκη Γ. Ευαγγελία για την πολύτιμη βοήθειά της.

- την Ειδική Διατμηματική Επιτροπή (ΕΔΕ), την Συντονιστική Επιτροπή (ΣΕ), τις Γραμματείες των δυο σχολών και ιδιαιτέρως τον Διευθυντή του ΔΔΠΜΣ, πρ. Κοσμήτορα ΣΣΕ Καθηγητή Δρ. Νικόλαο Ιω. Δάρα, καθώς και τους υπόλοιπους καθηγητές, για την αгаστή συνεργασία και την εκτίμηση με την οποία μας περιέβαλλαν.

- τα επτά στελέχη ναυτιλιακής εταιρείας, κρατώντας την ανωνυμία τους, για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν για να εκφράσουν και αποτυπώσουν τις προτιμήσεις τους, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για αυτήν τη μελέτη.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω την έκφραση ευχαριστιών στην οικογένεια μου, που αποτέλεσαν ταυτόχρονα εμπνευστές, καθοδηγητές και συνοδοιπόροι στο όμορφο αυτό ακαδημαϊκό ταξίδι.

Περίληψη

Η ναυτιλιακή βιομηχανία θεωρείται από τους πιο κομβικούς και καίριους παράγοντες της παγκόσμιας οικονομίας, μεταφέροντας συντριπτικά το μεγαλύτερο ποσοστό αγαθών και προϊόντων, υπολογιζόμενο περίπου στο 80% με 90% του διεθνούς εμπορίου. Αν και ως βιομηχανία είναι η πιο αποδοτική σε μεταφορά φορτίου καυσίμων, έχει επικριθεί για την αρνητική συνεισφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση, περίπου 3% του συνολικού παγκόσμιου ποσοστού εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Επιπλέον, θεωρείται υπεύθυνη για την παραγωγή οξειδίων του θείου (SO_x) και οξειδίων του αζώτου (NO_x) με ποσοστό εκπομπών 5-10% και 15-30%, αντίστοιχα.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας (IMO) στο πλαίσιο ανάληψης ενεργειών αντιμετώπισης του φαινομένου έχει υιοθετήσει σχετικό ψήφισμα (κανονισμός «*IMO 2020*») στο πλαίσιο προσπάθειας οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου να μειωθούν τουλάχιστον στο μισό έως το 2050 από τις αντίστοιχες τιμές του 2008, ενώ ταυτόχρονα αγωνίζεται για τη σταδιακή κατάργησή τους. Από αρχές του 2020, ημερομηνία έναρξης και εφαρμογής του μέτρου μείωσης των εκπομπών CO_2 , η ναυτιλιακή κοινότητα μεταξύ άλλων οφείλει να επιλέξει εναλλακτικό είδος καυσίμου που θα χρησιμοποιεί η βιομηχανία της.

Έτσι κάθε ναυτιλιακή εταιρεία οφείλει μέσα από τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, την επιλογή κατάλληλου καυσίμου για τη μείωση των εκπομπών ρύπων από μια ποικιλία πιθανών εναλλακτικών καυσίμων με συγκεκριμένες ιδιότητες βάσει ποσοτικών και ποιοτικών κριτηρίων, που δύναται υπό προϋποθέσεις να χρησιμοποιηθούν, όπως το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG), τη Μεθανόλη, την Αμμωνία, το Υδρογόνο ή Βιοκαύσιμα, τροποποιώντας αντίστοιχα τις υφιστάμενες υποδομές ή επιλέγοντας τους κατάλληλους κινητήρες μέσω διαδικασίας παραγγελιών σε νεότευκτα πλοία.

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή αρχικά καταγράφεται η υφιστάμενη κατάσταση στο πεδίο και ορίζεται το πρόβλημα. Στη συνέχεια μοντελοποιείται και το πρόβλημα επιλύεται με χρήση της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων. Στην επίλυση του προβλήματος απόφασης εφαρμόζεται η μέθοδος UTASTAR, με στόχο την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων και επιλογή της καταλληλότερης για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στο τομέα της ναυτιλίας.

Λέξεις – Κλειδιά Ναυτιλιακό καύσιμο, εκπομπές ρύπων αερίων, CO_2 , ατμοσφαιρική ρύπανση, LNG, LPG, Μεθανόλη, Αμμωνία, Υδρογόνο, Βιοκαύσιμα, πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων, μέθοδος πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων UTASTAR

Abstract

The Shipping Industry is considered one of the most pivotal and key factors in the global economy, transporting overwhelmingly the largest percentage of goods and products, accounting for approximately 80% to 90% of international trade. Although as an industry it is the most efficient in transporting fuel cargo, it has been criticized for its negative contribution to air pollution, about 3% of the total global rate of carbon dioxide (CO_2) emissions. In addition, it is considered responsible for the production of sulfur oxides (SO_x) and nitrogen oxides (NO_x) with an emission rate of 5-10% and 15-30%, respectively.

The International Maritime Organization (IMO) as part of taking action to address the phenomenon has adopted a relevant resolution (the "IMO 2020" regulation) as part of an effort to reduce greenhouse gas emissions by at least half by 2050 from the corresponding values of 2008, while at the same time fights for their gradual abolition. From the beginning of 2020, the start and implementation date of the measure to reduce CO_2 emissions, the shipping community must, among other things, choose an alternative type of fuel to be used by its industry.

Thus, every shipping company must through the decision-making process, choose the appropriate fuel to reduce emissions from a variety of possible alternative fuels with specific properties based on quantitative and qualitative criteria, which may under certain conditions be used. The alternative fuels considered by decision makers are liquefied natural gas (LNG), liquefied petroleum gas (LPG), Methanol, Ammonia, Hydrogen or Biofuels, respectively modifying the existing infrastructure or choosing the appropriate engines through a process of ordering new ships.

In this Master's Thesis, the current situation in the field is initially recorded and the problem is defined. The problem is then modeled and solved using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). In solving the decision problem, the UTASTAR method is applied, with the aim of evaluating the alternative solutions and choosing the most suitable one to deal with air pollution in the shipping sector.

Keywords: Marine fuel, gas emissions, CO_2 , air pollution, LNG, LPG, Methanol, Ammonia, Hydrogen, Biofuels, Multi-Criteria Decision Analysis, UTASTAR method

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1	Στρατηγική μείωσης εκπομπών αερίων GHG του IMO	34
Πίνακας 2	Χρονοδιάγραμμα των πιο σχετικών εξελίξεων και τροποποιήσεων στο Παράρτημα VI MARPOL.....	35
Πίνακας 3	Παραρτήματα Σύμβασης MARPOL.....	37
Πίνακας 4	Δεδομένα του IMO (2015) αναφορικά με MARPOL 73/78.....	37
Πίνακας 5	Εφαρμογή EU MRV- EU ETS σε διάφορες κατηγορίες πλοίων.....	48
Πίνακας 6	Εφαρμογή EU MRV- EU ETS σε εκπομπές CO ₂ & GHGs.....	48
Πίνακας 7	Εφαρμογή EU MRV- EU ETS σε θαλάσσιες διαδρομές εντός - εκτός Ε.Ε.....	49
Πίνακας 8	Χαρακτηριστικά-ιδιότητες εναλλακτικών καυσίμων	68
Πίνακας 9	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εναλλακτικών καυσίμων..	71
Πίνακας 10	Επιστημονικές μέθοδοι και μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτήριας ανάλυσης.....	83
Πίνακας 11	Κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών καυσίμων και κατάταξη του αποφασίζοντα.....	90
Πίνακας 12	Καθορισμός τιμών, μονοτονίας & διαστημάτων	91
Πίνακας 13	Εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα προς αξιολόγηση	109
Πίνακας 14	Κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών καυσίμων	110
Πίνακας 15	Επιλογών / αποφάσεων εναλλακτικών καυσίμων.....	111
Πίνακας 16	Καθορισμός μονοτονίας, τύπου, ελάχιστης – μέγιστης τιμής, διαστημάτων.....	112
Πίνακας 17	Εξεύρεση Μ.Ο. βαρών κριτηρίων	122
Πίνακας 18	Εξεύρεση Μ.Ο. ολικής αξίας εναλλακτικών	123
Πίνακας 19	Πίνακας ολικής χρησιμότητας εναλλακτικών καυσίμων και τελικής κατάταξη ολικής χρησιμότητας εναλλακτικών καυσίμων.....	124

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1	Περιεκτικότητα συστατικών μίγματος εισόδου και εξόδου από μια ναυτική μηχανή.....	26
Σχήμα 2	Μίγμα καυσίμου για διάφορους τύπους σκαφών.....	29
Σχήμα 3	Τρέχουσες και υπό συζήτηση πιθανές ECA Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών από τον IMO.....	38
Σχήμα 4	Διαδικασία SEEMP μέσω τεσσάρων βημάτων.....	43
Σχήμα 5	Υπολογισμός EEDI και EEOI, και η σχέση μεταξύ τους.....	44
Σχήμα 6	Χρονική απεικόνιση μέτρων και δράσεων IMO.....	45
Σχήμα 7	Σύνδεση μεταξύ των DCS, CII και SEEMP Μέρους III.....	46
Σχήμα 8	Αποτύπωση ποσοστού εκπομπών, υλοποίησης εφαρμογής EU MRV- EU ETS στα ταξίδια και τα λιμάνια εντός/εκτός Ε.Ε.	49
Σχήμα 9	Λειτουργία Μηχανισμού Συνοριακής Προσαρμογής Άνθρακα (CBAM).....	51
Σχήμα 10	Στόχοι ροής μείωσης της έντασης των αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με το 2020.....	51
Σχήμα 11	Ηλεκτρική τροφοδότηση από ξηράς (OPS/ On-shore power supply) κατά τη διάρκεια ελλιμενισμού	52
Σχήμα 12	Παραγωγή πράσινων εναλλακτικών καυσίμων.....	63
Σχήμα 13	Επισκόπηση των βιοκαυσίμων, των οδών παραγωγής και των ομάδων βιομάζας-πρώτων υλών.....	65
Σχήμα 14	Τα εξεταζόμενα εναλλακτικά καύσιμα (LNG, LPG, H ₂ , NH ₃ , CH ₃ OH & Biofuels).....	67
Σχήμα 15	Βασικά βήματα μιας προσέγγισης ανάλυσης απόφασης πολλαπλών κριτηρίων.....	73
Σχήμα 16	Επισκόπηση της διαδικασίας MCDA / MCDM.....	74
Σχήμα 17	Μεθοδολογικό πλαίσιο πολυκριτηριακής ανάλυσης.....	78
Σχήμα 18	Μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτηριακής ανάλυσης.....	84

Ευρετήριο Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1	Εκπομπές CO_2 στη θαλάσσια δραστηριότητα	26
Διάγραμμα 2	Εκπομπές CO_2 από διαφορετικές πηγές θαλάσσιων	27
Διάγραμμα 3	Αριθμός κρατών μελών της ΕΕ που επικυρώνουν σύμβαση του IMO.....	33
Διάγραμμα 4	Εξέλιξη ορίων εκπομπών SO_x	39
Διάγραμμα 5	Εξέλιξη ορίων εκπομπών NO_x στο Tier I, II και III	39
Διάγραμμα 6	Χρονικός ορίζοντας υλοποίησης EU ETS.....	47
Διάγραμμα 7	Καμπύλη μονότονης παλινδρόμησης.....	89
Διάγραμμα 8	Κατανομή βαρών για τον 1 ^ο αποφασίζοντα.....	114
Διάγραμμα 9	Κατανομή βαρών για τον 2 ^ο αποφασίζοντα.....	114
Διάγραμμα 10	Κατανομή βαρών για τον 3 ^ο αποφασίζοντα.....	115
Διάγραμμα 11	Κατανομή βαρών για τον 4 ^ο αποφασίζοντα.....	115
Διάγραμμα 12	Κατανομή βαρών για τον 5 ^ο αποφασίζοντα.....	116
Διάγραμμα 13	Κατανομή βαρών για τον 6 ^ο αποφασίζοντα.....	116
Διάγραμμα 14	Κατανομή βαρών για τον 7 ^ο αποφασίζοντα.....	116
Διάγραμμα 15	Αποτύπωση προσθετικών συναρτήσεων αξίας των επτά αποφασιζόντων για το κριτήριο «Διαθέσιμη Υποδομή».....	118
Διάγραμμα 16	Αποτύπωση προσθετικών συναρτήσεων αξίας των επτά αποφασιζόντων για το κριτήριο «Λειτουργικό Κόστος».....	119
Διάγραμμα 17	Αποτύπωση προσθετικών συναρτήσεων αξίας των επτά αποφασιζόντων για τα περιβαλλοντικά κριτήρια.....	120
Διάγραμμα 18	Αποτύπωση προσθετικών συναρτήσεων αξίας των επτά αποφασιζόντων για τα κοινωνικά κριτήρια.....	121
Διάγραμμα 19	Μέσος όρος βαρών κριτηρίων	122
Διάγραμμα 20	Μέσος όρος ολικής αξίας εναλλακτικών.....	123

Πίνακας Συντμήσεων

Ακρωνύμιο	Περιγραφή ακρωνυμίου
CO_2	Carbon Dioxide
CH_4	Methane
CAPEX	Capital Expenditures
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCAI	Calculated carbon aromaticity index
CII	Carbon Intensity Index
CIMAC	Conseil International des Machines à Combustion - International Council on Combustion Engines
DCS	Data Collection System
DWT	Dead Weight Tonnes
ECA	Emission Control Area
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator
EEXI	Energy Efficiency Existing Ship Index
EIAPP	Engine International Air Pollution Prevention (Certificate)
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator
EU ETS	EU Emission Trade System
EU MRV	EU regulation on the Monitoring, Reporting, and Verification of carbon dioxide (CO_2) emissions from ships
GHG	Greenhouse Gas
HFO	Heavy Fuel Oil
IEE	Certificate International Energy Efficiency Certificate
IFO	Intermediate Fuel Oil

IMO	International Maritime Organization
ISO/PAS	International Organization for Standardization / Publicly Available Specification
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
LSFO	Low Sulphur Fuel Oil
MARPOL	Marine Pollution (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)
MCDA	Multiple-Criteria Decision Analysis
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MDO	Marine Diesel Oil
MEPC	Marine Environment Protection Committee
MOU	Memorandum of Understanding
NO_2	Nitrogen Dioxide
NO_x	Nitrogen Oxides
O_3	Ozone
OPEX	Operating Expense
OPRC	International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation
OR	Operational Research
PM	Particulate Matter
PSC	Port State Control
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SO_2	Sulphur Dioxide
SO_x	Sulphur Oxides

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Ορισμός του προβλήματος¹

Η μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ειδικότερα η εξάλειψη εκπομπών του άνθρακα στο τομέα της ναυτιλίας, αποτελεί σημαντική πρόκληση για την διατήρηση και βιωσιμότητα του περιβάλλοντος στα επόμενα χρόνια. Μέσω νομοθετικών πρωτοβουλιών^{2 3} έχει υπάρξει ένα πλαίσιο με χρονολογικό ορίζοντα υλοποίησης για όλους τους εμπλεκόμενους στην ναυτιλιακή κοινότητα και ιδιαίτερα για τις ναυτιλιακές εταιρείες οι οποίες έχουν στην κατοχή τους ή διαχειρίζονται πλοία.

Το ζητούμενο όπως προκύπτει είναι η μείωση των εκπομπών ρύπων, γεγονός που επιφέρει την αναζήτηση βιώσιμων προτάσεων, οι οποίες θα μπορέσουν να ανταποκριθούν άμεσα, βραχυπρόθεσμα αλλά και σε βάθος χρόνου αποτελώντας ιδανικές λύσεις για την ναυτιλία. Η αντικατάσταση του υφιστάμενου συμβατικού καυσίμου με εναλλακτικό καύσιμο το οποίο θα επιφέρει τα αιτούμενα αποτελέσματα για ένα βιώσιμο περιβάλλον, διαφαίνεται ως η καλύτερη πρόταση.

Η επιλογή του καυσίμου λειτουργίας των πλοίων, δεν είναι μια εύκολη διαδικασία δεδομένου ότι επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες και οφείλει να λάβει υπόψη της, κάθε φορά διαφορετικούς συντελεστές και τις ιδιαίτερες επικρατούσες συνθήκες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ερευνητές μέχρι και σήμερα δεν έχουν καταλήξει για το βέλτιστο θαλάσσιο καύσιμο του μέλλοντος.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Η εργασία πραγματεύεται το υφιστάμενο πρόβλημα της ναυτιλιακής βιομηχανίας, αναφορικά με την κατάλληλη επιλογή καυσίμου λειτουργίας των πλοίων, στο πλαίσιο μείωσης των εκπομπών αέριων ρύπων. Κύριο μέλημα είναι ο εντοπισμός και η καταγραφή του προβλήματος, η μοντελοποίηση του και η προσπάθεια επίλυσης

¹Καθορισμός του αντικειμένου: Μέρος της μεθοδολογίας μοντελοποίησης προβλημάτων λήψης αποφάσεων σύμφωνα με τον Roy, αναφορικά με το Επίπεδο 1 (§3.4 & §4.1 παρούσας εργασίας), (Roy,1985).

² IMO. Marine Environment/ Pollution Prevention. «Decarbonization and Clean air in shipping»

³ European Commission (2022). «New shipping fuel standards to reduce sulphur air pollutants in the Mediterranean by 80%»

του με χρήση της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων μέσω της μεθόδου UTASTAR.

Οι ναυτιλιακές εταιρείες και οι επενδυτές πρέπει να είναι σίγουροι μακροπρόθεσμα ότι τα περιουσιακά στοιχεία στα οποία επενδύουν δεν θα απαιτούν σημαντικές πρόσθετες επενδύσεις ενώ παράλληλα στόχος είναι οι δρώντες όπου εμπλέκονται να παραμένουν όσο το δυνατόν ανταγωνιστικοί οικονομικά.

Η προσδοκία του έργου είναι η υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης μελέτης, έχοντας βάση εκκίνησης την υφιστάμενη ακαδημαϊκή και βιομηχανική βιβλιογραφία, αναφορικά τόσο με την εμπορική, όσο και επιχειρησιακή βιωσιμότητα εναλλακτικών καυσίμων πλοίων. Η προσέγγιση της μελέτης είναι να εκτιμήσει με γνώμονα τους υφιστάμενους περιορισμούς πόσο καλά αποδίδει μια επιλογή εναλλακτικών καυσίμων σε ένα σύνολο παραμέτρων.

Το πρόβλημα που θα αντιμετωπίσει αυτή η εργασία προέρχεται από την ανάγκη να οδηγηθεί σε μια ορθή λήψη αποφάσεων για το σήμερα και το εγγύς μέλλον. Η πρόκληση που προσπαθεί να αντιμετωπίσει η έρευνα είναι η ανάγκη να λάβει μια ισορροπημένη απόφαση σχετικά με την επιλογή μιας προτεινόμενης μελλοντικής εναλλακτικής λύσης.

Το βασικό ερευνητικό ερώτημα που προκύπτει ως αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι : «Ποια είναι η ιδανική εναλλακτική επιλογή για βιώσιμα ναυτιλιακά καύσιμα;». Η λήψη μίας τεκμηριωμένης απόφασης είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, λαμβάνοντας υπόψη τους δρώντες και τα συμφέροντά τους στο ναυτιλιακό στερέωμα, τα πολλαπλά κριτήρια και τους εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν τις αποφάσεις, την αβεβαιότητα του μέλλοντος και ταυτόχρονα ότι η επιλεγείσα απόφαση θα διέπεται από νομιμότητα και θα διασφαλίζει τη βέλτιστη επιχειρηματική απόδοση.

1.3 Μεθοδολογία - Πλαίσιο υλοποίησης έρευνας

Σύμφωνα με τον Mouly⁴, μια έρευνα μπορεί να επιτυγχάνει το σκοπό της μέσα από τη συστηματική και συντονισμένη συλλογή, ανάλυση και ερμηνεία συλλεχθέντων στοιχείων – δεδομένων, για ένα ζήτημα ενδιαφέροντος με συγκεκριμένο πλαίσιο, επιδιώκοντας την αξιοπιστία στην επίλυσή του.

⁴ Mouly, George J., (1963). «*The Science of Educational Research*».

Η διαδικασία εκπλήρωσης μιας έρευνας μπορεί να βασίζεται σε στοιχεία και δεδομένα που συλλέγονται από τον ίδιο τον ερευνητή, αλλά μπορεί επίσης να είναι μια δευτερεύουσα μελέτη, η οποία είναι βασισμένη σε στοιχεία που έχουν ήδη συλλεχθεί από έτερο συντάκτη/ερευνητή, π.χ. προηγούμενων μελετών, μέσω βιβλιογραφίας, αρθρογραφίας ή από διαδικτυακές βάσεις. Ο στόχος είναι να επεκταθεί η βάση δεδομένων στην οποία εδράζεται η έρευνα, προκειμένου το τελικό αποτέλεσμα να είναι όσο το δυνατόν πιο λεπτομερές και αξιόπιστο.

Η παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε με συλλογή δεδομένων και στοιχείων από ερωτηματολόγια, βάσεις δεδομένων, από σχετική βιβλιογραφία καθώς και συζητήσεις με ανθρώπους προερχόμενους από τη ναυτιλιακή βιομηχανία αλλά και με επιστημονικό ανθρώπινο δυναμικό συναφούς αντικείμενου. Επομένως, μέσω της δευτερογενούς έρευνας έχουν ληφθεί υπόψη τελευταίες χρονολογικά μελέτες που έχουν στηριχθεί στους νομοθετικούς περιορισμούς και τις ναυτιλιακές οδηγίες του IMO και έχουν πραγματοποιηθεί με μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Η μελέτη⁵ των Khanh Q. Bui , Aykut I Olcer, Momoko Kitada και Fabio Ballini (2020), (στελεχών του πανεπιστημίου UiT The Arctic University της Νορβηγίας ο πρώτος και του παγκόσμιου ναυτιλιακού πανεπιστημίου οι υπόλοιποι), συμφώνως των προτιμήσεων των πλοιοκτητών, βραχυπρόθεσμα στρέφεται ξεκάθαρα ως επιλογή στα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και ακολουθεί η μεθανόλη. Οι πλυντρίδες (Scrubbers) και το LNG έρχονται ως τρίτη και τέταρτη επιλογή αντίστοιχα. Ωστόσο θέτει την εκτίμηση ότι, το μελλοντικό μείγμα καυσίμων που θα χρησιμοποιείται θα εξαρτηθεί από την επόμενη γενιά τεχνολογιών και μελλοντικών νέων εναλλακτικών καυσίμων που δεν έχουν συζητηθεί και δεν έχουν ενσωματωθεί ακόμη στην προτεινόμενη διαδικασία λήψης αποφάσεων της μελέτης.

Η μελέτη⁶ των Julia Hanssona, Stina Manssonc, Selma Brynolfa, Maria Grahna (2019) από πανεπιστήμια του Γκέτεμπορκ της Σουηδίας, διαπιστώνουν ότι με βάση τις απόψεις των πλοιοκτητών, των παραγωγών καυσίμων και των κατασκευαστών κινητήρων, το LNG κατατάσσεται στην υψηλότερη θέση, με το HFO δεύτερο, και έπεται η ορυκτή μεθανόλη ακολουθούμενη από τα βιοκαύσιμα. Αυτές οι κατατάξεις

⁵ Khanh Q. Bui et al. ,(2020). « *Selecting technological alternatives for regulatory compliance towards emissions reduction from shipping: An integrated fuzzy multi-criteria decision-making approach under vague environment*»

⁶ Hanssona J. et al. ,(2019). «*Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders*»

προέρχονται από την οικονομία, ιδίως την τιμή των καυσίμων, που είναι το κορυφαίο κριτήριο για αυτούς τους παράγοντες. Από την άλλη πλευρά, οι απόψεις των κυβερνητικών αρχών έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλότερη κατάταξη του ανανεώσιμου υδρογόνου, με δεύτερη τη μεθανόλη από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η μελέτη⁷ των Nikola Mandic, Helena Ukic Boljat, Toni Kekez και Lidija Runko Luttenberger (2021) από πανεπιστήμια του Σπλιτ και της Ριέκας της Κροατίας καταδεικνύει τη σημασία της γνώσης των περιορισμών και την ανάγκη της αποδοχής της ρεαλιστικής πραγματικότητας. Η εστίαση των αποτελεσμάτων της μελέτης δίνεται ακριβώς στην αναβάθμιση/κατασκευή συγκεκριμένων σημείων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στην ξηρά και των σημείων ανεφοδιασμού LNG. Στην τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, το υδρογόνο κέρδισε επίσης σχετικά υψηλές βαθμολογίες και από τις ομάδες ενδιαφερομένων, αλλά για παράδειγμα αυτό το καύσιμο δεν λαμβάνεται υπόψη για μεταφορά στον εθνικό σχεδιασμό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι και οι τρεις ερευνητικές προσεγγίσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της πολυκριτηριακής ανάλυσης (MCDA) και συγκεκριμένα η πρώτη με συνδυασμό των τεχνικών ασαφούς AHP και ασαφούς TOPSIS και οι δυο επόμενες με τη Διαδικασία Αναλυτικής Ιεραρχίας (AHP). Τα κριτήρια που χρησιμοποίησε η κάθε μέθοδος και τα βάρη που τους αποδόθηκαν, παρουσιάζονται στο Παράρτημα I, τα οποία είχαν ως αποτέλεσμα την τελική κατάταξη όλων των εναλλακτικών και τη δυνατότητα επιλογής της βέλτιστης απόφασης από τους εμπλεκόμενους.

Επιπλέον, κατά την εκπόνηση της εργασίας έχει ληφθεί υπόψη ότι η απαίτηση για καθαρές μεταφορές, επέφερε αλλαγές στις τεχνολογικές και επιχειρησιακές στρατηγικές της ναυτιλιακής βιομηχανίας υιοθετώντας ένα πλήθος καινοτομιών όπως:

- ❖ Βελτιστοποίηση της γάστρας εστιάζοντας στην ελαχιστοποίηση της αντίστασης και της τριβής μεταξύ νερού και γάστρας, μέσω επιστρώσεων και χρήσης επικαλύψεων μειώνοντας τη ρυπαρότητα της.

- ❖ Καθαρισμός του κύτους του πλοίου για την επίτευξη καλύτερης ολίσθησης και μείωση της τριβής.

⁷ Mandic N. et al. ,(2021). «*Multicriteria Analysis of Alternative Marine Fuels in Sustainable Coastal Marine Traffic*»

❖ Λίπανση του αέρα ως μέθοδος μείωσης της τριβής κύτους – υγρού στοιχείου και βελτίωση της ολίσθησης.

❖ Λείανση και αναβάθμιση της έλικας για την ανάκτηση όσο το δυνατόν περισσότερης περιστροφικής ενέργειας στη ροή.

❖ Μείωση της ταχύτητας (slow steaming) του πλοίου για εξοικονόμηση καυσίμου και ταυτόχρονη μείωση εκπομπών αερίων.

❖ Βελτιωτικές τροποποιήσεις κύριων κινητήρων τόσο σε θέματα διαφυγής όσο και υποδοχής νέων καυσίμων.

❖ Βελτίωση αυτόματου πιλότου προκειμένου οι κινήσεις του πλοίου να είναι ομαλές και ισορροπημένες, ιδίως όταν απαιτείται διόρθωση πλευσης ή αλλαγή πορείας.

❖ Ανάκτηση θερμότητας απορριμμάτων μέσω συστήματος το οποίο από την εξαγωγή των καυσαερίων επανακτάται η θερμική ενέργεια και μετατρέπεται σε ηλεκτρική, ενώ το υπολειπόμενο ποσό θερμότητας μπορεί περαιτέρω να αξιοποιηθεί για υπηρεσίες στο πλοίο (όπως ζεστό νερό και ατμός).

❖ Χρήση αιολικής, ηλιακής, κυματικής και πυρηνικής ενέργειας για πρόωση με τις αντίστοιχες σχεδιαστικές τροποποιήσεις επί πλοίου.

❖ Ηλεκτρική καθαρή πρόωση με χρήση μπαταριών.

❖ Διαδικασία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από την ξηρά (Cold ironing) ενώ τα ηλεκτροπαραγωγικά ζεύγη (γεννήτριες) είναι απενεργοποιημένα.

Τα παραπάνω μέτρα επιτυγχάνουν μεμονωμένα, είτε μικρή εξοικονόμηση κατανάλωσης καυσίμου και μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων, είτε αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου, αλλά σε κάθε περίπτωση δεν είναι ικανά από μόνα τους να μπορέσουν να ανταποκριθούν άμεσα στις νέες συνθήκες που έχουν

δημιουργηθεί και να φέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η συνύπαρξη κάποιων εξ' αυτών είναι θεμιτή, όμως το κόστος επένδυσης είναι τις περισσότερες φορές απαγορευτικό, χωρίς και πάλι να ικανοποιούν τις νομοθετικές δεσμεύσεις είτε γιατί η επίδραση τους είναι πάρα πολύ μικρή στο τελικό αποτέλεσμα, είτε γιατί βρίσκονται τεχνολογικά σε πολύ πρόωμη φάση.

Ως εκ' τούτου, και έχοντας ως δεδομένο ότι η πηγή του προβλήματος εντοπίζεται στα υφιστάμενα ναυτιλιακά συμβατικά καύσιμα από όπου και προέρχονται οι εκπομπές αερίων ρύπων, τα εναλλακτικά καύσιμα που εξετάζονται στη παρούσα εργασία, μπορούν να αποτελέσουν την κύρια λύση και να διαδραματίσουν βασικό ρόλο στον απώτερο στόχο της επίτευξης μείωσης των εκπομπών. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχοντας καταλήξει και χρησιμοποιώντας το κατάλληλο βιώσιμο εναλλακτικό καύσιμο μπορεί να επιτευχθεί απόλυτο ποσοστό μείωσης των εκπομπών επί πλοίου, πετυχαίνοντας τον απώτερο σκοπό και σηματοδοτώντας την πλήρη και καθολική αποδοχή του στην ναυτιλιακή αγορά.

Η εκπόνηση της διατριβής λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, την κλίμακα των επερχόμενων προκλήσεων, των εξελισσόμενων συνθηκών της αγοράς και του ρυθμιστικού τοπίου, προσπαθεί να εστιάσει στην επιλογή κατάλληλου εναλλακτικού καυσίμου, κάνοντας χρήση της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων μέσω της μεθόδου UTASTAR.

1.4 Διάρθρωση της διατριβής

Η δομή της εργασίας είναι διαρθρωμένη σε έξι κεφάλαια, μεταξύ των οποίων, το πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο στο οποίο βρισκόμαστε, όπου παρουσιάζεται το πρόβλημα, ο σκοπός της διατριβής, η μέθοδος σύνταξης που χρησιμοποιήθηκε και η διάρθρωση της. Στο δεύτερο και στο τρίτο κεφάλαιο εμπεριέχονται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας με παρουσίαση ορισμών και εννοιών, παράθεση ιστορικής αναδρομής καθώς και η αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης. Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο λαμβάνουν χώρα η μεθοδολογία της έρευνας, η περιγραφή κύριων και απαραίτητων δεδομένων αυτής, η εφαρμογή της χρησιμοποιούμενης πολυκριτηριακής μεθόδου, η ανάλυση των αποτελεσμάτων. Εν τέλει, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της έρευνας καθώς και προτάσεις για το εγγύς και το απώτερο μέλλον.

Συναφώς, το δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζει το κανονιστικό πλαίσιο του ναυτιλιακού καυσίμου και συγκεκριμένα ένα ιστορικό υπόβαθρο της εξέλιξης των

ναυτιλιακών καυσίμων, τους υφιστάμενους τύπους καυσίμων, τις ιδιότητές τους, το θεσμικό νομοθετικό πλαίσιο, το Παράρτημα VI της MARPOL, τον Κανονισμό IMO 2020, μέσα και εργαλεία του IMO για την μέτρηση των ατμοσφαιρικών ρύπων καθώς και τη συμπερίληψη της ναυτιλίας μέσω πρωτοβουλιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU ETS), στον Μηχανισμό Συνοριακής Προσαρμογής Άνθρακα καθώς και αναφορά στον μηχανισμό FuelEU Maritime. Ακολούθως, γίνεται αναλυτική αναφορά και συγκριτική παρουσίαση στις εναλλακτικές μορφές καυσίμων και ειδικότερα σε έξι εναλλακτικά καύσιμα που θα αποτελέσουν και τις ρεαλιστικές επιλογές για την επίλυση του προβλήματος μας, σήμερα και για το εγγύς μέλλον.

Στο τρίτο κεφάλαιο εκτίθενται, η έννοια της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων, η ιστορική αναδρομή, η διασύνδεση της επιχειρησιακής έρευνας και της πολυκριτηριακής ανάλυσης, το μεθοδολογικό πλαίσιο που ακολουθείται, η διαδικασία της επιλογής πολυκριτηριακής μεθόδου καθώς και οι επιστημονικές μέθοδοι και οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Επιπρόσθετα, αναλύεται η μέθοδος UTASTAR που θα ακολουθηθεί.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει την μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος, παρουσιάζοντας προσαρμοσμένα στη περίπτωση μας τα τέσσερα επίπεδα αυτής σύμφωνα με Roy. Ακολούθως, γίνεται συνοπτική αναφορά στις εναλλακτικές μορφές καυσίμων ως πηγή ενέργειας στη ναυτιλία και συγκεκριμένα στο υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), στο υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG), στο υδρογόνο (H_2), στην αμμωνία (NH_3), στην αιθανόλη (CH_3OH), στα Βιοκαύσιμα, καθώς και εισάγονται τα ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, γίνεται χρήση και εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR, μοντελοποιείται το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με τα δεδομένα και την αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών και των κριτηρίων, προβαίνοντας στην επίλυση του με τη χρήση της αναφερόμενης μεθόδου και αναλύοντας τα αποτελέσματα.

Το έκτο κεφάλαιο παρουσιάζει μια σύντομη περίληψη του υπό εξέταση θέματος, παρουσιάζοντας τα συμπεράσματα και τις διαπιστώσεις της διατριβής, για την τελική επιλογή ναυτιλιακού καυσίμου, παρέχοντας ταυτόχρονα προτάσεις και προοπτικές για το μέλλον.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό υπόβαθρο - Μέρος 1^ο .

Το κανονιστικό πλαίσιο του ναυτιλιακού καύσιμου

Στο δεύτερο κεφάλαιο εμπεριέχεται το πρώτο μέρος του θεωρητικού υπόβαθρου της εργασίας με παρουσίαση ορισμών και εννοιών, παράθεση ιστορικής αναδρομής, αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, καθώς και οι εναλλακτικές μορφές καυσίμου που προτείνονται.

2.1 Ναυτιλιακά καύσιμα

2.1.1 Ιστορική αναδρομή

Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, τα πλοία που χρησιμοποιούσαν πανιά εκμεταλλευόμενα την αιολική ενέργεια, άρχισαν να αντικαθίστανται από ατμόπλοια. Αργότερα, γύρω στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, τα μηχανοκίνητα πλοία που είχαν κινητήρες εσωτερικής καύσης χρησιμοποιήθηκαν κυρίως ως εμπορικά πλοία για τη μεταφορά φορτίων.

Η χρήση των κινητήρων Diesel ξεκίνησε στις αρχές του 1900 παίρνοντας το όνομά τους από τον ομώνυμο εφευρέτη και μηχανικό Rudolf Diesel. Ο πρώτος τετράχρονος ναυτικός κινητήρας με βαρύ καύσιμο τέθηκε σε λειτουργία τη δεκαετία του 1930. Με τον καιρό, οι ναυτιλιακές εταιρείες άρχισαν να επενδύουν περισσότερο στην μεταφορά φορτίων και με οικονομικά κριτήρια, επέλεξαν για ποντοπόρες θαλάσσιες διαδρομές τον δίχρονο κινητήρα, ο οποίος έγινε μεγαλύτερος, πιο ισχυρός και διάσημος.

Η χρήση βαρέος μαζούτ (HFO/Heavy Fuel Oil) έγινε πιο δημοφιλής τη δεκαετία του 1950 λόγω της εισαγωγής της υψηλής αλκαλικής λίπανσης κυλίνδρων, η οποία ήταν σε θέση να εξουδετερώσει τα οξέα που παράγονται από την υψηλή περιεκτικότητα σε θείο στο βαρύ μαζούτ.

Στη δεκαετία του 1960, τα πλοία με ναυτικούς κινητήρες που κατανάλωναν καύσιμο βαρύ μαζούτ έγιναν πιο δημοφιλή και αυξήθηκαν σε αριθμό, σε σύγκριση με τα ατμόπλοια. Τελικά, τον 21ο αιώνα, τα μηχανοκίνητα πλοία αντικατέστησαν σχεδόν όλα τα ατμόπλοια και απέκτησαν το 98% του παγκόσμιου στόλου.

Ο Βρετανικός Οργανισμός Προτύπων (BS MA 100) και το Διεθνές Συμβούλιο Μηχανών Καύσης (CIMAC/Conseil International de Machines à Combustion)⁸, το 1982, εξέδωσαν τις απαιτήσεις προδιαγραφών για καύσιμα πλοίων.

Από το 1987 έχει καθιερωθεί διεθνές πρότυπο: ISO 8217⁹, με σκοπό τον καθορισμό των απαιτήσεων στα καύσιμα κινητήρων ντίζελ σε πλοία, προτού των διαδικασιών επεξεργασίας (καθίζηση, φυγοκέντρωση, διήθηση), προκειμένου να παρέχονται οδηγίες στους ενδιαφερομένους, και στους δρώντες της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Σε τακτά χρονικά διαστήματα, το αναφερόμενο διεθνές πρότυπο υποβάλλεται σε διαδικασίες αναθεώρησης και επικαιροποίησης των προδιαγραφών, ώστε να ανταποκρίνονται στις τεχνολογικές αλλαγές στους κινητήρες, στις διαδικασίες επεξεργασίας του καυσίμου και στις περιβαλλοντικές εξελίξεις.

Το ISO 8217: 2017 λαμβάνει υπόψη τις αυξανόμενες απαιτήσεις της περιβαλλοντικής νομοθεσίας και επιτρέπει στα καύσιμα πλοίων να περιλαμβάνουν όχι μόνο υδρογονάνθρακες από αργό πετρέλαιο, άμμο πετρελαίου και σχιστολιθικό πετρέλαιο αλλά και υδρογονάνθρακες από συνθετικές ή ανανεώσιμες πηγές.

Η μείωση της μέγιστης περιεκτικότητας σε θείο των καυσίμων πλοίων, οδήγησε σε μια μετάβαση στη φύση των ναυτιλιακών καυσίμων και καθώς η αναθεώρηση του ISO 8217:2017 δεν ήταν δυνατή έως την 1η Ιανουαρίου 2020, αναπτύχθηκε το ISO/PAS 23263:2019¹⁰. Η εν λόγω προδιαγραφή αντιμετωπίζει ζητήματα ποιότητας καυσίμου δεδομένου του μέγιστου ορίου 0,50% θείου (S), από το 2020 και των ναυτιλιακών καυσίμων που διατίθενται στην αγορά.

Το ISO/PAS 23263:2019 εξετάζει γενικές εκτιμήσεις σχετικά με την περιεκτικότητα σε θείο και το σημείο ανάφλεξης των καυσίμων, την εφαρμογή του ISO 8217:2017 σε αυτά τα καύσιμα αλλά και ειδικές εκτιμήσεις που μπορεί να ισχύουν για ορισμένα από αυτά τα καύσιμα.

⁸ CIMAC, (1990)

https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/Recommendations/Recommendation_11.pdf

⁹ Fuel Standard for marine distillate fuels - Requirements for marine distillate fuels (1987)

<https://marine.wfscorp.com/sites/default/files/d7/documents/sites/default/files/ISO-8217-1987-Tables-1-amp-2-1.pdf>

¹⁰ ISO/PAS 23263:2019, Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.iso.org/standard/75113.html>

2.1.2 Υφιστάμενοι τύποι ναυτιλιακών καυσίμων¹¹

Η αγορά θαλάσσιων κινητήρων, αποτελείται από ένα πλήθος διαφορετικών τεχνολογιών κινητήρων για διάφορες ναυτιλιακές εφαρμογές και απαιτήσεις ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικούς κινητήρες με δίχρονους/τετράχρονους, μονού/διπλού καυσίμου, διαφορετικούς κύκλους καύσης, αποδοτικότητες, συστήματα καθαρισμού καυσαερίων και ανεφοδιασμό διαφορετικών καυσίμων.

Στη ποντοπόρο ναυτιλία χρησιμοποιούνται επί των πλείστων μεγάλου μεγέθους μηχανές Diesel ως κινητήρες πλοίων, οι οποίες λειτουργούν με διάφορα καύσιμα καθώς και ανάμιξη αυτών. Το είδος του καυσίμου στις μηχανές αυτές μπορεί να είναι από προϊόν αποστάξεως αργού πετρελαίου μέχρι κατάλοιπα από την απόσταξη του.

Η κύρια σύσταση που συναντάμε στα ναυτιλιακά καύσιμα περιέχει άνθρακα (C) και υδρογόνο (H). Η περιεκτικότητα του άνθρακα C στο πετρέλαιο κυμαίνεται από 84,9% έως 87,4%¹². Μια ναυτική μηχανή παράγει εκπομπές κυρίως άζωτου (N_2), οξυγόνου (O_2), υδρατμούς (H_2O) και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Σε μικρότερο ποσοστό οι εκροές περιέχουν NO_x , SO_x , μονοξείδιο του άνθρακα (CO), αιωρούμενα σωματίδια (PM) και άκαυστους υδρογονάνθρακες (H/C). Η παρουσία σε υψηλό ποσοστό θείου (S) στα καύσιμα είναι υπεύθυνη για την δημιουργία SO_x . Ομοίως το άζωτο (N_2) που υπάρχει στον ατμοσφαιρικό αέρα όταν εισάγεται στις ΜΕΚ δημιουργείται αντίδραση, προκαλώντας οξείδωση του αζώτου και ευθύνεται για την παρουσία οξειδίων του αζώτου (NO_x). Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) αποτελούν ένα μίγμα από οργανικές και ανόργανες ουσίες, περιέχοντας άνθρακα, αιθάλη, στάχτη, σωματίδια καυσίμου μη πλήρους καύσης, άκαυστο έλαιο λίπανσης, θειικά και υγρασία^{13 14}.

Σύμφωνα με ερευνητικές μελέτες^{15 16}, τα προϊόντα που εκρέουν κυρίως από τις τσιμινιέρες (καπνοδόχους) των πλοίων είναι θειικά σωματίδια και σωματίδια αιθάλης (καπνιά). Παρακάτω (Σχήμα 1) γίνεται παρουσίαση ενός ενδεικτικού ισοζυγίου ναυτικής μηχανής όπου παρουσιάζονται με δεδομένα η αναλογία αέρα - καυσίμου και

¹¹ Παπαευαγγέλου Τ. (2022). «Καύσιμα - Λιπαντικά».

¹² MEPC, (2014)

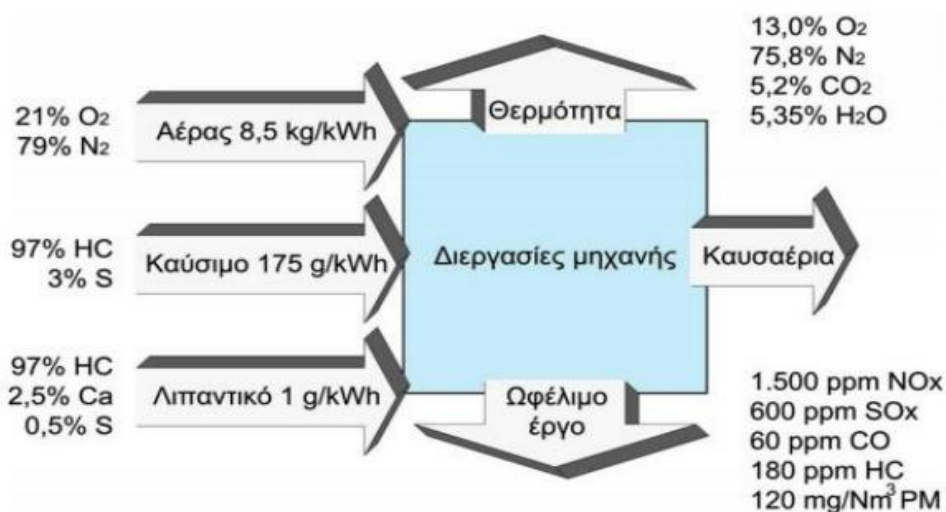
¹³ Vermeire Monique B., (2021) «Everything you need to know about marine fuels»

¹⁴ Καλλίγερος Στ. κ.α., (2010). «Ναυτιλιακά Καύσιμα Προδιαγραφές Προοπτικές».

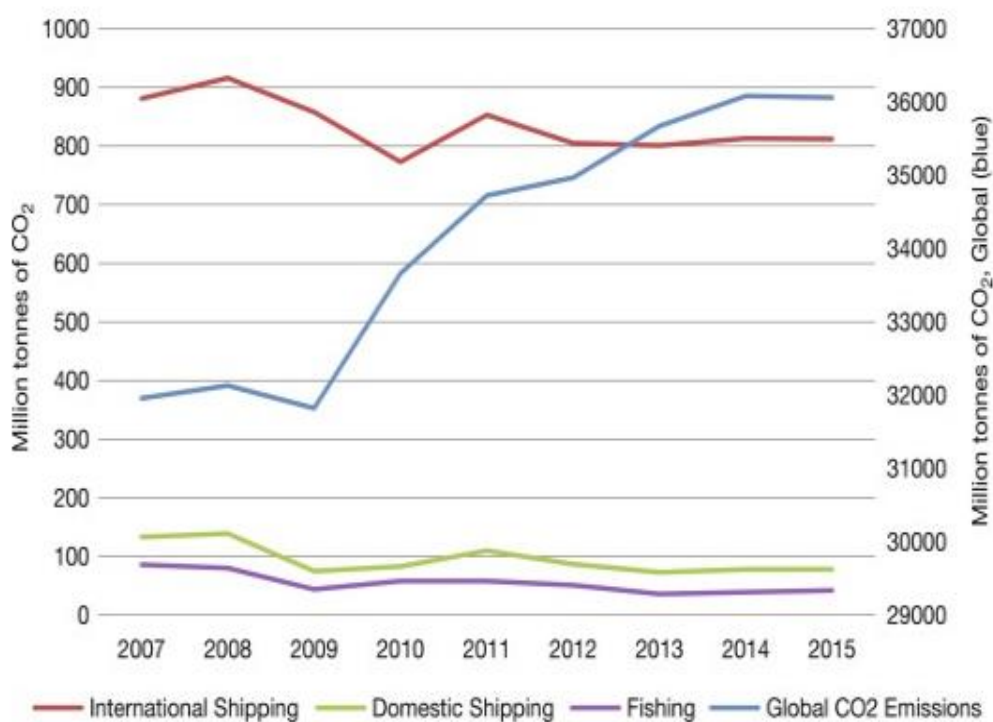
¹⁵ Agrawal et al. (2008). «In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean-going container vessel»

¹⁶ Moldanova et al. (2009). «Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine»

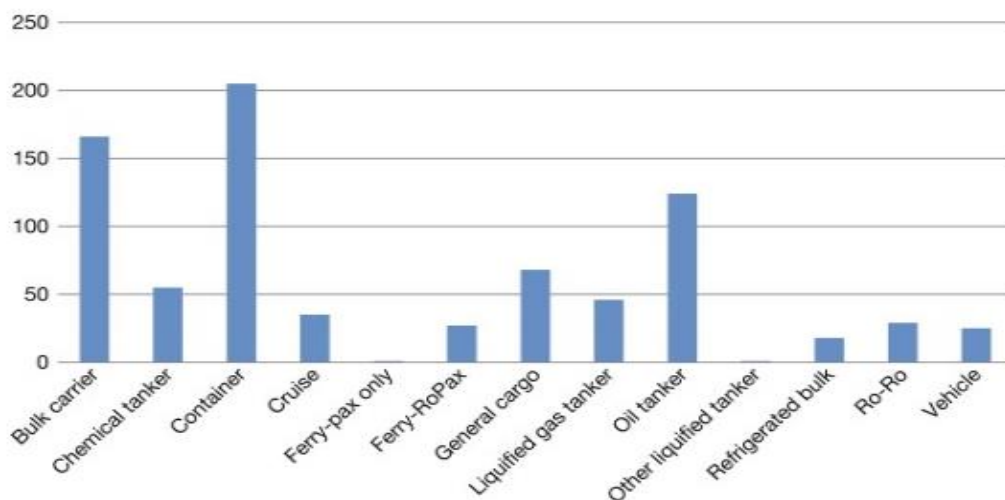
λιπαντικού κατά τη φάση της εισροής στον κινητήρα καθώς και η περιεκτικότητα των καυσαερίων κατά την φάση της εκροής.



Σχήμα 1. Περιεκτικότητα συστατικών μίγματος εισόδου και εξόδου από μια ναυτική μηχανή (Man & Diesel, 2004)



Διάγραμμα 1. Εκπομπές CO₂ στη θαλάσσια δραστηριότητα. (Πηγή: Olmer, N., et al. (2017). «Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την παγκόσμια ναυτιλία, 2013–2015».)



Διάγραμμα 2. Εκπομπές CO₂ από διαφορετικές πηγές θαλάσσιων μεταφορών. (Πηγή: Smith T., et al. (2014b). «Παγκόσμιες τάσεις καυσίμων πλοίων 2030»)

Τα συμβατικά καύσιμα όπου ο κλάδος της ναυτιλίας χρησιμοποιεί σε διάφορους τύπους και μεγέθη μηχανών είναι τα εξής:

❖ **Βαρύ μαζούτ - Heavy Fuel Oil (HFO).** Το καύσιμο αυτό, βαρύ μαζούτ όπως είναι η ονομασία του, είναι αποτέλεσμα κατάλοιπων της διύλισης του αργού πετρελαίου, η ποιότητα του οποίου διαφέρει αναλόγως της διαδικασίας διύλισης που λαμβάνει χώρα και της σύνθεσης του ακατέργαστου πετρελαίου που γίνεται χρήση. Το καύσιμο HFO φέρει χαρακτηριστικά μεγάλου ιξώδους και υψηλού ποσοστού θείου. Ως εκ τούτου απαιτεί προθέρμανση προτού εισαχθεί στον θάλαμο καύσης και διατήρηση συγκεκριμένης θερμοκρασίας κατά το στάδιο της αποθήκευσης του. Η χρήση του στη ναυτιλία συναντάται κυρίως στα μεγάλα ποντοπόρα πλοία.

❖ **Καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο LSFO, VLSFO και ULSFO.** Τα πετρελαιοδή καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (LSFO, VLSFO & ULSFO), είναι τρεις κατηγορίες καυσίμων, με κάθε κατηγορία να περιέχει χαμηλότερο ποσοστό θείου σε σύγκριση με την προηγούμενη. Ενώ το Heavy Fuel Oil (HFO) περιέχει γενικά 3,5% θείο, η περιεκτικότητα σε θείο αυτών των καυσίμων είναι χαμηλότερη. Το LSFO περιέχει γενικά περιεκτικότητα σε θείο 1,0%, καθιστώντας το μια μη δημοφιλή επιλογή μετά το 2020, καθώς δεν πληροί τα ρυθμιστικά όρια. Μια πιο δημοφιλής επιλογή είναι το VLSFO, καύσιμο συμμορφωμένο με τους κανονισμούς, πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, περιέχει μέγιστο 0,5% θείο. Προκειμένου να συμμορφώνονται με τα όρια περιεκτικότητας σε θείο σε ECA περιοχές όπως θα δούμε παρακάτω και ευρωπαϊκά λιμάνια, οι πλοιοκτήτες και οι ναυλωτές μπορούν επίσης να επιλέξουν να

ανεφοδιάστούν με καύσιμο ULSFO, το οποίο περιέχει κατά μέγιστο 0,1% θείο, που είναι η καθαρότερη διαθέσιμη επιλογή στα καύσιμα αλλά και η πιο ακριβή συνάμα¹⁷. Όλα τα προαναφερθέντα μαζούτ είναι παράγωγα αργού πετρελαίου και προέρχονται από το ίδιο βασικό προϊόν.

Η προκύπτουσα περιεκτικότητα σε θείο εξαρτάται αποκλειστικά από την έκταση της αποθείωσης. Κατά την αποθείωση, το θείο και οι θειούχες ενώσεις εξάγονται με καταλύτες και χημικά πρόσθετα που οδηγούν σε σημαντική αύξηση της τιμής του διυλιστηρίου¹⁸. Ως εκ τούτου, ορυκτά καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο θα είναι πάντα πιο ακριβές από τις πιο ρυπογόνες εναλλακτικές τους.

❖ **Αποταγμένο πετρέλαιο - Diesel Oil (distillate oil).** Το εν λόγω καύσιμο αποτελεί μείγμα υδρογονανθράκων μέσω της απόσταξης του αργού πετρελαίου. Θεωρείται το κύριο και το παραδοσιακό καύσιμο για τους κινητήρες Diesel. Δεν χρήζει ιδιαίτερης προετοιμασίας, διαχωρισμού, προθέρμανσης πριν τη διαδικασία της καύσης, πλην όμως βελτιώνονται αισθητά οι ιδιότητές του προσθέτοντας κατάλληλες ουσίες, αποσκοπώντας σε βελτιωμένη απόδοση του κινητήρα. Η νομοθεσία που διέπει αλλαγή ορίων εκπομπών οξειδίων του θείου, έχει επιφέρει διαδικασίες περαιτέρω επεξεργασίας του καυσίμου, στοχεύοντας στη μείωση του ποσοστού θείου σε αυτό.

❖ **Γαλακτοποιημένα καύσιμα - Emulsified Fuels.** Τα συγκεκριμένα καύσιμα είναι βαριά κλάσματα υδρογονανθράκων, προερχόμενα είτε μέσω φυσικών πηγών, είτε αποτελούν προϊόντα διύλισης. Η επεξεργασία συντελείται με την παρουσία νερού προκειμένου να επιτευχθεί η ομογενοποίηση. Η χρήση τους πραγματοποιείται σε ναυτικούς κινητήρες που δέχονται καύσιμο HFO.

❖ **Υπολειμματικό μαζούτ - Residual fuel oil (RO).** Είναι το καύσιμο που παραμένει μετά την αφαίρεση πολύτιμων αποσταγμάτων (όπως η βενζίνη) από το πετρέλαιο και που χρησιμοποιείται ιδιαίτερα από τη βιομηχανία. Σημαντικές προδιαγραφές για τα υπολειμματικά καύσιμα είναι το ιξώδες και η περιεκτικότητα σε θείο, αν και πρέπει να παρακολουθούνται τα όρια για το σημείο ανάφλεξης, το σημείο

¹⁷ Ship & Bunker. Average Bunker Prices <https://shipandbunker.com/prices/av>
<https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#ULSFO>
<https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#VLSFO>

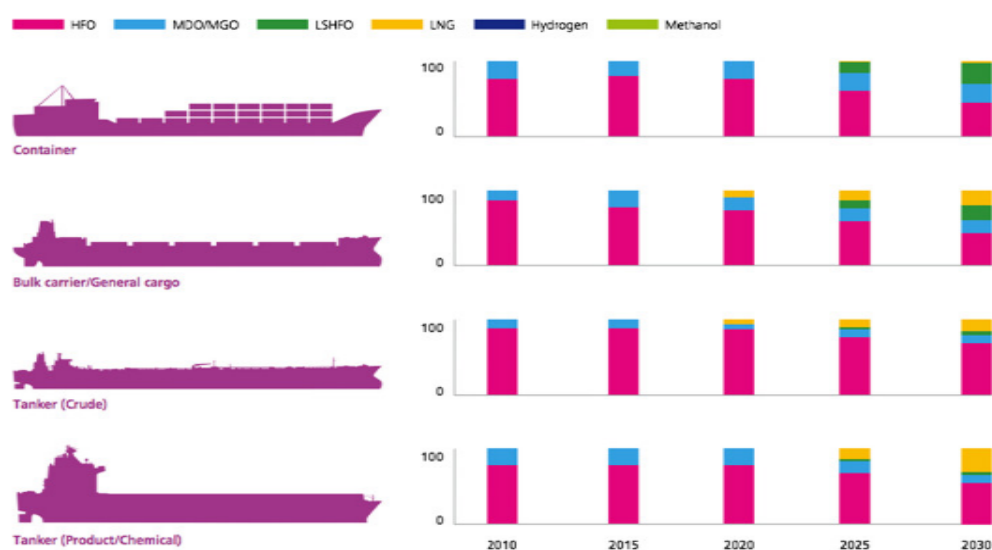
¹⁸ Kuimov et al. (2016). «Low-Sulfur Fuel and Oil Production. In *Materials Engineering and Technologies for Production and Processing II*»

ροής, το νερό και τα ιζήματα και την παραγωγή τέφρας. Θεωρείται το λιγότερο ποιοτικό και συνάμα το πιο φθηνό καύσιμο.

❖ **Ενδιάμεσο μαζούτ -Intermediate Fuel Oil (IFO).** Το συγκεκριμένο είδος καυσίμου αποτελεί μείγμα μικρής περιεκτικότητας αποταγμένου πετρελαίου και ποσότητας μαζούτ. Το μείγμα το οποίο φέρει την αναλογία 2% D.O. και 98% HFO έχει την ονομασία IFO380 και το μείγμα το οποίο φέρει την αναλογία 12% D.O. και 88% HFO έχει την ονομασία IFO180. Το τελευταίο είναι ποιοτικότερο και ακριβότερο από το IFO380.

❖ **Ναυτιλιακό πετρέλαιο - Marine Diesel Oil (MDO).** Είναι καύσιμο που αποτελείται από διάφορα μείγματα αποσταγμάτων και βαρύ μαζούτ. Δεν είναι καθαρό απόσταγμα και περιέχει χαμηλό ποσοστό θείου, μικρότερο από τα προαναφερθέντα IFO 180, IFO 380 και RO αλλά μεγαλύτερο από τα MGO.

❖ **Ναυτιλιακό καύσιμο - Marine Gas Oil (MGO).** Καύσιμο που αποτελείται αποκλειστικά από αποστάγματα. Το MGO είναι παρόμοιο με το ντίζελ, αλλά έχει μεγαλύτερη πυκνότητα. Το MGO βασίζεται στα ελαφρύτερα αποστάγματα και έχει χαμηλό ιξώδες ώστε να λειτουργεί σε ελεγχόμενη θερμοκρασία. Το gasoil συγκαταλέγεται στα ευγενή προϊόντα και θεωρείται από τα καλύτερα καύσιμα για ναυτικούς κινητήρες με το χαμηλότερο ποσοστό περιεκτικότητας σε θείο, σημαντικά λιγότερα σωματίδια και αιθάλη. Το κόστος του είναι υψηλό.



Σχήμα 2. Μίγμα καυσίμου για διάφορους τύπους σκαφών. (Πηγή: Riley E.J., et al. (2019).

«Marine Transportation and Energy Use»)

2.1.3 Ιδιότητες ναυτιλιακών καυσίμων^{19 20}

- ❖ **Θερμογόνος δύναμη καυσίμου (Heating value of fuel).** Η θερμική αξία ενός καυσίμου είναι η ποσότητα θερμότητας που απελευθερώνεται κατά την καύση του. Αναφέρεται επίσης ως ενέργεια ή θερμογόνος δύναμη, η θερμική αξία είναι ένα μέτρο της ενεργειακής πυκνότητας ενός καυσίμου και εκφράζεται σε ενέργεια ανά καθορισμένη ποσότητα (kJ/Kg).
- ❖ **Πυκνότητα (Density).** Κάθε ύλη, είτε στερεό, είτε υγρό, είτε αέριο έχει μια συγκεκριμένη πυκνότητα. Η «πυκνότητα μαζούτ» είναι ένας ουσιαστικός παράγοντας που υποδεικνύει τη ποιότητα ανάφλεξης. Επιπλέον, στη διαδικασία του ανεφοδιασμού, χρησιμοποιείται ως στοιχείο υπολογισμού της ποσότητας του μαζούτ που παραδίδεται.
- ❖ **Κινηματικό ιξώδες (Kinematic viscosity).** Το ιξώδες είναι η αντίσταση εντός του ρευστού που δρα ενάντια στη ροή. Το κινηματικό ιξώδες αντιπροσωπεύει το δυναμικό ιξώδες ενός ρευστού ανά μονάδα πυκνότητας. Το ιξώδες του καυσίμου είναι μια εξαιρετικά σημαντική παράμετρος καθώς χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ευκολίας ψεκασμού και της ευκολίας για την άντληση του καυσίμου μέσα στο σύστημα.
- ❖ **Υπολογισμένος δείκτης αρωματικότητας άνθρακα (CCAI).** Ο υπολογισμένος δείκτης αρωματικότητας άνθρακα (CCAI) είναι ένας υπολογισμός που βασίζεται στην πυκνότητα και το ιξώδες ενός δεδομένου καυσίμου. Σύμφωνα με τον τύπο, ο αριθμός CCAI είναι αντιστρόφως ανάλογος με την αποτελεσματική καύση. Αυτό σημαίνει ότι όσο υψηλότερος ο αριθμός CCAI, τόσο πιο κατώτερη είναι η ποιότητα ανάφλεξης του καυσίμου. Το CCAI βοηθά στη λήψη της καθυστέρησης ανάφλεξης του καυσίμου και χρησιμοποιείται μόνο για το υπολειμματικό καύσιμο όπως το HFO.
- ❖ **Σημείο ανάφλεξης (Flash Point).** Η θερμοκρασία στην οποία αναφλέγεται ο ατμός του θερμαινόμενου καυσίμου είναι γνωστή ως σημείο ανάφλεξης του καυσίμου. Αυτό γίνεται υπό καθορισμένες συνθήκες δοκιμής, χρησιμοποιώντας δοκιμαστική φλόγα. Σύμφωνα με τη SOLAS, το σημείο ανάφλεξης για όλα τα καύσιμα βαρέου

¹⁹ Μελανίτης Ν.Ε. (2004). «Τεχνολογία καυσίμων και λιπαντικών».

²⁰ Παπαευαγγέλου Τ. (2022).

μαζούτ που θα χρησιμοποιηθούν στα πλοία εντός μηχανημάτων, έχει οριστεί στους 60°C τουλάχιστον.

❖ **Σημείο ροής.** Το σημείο ροής είναι το επίπεδο της θερμοκρασίας κάτω από το οποίο το καύσιμο σταματάει να ρέει. Συγκεκριμένα, είναι ένα μέτρο της τάσης ενός καυσίμου να γίνεται πιο παχύρρευστο και να αντιστέκεται στη ροή όταν είναι κρύο.

❖ **Περιεκτικότητα σε Θείο (S).** Το θείο είναι ένα φυσικό συστατικό του αργού πετρελαίου που υπάρχει στη βενζίνη και το ντίζελ εκτός εάν αφαιρεθεί. Η μείωση της περιεκτικότητας σε θείο επιτρέπει προηγμένους ελέγχους εκπομπών και μειώνει την ατμοσφαιρική ρύπανση. Σύμφωνα με τη MARPOL, η τρέχουσα τιμή θείου για το HFO είναι:

- 3,50% m/m από την 1η Ιανουαρίου 2012 και μετά

- 0,50% m/m από την 1η Ιανουαρίου 2020 και μετά

❖ **Περιεκτικότητα σε νερό.** Το νερό στα καύσιμα οδηγεί σε μείωση της απόδοσης του μαζούτ και οδηγεί σε απώλεια ενέργειας. Το βαρύ μαζούτ αναμεμειγμένο με νερό, εάν καεί, θα οδηγήσει σε διάβρωση των εσωτερικών μερών.

❖ **Κετάνιο (Cetane Number).** Η βαθμολογία κετανίου, επίσης γνωστή ως αριθμός κετανίου, είναι μια μέτρηση της ποιότητας ή της απόδοσης του καυσίμου ντίζελ. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός, τόσο καλύτερα καίγεται το καύσιμο στον κινητήρα ενός οχήματος. Ο αριθμός κετανίου είναι παρόμοιος με τον αριθμό οκτανίων στο ότι είναι μια βαθμολογία που αποδίδεται σε ένα καύσιμο για να αξιολογήσει την ποιότητα της καύσης του.

❖ **Υπολείμματα άνθρακα (Carbon Residue).** Μια εργαστηριακή δοκιμή καυσίμου μπορεί να προσδιορίσει τα υπολείμματα άνθρακα/εξανθρακώματα στο βαρύ μαζούτ. Το καύσιμο τείνει να σχηματίζει εναποθέσεις άνθρακα στην επιφάνεια διαφορετικών τμημάτων που εμπλέκονται στον θάλαμο καύσης υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Όση περισσότερη ποσότητα υδρογονανθράκων, τόσο πιο δύσκολο να καεί το καύσιμο αποτελεσματικά.

❖ **Περιεκτικότητα σε Τέφρα.** Η ποσότητα των ανόργανων υλικών που υπάρχουν στο καύσιμο και παραμένουν ως υπόλειμμα όταν τελειώσει η διαδικασία καύσης ονομάζεται εναποθέσεις τέφρας. Αυτά τα κοιτάσματα αποτελούνται κυρίως από στοιχεία όπως το βανάδιο, το θείο, το νικέλιο, το νάτριο, το πυρίτιο, το αλουμίνιο κ.λπ., τα οποία υπάρχουν ήδη στο καύσιμο. Το μέγιστο όριο περιεκτικότητας σε τέφρα στο καύσιμο είναι 0,2% m/m.

2.2 Θεσμικό νομοθετικό πλαίσιο IMO - Υφιστάμενη κατάσταση

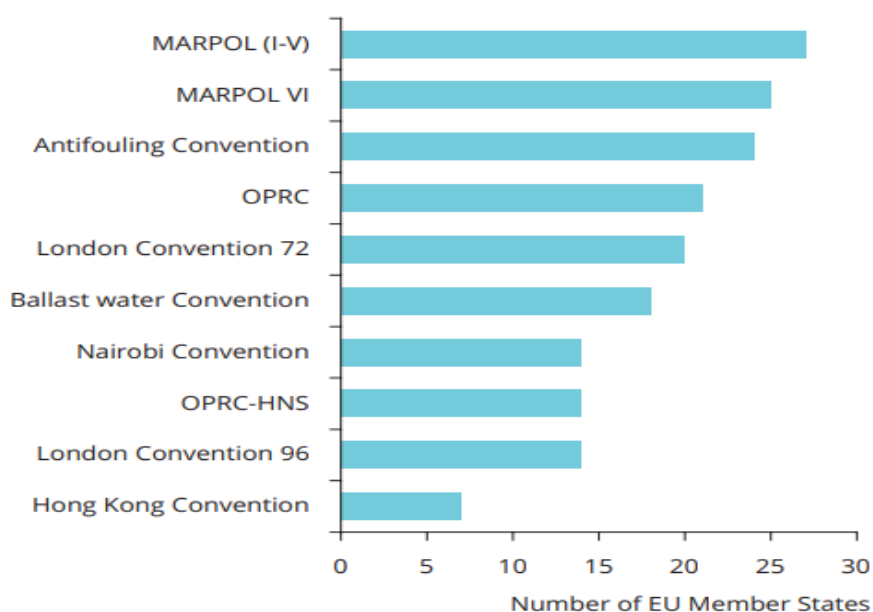
Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας διευρύνεται όλο και περισσότερο σε καθημερινή βάση. Η αυξημένη ποσότητα της χρήσης ενέργειας παράγει μεγάλη ποσότητα αερίων θερμοκηπίου (GHGs) από την κατανάλωση πετρελαιοειδών, που τελικά συντελεί στην αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας, με τις συνέπειες που ενδέχεται να έχει για τον πλανήτη.

Ερευνητές καθώς και περιβαλλοντολόγοι σε όλο τον κόσμο ανησυχούν για τον τρόπο εξάλειψης αυτού του φαινομένου και ενθαρρύνουν τους ειδικούς καυσίμων και κινητήρων να διερευνήσουν έρευνες για βιώσιμα και εναλλακτικά καύσιμα.

Στο χώρο της ναυτιλιακής κοινότητας, οι κανόνες και οι κανονισμοί σχετικά με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τοξικών αερίων προορίζονται για να κατευθύνουν τους πλοιοκτήτες, τους ναυλωτές, τους ναυπηγούς και όλους τους εμπλεκόμενους του ναυτιλιακού κλάδου προς την καθαρότερη ναυτιλία. Η ένταξη των δρώντων σε οργανισμούς και ιδρύματα, μεταξύ άλλων εξασφαλίζει ότι τα εμπλεκόμενα μέρη συμφωνούν να ακολουθούν τους επιβαλλόμενους κανόνες και κανονισμούς που προτείνονται. Η παραβίαση των κανονισμών μπορεί συχνά να οδηγήσει σε σημαντικά πρόστιμα, ακόμη και σε κράτηση πλοίων μέχρι να επιλυθεί το ζήτημα. Σε αυτήν την ενότητα, θα συζητηθούν οι πιο σχετικοί ρυθμιστικοί φορείς και κανονισμοί σχετικά με τις εκπομπές των πλοίων.

Ο IMO είναι ο αρμόδιος παγκόσμιος οργανισμός για τον καθορισμό προτύπων επί θεμάτων ασφάλειας και των περιβαλλοντικών επιδόσεων στη διεθνή ναυτιλία. Παρέχει ένα πλαίσιο συνεργασίας μεταξύ των κυβερνήσεων για τη ρύθμιση τεχνικών θεμάτων που επηρεάζουν το χώρο της ναυτιλίας. Όλα τα κράτη-μέλη της Ε.Ε. είναι μέλη του IMO, ενώ η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει καθεστώς παρατηρητή ως διακυβερνητικός οργανισμός. Ως εκ τούτου, τα κράτη μέλη συμμετέχουν στις κύριες επιτροπές όπου συζητείται η έγκριση των σχετικών νομοθετικών μέτρων και τροποποιήσεων διεθνών

συμβάσεων. Μια διεθνής ναυτιλιακή σύμβαση δεν είναι δεσμευτική έως ότου τεθεί σε ισχύ μετά την επικύρωσή της από έναν ελάχιστο αριθμό κρατών. Στην περίπτωση των συμβάσεων του IMO, αυτή η απαίτηση για έναν ελάχιστο αριθμό κρατικών επικυρώσεων συνδυάζεται επίσης με μια απαίτηση σχετικά με το ποσοστό του παγκόσμιου εμπορικού στόλου που αντιπροσωπεύουν.



Διάγραμμα 3. Αριθμός κρατών μελών της ΕΕ που επικυρώνουν σύμβαση του IMO.

Η αναφορά γίνεται για τις διεθνείς συμβάσεις: MARPOL, Διεθνή Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (OPRC), Διεθνή Σύμβαση για την πετρελαϊκή ρύπανση, ετοιμότητα, αντίδραση και συνεργασία (OPRC-HNS), Πρωτόκολλο για την ετοιμότητα, την απόκριση και τη συνεργασία σε περιστατικά ρύπανσης από επικίνδυνες και επιβλαβείς ουσίες. (Πηγή: IMO, 2021)

Ο IMO στοχεύει να μειώσει από τη ναυτιλία τις εκπομπές GHG κατά τουλάχιστον 50% και για CO_2 κατά 70%, για το 2050 σε σύγκριση με το 2008, ενώ παράλληλα συνεχίζονται οι προσπάθειες για τη σταδιακή πλήρη κατάργησή τους²¹. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, εφαρμόστηκαν διάφορα μέτρα. Αυτά τα μέτρα μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις περιόδους σύμφωνα με τον σχεδιασμό του οργανισμού: - βραχυπρόθεσμο για το 2018-2023, μεσοπρόθεσμο για την περίοδο μεταξύ 2023-2030 και μακροπρόθεσμο για τα έτη μετά το 2030. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα μελλοντικά μέτρα εξακολουθούν να είναι σε εννοιολογική μορφή και θα πρέπει να

²¹ IPCC 5th Assessment Report. Technical report, Geneva, 2013.
(Πηγή: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>)

υποστηρίζονται από επίσημη σύμβαση του IMO προτού καταστούν νομικά δεσμευτικά. Μια επισκόπηση παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Στρατηγική μείωσης εκπομπών αερίων GHG του IMO. Πηγή: (Volger, 2019)

Μέτρα	Ομάδα-στόχος	Περίοδος	
Νέος Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI)	Νεόκτιστα σκάφη	Βραχυπρόθεσμα - Σε εξέλιξη	2018-2023
Μέτρα λειτουργικής αποτελεσματικότητας (π.χ. SEEMP, επιχειρησιακό πρότυπο απόδοσης)	Όλα τα σκάφη	Βραχυπρόθεσμα - Σε εξέλιξη	2018- 2023
Υπάρχον πρόγραμμα βελτίωσης στόλου	Όλα τα σκάφη	Βραχυπρόθεσμα - Σε εξέλιξη	2018-2023
Μείωση ταχύτητας	Όλα τα σκάφη	Βραχυπρόθεσμα - Σε εξέλιξη	2018-2023
Μέτρα για την αντιμετώπιση των εκπομπών μεθανίου και πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC)	Κινητήρες και υποδομές καυσίμων	Βραχυπρόθεσμα - Σε εξέλιξη	2018- 2023
Πρόγραμμα εναλλακτικής εφαρμογής καυσίμου χαμηλών και μηδενικών εκπομπών άνθρακα	Όλα τα πλοία, καύσιμα	Μεσοπρόθεσμα	2023 -2030
Περαιτέρω μέτρα λειτουργικής απόδοσης (π.χ. SEEMP, πρότυπο λειτουργικής απόδοσης)	Όλα τα σκάφη	Μεσοπρόθεσμα	2023 -2030
Ανάπτυξη και παροχή μηδενικών εκπομπών άνθρακα ή απολιθωμάτων καυσίμων	Όλα τα πλοία, καύσιμα	Μακροπρόθεσμα	2030- ...
Μέτρα με βάση την αγορά (MBM)	Όλα τα πλοία, καύσιμα	Μακροπρόθεσμα	2030- ...

Η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) είναι μια επιτροπή υπό τον IMO. Σύμφωνα με τον ιστότοπο του IMO, το MEPC εκπροσωπεί το «*ανώτερο τεχνικό όργανο του IMO για θέματα που σχετίζονται με τη θαλάσσια ρύπανση*»²². Αρχικά, το επίκεντρο της επιτροπής (MEPC) αφορούσε την πρόληψη από την θαλάσσια ρύπανση από πετρελαιοειδή, η οποία οδήγησε στην εισαγωγή της πρώτης σύμβασης για

²² International Maritime Organization (IMO). Marine Environment. (Πηγή: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Default.aspx>.)

την καταπολέμηση της ρύπανσης στη θάλασσα - *Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία* (MARPOL). Τα τελευταία χρόνια, ο στόχος του MEPC επεκτάθηκε πέρα από την απλή κάλυψη της ρύπανσης από πετρέλαιο. Το 1997 εγκρίθηκε το Παράρτημα VI, με στόχο τη ρύθμιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και εκπομπών από πλοία.

Παρακάτω παρέχεται ένα χρονοδιάγραμμα των αξιοσημείωτων ρυθμιστικών εξελίξεων στις κατευθυντήριες γραμμές MEPC του IMO για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία (Παράρτημα VI), το οποίο θα αναλυθεί στις επόμενες παραγράφους.

Πίνακας 2: Χρονοδιάγραμμα των πιο σχετικών εξελίξεων και τροποποιήσεων στο Παράρτημα VI MARPOL²³.

1997	Πρώτη έγκριση του Παραρτήματος VI
2005	Τίθεται σε ισχύ το Παράρτημα VI: το συνολικό ανώτατο όριο θείου ορίζεται σε 4,50% m/m και το ανώτατο όριο θείου ECA ορίζεται σε 1,50% m/m. Ισχύουν τα στοιχεία ελέγχου NO_x Tier I.
2010	Η περιεκτικότητα θείου ECA μειώνεται στο 1,00% m/m
2011	Ισχύουν έλεγχοι NO_x Tier II
2012	Το παγκόσμιο ανώτατο όριο θείου μειώνεται στο 3,50% m/m
2013	Υποχρεωτική EEDI για όλα τα πλοία που ναυπηγήθηκαν μετά το 2013. SEEMP υποχρεωτικό για όλα τα πλοία.
2015	Η περιεκτικότητα θείου ECA μειώθηκε στο 0,10% m/m
2016	Οι έλεγχοι NO_x Tier III ισχύουν στα ECA, το Tier II παραμένει το πρότυπο εκτός
2020	T > παγκόσμιο ανώτατο όριο θείου μειώνεται στο 0,50% m/m

²³ International Maritime Organization (IMO). Marine Environment.
(Πηγή: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93Regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93Regulation-14.aspx))

2.2.1 Παράρτημα VI της MARPOL

Η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα Πλοία, γνωστή παγκοσμίως ως MARPOL, υπογράφηκε το 1973 και τροποποιήθηκε με το Πρωτόκολλο του 1978 και του 1997. Είναι μία από τις σημαντικότερες συμβάσεις που σχεδιάστηκαν από τον IMO, εστιάζοντας στην πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία με στόχο τη διαφύλαξη του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Σύμφωνα με τον IMO: «*Η MARPOL έχει συμβάλει σημαντικά στη σημαντική μείωση της ρύπανσης από τη διεθνή ναυτιλία συμπεριλαμβάνοντας το 99% της παγκόσμιας εμπορικής χωρητικότητας*»²⁴. Από την υπογραφή της το 1973, η MARPOL ενημερώνεται συνεχώς με τροποποιήσεις όλα αυτά τα χρόνια.

Το παράρτημα VI της MARPOL, το οποίο τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005, αντιμετωπίζει συγκεκριμένα την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία, θέτοντας όρια στις εκπομπές διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων.

Τα βασικά στοιχεία του παραρτήματος VI MARPOL περιλαμβάνουν:

- Όρια εκπομπών οξειδίου του θείου (SO_x)
- Όρια εκπομπών οξειδίου του αζώτου (NO_x)
- Όρια εκπομπής σωματιδίων (PM)
- Μέτρα ενεργειακής απόδοσης
- Αποτέφρωση επί πλοίου
- Ουσίες που καταστρέφουν το όζον

Απώτερος στόχος της Σύμβασης είναι τόσο η πρόληψη όσο και η ελαχιστοποίηση της ρύπανσης από τα πλοία, είτε ακούσιας είτε έχει προκληθεί από συνήθεις διαδικασίες/πράξεις.

Γενικότερα, η Διεθνής Σύμβαση αποτελείται από έξι παραρτήματα με κανονισμούς, τα οποία αναφέρονται το καθένα σε διαφορετικό είδος ρύπανσης ως ακολούθως (Πίνακας 3):

²⁴ Pollution Prevention - IMO, (2020). <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Pollution-Prevention.aspx>

Πίνακας 3: Παραρτήματα Σύμβασης MARPOL

Παράρτημα I:	<i>Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από πετρέλαιο</i>
Παράρτημα II:	<i>Κανονισμοί για την καταπολέμηση της ρύπανσης από μεγάλες ποσότητες επιβλαβών υγρών ουσιών (δηλαδή χημικών ουσιών που μεταφέρονται από τα χημικά δεξαμενόπλοια)</i>
Παράρτημα III:	<i>Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονται δια θαλάσσης σε πακεταρισμένες μορφές, ή σε εμπορευματοκιβώτια, φορητές δεξαμενές ή οδικά και σιδηροδρομικά βαγόνια δεξαμενές</i>
Παράρτημα IV:	<i>Πρόληψη της ρύπανσης από τα λύματα πλοίων</i>
Παράρτημα V:	<i>Πρόληψη της ρύπανσης από τα σκουπίδια πλοίων</i>
Παράρτημα VI:	<i>Πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία (έναρξης ισχύς 19 Μαΐου 2005)</i>

Πίνακας 4: Δεδομένα του IMO (2015) αναφορικά με MARPOL 73/78.

Παράρτημα Marpol 73/78	Ημερομηνία που τέθηκε σε ισχύ	Αριθμός κρατών που το έχουν επικυρώσει	% παγκόσμιας χωρητικότητας
I/II	2/10/1983	153	98,52
III	1/7/1992	141	97,79
IV	27/9/2003	134	90,74
V	31/12/1998	147	98,03
VI	19/5/2005	80	95,23

Στο Παράρτημα VI της MARPOL, δίνεται έμφαση στο περιορισμό των κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων από τα καυσαέρια των πλοίων. Οι περιορισμένες ουσίες περιλαμβάνουν οξείδια θείου (SO_x) και οξείδια αζώτου (NO_x), απαγορεύοντας τη σκόπιμη εκπομπή ουσιών που καταστρέφουν το όζον. Επιπλέον, στο Παράρτημα VI της MARPOL ρυθμίζονται θέματα αποτέφρωσης στα πλοία και οι εκπομπές για πτητικές οργανικές ενώσεις από δεξαμενόπλοια²⁵. Οι τροποποιήσεις γύρω από το Παράρτημα

²⁵ IMO profile - IMO, (2020). (Πηγή: <https://business.un.org/en>).

VI της MARPOL αποσκοπούν στη μείωση εκπομπών οξειδίων θείου και αζώτου (SO_x , NO_x) καθώς και σωματιδίων (PM). Επιπλέον, στο πλαίσιο μείωσης ατμοσφαιρικών ρύπων σε καθορισμένες θάλασσες περιοχές ελέγχου (ECA), ρυθμίζονται εκ νέου διαδικασίες. Τα ECA είναι περιφερειακές περιοχές που δημιουργήθηκαν για τον περιορισμό των εκπομπών σκαφών κοντά σε πυκνοκατοικημένες παράκτιες ζώνες υψηλής κυκλοφορίας. Μία επισκόπηση των τρεχόντων και των πιθανών μελλοντικών ECA φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3. Τρέχουσες και υπό συζήτηση πιθανές ECA Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών από τον IMO

Προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά όρια εκπομπών, αναπτύχθηκε μια κατευθυντήρια γραμμή τόσο για τις εκπομπές θείου όσο και για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Η μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο στα ναυτιλιακά καύσιμα ορίζεται ως μάζα θείου % κατά μάζα καυσίμου (m/m) και επί του παρόντος περιορίζεται στο 0,5% παγκοσμίως και στο 0,1 % στα ECA^{26 27}.

Για τα όρια εκπομπών NO_x , εισήχθη ένα Πιστοποιητικό Διεθνούς Πρόληψης της Ρύπανσης του Αέρα κινητήρα (EIAPP), το οποίο μπορεί να ληφθεί κατά την κατασκευή θαλάσσιου κινητήρα ντίζελ σύμφωνα με τον «Τεχνικό Κώδικα NO_x 2008»^{28 29}. Αυτή η πιστοποίηση έχει εξελιχθεί σε τρία επίπεδα, από τα οποία επί του παρόντος οι έλεγχοι της Βαθμίδας III ισχύουν μόνο για συγκεκριμένα πλοία ενώ δραστηριοποιούνται σε

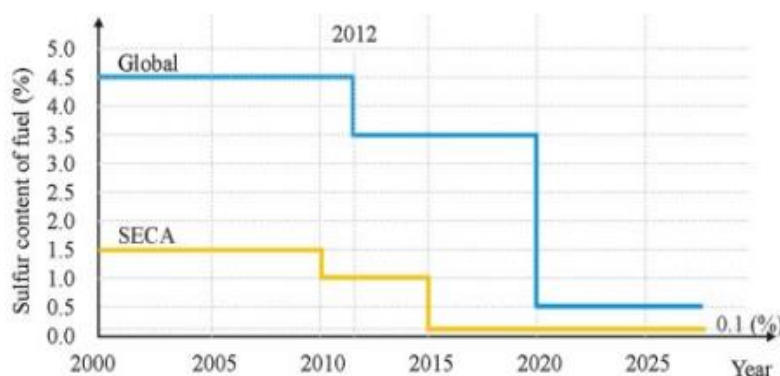
²⁶ Κανονισμός 13 της MARPOL Παράρτημα VI (NO_x) (Πηγή: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-\(ECAs\)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-\(NOx-emission-control\).aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Emission-Control-Areas-(ECAs)-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-(NOx-emission-control).aspx))

²⁷ Κανονισμός 14 της MARPOL Παράρτημα VI (SO_x & PM) (Πηγή: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx))

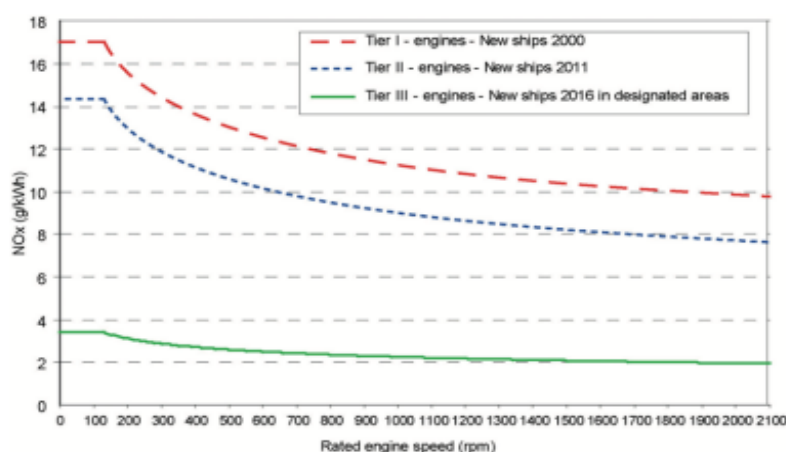
²⁸ Κανονισμός 14 της MARPOL Παράρτημα VI

²⁹ <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Special-Areas-Marpol.aspx>

ECA, ενώ εκτός τέτοιων περιοχών ισχύουν οι έλεγχοι Tier II³⁰. Στα παρακάτω σχήματα, φαίνονται οι εξελίξεις των παγκόσμιων ορίων εκπομπών SO_x και NO_x και του ECA αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4. Εξέλιξη ορίων εκπομπών SO_x . (Πηγή: Perera et al., 2016)



Διάγραμμα 5. Εξέλιξη ορίων εκπομπών NO_x στο Tier I, II και III. (Πηγή: Safety4Sea, 2016)

2.2.2 Κανονισμός IMO 2020 και ζητήματα συμμόρφωσης

Η πιο πρόσφατη εξέλιξη στο MARPOL VI, που συχνά συντομεύεται ως IMO 2020 ή Sulfur 2020, έχει επιφέρει πολλές συζητήσεις στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Οι προθέσεις για την εφαρμογή ανώτατου ορίου θείου 0,5% m/m το 2020 έγιναν σαφείς από τον IMO ήδη από το 2008. Στη συνέχεια, ο IMO ανακοίνωσε το αναθεωρημένο ανώτατο όριο του θείου 0,50% m/m στα τέλη του 2016, με ισχύ από την 1 η Ιανουάριου 2020, με την επιφύλαξη μιας αναθεώρησης σκοπιμότητας που θα ολοκληρωνόταν το

³⁰ Κανονισμός 13 της MARPOL Παράρτημα VI

αργότερο το 2018³¹. Οι εμπλεκόμενοι δρώντες του κλάδου αρχικά αμφέβαλλαν για τη σκοπιμότητα του. Πολλοί επεσήμαναν ότι η διαθεσιμότητα καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (LSFO) ή ισοδύναμων καυσίμων θα υπολείπονταν της παγκόσμιας ζήτησης τους. Άλλοι φοβήθηκαν ότι το κόστος των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο μετά το 2020 θα εκτινάσσονταν, μετατρέποντας τις επιχειρήσεις τους ασύμφορες. Εναλλακτικές λύσεις, όπως η εκ των υστέρων τοποθέτηση μηχανημάτων πλύσης (πλυντρίδες), ήταν και παραμένει μια εφαρμοστέα επιλογή.

Για να βοηθήσουν τους ιδιοκτήτες πλοίων και τους δρώντες στη ναυτιλία να προγραμματίσουν εκ των προτέρων το όριο του 0,50% σε θείο για το 2020, η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) του IMO ενέκρινε διάφορες κατευθυντήριες εκθέσεις για να διευκολύνει τη μετάβαση³². Αυτές οι οδηγίες προσπαθούσαν να παρέχουν κατανοητές πληροφορίες σχετικά με τη νομοθεσία, καθώς και λύσεις σε τεχνικές προκλήσεις που προκύπτουν, όπως θερμικό σοκ στο σύστημα καυσίμου, αλλαγές ιξώδους, προβλήματα καύσης και διαδικασίες ελέγχου ποιότητας καυσίμου³³. Επιπλέον, αυτές οι οδηγίες περιλαμβάναν ένα υπόδειγμα για την υποβολή Αναφοράς Μη Διαθεσιμότητας Καυσίμου (a Fuel Oil Non-Availability Report - FONAR), με σκοπό να διευκολύνει τους φορείς εκμετάλλευσης και τους ιδιοκτήτες πλοίων στην περίπτωση που δεν μπορούσαν να τηρηθούν οι κανονισμοί λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας LSFO ή ισοδύναμης εκπομπής μείωσης των καυσίμων ή της τεχνολογίας. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η διαδικασία FONAR δεν αποτελούσε παραίτηση από την υποχρέωση και ότι το πλοίο μπορούσε να υποβληθεί σε εκτενέστερες επιθεωρήσεις ή αξιολογήσεις ενώ βρισκόταν στο λιμάνι εάν η εξαίρεση γινόταν πολύ συχνά.

Όταν η αρχή ενός λιμένα εντοπίζει σαφείς λόγους που καθιστούν ένα πλοίο ύποπτο για μη συμμόρφωση επί θεαμάτων επιθεώρησης, τότε μπορεί να απαιτήσει την ανάλυση δειγμάτων καυσίμων (μαζούτ). Όταν ένα δείγμα λαμβάνεται από ένα πλοίο, πρέπει να παρέχεται απόδειξη στο πλοίο και το πλοίο θα πρέπει να ενημερώνεται για το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης.

³¹ IMO 2020, (2016). (Πηγή : <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/10-MEPC-74-sulphur-2020.aspx>)

³²IMO - III CODE, (2019)

(Πηγή:[https://wwwcdn.imo.org/localresources/fr/OurWork/MSAS/Documents/MSAS/Basic%20documents/A.1141\(31\)%20-%202019%20Non-Exhaustive%20List.pdf.pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/fr/OurWork/MSAS/Documents/MSAS/Basic%20documents/A.1141(31)%20-%202019%20Non-Exhaustive%20List.pdf.pdf))

³³ BIMCO, (2019). Technical report.

Εάν η μη συμμόρφωση με τον κανονισμό IMO 2020 διαπιστώνονταν και αποδεικνύονταν από την αρχή του λιμένα, αυτό μπορούσε να απαγορεύσει τον απόπλου του πλοίου έως ότου το πλοίο λάβει τα κατάλληλα μέτρα για την επίτευξη της συμμόρφωσης, διαδικασία η οποία μπορούσε να περιλαμβάνει την απάντληση και αποδέσμευση όλων των μη συμμορφούμενων καυσίμων σε κατάλληλες υποδοχές.

Επιπλέον, η εποπτική αρχή κάθε λιμένα έπρεπε και πρέπει να αναφέρει τυχόν μη συμμόρφωση προς το κράτος στο οποίο ανήκει η σημαία. Θα πρέπει επίσης να ενημερώσει το κράτος στην δικαιοδοσία του οποίου εκδόθηκε το δελτίο παράδοσης καυσίμων για μη συμμορφούμενο καύσιμο.

2.2.3 Μέσα και εργαλεία μέτρησης για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους

Για να διευκολυνθεί η προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων και βελτίωσης στη ποιότητα των συστατικών του αέρα, έχουν εισαχθεί μέσα και εργαλεία μέτρησης των ατμοσφαιρικών ρύπων. Ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI), το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP) και ο Επιχειρησιακός Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης (EEOI) είναι τρεις σημαντικές αναλύσεις της MARPOL VI που εισήχθησαν τον Ιούλιο του 2011. Επιπρόσθετα με τις τροποποιήσεις MARPOL VI έχουν προστεθεί ο υφιστάμενος δείκτης ενεργειακής απόδοσης πλοίων (EEXI), ο Δείκτης Έντασης Άνθρακα (CII), ενώ από το 2019 έχει εφαρμοστεί σύστημα συλλογής δεδομένων καυσίμων (DCS/ Data Collection System).

2.2.3.1 Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI)

Ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI) για νέα πλοία είναι το πιο σημαντικό τεχνικό μέτρο και στοχεύει στην προώθηση της χρήσης εξοπλισμού και κινητήρων πιο αποδοτικής ενέργειας. Όπως το περιγράφει³⁴ ο IMO: «*Το EEDI είναι ένας μη δεσμευτικός, βασισμένος στην απόδοση μηχανισμός που αφήνει την επιλογή των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα συγκεκριμένο σχεδιάσμα πλοίου στη βιομηχανία. Εφόσον επιτυγχάνεται το απαιτούμενο επίπεδο ενεργειακής απόδοσης, οι σχεδιαστές πλοίων και οι κατασκευαστές είναι ελεύθεροι να χρησιμοποιούν τις πιο οικονομικές λύσεις προκειμένου το πλοίο να συμμορφώνεται με τους κανονισμούς. Το EEDI παρέχει ένα συγκεκριμένο αριθμό για ένα μεμονωμένο σχέδιο πλοίου, εκφρασμένο σε γραμμάρια διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ανά μίλι χωρητικότητας πλοίου (όσο*

³⁴ IMO - Μέτρα Ενεργειακής Απόδοσης (Πηγή: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/technical-and-operational-measures.aspx>)

μικρότερο είναι EEDI τόσο πιο ενεργειακά αποδοτικό είναι ο σχεδιασμός του πλοίου) και υπολογίζεται με έναν τύπο που βασίζεται στις τεχνικές παραμέτρους σχεδιασμού για ένα δεδομένο πλοίο».

2.2.3.2 Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (SEEMP)

Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan) είναι ένα δομημένο, πρακτικό εργαλείο που βοηθά τις ναυτιλιακές εταιρείες να διαχειρίζονται τις περιβαλλοντικές τους επιδόσεις και να βελτιώνουν τη λειτουργική τους απόδοση. Ο σκοπός του SEEMP είναι να δημιουργήσει έναν μηχανισμό για την Εταιρεία ή/και το πλοίο για να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση στη λειτουργία ενός πλοίου. Κατά προτίμηση, το SEEMP ενός συγκεκριμένου πλοίου συνδέεται με μια ευρύτερη εταιρική πολιτική διαχείρισης ενέργειας για την Εταιρεία που κατέχει, εκμεταλλεύεται ή ελέγχει το πλοίο, αναγνωρίζοντας ότι τα πλοία λειτουργούν κάτω από ένα ευρύ φάσμα με διαφορετικές συνθήκες.

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μπορεί να μειώσει την κατανάλωση καυσίμου, να εξοικονομήσει χρήματα και να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αν και η απόδοση των μεμονωμένων μέτρων μπορεί να είναι μικρή, το συλλογικό αποτέλεσμα σε ολόκληρο τον στόλο είναι σημαντικό.

Το SEEMP είναι ένα σχέδιο ειδικά για το πλοίο που επιδιώκει να βελτιώσει την ενεργειακή απόδοση του πλοίου μέσω τεσσάρων βημάτων: α) Σχεδίαση, β) Εκτέλεση, γ) Παρακολούθηση και δ) Αυτοαξιολόγηση & βελτίωση (Σχήμα 4). Αυτά τα στοιχεία διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον συνεχή κύκλο για τη βελτίωση της διαχείρισης της ενέργειας του πλοίου, καθώς, με κάθε επανάληψη του κύκλου, ορισμένα στοιχεία του SEEMP θα αλλάζουν αναγκαστικά, ενώ άλλα μπορεί να παραμείνουν όπως πριν.

Το SEEMP θα πρέπει να περιλαμβάνει διατάξεις για την παρακολούθηση και την καταγραφή των σχετικών δεδομένων που σχετίζονται με την κατανάλωση καυσίμου, την ενεργειακή απόδοση και τις εκπομπές. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων που εφαρμόζονται και τον εντοπισμό περιοχών για περαιτέρω βελτίωση.

Οι αρχές σημαίας, οι νηογνώμονες και οι αρχές ελέγχου του κράτους λιμένα μπορούν να επαληθεύουν τη συμμόρφωση με το SEEMP κατά τις επιθεωρήσεις και τους

ελέγχους. Η μη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις SEEMP μπορεί να οδηγήσει σε κυρώσεις.



Σχήμα 4. Διαδικασία SEEMP³⁵ μέσω τεσσάρων βημάτων. (Σχεδίαση - Εκτέλεση - Παρακολούθηση – Αυτάξιολόγηση & Βελτίωση)

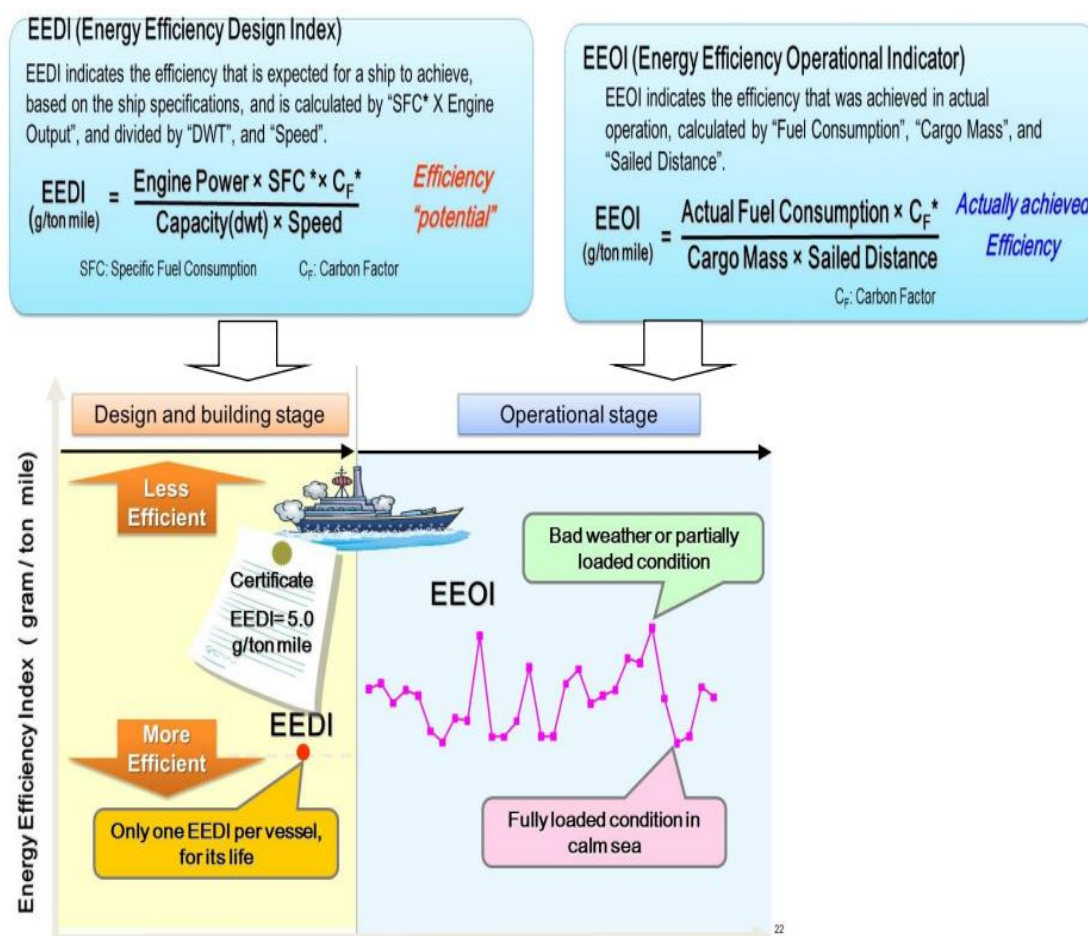
2.2.3.3 Επιχειρησιακός Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης (ΕΕΟΙ)

Το ΕΕΟΙ επιτρέπει την μέτρηση της απόδοσης καυσίμου σε ένα πλοίο που βρίσκεται σε λειτουργία καθώς και προσμετρά την επίδραση τυχόν αλλαγών π.χ. βελτιωμένη σχεδίαση ταξιδιού ή πιο συχνός καθαρισμός έλικας ή εγκατάσταση νέας προπέλας. Το πεδίο εφαρμογής του ΕΕΟΙ είναι ευρύτερο από αυτό της τρέχουσας κατευθυντήριας γραμμής για την ενεργειακή απόδοση νέων πλοίων, επειδή εστιάζει επίσης στις τεχνολογικές βελτιώσεις για τα υπάρχοντα πλοία.

Από αυτά τα ψηφίσματα, το EEDI είναι υποχρεωτικό για νέα πλοία που ναυπηγήθηκαν μετά το 2013, το SEEMP κρίθηκε υποχρεωτικό για όλα τα πλοία από το 2013 και το ΕΕΟΙ πρόκειται να εφαρμοστεί εθελοντικά. Με αυτά τα μέτρα, ο IMO

³⁵ Lloyd's Register (2023). <https://www.lr.org/en/services/technical-advisory/seemp-part-iii-ship-energy-efficiency/>

καταδεικνύει την ανάγκη για αντιμετώπιση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία³⁶.



Σχήμα 5. Υπολογισμός EEDI και EEOI, και η σχέση μεταξύ τους. (Πηγή: Παρουσίαση του IMO για τα Τεχνικά μέτρα)

2.2.3.4 Δείκτης σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης πλοίων (EEXI)

Τον Νοέμβριο του 2020, κατά τη διάρκεια του MEPC 75, ο IMO εισήγαγε έναν δείκτη σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης πλοίων τροποποιώντας το Παράρτημα VI της MARPOL. Ουσιαστικά το EEXI είναι η επέκταση του EEDI για τα υπάρχοντα πλοία και αναφέρεται στις εκπομπές CO_2 ανά τόνο φορτίου και μίλι σε σχέση με την απόδοση του κινητήρα, το φορτίο και την ταχύτητα. Το EEXI θα ισχύει για όλα τα πλοία άνω των 400 GT που εμπίπτουν στο Παράρτημα VI της MARPOL.

³⁶ Energy Efficiency Measures - IMO, (2020).

<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/AirPollution-Default.aspx>

2.2.3.5 Δείκτης Έντασης Άνθρακα (CII)

Για πλοία μεικτής χωρητικότητας 5.000 τόνων και άνω, ο Δείκτης Έντασης Άνθρακα (CII), μετρά την πραγματική κατανάλωση καυσίμου και την απόσταση που διανύθηκε για κάθε πλοίο³⁷.



Σχήμα 6. Χρονική απεικόνιση μέτρων και δράσεων IMO. (Πηγή: IMO)

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει στοχεύσει μείωση της έντασης άνθρακα κατά 40% για τον ναυτιλιακό στόλο έως το 2030, με περαιτέρω βελτίωση στο 50% έως το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 2008. Με τόσες πολλές ενέργειες που απαιτούνται σε ένα τόσο σύντομο χρονοδιάγραμμα, ο IMO έχει αναπτύξει ένα χρονοδιάγραμμα και εισήγαγε μια σειρά από μέτρα για να ποσοτικοποιήσει τις βελτιώσεις απόδοσης για να βοηθήσει στην επίτευξη της απαραίτητης αλλαγής.

2.2.3.6 Σύστημα Συλλογής Δεδομένων (DCS)

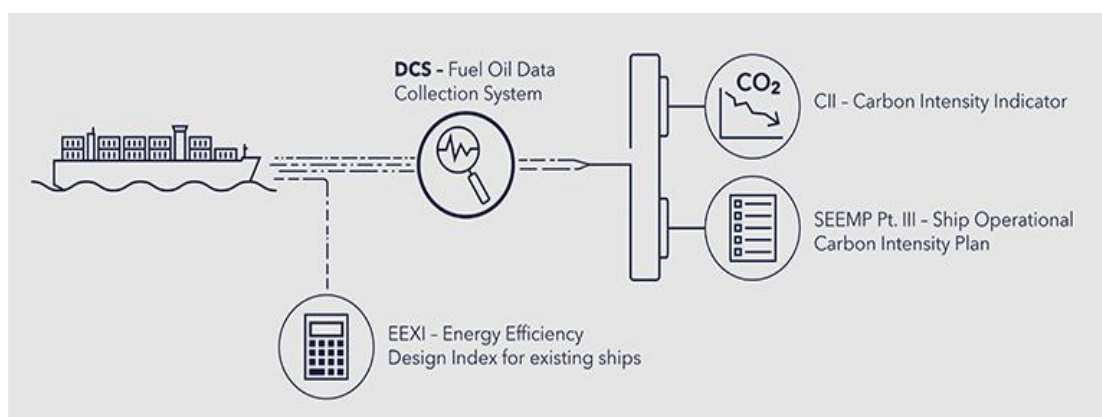
Η συγκέντρωση πληροφοριών για το σύστημα συλλογής δεδομένων καυσίμων (DCS/ Data Collection System) του IMO ξεκίνησε την 1η Ιανουαρίου 2019. Το DCS

³⁷Fuels-marine engine. (2021) (Πηγή:<https://www.infineuminsight.com/en-gb/articles/proving-marine-additive-performance/>)

συγκεντρώνει δεδομένα όπως η κατανάλωση καυσίμου, η απόσταση που διανύθηκε και οι αντίστοιχες ώρες σε εξέλιξη, για μεμονωμένα πλοία 5.000 GT και άνω.

Τα συγκεντρωτικά δεδομένα DCS αποτελούν τη βάση για τη βαθμολογία CII (Δείκτης Έντασης Άνθρακα) και το Μέρος III SEEMP (Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου/ Λειτουργικό Σχέδιο Έντασης Άνθρακα Πλοίου). Από την 1η Ιανουαρίου 2023, το Μέρος III του SEEMP πρέπει να έχει επικαιροποιηθεί και να βρίσκεται σε πλοία με χωρητικότητα άνω των 5.000 GT, προκειμένου να προβούν στην τεκμηρίωση των σχεδίων τους για την επίτευξη των στόχων CII.

Από το 2024, το CII πρέπει να υπολογίζεται με βάση τα δεδομένα DCS του προηγούμενου έτους και στη συνέχεια να αναφέρεται στον επαληθευτή DCS για επαλήθευση μαζί με τα συγκεντρωτικά δεδομένα DCS. Η επιτυγχανόμενη CII και η περιβαλλοντική βαθμολογία (Α έως Ε) θα σημειωθούν στη συνέχεια στη Δήλωση Συμμόρφωσης DCS (DCS Statement of Compliance), η οποία θα πρέπει να διατηρείται επί του πλοίου για πέντε χρόνια.



Σχήμα 7. Σύνδεση μεταξύ των DCS, CII και SEEMP Μέρος III (Πηγή: DNV)

2.3 Η στοχοθεσία της Ευρώπης για μείωση των εκπομπών αερίων GHG

Η προσπάθεια της Ευρώπης να αναβαθμίσει τον κλιματικό της στόχο για μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου για το 2030, από 40% σε τουλάχιστον 55% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, εκφράζεται με το πακέτο μέτρων, γνωστό ως «Fit for 55»³⁸ («Προσαρμογή στο 55%»). Το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών της Ε.Ε., ο Μηχανισμός Συνοριακής Προσαρμογής Άνθρακα και ο Μηχανισμός FuelEU

³⁸ European Council <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

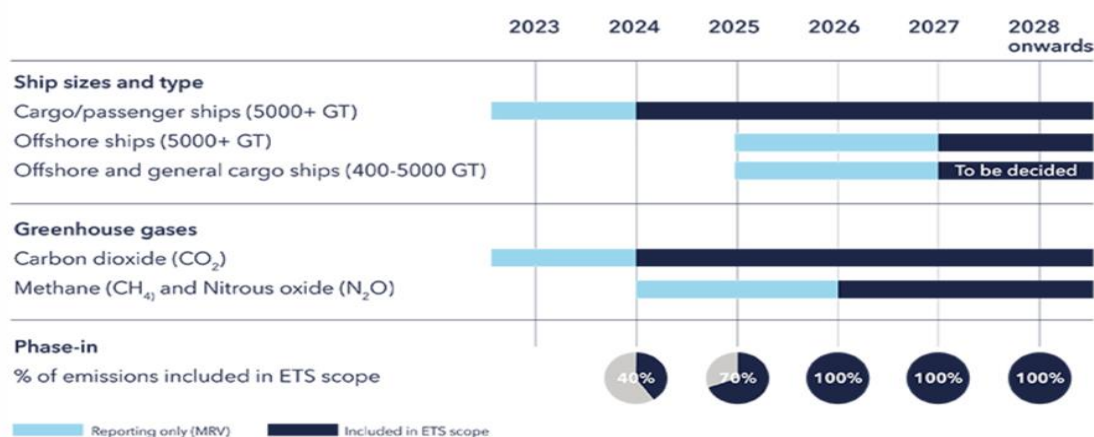
Maritime, αποτελούν δράσεις, μέρος του ευρύτερου αναφερόμενου πακέτου μέτρων, που μπορούν να εφαρμοστούν στο κλάδο της ναυτιλίας.

2.3.1 Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ε.Ε. (EU ETS)

Η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω προσωρινής συμφωνίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου (ΕΚ), του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, κατέληξαν σε συμφωνία για τη συμπερίληψη της ναυτιλίας στο Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της ΕΕ (EU ETS) από το 2024. Αυτό το μέτρο έχει προκαλέσει πλήθος συζητήσεων λόγω του κόστους για τις ναυτιλιακές εταιρείες και της πιθανής αβεβαιότητας των τιμών του άνθρακα.

Το EU ETS³⁹ είναι ένα μέτρο που βασίζεται στην αγορά και στοχεύει στην εσωτερικευση του εξωτερικού κόστους του CO₂ στις λειτουργίες των εμπορικών πλοίων, προκειμένου να εισαγάγει την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει». Αυτό δημιουργεί ένα οικονομικό κίνητρο για τις ναυτιλιακές εταιρείες να απελευθερώσουν τους στόλους τους από τον άνθρακα.

Το EU ETS είναι ένα σύστημα ανώτατων ορίων εκπομπών και εμπορίας όπου ένα περιορισμένο ποσό δικαιωμάτων εκπομπών, διατίθεται στην αγορά και μπορεί να διαπραγματευτεί. Το ανώτατο όριο μειώνεται κάθε χρόνο, διασφαλίζοντας ότι ο στόχος της ΕΕ για τις εκπομπές έως το 2030 προβλέπει μείωση κατά 55%, σε σχέση με το 1990, δράση που μπορεί να επιτευχθεί ενώ θα καταστεί κλιματικά ουδέτερη έως το 2050.



Διάγραμμα 6. Χρονικός ορίζοντας υλοποίησης EU ETS (Πηγή: DNV)

³⁹ DNV, (2023). «EU ETS: Preliminary agreement to include shipping in the EU's Emission Trading System from 2024»

Από το 2024 το EU ETS θα περιλαμβάνει πλοία άνω των 5000 GT που μεταφέρουν φορτίο ή επιβάτες για εμπορικούς σκοπούς. Το σύστημα Παρακολούθησης, Αναφοράς & Επαλήθευσης της ΕΕ (EU MRV/Monitoring, Reporting & Verification), θα επεκταθεί από το 2025 για να ισχύει για πλοία ανοικτής θαλάσσης άνω των 400 GT και γενικά φορτηγά πλοία μεταξύ 400 και 5000 GT που μεταφέρουν φορτίο για εμπορικούς σκοπούς. Τα υπεράκτια πλοία άνω των 5000 GT θα περιλαμβάνονται από το 2027 στο ETS. Έως το 2026, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή θα επανεξετάσει εάν τα πλοία γενικού φορτίου και υπεράκτιας χωρητικότητας μεταξύ 400 και 5000 GT θα περιλαμβάνονται επίσης στο ETS.

Πίνακας 5. Εφαρμογή EU MRV- EU ETS σε διάφορες κατηγορίες πλοίων (Πηγή: DNV)

Type	Size (GT)	EU MRV	EU ETS
Ships transporting cargo or passengers	5000+	In force	2024
General cargo and offshore ships	400-5000	2025	To be evaluated
Offshore ships	5000+	2025	2027

Από το 2024 το EU ETS θα περιλαμβάνει μόνο εκπομπές CO_2 , ενώ το EU MRV θα επεκταθεί το ίδιο έτος για να συμπεριλάβει αναφορές για το μεθάνιο (CH_4) και τα υποξείδια του αζώτου (N_2O), που είναι δύο άλλα αέρια θερμοκηπίου (GHG) που εκπέμπονται από τα πλοία. Από το 2026 το EU ETS θα περιλαμβάνει επίσης αυτά τα δύο αέρια θερμοκηπίου.

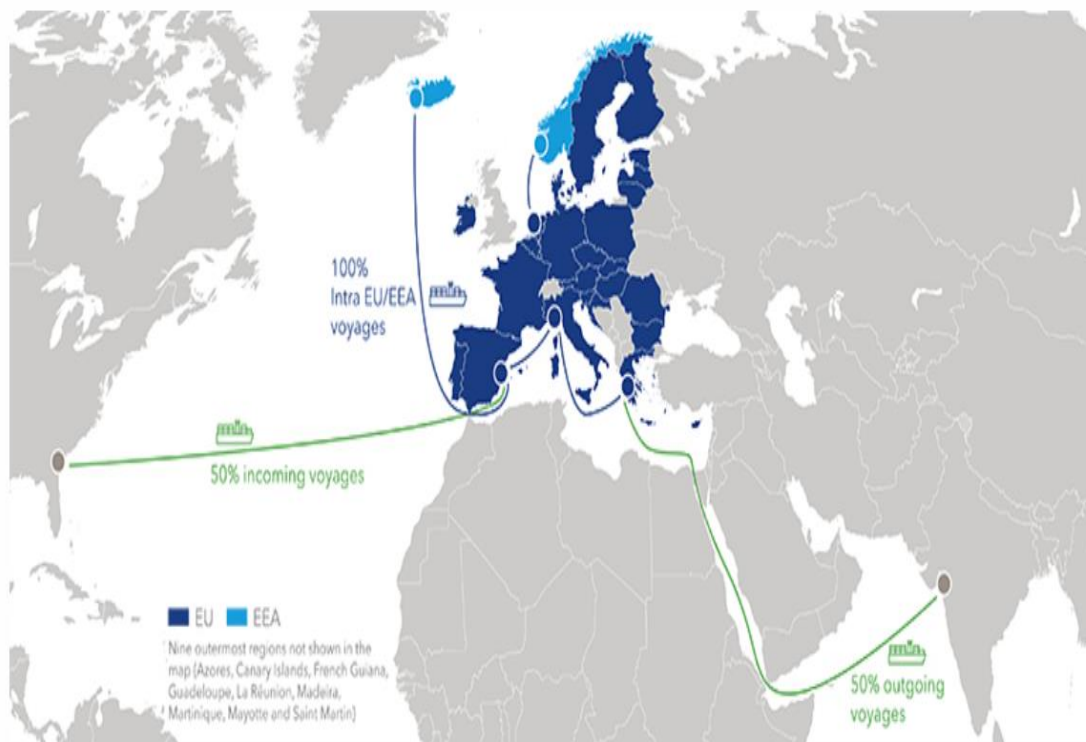
Πίνακας 6. Εφαρμογή EU MRV- EU ETS σε εκπομπές CO_2 & GHGs (Πηγή: DNV)

GHG	EU MRV	EU ETS
CO_2	In force	2024
Methane (CH_4), Nitrous oxide (N_2O)	2024	2026

Το γεωγραφικό εύρος έχει επίσης αυξηθεί, έως το 2026 θα λαμβάνεται υπόψη μόνο το 50% των εκπομπών από πλοία που προέρχονται από λιμάνι εκτός ΕΕ, από το 2027 θα πρέπει να πληρώνεται το 100% των εκπομπών, με ορισμένες εξαιρέσεις.

Πίνακας 7. Εφαρμογή EU MRV- EU ETS σε θαλάσσιες διαδρομές εντός -εκτός Ε.Ε. (Πηγή: DNV)

Voyage scope	EU MRV	EU ETS
Emissions on voyages and port calls within the EU/EEA	100%	100%
Emissions on voyages into and out of the EU/EEA	100%	50%



Σχήμα 8. Αποτύπωση ποσοστού εκπομπών, υλοποίησης εφαρμογής EU MRV- EU ETS στα ταξίδια και τα λιμάνια εντός/εκτός Ε.Ε. (Πηγή: DNV)

2.3.2 Μηχανισμός Συνοριακής Προσαρμογής Άνθρακα (CBAM)

Ο κανονισμός CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) θα απαιτεί από τους εισαγωγείς ορισμένων αγαθών υψηλής έντασης άνθρακα να καταβάλλουν εισφορά στις εισαγωγές τους που αντιστοιχεί στο τέλος που επιβάλλεται σε συγκρίσιμες εγχώριες

βιομηχανίες βάσει του EU ETS, επεκτείνοντας έτσι την τιμή άνθρακα που καταβάλλουν οι εταιρείες της ΕΕ στους ξένους παραγωγούς των ίδιων αγαθών⁴⁰.

Η γενική λογική του κανονισμού είναι να αντιμετωπίσει τον κίνδυνο "διαρροής άνθρακα", ο οποίος θα προέκυπτε εάν οι μειώσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ("GHG") που επιτυγχάνονται εντός της ΕΕ βάσει του EU ETS αντισταθμίζονταν από καλυμμένους φορείς εκμετάλλευσης που αλλάζουν τις δραστηριότητές τους σε δικαιοδοσίες εκτός του πεδίου εφαρμογής του EU ETS ή/και από εταιρείες της ΕΕ που αυξάνουν τις εισαγωγές τους από αυτές τις δικαιοδοσίες⁴¹. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο συμφώνησαν ότι ο κανονισμός CBAM θα τεθεί σε ισχύ την 1η Οκτωβρίου 2023⁴². Θα υπάρξει μεταβατική περίοδος τριών ετών, κατά την οποία θα ισχύουν μόνο οι υποχρεώσεις υποβολής εκθέσεων⁴³. Μετά τη μεταβατική περίοδο, η CBAM θα τεθεί σταδιακά, με τον ίδιο ρυθμό που καταργούνται σταδιακά τα δωρεάν δικαιώματα ETS της ΕΕ σε τομείς που καλύπτονται από το CBAM⁴⁴.

Στο μεταξύ, ο κανονισμός CBAM θα ισχύει μόνο για το ποσοστό των εκπομπών που δεν επωφελούνται από δωρεάν δικαιώματα βάσει του EU ETS⁴⁵. Αυτό έχει ως στόχο να διασφαλίσει ότι οι παραγωγοί αγαθών που καλύπτονται από το EU ETS δεν τυγχάνουν ευνοϊκότερης μεταχείρισης από τους αλλοδαπούς παραγωγούς των ίδιων προϊόντων που καλύπτονται από το CBAM⁴⁶. Ο κανονισμός CBAM θα ισχύσει αρχικά για εισαγωγές σε πέντε τομείς έντασης εκπομπών που θεωρούνται ότι διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο διαρροής άνθρακα: τσιμέντο, σίδηρος και χάλυβας, αλουμίνιο, λιπάσματα και ηλεκτρική ενέργεια. Ο κανονισμός CBAM θα κάλυπτε τις εισαγωγές αυτών των αγαθών από όλες τις τρίτες χώρες εκτός από εκείνες που περιλαμβάνονται στο ΣΕΔΕ ή σε συνδεδεμένο μηχανισμό.

Συνεπώς, ο κανονισμός CBAM στοχεύει να συμβάλει στους στόχους της ΕΕ για την κλιματική ουδετερότητα και να ενθαρρύνει τις χώρες εταίρους να απελευθερώσουν τις διαδικασίες παραγωγής τους από τον άνθρακα, εξισορροπώντας τους όρους

⁴⁰ Council of the European Union, (2022). «*Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a carbon border adjustment mechanism (CBAM) – Compromise Text*». Chapter II.

⁴¹ Council of the European Union, (2022). Αιτιολογική (8)

⁴² Council of the European Union, (2022). Άρθρο 36

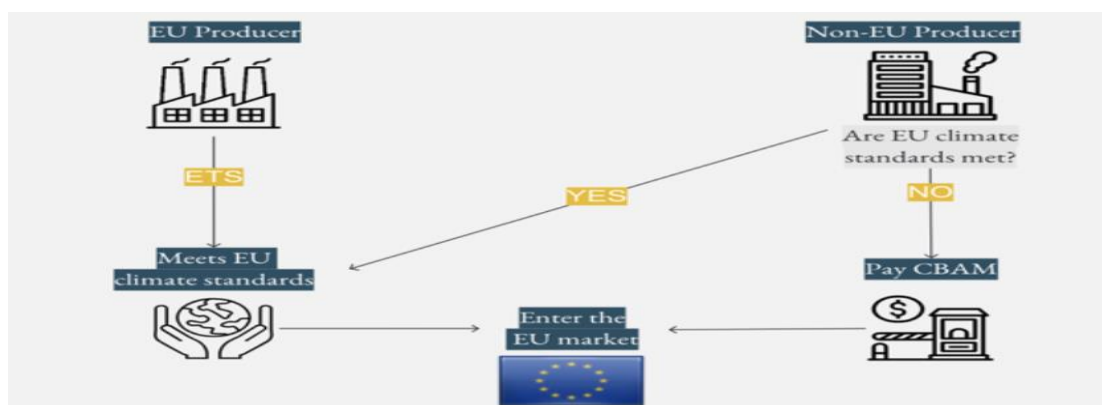
⁴³ Council of the European Union, (2022). Άρθρο 32

⁴⁴ Council of the European Union, (2022). Άρθρο 31 (1)

⁴⁵ Council of the European Union, (2022). Άρθρο 31 (1)

⁴⁶ Council of the European Union, (2022). Αιτιολογική (11)

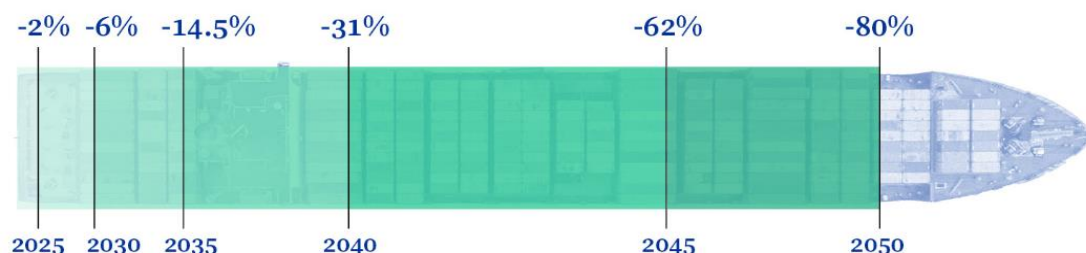
ανταγωνισμού στην τιμολόγηση του άνθρακα μεταξύ της ΕΕ και των παραγωγών τρίτων χωρών.



Σχήμα 9. Λειτουργία Μηχανισμού Συνοριακής Προσαρμογής Άνθρακα (CBAM)

2.3.3 Μηχανισμός FuelEU Maritime

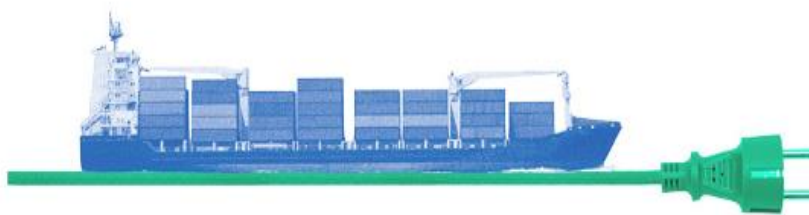
Ο έτερος μηχανισμός είναι το FuelEU Maritime, ο οποίος αποτελεί βασικό στοιχείο της νομοθετικής δέσμης «Fit-for-55» και θα τεθεί σε ισχύ το 2025. Ο κανονισμός θέτει στόχους για τη μείωση της ετήσιας μέσης έντασης GHG της ενέργειας που χρησιμοποιείται από ένα πλοίο (ή, κυρίως, από ένα στόλο ή ομάδα πλοίων). Η απαιτούμενη μείωση της έντασης των αερίων του θερμοκηπίου ξεκινάει μικρή, από -2% το 2025 (σε σύγκριση με μια βασική γραμμή του 2020), φθάνοντας στο -6% το 2030 και -14,5% το 2035, έως το -80% έως το 2050. Στη συνέχεια υπολογίζεται πρόστιμο ή ανταμοιβή με βάση την έκταση της υπο- ή υπεραπόδοσης έναντι του στόχου του σκάφους ή του στόλου για το έτος και το κόστος των καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα που θα χρειαζόταν για την επίτευξη του στόχου.⁴⁷



Σχήμα 10. Στόχοι ροής μείωσης της έντασης των αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με το 2020⁴⁸.

⁴⁷ Council of the European Union, (2023). «FuelEU Maritime initiative: Provisional agreement to decarbonise the maritime sector»

⁴⁸ Council of the European Union, (2023). «Infographic - Fit for 55: increasing the uptake of greener fuels in the aviation and maritime sectors»



Σχήμα 11. Επίκειται η ηλεκτρική τροφοδότηση από ξηράς (OPS/ On-shore power supply) κατά τη διάρκεια ελλιμενισμού ή εφαρμογή τεχνολογίας μηδενικών εκπομπών⁴⁹.

2.4 Εναλλακτικές μορφές καυσίμων

Η υφιστάμενη χρήση καυσίμου στο τομέα της ναυτιλίας, πραγματοποιείται κυρίως σε κινητήρες (μηχανές) εσωτερικής καύσης, ενώ αναπτύσσεται και η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου που τα τελευταία χρόνια όλο και αυξάνεται η χρήση τους.

Από τις πληροφορίες και από τις εξελίξεις που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου, είναι προφανές ότι οι κανονισμοί και τα όρια εκπομπών γίνονται συνεχώς αυστηρότερα. Για πολλά χρόνια, από την οπτική γωνία του πλοιοκτήτη, μικρές προσαρμογές ήταν επαρκείς προκειμένου να συμμορφωθούν με τις εν λόγω απαιτήσεις. Ωστόσο, η βιομηχανία φτάνει σε ένα σημείο όπου πρέπει να αναδυθούν νέες τεχνολογίες καυσίμων που θα συνοδεύουν αυτήν την αλλαγή.

Το ιδανικό θαλάσσιο καύσιμο στο εγγύς μέλλον οφείλει να έχει όλα τα ακόλουθα χαρακτηριστικά – ιδιότητες :

- ✓ Αποτελεσματικός φορέας ενέργειας. Οι φορείς ενέργειας μεταφέρουν ενέργεια από τη μια μορφή στην άλλη και μπορούν να μετατραπούν σε άλλους τύπους ενέργειας, όπως κίνηση, θερμότητα ή φως. Το πετρέλαιο, το υδροποιημένο φυσικό αέριο και το υδρογόνο είναι φορείς ενέργειας, μεταξύ πολλών άλλων.
- ✓ Υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Τα καλύτερα καύσιμα, ειδικά για ναυτιλιακές εφαρμογές όπου τα πλοία πρέπει να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις χωρίς να

⁴⁹ Council of the European Union, (2023). «Infographic - Fit for 55: increasing the uptake of greener fuels in the aviation and maritime sectors»

σταματήσουν για να ανεφοδιαστούν, θα απελευθερώναν πολλή ενέργεια ανά ποσότητα καυσίμου που χρησιμοποιείται.

✓ Ασφαλές για χρήση και αποθήκευση. Πολλοί άνθρωποι ζουν και εργάζονται ανάμεσα στο σημείο όπου παράγονται, μεταφέρονται, αποθηκεύονται και φορτώνονται τα καύσιμα σε ένα πλοίο. Οι ανησυχίες για την ασφάλεια περιλαμβάνουν την τοξικότητα και την καύση του καυσίμου. Η ανάπτυξη και η επίδειξη εναλλακτικών καυσίμων για θαλάσσιες χρήσεις πρέπει επίσης να αποδείξει ότι τα καύσιμα μπορούν να μεταφερθούν και να αποθηκευτούν με ασφάλεια.

✓ Παράγεται σε κλίμακα και ανταγωνιστικό κόστος. Ακόμα κι αν μια εναλλακτική επιλογή καυσίμου είναι τεχνικά εφικτή για την τροφοδοσία ενός πλοίου, ένα άλλο βασικό ερώτημα είναι εάν μπορεί να παραχθεί σε βιομηχανική κλίμακα για να καλύψει τη ζήτηση της ναυτιλίας και εάν το καύσιμο μπορεί να μετακινηθεί σε όλο τον κόσμο με λογικό κόστος .

✓ Ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ένα βιώσιμο εναλλακτικό θαλάσσιο καύσιμο πρέπει να έχει ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής της παραγωγής του. Αυτό σημαίνει ότι θα έχει χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές GHG, αποφεύγοντας τόσο το διοξείδιο του άνθρακα όσο και άλλα GHG όπως το μεθάνιο ή το άζωτο που σχηματίζει όζον. Δεν θα πρέπει επίσης να περιέχει σωματίδια και άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία. Άλλες περιβαλλοντικές εκτιμήσεις περιλαμβάνουν τις συνέπειες της διαρροής καυσίμου, την αλλαγή χρήσης γης και άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις για την παραγωγή της πρώτης ύλης (την πρώτη ύλη που απαιτείται για την παραγωγή του καυσίμου).

Υπάρχει ποικιλία επιλογών καυσίμων για αξιολόγηση χρησιμοποιώντας αυτά τα χαρακτηριστικά, αλλά τα ίδια τα καύσιμα μπορεί να παραχθούν με διαφορετικές μεθόδους, προσθέτοντας επιλογές. Πολλές φορές οι μέθοδοι περιγράφονται ανά χρώμα. Τα «καφέ», «γκρίζα» και «μαύρα» καύσιμα, όπως το μαύρο υδρογόνο, χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα ή άνθρακα στη διαδικασία παραγωγής. Τα «μπλε» καύσιμα χρησιμοποιούν επίσης ορυκτά καύσιμα, αλλά στοχεύουν στην παγίδευση και αποθήκευση των εκπομπών άνθρακα που απελευθερώνονται στη διαδικασία παραγωγής, γνωστή ως δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα. «Πράσινο» είναι ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα καύσιμα που δεν παράγουν επιβλαβείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη διαδικασία παραγωγής.

Οι πράσινες εναλλακτικές επιλογές ερευνώνται και εφαρμόζονται πιλοτικά σε όλο τον κόσμο, αλλά δεν υπάρχει καμία που να πληροί όλες αυτές τις απαιτήσεις για τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Ωστόσο, η αντικατάσταση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων από νέα εναλλακτικά καύσιμα αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία, λαμβάνοντας υπόψη την ισχυρή υποδομή, την δημοτικότητα και τα διαδεδομένα δίκτυα χρήσης των πρώτων.

Παρακάτω θα αναλυθούν ρεαλιστικές προτάσεις που αφορούν εναλλακτικά καύσιμα που ήδη κάποια χρησιμοποιούνται ευρέως στο χώρο της ναυτιλίας, όπως το υγροποιημένο φυσικό αέριο, το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου αλλά και νεότερα όπως το υδρογόνο, η αμμωνία, η μεθανόλη, τα βιοκαύσιμα, σε αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων της ναυτιλίας. Το heavy fuel oil με χρήση πλυντρίδων⁵⁰ καθώς και τα παράγωγά του δεν θα μπουν στη διαδικασία αξιολόγησης, δεδομένου ότι αποτελούν συμβατικά καύσιμα, τα οποία στη παρούσα χρονική περίοδο χρησιμοποιούνται υπό προϋποθέσεις και συγκεκριμένες διαδικασίες, πλην όμως δεν αποτελούν λύση για το απώτερο μέλλον.

2.4.1 Υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas - LNG)

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) είναι πλέον ένα πολύ γνωστό εναλλακτικό καύσιμο στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Είναι ένα υγρό αέριο που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH_4) με κάποιο μείγμα αιθανίου (C_2H_6) που έχει ψυχθεί στην υγρή του μορφή για αποθήκευση. Δεν παράγει σχεδόν καθόλου εκπομπές οξειδίου του θείου ή σωματιδίων, διαθέτει επίσης χαμηλές εκπομπές οξειδίων του αζώτου και εκπομπές GHG μεταξύ 7 και 22% ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα. Επιπλέον, το LNG σε συνδυασμό με μια κυψέλη καυσίμου ντίζελ/ανθρακικού συνδυασμένου κύκλου θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές CO_2 έως και 80%.

Παρόλο αυτών των πλεονεκτημάτων, τα πλοία δεν θα επιτύχουν μηδενικές εκπομπές CO_2 μόνο με LNG. Το LNG εξακολουθεί να είναι ένα ορυκτό καύσιμο και θέτει την πρόκληση παρουσίας μεθανίου. Προκαλούμενο από την ατελή καύση LNG

⁵⁰ Clear seas, (2022). «Exhaust Gas Cleaning Systems (Scrubbers) on Ships: Clearing the Air on the Controversy» Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://clearseas.org/en/blog/exhaust-gas-cleaning-systems-scrubbers-on-ships-clearing-the-air-on-the-scrubbers-controversy/>

στον κινητήρα του πλοίου, το μεθάνιο - ένα ισχυρό αέριο θερμοκηπίου - εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, αντισταθμίζοντας εν μέρει τη μείωση των εκπομπών CO_2 .

Μια άλλη πρόκληση με το LNG ήταν η περιορισμένη υποδομή ανεφοδιασμού καυσίμων και υψηλότερες κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX). Ωστόσο, χάρη στις τεράστιες επενδύσεις σε παγκόσμιες εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου και των ευνοϊκών συνθηκών για χαμηλά λειτουργικά κόστη (OPEX), η τιμή του LNG μειώνεται, καθιστώντας το όλο και πιο ανταγωνιστικό με το HFO. Αυτή η τάση πρόκειται να συνεχιστεί καθώς προχωρά η παγκόσμια συγκέντρωση υποδομής ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου.

Ένα θέμα στο οποίο συμφωνούν οι περισσότεροι ερευνητές και κατασκευαστές κινητήρων είναι ότι το LNG δεν είναι η πιο βιώσιμη λύση καυσίμου μακροπρόθεσμα, καθώς τα πλοία που κινούνται με LNG και οι εγκαταστάσεις παραγωγής φυσικού αερίου εξακολουθούν να εκπέμπουν, και θα συνεχίσουν να εκπέμπουν, σημαντική ποσότητα CO_2 και CH_4 . σε σύγκριση με τις εναλλακτικές του^{51 52 53}. Ωστόσο, το LNG θα μπορούσε να προσφέρει μια αξιοπρεπή λύση στο μεσοδιάστημα.

Η τεχνολογία που απαιτείται για τη χρήση του ΥΦΑ ως καυσίμου πλοίου είναι άμεσα διαθέσιμη. Αντικειμενική δυσκολία αποτελεί η αποθήκευση του σε μονωμένες δεξαμενές για κρυογονική εφαρμογή υψηλού κόστους συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα αποθήκευσης και προμήθειας καυσίμων με βάση το πετρέλαιο.

Συμπερασματικά, το LNG είναι καθαρό, άχρωμο, άοσμο, μη τοξικό και μη - διαβρωτικό καύσιμο⁵⁴ και είναι συμβατό με τους στόχους του IMO. Η χρήση LNG μειώνει διαφορετικούς τύπους εκπομπών⁵⁵ αλλά αυξάνει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου λόγω της διαρροής μεθανίου κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής^{56 57}.

⁵¹ Brynolf S., et al. (2014). «*Environmental assessment of marine fuels: Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol*».

⁵² Heather T., et al. (2015). «*Natural gas as a marine fuel*».

⁵³ Pavlenko N., et al. (2020). «*The climate implications of using LNG as a marine fuel*».

⁵⁴ Arteconi, A., et al. (2010). «*Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe*».

⁵⁵ Lehtoranta, K., et al. (2021). «*Performance and regeneration of methane oxidation catalyst for LNG ships*».

⁵⁶ Manouchehrinia, B., et al. (2020). «*Well to - Propeller environmental assessment of natural gas as a marine transportation fuel in British Columbia, Canada*».

⁵⁷ Schinas, O., et al. (2016). «*Feasibility and commercial considerations of LNG - fueled ships*».

Επιπλέον, το LNG είναι ανταγωνιστικό με τα συμβατικά καύσιμα, αλλά έχει υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης⁵⁸.

2.4.2 Υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (Liquefied Petroleum Gas LPG)

Το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG) είναι ένα υγρό αέριο που αποτελείται από ένα μείγμα κυρίως προπανίου και βουτανίου και αποτελεί μια πιθανή εναλλακτική λύση στο LNG. Το υγραέριο είναι ευρέως διαθέσιμο και εύκολο στο χειρισμό και την αποθήκευση, με αποτέλεσμα χαμηλότερο CAPEX σε σχέση με το LNG.

Ωστόσο, το υγραέριο αν και περιορίζει την παραγωγή άνθρακα, δεν εξαλείφει τις εκπομπές CO₂ και ενώ οι τερματικοί σταθμοί υγραερίου λειτουργούν παγκοσμίως, η υποδομή ανεφοδιασμού καυσίμων αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Αν και τα σημερινά επίπεδα παραγωγής υγραερίου είναι ανεπαρκή για να καταστήσουν αυτό το εναλλακτικό καύσιμο μια ολοκληρωμένη λύση για τη ναυτιλία, σίγουρα θα είναι μέρος της ευρύτερης λύσης, ξεκινώντας από τις εταιρείες μεταφοράς υγραερίου.

Το LPG παράγεται ως υποπροϊόν από δύο διαδικασίες: την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου και τη διύλιση πετρελαίου.

Το μείγμα είναι αέριο υπό συνθήκες περιβάλλοντος, αλλά υπό πίεση το αέριο γίνεται υγρό. Παρόλο που οι τιμές θέρμανσης για το προπάνιο και το βουτάνιο είναι υψηλότερες από εκείνες των καυσίμων με βάση το πετρέλαιο, μια δεξαμενή υγραερίου θα έχει συνήθως τρεις φορές μεγαλύτερο όγκο από μια δεξαμενή με καύσιμο με βάση το πετρέλαιο λόγω της χαμηλής πυκνότητάς της.⁵⁹

2.4.3 Υδρογόνο - H₂ (Hydrogen)

Το υδρογόνο (H₂) θεωρείται εναλλακτικό καύσιμο για τη θάλασσα λόγω των εκπομπών μηδενικού άνθρακα από τη δεξαμενή καυσίμου προς την προωστήρια εγκατάσταση και την υψηλή απόδοση μετατροπής όταν χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου.

Ωστόσο, αν και οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου δεν εμφανίζουν άμεσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εκπομπές που σχετίζονται με την παραγωγή υδρογόνου. Το υδρογόνο παράγεται συνήθως μέσω δύο οδών: του

⁵⁸ Brynolf, S., et al. (2014).

⁵⁹ Cengiz Deniz, et al. (2016). «*Environmental and economical assessment of alternative marine fuels*».

ορυκτού υδρογόνου (γκρι υδρογόνο) μέσω αποθείωσης και αναμόρφωσης του φυσικού αερίου και του ανανεώσιμου υδρογόνου (πράσινο υδρογόνο/ $e-H_2$) μέσω ηλεκτρόλυσης με βάση την ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια⁶⁰. Επί του παρόντος, το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου παράγεται μέσω της οδού των ορυκτών, με αποτέλεσμα υψηλές εκπομπές CO_2 σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού.

Ως εκ τούτου, προκειμένου να εμπορευματοποιηθεί η χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου μηδενικών εκπομπών στη θάλασσα, είναι σημαντικό να κλιμακωθεί η παραγωγή του από ανανεώσιμες πηγές.

Αν και το ανανεώσιμο υδρογόνο είναι ένα αποδοτικό καύσιμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μηδενικές εκπομπές άνθρακα, η διαθεσιμότητά του και η χαμηλή ογκομετρική του πυκνότητα απαιτούν σημαντική πρόσθετη υποδομή και σχεδιασμό συστήματος για θαλάσσιες εφαρμογές. Σε αντίθεση με τα περισσότερα ναυτιλιακά καύσιμα, η αποθήκευση υδρογόνου απαιτεί πολύ υψηλή πίεση ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η αποθήκευση του υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο είναι τυπικά υπό πίεση 250-700 bar, ή εναλλακτικά ως υγρό στους $-254^{\circ}C$. Ακόμη και κάτω από αυτές τις συνθήκες, το συμπιεσμένο υδρογόνο απαιτεί 30 φορές μεγαλύτερη αποθήκευση σε σύγκριση με το HFO και 8 φορές μεγαλύτερη αποθήκευση σε υγρή κατάσταση⁶¹.

Η μειωμένη ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα και η ανάγκη για μεγαλύτερη αποθήκευση θα ευνοούσε επομένως τις θαλάσσιες μεταφορές εσωτερικών ή μικρών αποστάσεων σε σχέση με τις ποντοπόρες θαλάσσιες μεταφορές, καθώς αυτοί οι τύποι απαιτούν λιγότερη αποθήκευση καυσίμου επί του σκάφους⁶².

Επιπλέον, υπάρχει υψηλός κίνδυνος ασφάλειας γύρω από τη χρήση υδρογόνου. Δεδομένου ότι το αέριο είναι εξαιρετικά εκρηκτικό, η διαρροή θα πρέπει να αποφεύγεται ανά πάσα στιγμή. Αυτό είναι ιδιαίτερα μια πρόκληση σε συνθήκες αποθήκευσης σε υψηλή πίεση, καθώς τα μόρια ουσιαστικά «σπρώχνονται» στο αποθηκευτικό υλικό σε πιέσεις έως και 700 bar. Επιπλέον, το μικρό του μέγεθος σωματιδίων το καθιστά ικανό να διαχέεται μέσω πολλών υλικών, συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, καθιστώντας τα εύθραυστα και υπόκεινται σε

⁶⁰ Hansson Julia, et al. (2019). «*Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders*».

⁶¹ Bengtsson S, et al. (2011). «*A comparative life cycle assessment of marine fuels: Liquefied natural gas and three other fossil fuels*»..

⁶² E4Tech. (2018). «*Master plan for CO2 reduction in the Dutch shipping sector*»

ξαφνικό κάταγμα⁶³. Επομένως, η διανομή, η αποθήκευση και η ανεφοδιασμός υδρογόνου απαιτούν εξαιρετικά εξελιγμένα συστήματα, τα οποία αναπόφευκτα έχουν υψηλό κόστος. Συνολικά, το κόστος καυσίμου υδρογόνου είναι υψηλότερο, ενδεχομένως κατά μια τάξη μεγέθους, σε σύγκριση με τα συμβατικά είδη καυσίμων, αν και αυτό το χάσμα θα πρέπει να μειωθεί καθώς μειώνεται το κόστος της ηλεκτρόλυσης⁶⁴

Συμπερασματικά, το υδρογόνο έχει χαμηλό σημείο ανάφλεξης, υψηλή ταχύτητα φλόγας, μεγάλο εύρος αναφλεξιμότητας και υψηλή διαχυσιμότητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με άλλα καύσιμα⁶⁵. Το υδρογόνο παράγει μηδενικές εκπομπές όταν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές⁶⁶. Από την άλλη πλευρά, είναι πολύ αντιδραστικό⁶⁷ και έχει μεγάλες δυσκολίες στο χειρισμό και υψηλό κόστος μεταφοράς^{69 70 71}.

2.4.4 Αμμωνία - NH_3 (Ammonia)

Τα τελευταία χρόνια, η αμμωνία (NH_3) έχει προταθεί όλο και περισσότερο ως δυνητικό θαλάσσιο καύσιμο μηδενικού άνθρακα λόγω της έλλειψης εκπομπών GHG και της ικανότητάς της να αποθηκεύει αποτελεσματικά υδρογόνο⁷². Η υψηλή θερμοκρασία ρευστοποίησής του σε σύγκριση με το υδρογόνο (-33°C σε σύγκριση με -253°C για το H_2) το καθιστά πιο απλό στην αποθήκευση και τη διανομή του⁷³. Επιπλέον, η αμμωνία είναι 46% πιο ενεργειακά πυκνή ανά μονάδα όγκου από το υγρό υδρογόνο, εξοικονομώντας έτσι χώρο και κόστος διανομής σε σύγκριση με το H_2 ⁷⁴.

Αν και η χρήση της αμμωνίας ως καυσίμου πλοίων παράγει μηδενικές εκπομπές CO_2 από τη δεξαμενή καυσίμου προς την προωστήρια εγκατάσταση, η αβεβαιότητα σχετικά με τις αυξημένες εκπομπές NO_x από την καύση αμμωνίας δεν πρέπει να

⁶³ DNV GL. (2019). «*Comparison of Alternative Marine Fuels*».

⁶⁴ Raucci C, Calleya J, Suarez de la Fuente S, Pawling R., (2015). «*Hydrogen on board ship: A first analysis of key parameters and implications*». International Conference on Shipping in Changing Climates.

⁶⁵ Pan, H., et al. (2014). «*Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine*».

⁶⁶ Ryste, J. A. (2019). «*Comparison of alternative marine fuels*».

⁶⁷ Konnov, A. A. (2019). «*Yet another kinetic mechanism for hydrogen combustion*».

⁶⁸ Elishav, O., et al. (2020). «*Progress and prospective of nitrogen-based alternative fuels*».

⁶⁹ Plana, C., et al. (2010). «*Ni on alumina-coated cordierite monoliths for in situ generation of CO-free H_2 from ammonia*».

⁷⁰ Valera-Medina, A., et al. (2017). «*Coherent structure impacts on blowoff using various syngases*».

⁷¹ Taccani, R., et al. (2020). «*High energy density storage of gaseous marine fuels: An innovative concept and its application to a hydrogen powered ferry*».

⁷² E4Tech. (2018). «*Master plan for CO2 reduction in the Dutch shipping sector*».

⁷³ DNV GL. (2019). «*Comparison of Alternative Marine Fuels*».

⁷⁴ Ash N., et al. (2019). «*Sailing on Solar - Could green ammonia decarbonise international shipping?*».

αγνοηθεί⁷⁵. Επιπλέον, η υψηλή διαβρωτικότητα και η τοξικότητά της για τον άνθρωπο απαιτούν τη λήψη πρόσθετων μέτρων ασφάλειας και υγείας σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού και επί του πλοίου⁷⁶.

Επιπλέον, η προσαρμογή της παγκόσμιας υποδομής ανεφοδιασμού καυσίμων για τη διανομή και τη διαχείριση της αμμωνίας απαιτεί σημαντικές επενδύσεις. Αν και η απαίτηση για τέτοιες επενδύσεις μπορεί να μην αποτελεί πρόβλημα για τις αναπτυγμένες χώρες και τα λιμάνια, παρουσιάζει σημαντικά εμπόδια στην υιοθέτησή τους στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Η αμμωνία έχει χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση, κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα και κυψέλες καυσίμου. Μια πρόσφατη βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει ότι υπάρχει περιορισμένος αριθμός δοκιμών που έχουν δημοσιευθεί για την αμμωνία σε κινητήρες εσωτερικής καύσης και ότι στις διαθέσιμες δοκιμές χρειάζονταν σημαντικές ποσότητες καυσίμου ανάφλεξης (όπως υδρογόνο, ντίζελ ή αλκοόλες)^{77 78}.

Στις κυψέλες καυσίμου, η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ή μπορεί να χωριστεί σε H_2 και N_2 όπου μετά το υδρογόνο χρησιμοποιείται απευθείας στο στοιχείο. Αν και οι κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) που χρησιμοποιούν καθαρισμένο υδρογόνο είναι εμπορικές και δοκιμάζονται σε ναυτιλιακές εφαρμογές, εναλλακτικές λύσεις που χρησιμοποιούν απευθείας αμμωνία (π.χ. κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)) δεν έχουν δοκιμαστεί στο πλοίο⁷⁹. Σε οποιαδήποτε από τις δύο περιπτώσεις, η εφαρμογή αμμωνίας στις κυψέλες καυσίμου παραμένει μια σχετικά δαπανηρή λύση.

Η αμμωνία παράγεται ήδη σε παγκόσμια κλίμακα για την παραγωγή λιπασμάτων. Η τρέχουσα παραγωγική διαδικασία χρησιμοποιεί υδρογόνο που λαμβάνεται από φυσικό αέριο, δημιουργώντας αυτό που ονομάζεται «καφέ αμμωνία», επειδή εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα, ένα GHG. Παρόμοια με το πράσινο υδρογόνο που συζητήθηκε παραπάνω, η «πράσινη» αμμωνία (επίσης αποκαλούμενη e-αμμωνία) είναι η αμμωνία που παράγεται με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το νερό

⁷⁵ Hansson J., et al. (2020). «*The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis*».

⁷⁶ DNV GL. (2019). «*Comparison of Alternative Marine Fuels*».

⁷⁷ Ash N., et al. (2019). «*Sailing on Solar - Could green ammonia decarbonise international shipping?*».

⁷⁸ Hansson J. et al. (2020). «*On the potential of ammonia as fuel for shipping – A synthesis of knowledge*».

⁷⁹ Hansson J., et al. (2020). «*The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis*».

αποσυντίθεται σε υδρογόνο και οξυγόνο και το υδρογόνο στη συνέχεια συνδυάζεται με άζωτο υπό πίεση και υψηλή θερμοκρασία. Πιλοτικά έργα για την παραγωγή πράσινης αμμωνίας, τη χρήση κινητήρων και τις πρακτικές αποθήκευσης προχωρούν με ταχείς ρυθμούς σε όλο τον κόσμο, αλλά δεν είναι ακόμη χρησιμοποιήσιμα σε βιομηχανική κλίμακα.

Συνολικά, η τεχνολογία για την υποστήριξη της αμμωνίας ως καυσίμου πλοίων εξακολουθεί να παρουσιάζει χαμηλή ωριμότητα, καθώς τα ποσοστά παραγωγής αμμωνίας δεν μπορούν ακόμη να ανταπεξέλθουν στην εμπορευματοποίησή της και η βασική υποδομή ανεφοδιασμού δεν υπάρχει⁸⁰. Ωστόσο, η αμμωνία που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές υδρογόνου και αζώτου μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση για τη ναυτιλία μακροπρόθεσμα, καθώς εκτός από μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή της δεν εξαρτάται από εξαντλημένες πρώτες ύλες και, εάν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι εκπομπές CO_2 εξαλείφονται πλήρως.

Συμπερασματικά, η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ή αλκαλικές κυψέλες καυσίμου⁸¹. Η αμμωνία δεν περιέχει άνθρακα και θείο, επομένως, δεν είναι πηγή εκπομπών CO_2 , CO και άκαυτων HC, καθώς και εκπομπών SO_x και PM⁸². Από την άλλη πλευρά, το μεγαλύτερο πρόβλημα με την αμμωνία είναι να εισπνεύσει το πλήρωμα λόγω της υψηλής τοξικότητάς της⁸³. Εξάλλου, ένα πλοίο που χρησιμοποιεί αμμωνία ως καύσιμο χρειάζεται 1,6-2,3 φορές περισσότερο όγκο και 1,4-1,6 φορές περισσότερο βάρος⁸⁴. Επίσης, το κόστος παραγωγής της αμμωνίας είναι υψηλότερο από τα ορυκτά καύσιμα⁸⁵.

2.4.5 Μεθανόλη - CH_3OH (Methanol)

Η μεθανόλη, αναμένεται να είναι ένα από τα καύσιμα στο μείγμα ανανεώσιμων καυσίμων για τον τομέα των μεταφορών μαζί με αρκετούς άλλους φορείς ενέργειας όπως το υδρογόνο, και η αμμωνία. Είναι υγρό σε θερμοκρασία δωματίου και πίεση περιβάλλοντος και έχει ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα παρόμοια με αυτή του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG).

⁸⁰ DNV GL. (2019). «*Comparison of Alternative Marine Fuels*».

⁸¹ Dimitriou, P., et al. (2020). «*A review of ammonia as a compression ignition engine fuel*».

⁸² Hansson, J., et.al. (2020).

⁸³ Triviza, N. L., et.al. (2020). «*Safety and reliability analysis of an ammonia powered fuel-cell system*».

⁸⁴ Kim, K., et al. (2020). «*A preliminary study on an alternative ship propulsion system fueled by ammonia: Environmental and economic assessments*».

⁸⁵ IEA. (2020). «*Key world energy statistics*», IEA. (2019). «*The future of hydrogen*».

Συγκεκριμένα, η μεθανόλη, με τη χημική δομή CH_3OH , είναι η απλούστερη αλκοόλη με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα και την υψηλότερη περιεκτικότητα σε υδρογόνο από οποιοδήποτε υγρό καύσιμο. Η μεθανόλη είναι ένα υγρό μεταξύ 176 και 338 K ($-93^{\circ}C$ έως $+65^{\circ}C$) σε ατμοσφαιρική πίεση - καθιστώντας την αποθήκευση λιγότερο ακριβή σε σύγκριση με τα LNG, H_2 και NH_3 . Λόγω της πυκνότητας και της χαμηλότερης τιμής θέρμανσης ($19,5 \text{ MJ / kg}$), η μεθανόλη απαιτεί περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερες δεξαμενές καυσίμου από το MGO ανά μονάδα ενέργειας, και παρόμοιες ή μικρότερες δεξαμενές καυσίμου από το LNG.

Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν τη μεθανόλη μια εφικτή επιλογή ως εναλλακτικό καύσιμο για τη θάλασσα, επειδή ο χειρισμός και η αποθήκευση της μεθανόλης είναι πολύ πιο απλή από τα κρυογονικά καύσιμα όπως το LNG και το υγροποιημένο υδρογόνο.

Η μεθανόλη παράγεται επί του παρόντος με χρήση τροφοδοσίας φυσικού αερίου και είναι υγρό υπό πίεση περιβάλλοντος. Σε σύγκριση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα, η θερμοκρασία του κάνει την αποθήκευση και τον χειρισμό πολύ πιο εύκολο. Ωστόσο, η μεθανόλη μπορεί να μην αποτελεί καθαρά μηδενική επιλογή λόγω των εκπομπών μεθανίου κατά την παραγωγή και την καύση και μπορεί να προσφέρει μόνο μια σχετικά περιορισμένη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά καύσιμα πλοίων, αν και προτείνεται ότι η μεθανόλη που προέρχεται από βιομάζα μπορεί να επιφέρει μείωση έως και 50 τοις εκατό.

Η μεθανόλη βρίσκεται διαθέσιμη σε παγκόσμια κλίμακα και η παραγωγή της σε ετήσια βάση κυμαίνεται άνω των 70 εκατομμύρια τόνων. Πρωτεύουσα ύλη της παραγωγής μεθανόλης αποτελεί το φυσικό αέριο, αν και δύναται να παρασκευασθεί 100% και με ανανεώσιμο τρόπο, παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές, όπως ποικιλία ζωοτροφών ή ως ηλεκτροκαύσιμο. Η αξιοποίηση αυτής της δυνατότητας καθιστά την μεθανόλη ως βιώσιμο εναλλακτικό καύσιμο.

Η μεθανόλη ως καύσιμο είναι συμβατό με τους υφιστάμενους περιορισμούς για την μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων και από ρυθμιστικής σκοπιάς η θαλάσσια μεθανόλη είναι ένα μελλοντικό καύσιμο που θα μπορούσε να συμμορφώνεται με την πιο αυστηρά καθορισμένη νομοθεσία για τη μείωση των εκπομπών που εξετάζεται.

Η τρέχουσα υποδομή ανεφοδιασμού, αποθήκευσης και διανομής μέσω μικρών τροποποιήσεων είναι συμβατή στο πλαίσιο διαχείρισης της μεθανόλης, λόγω της

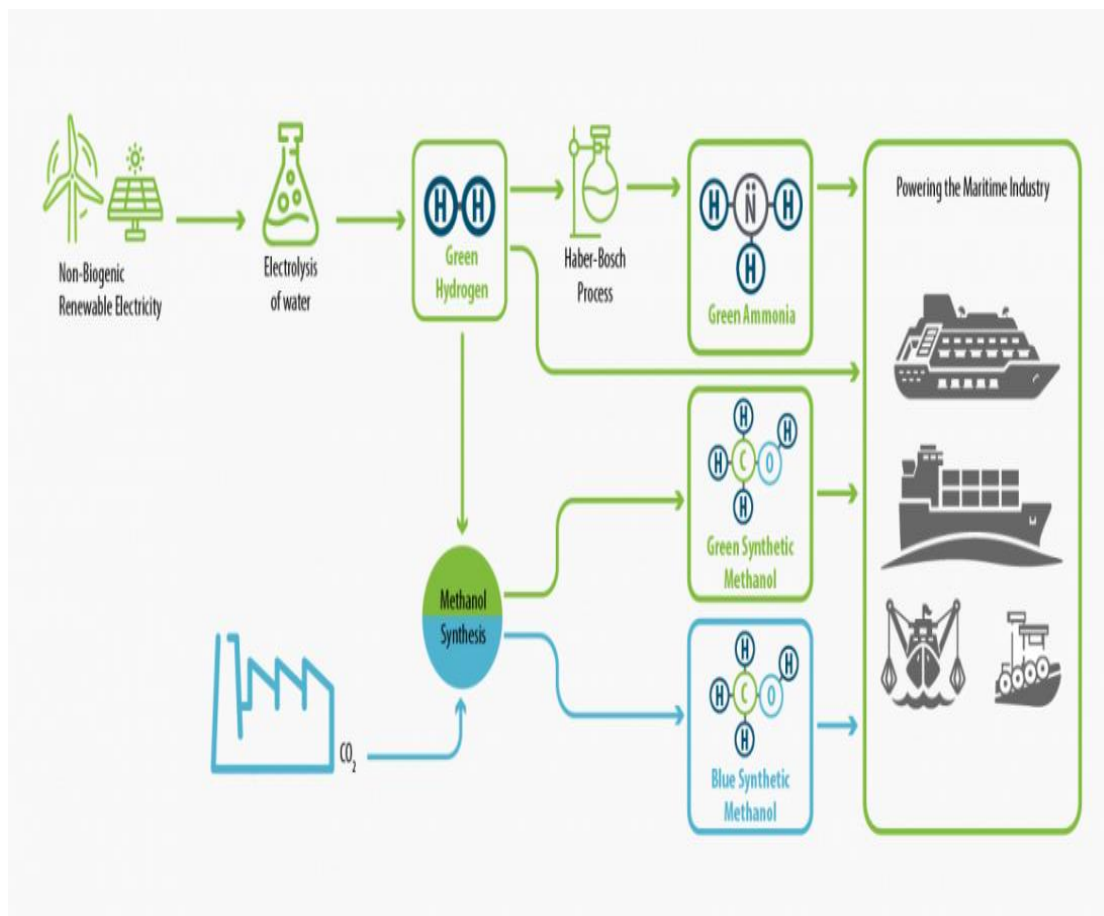
ρευστότητας της. Απαιτούνται μόνο μικρές τροποποιήσεις για να επιτρέπεται η μεθανόλη να είναι καύσιμο χαμηλού σημείου ανάφλεξης. Συνεπώς, το επενδυτικό κόστος υποδομής είναι σχετικά μέτριο σε σύγκριση με πιθανές εναλλακτικές λύσεις, ενώ η τιμή της παρουσιάζει περιφερειακή διακύμανση.

Λόγω της πυκνότητάς τους και της χαμηλότερης θερμαντικής τους αξίας, οι δεξαμενές καυσίμου μεθανόλης είναι περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερες από τις δεξαμενές πετρελαίου για το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο. Η μεθανόλη είναι τοξική, εύφλεκτη και μπορεί να είναι εκρηκτική. Ως εκ τούτου, πρέπει να αποθηκεύεται και να χειρίζεται προσεκτικά. Έχει σημείο ανάφλεξης περίπου 11°C και θεωρείται καύσιμο χαμηλού σημείου ανάφλεξης. Επιπλέον, η μεθανόλη καίγεται με μια αόρατη φλόγα. Τα πλοία που χρησιμοποιούν μεθανόλη ως καύσιμο πρέπει επομένως να είναι ειδικά σχεδιασμένα για να προστατεύουν το πλήρωμα και να διασφαλίζουν την ορθή λειτουργία.

Σε αντίθεση με το υδρογόνο (H_2) ή την αμμωνία (NH_3), η χημική ένωση της μεθανόλης περιέχει ένα άτομο άνθρακα. Αυτό σημαίνει ότι η δημιουργία μεθανόλης περιλαμβάνει άνθρακα (CO_2). Το αν μπορεί να είναι καύσιμο μηδενικών εκπομπών GHG εξαρτάται από το αν αυτός ο άνθρακας προέρχεται από ανανεώσιμη ή μη πηγή. Το μεγαλύτερο μέρος της μεθανόλης που παράγεται σήμερα δεν έχει μηδενικές εκπομπές GHG καθώς η παραγωγή χρησιμοποιεί φυσικό αέριο.

Η μεθανόλη χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών GHG μπορεί να είναι ένας από τους δύο τύπους: βιομεθανόλη ή e-μεθανόλη. Η βιομεθανόλη δημιουργείται από απόβλητα βιομάζας που έχουν τον άνθρακα που απαιτείται για την παραγωγή μεθανόλης, όπως γεωργικά απόβλητα, λύματα ή απόβλητα ξύλου. Η e-μεθανόλη δημιουργείται συνδυάζοντας πράσινο υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα από τη δέσμευση άνθρακα, τη διαδικασία αφαίρεσης του άνθρακα απευθείας από την ατμόσφαιρα ή την έλξη του καθώς απελευθερώνεται από μια πηγή. Η δέσμευση άνθρακα είναι μια τεχνολογία για την οποία ελπίζουν οι άνθρωποι, αλλά δεν έχει ακόμη αποδειχθεί πλήρως ότι λειτουργεί. Επιπλέον, η διαδικασία παραγωγής για την παραγωγή μεθανόλης χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών GHG πρέπει να τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Συμπερασματικά, η μεθανόλη μπορεί να χρησιμοποιήσει^{86 87} την υποδομή του LNG αλλά είναι τοξική και διαβρωτική^{88 89}. Η μεθανόλη παράγει χαμηλά GHG και άλλες εκπομπές⁹⁰ και έχει ένα αποδεκτό αρχικό κόστος⁹¹.



Σχήμα 12. Παραγωγή πράσινων εναλλακτικών καυσίμων

2.4.6 Βιοκαύσιμα (Biofuels) Βιοντήζελ (Biodiesel), Βιοαιθανόλη, Βιοαέριο(Biogas), Βιομεθανόλη

Τα βιοκαύσιμα παράγονται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες και περιέχουν πολύ χαμηλό ή καθόλου θείο. Έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν τις εκπομπές GHG του

⁸⁶ Ančić, I., et al. (2020). «Alternative power options to reduce carbon footprint of ro-ro passenger fleet: A case study of Croatia».

⁸⁷ Andersson, K., & Salazar, C. M. (2015). «Methanol as a Marine Fuel Report».

⁸⁸ Ammar, N. R. (2019). «An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular container ship».

⁸⁹ Verhelst, S., et al. (2019). «Methanol as a fuel for internal combustion engines».

⁹⁰ Tuner, M. (2015). «Combustion of alternative vehicle fuels in internal combustion engines. A report on engine performance from combustion of alternative fuels based on literature review»

⁹¹ Ellis, J., et al. (2015). «Study on the Use of Ethyl and Methyl Alcohol as Alternative Fuels in Shipping».

κύκλου ζωής από τον θαλάσσιο τομέα και, ταυτόχρονα, να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της βιομηχανίας για εκπομπές θείου. Ελλείψει θείου, τα βιοκαύσιμα εκπέμπουν πολύ χαμηλά επίπεδα σωματιδίων κατά την καύση τους. Λόγω των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων τους, τα αειφόρα βιοκαύσιμα θεωρούνται καύσιμα πλοίων που θα μπορούσαν να απελευθερώσουν τον άνθρακα από τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος εισαγωγής βιοκαυσίμων στη ναυτιλία είναι είτε μέσω της παραγωγής βιοκαυσίμων που μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τα καύσιμα. Αυτά τα βιοκαύσιμα μπορούν επίσης να αναμειχθούν με συμβατά ορυκτά καύσιμα πλοίων σε ποσότητες σύμφωνα με τις οδηγίες των σχεδιαστών κινητήρων ή να χρησιμοποιηθούν ως άμεσο υποκατάστατο καύσιμο από διάφορες πρώτες ύλες, όπως αιθανόλη καλαμποκιού ή ζάχαρη μέσω διαφορετικών διεργασιών..

Τα σημαντικά εμπόδια που εμποδίζουν την ευρεία υιοθέτηση των βιοκαυσίμων περιλαμβάνουν περιβαλλοντικά, οικονομικά και τεχνικά ζητήματα. Για να γίνει μια «πράσινη» επιλογή, τα βιοκαύσιμα πρέπει να προέρχονται από βιώσιμες πρώτες ύλες. Άλλες ανησυχίες σχετίζονται με την επεκτασιμότητα και τον ανταγωνισμό στην αγορά, καθώς και με ζητήματα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ορισμένων βιοκαυσίμων.

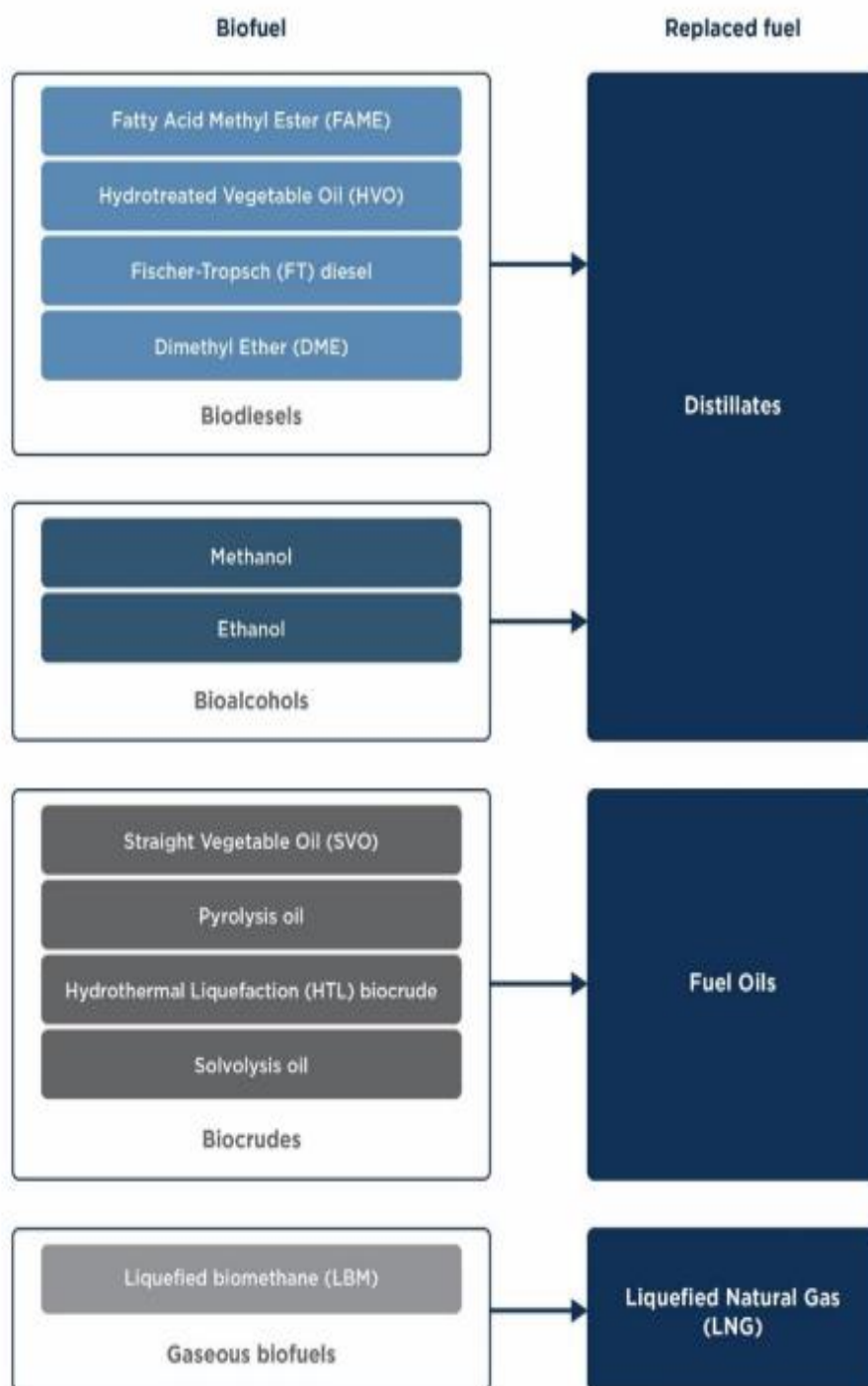
Τα κύρια βιοκαύσιμα που σχετίζονται με τη θαλάσσια ναυτιλία μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις ομάδες: βιοντίζελ, βιοαλκοόλες, βιοκαύσιμα και αέρια βιοκαύσιμα, ως ακολούθως:

❖ Το βιοντίζελ είναι ένα ανανεώσιμο καύσιμο που παρασκευάζεται από φυτικά έλαια, ζωικά λίπη ή ανακυκλωμένο μαγειρικό λίπος.

❖ Οι βιοαλκοόλες είναι μια ομάδα ανανεώσιμων καυσίμων που προέρχονται από βιολογικά υλικά όπως σάκχαρα, άμυλα ή κυτταρινική βιομάζα.

❖ Τα βιοκαύσιμα είναι υγρά καύσιμα που προέρχονται από βιομάζα μέσω διεργασιών όπως η πυρόλυση, η υδροθερμική υγροποίηση ή η αεριοποίηση.

❖ Τα αέρια βιοκαύσιμα παράγονται από βιομάζα μέσω διαδικασιών αναερόβιας χώνευσης, ζύμωσης ή αεριοποίησης.



Σχήμα 13. Επισκόπηση των βιοκαυσίμων, των οδών παραγωγής και των ομάδων βιομάζας-πρώτων υλών. (Πηγή: European Maritime Safety Agency (2022), Update on potential of biofuels in shipping, EMSA, Lisbon)

Τα βιοντίζελ και οι βιοαλκοόλες μπορούν να χρησιμεύσουν ως καύσιμα για τα αποστάγματα θαλάσσιων καυσίμων. Τα βιοακατέργαστα (biocrude) μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα (HFO) και τα VLSFO και ULSFO. Τα αέρια βιοκαύσιμα (όπως το υγροποιημένο βιομεθάνιο [LBM]) μπορούν να χρησιμοποιηθούν

ως καύσιμα που μπορούν να αντικαταστήσουν το υγροποιημένο φυσικό αέριο που προέρχεται από ορυκτά αέρια (LNG).

Για κάθε βιοκαύσιμο, έχουν προσδιοριστεί έως και δύο κύριες οδοί παραγωγής (δηλαδή, συγκεκριμένες σειρές διαδοχικών διαδικασιών παραγωγής) και προσδιορίζονται οι κύριες ομάδες πρώτης ύλης. Υπάρχουν έξι ομάδες πρώτων υλών: ελαιούχες καλλιέργειες, καλλιέργειες ζάχαρης και αμύλου, λιγνοκυτταρινικές καλλιέργειες, Λίπη, λάδια και γράσα (FOG), λιγνοκυτταρινικά και γεωργικά υπολείμματα, και τα φύκια. Η καταλληλότητα αυτών των βιοκαυσίμων εξετάζεται για την δυνατότητα χρήσης σε κινητήρες πλοίων.

Τα βιοκαύσιμα συχνά κατηγοριοποιούνται μεταξύ συμβατικών και προηγμένων βιοκαυσίμων. Τα συμβατικά βιοκαύσιμα βασίζονται σε καλλιέργειες και συχνά αναφέρονται ως βιοκαύσιμα «πρώτης γενιάς». Από την άλλη πλευρά, τα προηγμένα βιοκαύσιμα παράγονται από μη εδωδιμες πρώτες ύλες βιομάζας και αναφέρονται ως βιοκαύσιμα «δεύτερης γενιάς». Επομένως, ο όρος «προηγμένα βιοκαύσιμα» αναφέρεται στην πρώτη ύλη τους και όχι στην πορεία παραγωγής⁹².

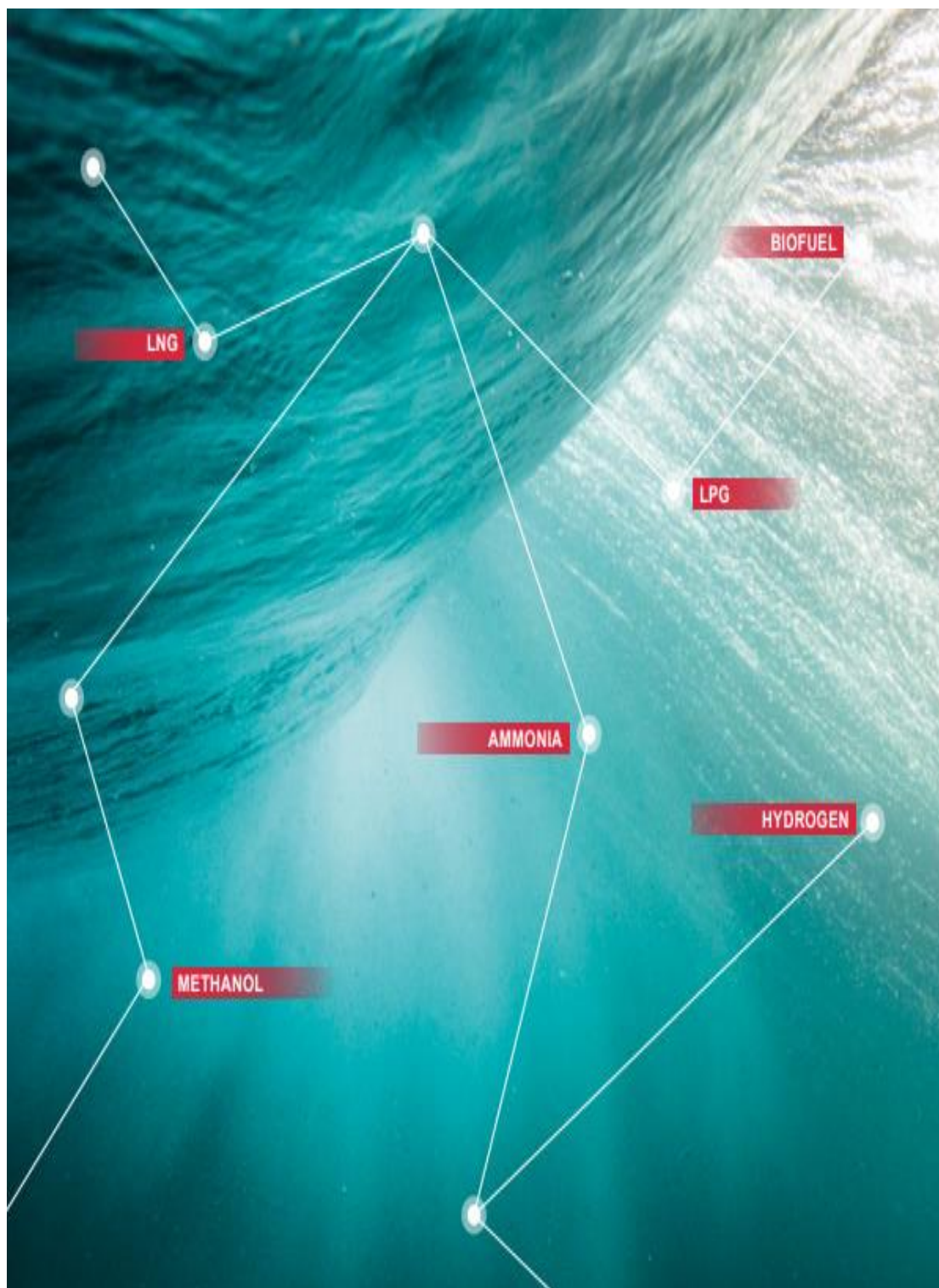
2.5 Συγκριτική παρουσίαση εναλλακτικών καυσίμων

Ενώ μόνο το 0,5% των πλοίων που λειτουργούσαν στην αρχή της εφαρμογής των μέτρων (2020) ήταν εξοπλισμένα με συστήματα εναλλακτικής ενέργειας, το ποσοστό αυτό έχει αυξηθεί σε 11,84% στα πλοία που παραγγέλθηκαν⁹³. Προβλέπεται ότι ο ρυθμός αυτός θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια με την έλευση νέων περιβαλλοντικών κανονισμών, αλλά υπάρχουν σοβαροί περιορισμοί που πρέπει να ξεπεραστούν.

Κάθε εναλλακτικό καύσιμο έχει το δικό του σύνολο πλεονεκτημάτων και προκλήσεων και η καταλληλότητα ενός συγκεκριμένου καυσίμου εξαρτάται από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα πρώτων υλών, η τεχνολογική ωριμότητα, οι απαιτήσεις υποδομής και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Μια διαφοροποιημένη προσέγγιση, που συνδυάζει πολλαπλά εναλλακτικά καύσιμα και τεχνολογίες, είναι συχνά απαραίτητη για την αντιμετώπιση των πολύπλοκων προκλήσεων της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της επίτευξης ενεργειακής ασφάλειας στον τομέα των μεταφορών.

⁹²Laursen, R., et al., (2022). «*Potential of Ammonia as Fuel in Shipping*»

⁹³ Lee, H. J., et al., (2020). «*Economic benefits of introducing LNG-fueled ships for imported flour in South Korea*».



Σχήμα 14⁹⁴. Τα εξεταζόμενα εναλλακτικά καύσιμα (LNG, LPG, H₂, NH₃, CH₃OH & Biofuels)

Μια σύνοψη των κύριων χαρακτηριστικών – ιδιοτήτων των εναλλακτικών καυσίμων του κεφαλαίου, δίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

⁹⁴ Whitepaper Alternative fuels outlook for shipping (2022). <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/alternative-fuels-outlook-shipping>

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά-ιδιότητες εναλλακτικών καυσίμων. (Δεδομένα: θερμιδική αξία⁹⁵, απαίτηση αποθήκευσης^{96 97}, αποτελεσματικότητα χρήσης και υποπροϊόντα^{98 99 100 101 102}, διαθεσιμότητα χρήσης^{103 104 105}).

Fuel Type	Calorific Value (MJ/kg)	Storage Requirement Onboard	Utilisation Efficiency		Utilisation by-Products	Availability of Utilisation Technologies in Commercial Use
			FC (Electric Efficiency)	ICE		
Natural Gas (liquefied)	50–55	–163 °C (Pressurised or unpressurised)	45–60% (SOFC) 35–45%(PEMFC)	35–40%	CO ₂ , H ₂ O, NO _x (ICE)	ICE: Yes, available for wide commercial use FC: Underdevelopment, no commercial case in marine application
Hydrogen	120–140	350–700 bar (gases), –252.8 °C (liquefied), Material-based storage	50–60% (PEMFC/SOFC)	30–35%	H ₂ O, NO _x (ICE)	ICE: Yes, available for commercial use FC: Yes, available for commercial use
Ammonia	22.5	21 °C under 8.8 bar or –33 °C under atmospheric pressure	30–60% (SOFC) 15–30%(AFC)	35–40%	H ₂ O, N ₂ , NO _x (ICE)	ICE: underdevelopment FC: underdevelopment, no commercial case in marine application
Methanol	22.7	liquid at ambient temperature	30–50%(SOFC) 20–30%(DMFC)	Up to 40%	CO ₂ , H ₂ O, CO(ICE), NO _x (ICE)	ICE: Yes, available for wide commercial use FC: Underdevelopment, no commercial case in marine application
Bio-diesel	38–46	liquid at ambient temperature	10–30% (SOFC)	Varies	CO ₂ , H ₂ O, CO(ICE), NO _x (ICE)	ICE: Yes, available for wide commercial use FC: Underdevelopment, no commercial case in marine application

⁹⁵ Stančín, H., et.al. (2020). «A review on alternative fuels in future energy system».

⁹⁶ Vandebroek, L., et.al. (2012). «Safety Aspects of the use of LNG for Marine Propulsion».

⁹⁷ Veldhuis, I.J.S., et.al. (2007). «Hydrogen fuel in a marine environment».

⁹⁸ Kobayashi, H., et.al. , (2019). «Science and technology of ammonia combustion».

⁹⁹ Ghorbani, A., (2011). «A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler».

¹⁰⁰ Coronado, C.R., et.al. (2009). «Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel».

¹⁰¹ Siddiqui, O., et.al. (2020). «Experimental investigation of improvement capability of ammonia fuel cell performance with addition of hydrogen».

¹⁰² Wang Y.,et al. (2020). «Efficient and durable ammonia power generation by symmetric flat-tube solid oxide fuel cells».

¹⁰³ DNV, (2018). «Maritime Forecast to 2050—Energy Transition Outlook».

¹⁰⁴ Gallucci, M. (2021). «Why the Shipping Industry Is Betting Big on Ammonia».

¹⁰⁵ Noor, C.W., et.al. (2018). «Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review».

Η χρήση καυσίμων στη ναυτιλία χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και ουδέτερα άνθρακα, αποτελεί μονοπάτι βιώσιμης εξέλιξης, αλλά κάθε επιλογή έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

❖ Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) προσφέρει άμεση μείωση των εκπομπών CO_2 και υπόκειται σε όλους τους ρυθμιστικούς περιορισμούς, έχοντας ένα καλά ανεπτυγμένο δίκτυο εφοδιασμού με αντίστοιχες κατάλληλες εγκαταστάσεις καυσίμων σε παγκόσμια κλίμακα, που διαθέτουν κρυογονικές συνθήκες ($-162^{\circ}C$) στο πλαίσιο αποθήκευσης του. Η τιμή του είναι πλήρως ανταγωνιστική και βρίσκεται ήδη σε εμπορική χρήση. Ωστόσο, είναι ένα καύσιμο με βάση τον άνθρακα που υπόκειται στο πρόβλημα της διαφυγής του μεθανίου.

❖ Το υγραέριο (LPG) είναι ένα ώριμο καύσιμο για πρόωση που προσφέρει επίσης σημαντική μείωση στις εκπομπές CO_2 . Απαιτεί χαμηλότερο CAPEX από το LNG ως καύσιμο, αλλά είναι ένα εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο που δημιουργεί κινδύνους σε περίπτωση διαρροών. Υπολείπεται σε υποδομές και δεν υφίσταται μεγάλη εμπειρία λειτουργίας.

❖ Το υδρογόνο παράγει μηδενικές εκπομπές όταν η παράγωγή προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Γενικότερα τα ηλεκτρονικά καύσιμα είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση, αλλά μια λύση που απαιτεί υψηλό επίπεδο διαθεσιμότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το πράσινο υδρογόνο (e-hydrogen) παράγεται από νερό χρησιμοποιώντας κυρίως ηλεκτρόλυση και ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή e-μεθανίου, e-μεθανόλης, e-αμμωνίας και ηλεκτρονικών αποσταγμάτων. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρονικών καυσίμων ενδέχεται να έχουν υψηλές απαιτήσεις CAPEX και OPEX για να παραμείνουν οικονομικά βιώσιμες, γεγονός που θα επηρεάσει το κόστος των ηλεκτρονικών καυσίμων.

❖ Η αμμωνία έχει σχετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με ορισμένα άλλα εναλλακτικά καύσιμα, παράγεται παγκοσμίως σε μεγάλες ποσότητες, δεν υπάρχουν εκπομπές CO_2 και ήδη παράγεται σε σημαντικούς όγκους για τη χημική βιομηχανία. Στην αντίπερα όχθη, η αμμωνία είναι τοξική και ο χειρισμός, η αποθήκευση και η μεταφορά της απαιτούν προσεκτική εξέταση και μέτρα ασφαλείας. Η αποθήκευση και η μεταφορά αμμωνίας απαιτεί εξειδικευμένη υποδομή για την ασφαλή αντιμετώπιση της υψηλής αντιδραστικότητάς της. Συμπερασματικά, ενώ η αμμωνία δείχνει πολλά

υποσχόμενη ως πιθανό εναλλακτικό καύσιμο για τα πλοία λόγω της υψηλής ενεργειακής της πυκνότητας και του δυναμικού απανθρακοποίησης, σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την τοξικότητα, την υποδομή και την τεχνολογία κινητήρων πρέπει να αντιμετωπιστούν για την ευρεία υιοθέτησή της. Τελικά, η επιλογή εναλλακτικού καυσίμου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η τεχνολογική ετοιμότητα, τα ρυθμιστικά πλαίσια και η οικονομική βιωσιμότητα.

❖ Η μεθανόλη είναι μια επικίνδυνη χημική ουσία που απαιτεί αυξημένα μέτρα ασφαλείας λόγω της ευφλεκτότητας και της τοξικότητάς της. Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από πολλά χρόνια επί των αερομεταφορέων μεθανόλης, η υιοθέτηση της μεθανόλης ως καύσιμο στα εμπορικά πλοία είναι εφικτή βραχυπρόθεσμα έως μεσοπρόθεσμα. Είναι βιοδιασπώμενο, υδατοδιαλυτό και μπορεί να αποθηκευτεί ως υγρό σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Όταν παράγεται από ορυκτές πηγές, ενδέχεται να μην προσφέρει σημαντική μείωση στις εκπομπές CO_2 σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα. Ωστόσο, θα μπορούσε να παραχθεί ανταγωνιστικά ως βιοκαύσιμο και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και υδρογόνο χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ως ηλεκτρονικό καύσιμο. Τέλος, η μεθανόλη συνοδεύεται επίσης από προκλήσεις όπως η χαμηλή περιεκτικότητά της σε ενέργεια, το χαμηλό σημείο ανάφλεξης και η τοξικότητά της με παρατεταμένη έκθεση.

❖ Τα πρώτης γενιάς ή τα συμβατικά βιοκαύσιμα αποτελούν πλέον ευρέως αναπτυγμένη πηγή καυσίμου για χερσαίες μεταφορές. Είναι επίσης συμβατά με σύγχρονους κινητήρες θαλάσσης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια στα πλοία (drop-in). Ωστόσο, υπάρχει ανησυχία για την ευρεία διαθεσιμότητα προηγμένων βιοκαυσίμων (δεύτερης και τρίτης γενιάς) για τη ναυτιλιακή βιομηχανία, η οποία μπορεί να είναι σε ανταγωνισμό με άλλους τομείς. Συνολικά, τα βιοκαύσιμα προσφέρουν ένα πολλά υποσχόμενο μονοπάτι για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των θαλάσσιων μεταφορών, παρέχοντας παράλληλα μια βιώσιμη και βιώσιμη εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να προοδεύει και τα ρυθμιστικά πλαίσια εξελίσσονται, τα βιοκαύσιμα είναι πιθανό να διαδραματίζουν ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στις προσπάθειες της ναυτιλιακής βιομηχανίας να επιτύχει μεγαλύτερη περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προτεινόμενων εναλλακτικών καυσίμων :

Πίνακας 9. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εναλλακτικών καυσίμων (Πηγή: NorthStandard, 2023, <https://my.standardclub.com/>)

Εναλλακτικά καύσιμα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)	<ul style="list-style-type: none"> - Βρίσκεται ήδη σε πρακτική χρήση - Συνεχώς αναπτύσσεται η υποδομή - Χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με τα παραδοσιακά θαλάσσια καύσιμα - Πυκνότητα υψηλής ενέργειας - Ειδικό κανονισμοί για το ΥΦΑ στο IMO's. (Διεθνής Κώδικας Ασφάλειας για πλοία που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλής κλίμακας (κωδικός IGF) 	<ul style="list-style-type: none"> - Κοινός γνωστό ως «καύσιμο μετάβασης», καθώς η μείωση των εκπομπών CO_2 είναι περιορισμένη - Απαιτεί θερμοκρασία $-162^{\circ}C$ για να παραμείνει σε υγρή κατάσταση - Χαμηλή ογκομετρική πυκνότητα (η αποθήκευση διαρκεί σχεδόν διπλάσια από το χώρο των παραδοσιακών θαλάσσιων καυσίμων) - Η αποθήκευση και ο χειρισμός απαιτούν πολύ περισσότερη φροντίδα από τα παραδοσιακά θαλάσσια καύσιμα - Η ολίσθηση του μεθανίου (αντίκτυπο GHG 25 φορές μεγαλύτερη από τις εκπομπές CO_2) - Πιθανή κριτική για τη χρήση ορυκτών καυσίμων
Υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG)	<ul style="list-style-type: none"> - Χαμηλότερο στο κόστος σε σύγκριση με τα παραδοσιακά θαλάσσια καύσιμα 	<ul style="list-style-type: none"> - Παρόμοια με το ΥΦΑ, η μείωση των εκπομπών CO_2 είναι περιορισμένη - Όπως και με το ΥΦΑ, η αποθήκευση LPG απαιτεί μεγαλύτερες δεξαμενές - Περιορισμένη εμπειρία λειτουργίας - Έλλειψη υποδομής - Συντελεστής ολίσθησης (αντίκτυπο GHG 3-4 φορές υψηλότερος από τις εκπομπές CO_2) - Πιθανή κριτική για τη χρήση ορυκτών καυσίμων
Υδρογόνο (H_2)	<ul style="list-style-type: none"> - Δεν υπάρχουν εκπομπές CO_2 - Κατάλληλο για χρήση σε κυψέλες καυσίμου για μικρά σκάφη - Η «πράσινη» παραγωγή μέσω ηλεκτρόλυσης που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι δυνατή με προϋποθέσεις - Η πτώση του κόστους των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να μειώσει το πράσινο κόστος παραγωγής 	<ul style="list-style-type: none"> - Δεν υπάρχει φυσικά - παράγεται κυρίως από πηγές ορυκτών καυσίμων (ενεργειακά έντονη διαδικασία). - Ακριβή η πράσινη παραγωγή - Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα - Μεγάλος όγκος καυσίμου (απαιτεί 8 φορές περισσότερο όγκο από τα ορυκτά καύσιμα για την ίδια ισχύ εξόδου) - Επακόλουθα ζητήματα ικανότητας αποθήκευσης καυσίμου - Απαιτεί θερμοκρασία $-253^{\circ}C$ για να παραμείνει σε υγρή κατάσταση - Έλλειψη υποδομής - Εξαιρετικά εύφλετα και εκρηκτικά, δημιουργώντας ζητήματα ασφαλείας καύσης παράγει νιτρικά οξείδια (εκπομπές NO_x) - Μεγάλο CAPEX για επενδύσεις υποδομών αποθήκευσης και ανεφοδιασμού
Αμμωνία (NH_3)	<ul style="list-style-type: none"> - Δεν υπάρχουν εκπομπές CO_2. Διαδικασία μετατροπής σχετικά φθηνή και απλή. - Η «πράσινη» παραγωγή, με τη χρήση πράσινου υδρογόνου και ανανεώσιμης ενέργειας για τη διαδικασία μετατροπής, είναι δυνατή - Υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας από το υδρογόνο. Η αποθήκευση απαιτεί μόνο ψύξη - Ήδη παράγεται σε σημαντικούς όγκους για τη χημική βιομηχανία - Τα ζητήματα χειρισμού σε σχέση με τη θαλάσσια μεταφορά είναι ήδη κατανοητά - Χρησιμοποιείται για καύση σε αεριοστρόβιλους 	<ul style="list-style-type: none"> - Αυτή τη στιγμή κατασκευάζεται με φυσικό αέριο. Η διαδικασία μετατροπής απαιτεί πρόσθετη είσοδο ενέργειας σε σύγκριση με το πράσινο υδρογόνο - Απαιτεί ενέργεια εισροής για ψύξη - Λιγότερη ενεργειακή πυκνότητα από τα συμβατικά καύσιμα - Μεγάλος όγκος καυσίμου (περίπου 2,7 φορές αυτός του HFO) - Οι εκπομπές N_2O (ο αντίκτυπος GHG είναι 300 φορές μεγαλύτερη από αυτή των εκπομπών CO_2) - Εξαιρετικά τοξικό - απαιτεί προσεκτική αντιμετώπιση τεχνικών προκλήσεων στην καύση, όπως η χαμηλή ευφλεκτότητα και οι δυσκολίες στην αύξηση της παραγωγής του κινητήρα - Απαιτεί μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης ή/και συχνότερη ανεφοδιασμό καυσίμων - Μεγάλο CAPEX για επενδύσεις υποδομών αποθήκευσης και ανεφοδιασμού
Μεθανόλη (CH_3OH)	<ul style="list-style-type: none"> - Υγρό σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, δεν χρειάζεται επεξεργασία - Εύκολο στη αποθήκευση και τη διαχείριση - Χαμηλό κόστος για τη μετατροπή των υφιστάμενων κινητήρων. Μικρές τροποποιήσεις σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις αποθήκευσης και καυσίμου - Ευρέως εμπορεύεται, καλά κατανοητό και ήδη διαθέσιμο σε κάποιες υποδομές ανεφοδιασμού - Βιοαποικοδομήσιμο, με χαμηλότερη επίδραση στο περιβάλλον σε περίπτωση διαρροής - Μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από το υδρογόνο και την αμμωνία - Καθαρή καύση με χαμηλά επίπεδα SO_x, NO_x και σωματιδιακής ύλης. 	<ul style="list-style-type: none"> - Η παραγωγή κυρίως από το φυσικό αέριο ή τον άνθρακα, καθώς η μείωση των εκπομπών CO_2 είναι περιορισμένη - Χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας από τα συμβατικά καύσιμα - Μεγάλος όγκος καυσίμου περίπου 2,4 φορές αυτή του πετρελαίου, απαιτώντας μεγαλύτερες δεξαμενές αποθήκευσης ή/και συχνότερο ανεφοδιασμό - Το χαμηλό σημείο ανάφλεξης εμπεριέχει τοξικό κίνδυνο πυρκαγιάς όταν εισπνέεται, απορροφάται ή χειρίζεται - Αυξημένοι κίνδυνοι διάβρωσης - Μεσαίο προς μεγάλο CAPEX για επενδύσεις υποδομών αποθήκευσης και ανεφοδιασμού
Βιοκαύσιμα	<ul style="list-style-type: none"> - Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα βιοκαύσιμα είναι υδροβενζοποιημένο φυτικό έλαιο (HVO) και βιοντίζελ (fame, μεθυλεστέρα λιπαρών οξέων) - Ουδέτερο στον άνθρακα - Προέλευση από βιολογικά ανανεώσιμους πόρους όπως φυτικά σάκχαρα κ.λπ. <p>Συνήθως αναμνηνύεται με παραδοσιακά θαλάσσια καύσιμα ή χρησιμοποιείται ως καύσιμο «drop-in», συμβατό με τους σημερινούς συμβατικούς θαλάσσιους κινητήρες.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Υψηλότερο στο κόστος σε σύγκριση με πολλά ορυκτά καύσιμα - Τεχνικά ζητήματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε δυσλειτουργία των μηχανημάτων - Σταθερότητα αποθήκευσης, βιολογική ανάπτυξη (βιορρύπανση), οξυττητα, απόφραξη φίλτρων και αυξημένες εναποθέσεις στον κινητήρα - Περιορισμένη παραγωγική ικανότητα και διαθεσιμότητα

Κεφάλαιο 3. Θεωρητικό υπόβαθρο - Μέρος 2^ο .

Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων

Στο τρίτο κεφάλαιο εμπεριέχεται το δεύτερο μέρος του θεωρητικού υποβάθρου της εργασίας με παρουσίαση ορισμών και εννοιών, παράθεση ιστορικής αναδρομής καθώς και παρουσίαση της επιλεγθείσας μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος.

3.1 Εισαγωγή

Η επιστήμη των αποφάσεων είναι ένας εστιασμένος και επισημοποιημένος κλάδος της επιχειρησιακής έρευνας που ασχολείται με τη λήψη αποφάσεων από τον άνθρωπο.

Η ανάλυση πολύκριτρίων αποφάσεων (MCDA) είναι ένα εργαλείο για τη διαχείριση σύνθετων προβλημάτων αποφάσεων. Στοχεύει στην εξεύρεση μιας βέλτιστης λύσης, της πιο συναινετικής λύσης, λαμβάνοντας υπόψη τα συμφέροντα και τις προτιμήσεις όλων των ενδιαφερόμενων μερών καθώς και πρακτικές πληροφορίες¹⁰⁶.

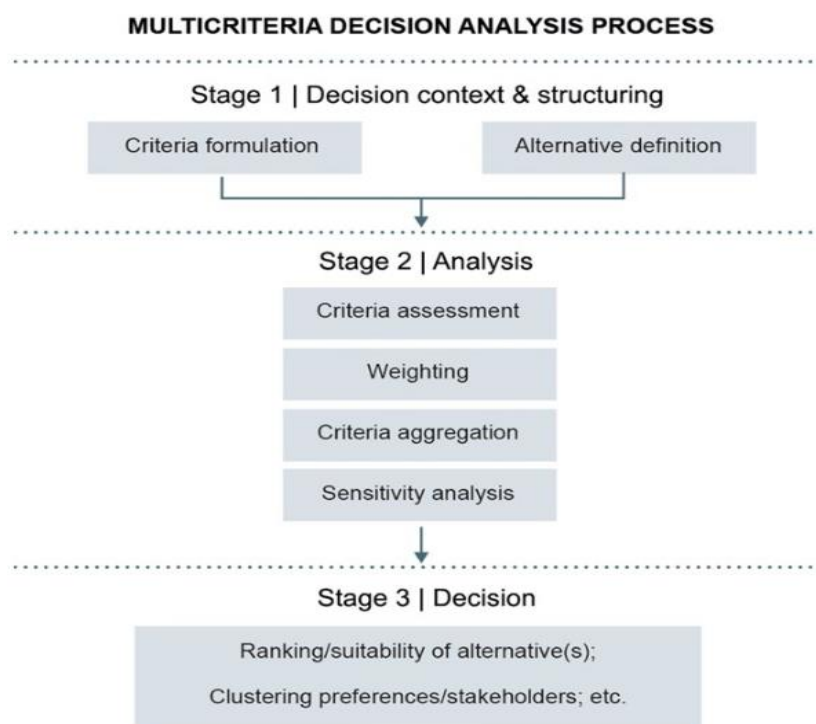
Η ανάλυση απόφασης πολλαπλών κριτηρίων (MCDA) είναι μια διαδικασία πολλαπλών βημάτων που αποτελείται από ένα σύνολο μεθόδων για τη δομή και την επισημοποίηση των διαδικασιών λήψης αποφάσεων με διαφανή και συνεπή τρόπο¹⁰⁷. Με τα χρόνια, το MCDA έχει αναπτύξει πολλές μεθόδους και λογισμικό για την επίλυση των καθορισμένων προβλημάτων. Για την χρησιμοποίηση των μεθόδων, είναι σημαντικό να οριστεί το πρόβλημα, οι εναλλακτικές λύσεις και τα κριτήρια που μπορεί να είναι διαφορετικοί τύποι κόστους, δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, κοινωνικοί δείκτες, ενεργειακή απόδοση, ποιότητα και άλλα συγκεκριμένα κριτήρια που σχετίζονται με το πρόβλημα. Όταν υπάρχουν πολλές εναλλακτικές λύσεις για ένα πρόβλημα, είναι σημαντικό να βρεθεί η καταλληλότερη εναλλακτική με τα καλύτερα κριτήρια κόστους, τις χαμηλότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον και την καλή ενεργειακή απόδοση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο MCDA ως εργαλείο σύγκρισης εναλλακτικών.

¹⁰⁶ Gamper C. D., et.al. (2006). «*A conceptual approach for the use of cost benefit and multi criteria analysis in natural hazard management*».

¹⁰⁷ Langemeyer J., et.al. (2016). «*Bridging the gap between ecosystem service assessments and land-use planning through Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)*».

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση προβλημάτων και μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με διαφορετικές παραμέτρους. Κάθε μέθοδος MCDA έχει τη δική της μέθοδο υπολογισμού με την οποία οι εναλλακτικές βρίσκονται στην ουρά και δεν είναι δυνατό να ισχυριστεί κανείς ότι η χρήση συγκεκριμένων μεθόδων με τα ίδια δεδομένα εισόδου θα οδηγήσει στο ίδιο τελικό αποτέλεσμα. Οι μέθοδοι μπορούν να επιλεγούν ανάλογα με τον τύπο του αποτελέσματος¹⁰⁸.

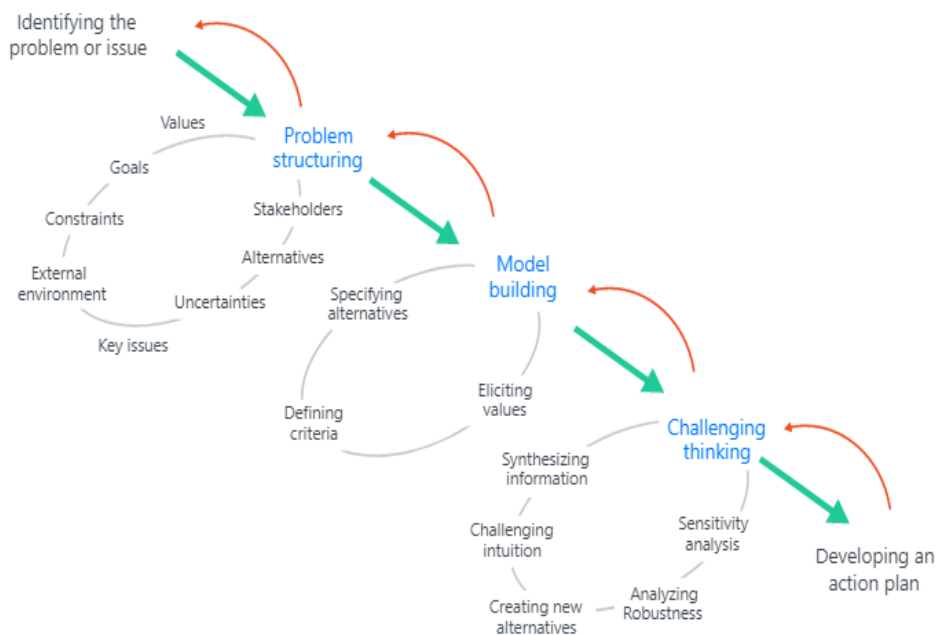
Η πολυκριτηριακή ανάλυση ορίζεται γενικά ως «ένα βοήθημα απόφασης και ένα μαθηματικό εργαλείο που επιτρέπει τη σύγκριση διαφορετικών εναλλακτικών ή σεναρίων σύμφωνα με πολλά κριτήρια, συχνά αντικρουόμενα, προκειμένου να οδηγηθεί ο αποφασίζων προς μια συνετή επιλογή»¹⁰⁹. Το σύνολο των εναλλακτικών αποφάσεων που εξετάζονται σε ένα δεδομένο πρόβλημα συχνά υποδηλώνεται με A και ονομάζεται σύνολο πιθανών εναλλακτικών. Ένα κριτήριο είναι μια συνάρτηση g , που ορίζεται στο A , λαμβάνοντας τις τιμές της σε ένα ταξινομημένο σύνολο και αντιπροσωπεύει τις προτιμήσεις του λήπτη αποφάσεων σύμφωνα με ορισμένες απόψεις.



Σχήμα 15. Βασικά βήματα μιας προσέγγισης ανάλυσης απόφασης πολλαπλών κριτηρίων (Geneletti, 2019)

¹⁰⁸ Ishizaka A., et.al. (2013). «Multi-Criteria Decision Analysis».

¹⁰⁹ Roy B., (1996). «Multicriteria methodology for decision aiding».



Σχήμα 16. Επισκόπηση της διαδικασίας MCDA / MCDM¹¹⁰

3.2 Ιστορική αναδρομή

Οι αυξανόμενες τάσεις πολυπλοκότητας στο οικονομικό, τεχνολογικό και επιχειρηματικό περιβάλλον, συνέβαλαν στην καθιέρωση της πολυκριτηριακής ανάλυσης ως καίριο πεδίο της επιχειρησιακής έρευνας (Operational research) και της επιστήμης της διαχείρισης (management science). Στην πραγματικότητα, ωστόσο, το πεδίο έχει μια μακρά ιστορία, η οποία μπορεί να αναχθεί στα έργα των Jean-Charles de Borda και Marquis de Condorcet σχετικά με τα συστήματα ψηφοφορίας στα τέλη του 18ου αιώνα.

Περίπου έναν αιώνα μετά από αυτά τα έργα, ο Vilfredo Pareto εισήγαγε την έννοια της κυριαρχίας, η οποία είναι θεμελιώδης στη σύγχρονη θεωρία της πολυκριτηριακής ανάλυσης, η οποία αργότερα επεκτάθηκε από τον Koopmans¹¹¹.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1940 και της δεκαετίας του 1950, οι von Neumann και Morgenstern¹¹² καθώς και ο Savage¹¹³ εισήγαγαν τη θεωρία της χρησιμότητας για κανονιστική λήψη αποφάσεων, η οποία έθεσε τα θεμέλια για τη

¹¹⁰ Multi-Criteria Decision Analysis/ Multi-Criteria Decision Making (MCDA/MCDM). <https://www.1000minds.com/decision-making/what-is-mcdm-mcda>

¹¹¹ Koopmans T.C., (1952) «*Activity Analysis of Production and Allocation*».

¹¹² Neumann J. Von et.al., (1944) «*Theory of Games and Economic Behavior*».

¹¹³ Savage L.J.. (1954). «*The Foundations of Statistics*».

θεωρία πολλαπλών χαρακτηριστικών χρησιμότητας/αξίας. Αυτά τα πρωτοποριακά έργα ενέπνευσαν αρκετούς ερευνητές κατά τη δεκαετία του 1960.

Οι Charnes και Cooper¹¹⁴ επέκτειναν την παραδοσιακή θεωρία του μαθηματικού προγραμματισμού μέσω της εισαγωγής του προγραμματισμού στόχων. Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1960, η πολυκριτηριακή ανάλυση προσέλκυσε το ενδιαφέρον και των Ευρωπαίων που ασχολούταν με την επιχειρησιακή έρευνα. Ο Roy¹¹⁵, ένας από τους πρωτοπόρους σε αυτόν τον τομέα, εισήγαγε την προσέγγιση της σχέσης υπεροχής. Θεωρείται ως ο ιδρυτής της «ευρωπαϊκής» σχολής πολυκριτηριακής ανάλυσης.

Τα τελευταία χρόνια, η πολυκριτηριακή ανάλυση συνέχισε την ανάπτυξή της μέσω:

- Νέων θεωρητικών εξελίξεων σε νέες τεχνικές και χαρακτηρισμός υφιστάμενων μοντέλων αποφάσεων.
- Εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθοδολογιών σε ολοκληρωμένα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων.
- Καινοτόμων εφαρμογών σε νέους τομείς, συμπεριλαμβανομένων μεταξύ άλλων στη διαχείριση, την οικονομία και τη χρηματοδότηση, το περιβάλλον και τον ενεργειακό σχεδιασμό, τις τηλεπικοινωνίες, τις μεταφορές κ.λπ.
- Εξερεύνηση των αλληλεπιδράσεων με άλλους κλάδους όπως η τεχνητή νοημοσύνη, ο εξελικτικός υπολογισμός, η θεωρία ασαφών συνόλων και ο μαλακός υπολογισμός.

3.3 Πολυκριτηριακή Ανάλυση & Επιχειρησιακή Έρευνα

Τις τελευταίες δεκαετίες, η επιχειρησιακή έρευνα (OR) έχει προχωρήσει πολύ ως πεδίο που υποστηρίζει την επιστημονική διαχείριση. Εντός του πεδίου της επιχειρησιακής έρευνας, έχουν αναπτυχθεί διάφορες διασυνδεδεμένες περιοχές βάσει διαφορετικών παραδειγμάτων λήψης αποφάσεων και πλαισίων προβλημάτων. Η επιχειρησιακή έρευνα ασχολείται κυρίως με τη δημιουργία μοντέλων και τις διαδικασίες αλγοριθμικής βελτιστοποίησης που διευκολύνουν την ανάλυση πολύπλοκων προβλημάτων του πραγματικού κόσμου. Αυτή η πολυπλοκότητα μπορεί να οφείλεται

¹¹⁴ Charnes A. and Cooper W.W. (1961). «*Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*».

¹¹⁵ Roy B., (1968).«*Classement et choix en pr'ésence de points de vue multiples: La m'ethode-ELECTRE*»

στη διάσταση ενός δεδομένου προβλήματος (π.χ. στον αριθμό των διαθέσιμων επιλογών και ενεργειών), στην αβεβαιότητα που επικρατεί στις περισσότερες πραγματικές καταστάσεις, στη φύση των διαθέσιμων δεδομένων που είναι συχνά ανακριβή, καθώς και στην πολλά ενδιαφερόμενα μέρη που εμπλέκονται συχνά.

Μια σημαντική επίπτωση των παραπάνω ζητημάτων περιλαμβάνει τον πολυδιάστατο χαρακτήρα των προβλημάτων λήψης αποφάσεων στον πραγματικό κόσμο, που απαιτεί την εξέταση πολλαπλών αντικρουόμενων απόψεων, ακόμη και σε καταστάσεις όπου εμπλέκεται ένας μόνο αποφασίζων. Στις μέρες μας, οικονομικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά κριτήρια εμπλέκονται σήμερα σε όλες σχεδόν τις καταστάσεις λήψης αποφάσεων, προκειμένου να περιγράψουν τα διαφορετικά αποτελέσματα των υπάρχουσών επιλογών. Σε αυτό το πλαίσιο, η διαδικασία λήψης αποφάσεων θα πρέπει να διερευνήσει τη συγκρουσιακή φύση των κριτηρίων, τις αντίστοιχες ανταλλαγές, τους στόχους που θέτουν οι αποφασίζοντες και φυσικά τον τρόπο με τον οποίο αυτοί μπορούν να εισαχθούν σε ένα κατάλληλο μοντέλο απόφασης που λαμβάνει υπόψη την υποκειμενικότητα, τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων.

Ωστόσο, με την εισαγωγή πολλαπλών απόψεων, κριτηρίων και παραγόντων, οι καθολικά αποδεκτές (αντικειμενικές) λύσεις δεν είναι πλέον εφικτές.

Η τελική επιλογή απαιτεί περισσότερες πληροφορίες ή σιωπηρές υποθέσεις σχετικά με τις προτιμήσεις των ατόμων που εμπλέκονται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Έχοντας υπόψη αυτά τα ζητήματα, η πολυκριτηριακή ανάλυση έχει γίνει ένας σημαντικός και ενεργός κλάδος στο OR, εστιάζοντας στην παροχή της θεωρίας και των μεθοδολογιών που απαιτούνται για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σε περίπλοκα και κακώς δομημένα προβλήματα, μέσα σε ένα ρεαλιστικό πλαίσιο που λαμβάνει υπόψη όλες τις απόψεις, τα κριτήρια και τους εμπλεκόμενους φορείς. Μεταξύ άλλων, η πολυκριτηριακή ανάλυση εστιάζει σε ζητήματα όπως: (1) η επίλυση της αντικρουόμενης φύσης των κριτηρίων, (2) η μοντελοποίηση των προτιμήσεων των αποφασιζόντων, (3) ο εντοπισμός συμβιβαστικών λύσεων και η ανάλυση των συνεπειών πολυκριτηριακών λύσεων και (4) η ανάπτυξη μοντέλων λήψης αποφάσεων.

3.4 Μεθοδολογικό πλαίσιο πολυκριτηριακής ανάλυσης

Στη λήψη αποφάσεων που περιλαμβάνει πολλαπλά κριτήρια, το βασικό πρόβλημα που αναφέρουν οι αναλυτές και οι αποφασίζοντες αφορά τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να ληφθεί η τελική απόφαση.

Η φιλοσοφία του διαχωρισμού των προτιμήσεων στην πολυκριτηριακή ανάλυση είναι η αξιολόγηση/εξαγωγή μοντέλων προτιμήσεων από δεδομένες προτιμησιακές δομές και η αντιμετώπιση δραστηριοτήτων υποβοήθησης λήψης αποφάσεων μέσω επιχειρησιακών μοντέλων.

Κάτω από τον όρο «πολυκριτηριακή ανάλυση» έχουν αναπτυχθεί δύο βασικές προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν:

1. ένα σύνολο μεθόδων ή μοντέλων που επιτρέπουν τη συγκέντρωση πολλαπλών κριτηρίων αξιολόγησης για την επιλογή μιας ή περισσότερων ενεργειών από ένα σύνολο A και
2. μια δραστηριότητα βοήθειας αποφάσεων σε έναν καθορισμένο φορέα απόφασης (άτομο, οργανισμός κ.λπ.)

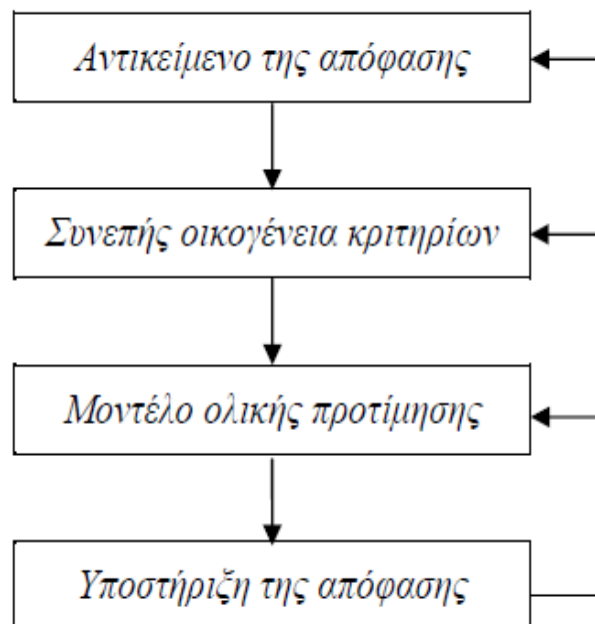
Και στις δύο περιπτώσεις, το σύνολο A των πιθανών ενεργειών αναλύεται βάσει πολλαπλών κριτηρίων προκειμένου να μοντελοποιηθούν όλες οι πιθανές επιπτώσεις, συνέπειες ή χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το σύνολο A.

Με γνώμονα τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζονται στα προβλήματα λήψης απόφασης πολλαπλών κριτηρίων, στο πεδίο της πολυκριτηριακής ανάλυσης υφίστανται οι ακόλουθοι τρεις βασικοί στόχοι:

- Ανάλυση των κριτηρίων.
- Μοντελοποίηση προτιμήσεων του αποφασίζοντα.
- Εντοπισμό ικανοποιητικών λύσεων.

Ο Roy (1985) στο πλαίσιο επίτευξης των στόχων, σκιαγραφεί μια γενική μεθοδολογία μοντελοποίησης των προβλημάτων λήψης αποφάσεων, η οποία περιλαμβάνει τέσσερα βήματα μοντελοποίησης ξεκινώντας με τον ορισμό του συνόλου A και τελειώνοντας με τη δραστηριότητα της βοήθειας απόφασης, ως εξής:

- Επίπεδο 1: Αντικείμενο της απόφασης, συμπεριλαμβανομένου του ορισμού του συνόλου των πιθανών ενεργειών A και του προσδιορισμού μιας προβληματικής στο A.
- Επίπεδο 2: Μοντελοποίηση μιας συνεπούς οικογένειας κριτηρίων με την υπόθεση ότι αυτά τα κριτήρια είναι συναρτήσεις μη φθίνουσας αξίας, εξαντλητικές και μη περιττές.
- Επίπεδο 3: Ανάπτυξη ενός μοντέλου ολικών προτιμήσεων, για τη συγκέντρωση των οριακών προτιμήσεων στα κριτήρια.
- Επίπεδο 4: Υποστήριξη αποφάσεων ή Βοήθεια απόφασης, με βάση τα αποτελέσματα του επιπέδου 3 και την προβληματική του επιπέδου 1.



Σχήμα 17. Μεθοδολογικό πλαίσιο πολυκριτηριακής ανάλυσης (Roy,1985)

Στο επίπεδο 1, ο Roy (1985) διακρίνει τέσσερις δηλώσεις προβλήματος αναφοράς, καθεμία από τις οποίες δεν αποκλείει απαραίτητα τις άλλες. Αυτές οι προβληματικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωριστά, ή με συμπληρωματικό τρόπο, σε όλες τις φάσεις της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Οι τέσσερις προβληματικές που καλύπτουν το σύνολο των πρακτικών περιπτώσεων είναι τα ακόλουθες:

- Προβληματική α-(Επιλογή, Choice): Επιλογή εναλλακτικής-ων ως κατάλληλη-ες για το υφιστάμενο πρόβλημα.
- Προβληματική β-(Ταξινόμηση, classification-sorting): Ταξινόμηση εναλλακτικής-ων σε προκαθορισμένες με ομοιογένεια και κατά προτίμηση κατηγορίες.
- Προβληματική γ-(Κατάταξη, Ranking):: Κατάταξη εναλλακτικών επιλογών από την καλύτερη στη χειρότερη (κατάταξη).
- Προβληματική δ-(Περιγραφή, Description):: Περιγραφή εναλλακτικών ενεργειών ως προς τις επιδόσεις τους στα κριτήρια (περιγραφή).

Αναλόγως της φύσης του εξεταζόμενου προβλήματος προκύπτει και το είδος της προβληματικής που θα ακολουθηθεί. Σε κάποιες περιπτώσεις προβλημάτων για την καλύτερη αντιμετώπιση επίλυσης τους απαιτείται συνδυασμός προβληματικών.

3.5 Επιλογή κατάλληλης μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης

Διάφορες μέθοδοι υποστηρίζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων με τους δείκτες που ευνοούν τη μία λύση έναντι της άλλης^{116 117}. Επιτρέπει στους ειδικούς να επιλέξουν τις βέλτιστες εναλλακτικές λύσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια από το να βασίζονται μόνο στα συναισθήματά τους. Ωστόσο, πολλές διαφορετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τέτοιων μοντέλων υποστήριξης αποφάσεων, γεγονός που καθιστά πρόκληση τον εντοπισμό της μεθόδου που είναι η σωστή επιλογή για ένα δεδομένο πρόβλημα απόφασης^{118 119}.

Μία από τις κύριες προσεγγίσεις για τη δημιουργία συστημάτων υποστήριξης είναι οι μέθοδοι ανάλυσης απόφασης πολλαπλών κριτηρίων (MCDA)¹²⁰. Επιτρέπουν την αξιολόγηση ενός καθορισμένου συνόλου εναλλακτικών επιλογών με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια που περιγράφουν αριθμητικά την ποιότητα των εναλλακτικών στις εξεταζόμενες πτυχές¹²¹. Ωστόσο, ο αριθμός των μεθόδων που ανήκουν σε αυτήν την

¹¹⁶ De Montis A. et.al. (2000). «Criteria for quality assessment of mcda methods».

¹¹⁷ Kizielewicz B. et.al. (2020). «A new approach to identifying a multi-criteria decision model based on stochastic optimization techniques».

¹¹⁸ Guitouni A. et.al. (1998). «Tentative guidelines to help choosing an appropriate mcda method»

¹¹⁹ Jacquet-Lagrange, E., Siskos, Y., (2001). «Preference disaggregation: 20 years of mcda experience», European Journal of Operational Research, 130(2), pp. 233-245.

¹²⁰ Badi I. et.al. (2020). «Supplier selection for steelmaking company by using combined GreyMARCOS methods».

¹²¹ Nutt D. J. et.al. (2014), «Estimating the harms of nicotine-containing products using the mcda approach».

ομάδα αυξάνεται συνεχώς και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται συχνά δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα σε ένα πρόβλημα^{122 123 124}.

Ως εκ τούτου, τίθεται το ερώτημα, πώς ποικίλλουν οι ταξινομήσεις MCDA; Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για τους ειδικούς σε προβλήματα όπου η επιλογή μιας βέλτιστης λύσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα των εναλλακτικών λύσεων.

Η επιλογή εναλλακτικών προτάσεων για βιώσιμες λύσεις αναφορικά με το κατάλληλο τύπο των καύσιμων στο τομέα της ναυτιλίας αποτελεί εξαιρετικά περίπλοκη διαδικασία, δεδομένου του πολυσύνθετου περιβάλλοντος που απευθύνεται, τους δρώντες και όλους τους τομείς υποστήριξης που πλαισιώνουν το εγχείρημα. Τα προβλήματα λήψης αποφάσεων αυτού του τύπου ορίζονται από πολυδιάστατα αντικειμενικά προφίλ και από την πολυεπιστημονική ή πολυκριτηριακή φύση των παραγόντων που πρέπει να αξιολογηθούν¹²⁵.

Ο στρατηγικός σχεδιασμός των αποφάσεων που εκτελούνται μέσω συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων ή DSS¹²⁶, έχει αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικός. Το DSS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με ηλεκτρονικά συστήματα που επιτρέπουν τη διαδραστική χρήση δεδομένων και μοντέλων για την υποστήριξη αυτών που λαμβάνουν αποφάσεις κατά την επίλυση προβλημάτων¹²⁷.

Αυτές οι μέθοδοι πρέπει να ταιριάζουν με το σκοπό και την ατζέντα των αναγκών, των απαιτήσεων και των περιορισμών που τίθενται.

Στο DSS, η χρήση μεθόδων Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) μπορεί να παρέχει υποστήριξη για την πολυεπιστημονική διαχείριση των παραγόντων, οι οποίοι πρέπει να βελτιστοποιηθούν για την εκπλήρωση του στόχου που

¹²² Kizielewicz B., et.al., (2020). «*Identification of relevant criteria set in the mcda process—wind farm location case study*».

¹²³ Sałabun W., et.al., (2020a). «*Are mcda methods benchmarkable? a comparative study of topsis, vikor, copras, and promethee ii methods*»

¹²⁴ Shekhovtsov A., et.al., (2020). «*Do distance-based multi-criteria decision analysis methods create similar rankings?*».

¹²⁵ Guarini, M.R., et.al., (2017). «*An Integrated Approach for the Assessment of Urban Transformation Proposals in Historic and Consolidated Tissues*»

¹²⁶ Ματσατσίνη, Ν. (2022), Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (Β' Έκδοση), Νέες Τεχνολογίες, Αθήνα (ΕΥΔΟΞΟΣ: 112706280).

¹²⁷ Guarini, M.R., et.al., (2017). «*Public Initiatives of Settlement Transformation: A Theoretical-Methodological Approach to Selecting Tools of Multi-Criteria Decision Analysis*».

αξιολογείται¹²⁸. Η βιβλιογραφία σχετικά με το MCDA εξετάζει διαφορετικές σχολές σκέψης^{129 130 131 132} και προτείνει έναν εκτεταμένο αριθμό μεθόδων με τις οποίες επιλύονται προβλήματα λήψης αποφάσεων σε τομείς εφαρμογής όπως τα μαθηματικά, η διαχείριση, η τεχνολογία πληροφοριών, η ψυχολογία, η κοινωνική επιστήμες και οικονομικά.

Αρκετοί συγγραφείς λειτουργούν ως πηγή αναφοράς για την περιγραφή των κύριων μεθόδων MCDA, οι οποίες έχουν αποδειχθεί χρήσιμες σε διαφορετικούς τύπους προβλημάτων λήψης αποφάσεων και τις προσεγγίσεις που ακολουθούνται για την επίλυσή τους^{133 134 135 136 137 138 139 140 141 142}.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία και τις ερευνητικές μελέτες οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για την επίλυση προβλημάτων είναι:

- Διαδικασία Αναλυτικής Ιεραρχίας (Analytic Hierarchy Process /AHP)¹⁴³
- Εξάλειψη και Επιλογή προσεγγίζοντας την Πραγματικότητα ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE)¹⁴⁴

¹²⁸ Klapka, J., et.al., (2002). «Decision support system for multicriterial R&D and information systems projects selection».

¹²⁹ Belton, V., et.al., (2002.). «Multiple Criteria Decision Analysis—An Integrated Approach».

¹³⁰ Figueira J., et.al., (2005). «Multiple Criteria Decision Analysis—State of the Art Survey»

¹³¹ Nijkamp P., et.al., (1998). «Multi-Criteria Analysis for Land Use Management».

¹³² Hartog, J.A., et.al., (1989). «A sensitivity analysis of multi-criteria choice-methods: An application on the basis of the optimal site selection for a nuclear power plant».

¹³³ Ishizaka, A., et.al., (2013). «Multi-Criteria Decision Analysis, Methods and Software»,

¹³⁴ Roy, B., (1985). «Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision»

¹³⁵ Guitoni, A.; Martel, J.M., (1998). «Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method».

¹³⁶ Vincke, P., (1989). «L'aide Multicritère à la Décision»

¹³⁷ Colson G., et.al., (1989). «Models and Methods in Multiple Objectives Decision Making, Models and Methods in Multiple Criteria Decision Making»

¹³⁸ Fishburn, P.C. (1978), «A survey of multiattribute/multicriterion evaluation theories. In Multiple Criterion Problem Solving»

¹³⁹ Guitouni, A., et.al., (1998). «A Framework to Choose a Discrete Multicriterion Aggregation Procedure»

¹⁴⁰ Roy B., Bouyssou D., (1993). «Aide Multicritère à la Décision: Methodes et Cas»

¹⁴¹ Keeney R.L., Raiffa H., (1993). «Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs»

¹⁴² Greco, S., M. Ehrgott, J. Figueira (eds.), (2016). «Multiple Criteria Decision Analysis, - State of the Art – Surveys» (2nd Edition), International Series in Operations Research and Management Science, Springer.

¹⁴³ Saaty T., (1977). «A scaling Method for priorities in hierarchical structures».

¹⁴⁴ Roy, B., (1968). «Classement et choix en presence de points de vue multiples: La méthode ELECTRE».

- Θεωρία χρησιμότητας πολλαπλών χαρακτηριστικών (Multi-attribute utility theory / MAUT)¹⁴⁵
- Μέθοδος οργάνωσης κατάταξης προτιμήσεων για αξιολογήσεις εμπλουτισμού (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations /PROMETHEE)¹⁴⁶
- Μέθοδος πρόσθετης χρησιμότητας UTA (UTilité Additive)¹⁴⁷
- Βελτιωμένη μέθοδος UTA - UTASTAR¹⁴⁸
- Διαδικασία Αναλυτικού Δικτύου (Analytic Network Process /ANP)¹⁴⁹
- Μέτρηση της ελκυστικότητας με αξιολόγηση βάσει κατηγοριών (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation /MACBETH)¹⁵⁰
- Τεχνική για Σειρά Προτίμησης κατά Ομοιότητα με Ιδανική Λύση (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution /TOPSIS)¹⁵¹

Σύμφωνα με τους Pardalos et al, (1995), υφίστανται 4 βασικές κατηγορίες, όπου περιλαμβάνουν επιστημονικές μεθόδους και μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτήριας ανάλυσης. (ως ακόλουθος Πίνακας)

¹⁴⁵ Dyer, J.S., (2005). «MAUT—Multiattribute utility theory. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*»

¹⁴⁶ Brans J.P., Vincke P., (1985). «*Note-A Preference Ranking Organisation Method: The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making*».

¹⁴⁷ Siskos, Y., E. Grigoroudis, N.F. Matsatsinis (2016), UTA methods, in: S. Greco, M. Ehrgott, J. Figueira (eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis, - State of the Art – Surveys* (2nd Edition), International Series in Operations Research and Management Science, vol. I, pp. 315-362, Springer.

¹⁴⁸ Siskos, J. et al., (2016).

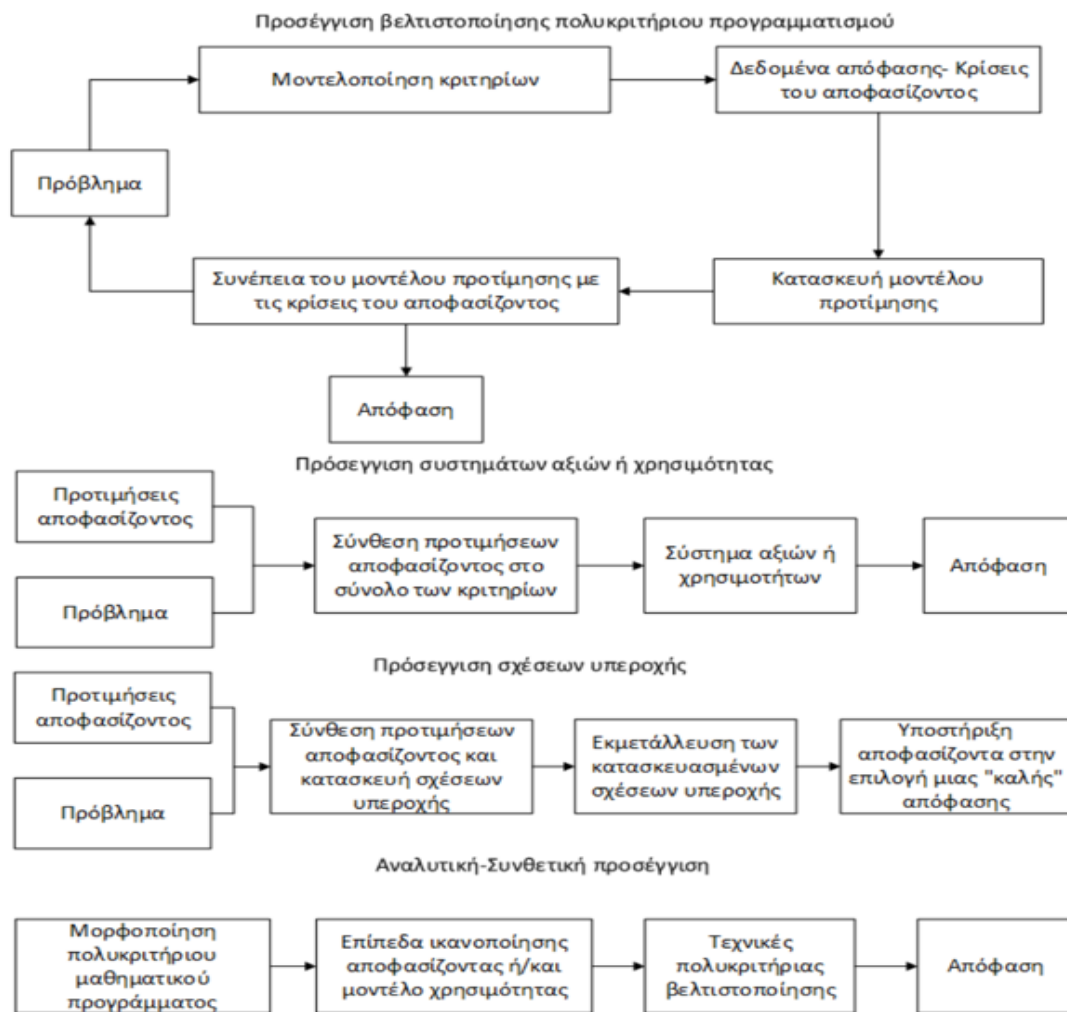
¹⁴⁹ Saaty, T.L., (2001). «*Analytic network process*».

¹⁵⁰ Bana e Costa C., Vansnick, J.,(1994). «*MACBETH: An interactive path towards the construction of cardinal value functions*».

¹⁵¹ Hwang, C.L., Yoon, K., (1981). «*Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*»

Πίνακας 10. Επιστημονικές μέθοδοι και μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτήριας ανάλυσης. (Πηγή: Ματσατσίνης, Ν. (2022), «Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων», Β΄ Έκδοση, Νέες Τεχνολογίες, Αθήνα, Νικόλαος Ματσατσίνης (2010), Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, Νέες Τεχνολογίες)

<i>Επιστημονικές μέθοδοι και οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτήριας ανάλυσης</i>	<i>Στόχος</i>	<i>Μέθοδοι επίτευξης</i>
Μέθοδος Πολυκριτήριου Μαθηματικού Προγραμματισμού - Multiobjective Mathematical Programming (Συστήματα Αξιών (Value Systems) - Αμερικάνικη Σχολή)	Στοχεύει στην κατασκευή ενός συστήματος αξίας το οποίο προκύπτει από τη σύνθεση των προτιμήσεων των ληπτών αποφάσεων σε ότι αφορά τα κριτήρια.	Μέθοδος Προγραμματισμού Στόχων – Goal Programming Charnes et al. (1955) Charnes and Cooper (1961)
Μέθοδοι Πολυκριτήριας Θεωρία Χρησιμότητας - Multiattribute Utility Theory. Πολυκριτήρια Βελτιστοποίηση (Multicriteria Optimization).	Αποτελεί μια επέκταση του Μαθηματικού Προγραμματισμού. Στοχεύει στην επίλυση προβλημάτων όπου δεν υπάρχουν διακριτές εναλλακτικές επιλογές και οι στόχοι είναι περισσότεροι του ενός.	<ul style="list-style-type: none"> - AHP - ANP - MACBETH - MAUT - TOPSIS
Μέθοδοι Τεχνικών Σχέσεων Υπεροχής - Outranking Relations (Γαλλική ή Ευρωπαϊκή Σχολή)	Στοχεύει στην αντιμετώπιση του προβλήματος της μη συγκρισιμότητας μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων.	<ul style="list-style-type: none"> - ELECTRE - PROMETHEE
Μέθοδοι Αναλυτικής – Συνθετικής Προσέγγισης – Aggregation Disaggregation Approach	Στοχεύει στην ανάλυση της συμπεριφοράς του λήπτη αποφάσεων και τον τρόπο αντίληψής του. Με τη χρήση επαναληπτικών διαδικασιών, αναλύονται και στη συνέχεια συντίθενται σε ένα σύστημα αξιών όλες οι παράμετροι του προβλήματος και η μέθοδος κρίσης του λήπτη αποφάσεων.	<ul style="list-style-type: none"> - UTA - UTASTAR



Σχήμα 18. Μεθοδολογικές προσεγγίσεις της πολυκριτηριακής ανάλυσης (Πηγή: Ματσατσίνης Ν. (2021) σημειώσεις στο πλαίσιο του ΔΠΜΣ ΣΣΕ – Πολυτεχνείο Κρήτης)

Ο μεγάλος αριθμός διαθέσιμων μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης για την επίλυση προβλημάτων δίνει τη δυνατότητα στους αποφασίζοντες την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου, λαμβάνοντας υπόψη τη παράμετρο ότι δίνοντας τα ίδια δεδομένα σε διαφορετικούς μεθόδους θα λάβουν διαφορετικά αποτελέσματα.

Συνολικά, ο λαμβάνων απόφαση οφείλει να κατανοεί το πρόβλημα, να αναγνωρίζει τις εναλλακτικές επιλογές και τα κριτήρια βάσει των οποίων θα αξιολογηθούν αυτές, προκειμένου να οδηγηθεί μέσα από τις διαδικασίες της επιλεγείσας μεθόδου στη καλύτερη απόφαση.

Λόγω της ανάπτυξης κριτηρίων για την επιλογή κατάλληλου εναλλακτικού καυσίμου, η κατανόηση της συμπεριφοράς των δρώντων και της αγοράς είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Η αναγνώριση μιας λειτουργίας αποκλειστικής χρησιμότητας,

σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των δρώντων, διευκολύνει την απόκτηση της αξίας κάθε επιλογής εναλλακτικού καυσίμου για τον αποφασίζοντα (DM). Σε αυτή τη μελέτη, η μέθοδος UTASTAR χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συνάρτησης οριακής αξίας χρησιμοποιώντας έντεκα (11) κατάλληλα υποκριτήρια (προερχόμενα από τα κύρια κριτήρια: τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά) και, τέλος, ταιριάζει στη συνάρτηση συνολικής χρησιμότητας. Παρέχει την ευκαιρία να ληφθεί μια ορθολογική απόφαση προσαρμοσμένη στη νοοτροπία των δρώντων που λαμβάνουν υπόψη την κατάταξη, την ιεράρχηση, την επιλογή ή την ταξινόμησή. Η τελική κατάταξη τείνει όσο το δυνατόν με την αρχική προδιάταξη.

3.5.1 Επιλογή κριτηρίων και απόδοση βαρών

Με τον όρο κριτήρια επιλογής εισάγονται έννοιες που βοηθούν τον αποφασίζοντα να σταθμίσει τις επιλογές του και να επιλέξει μια συμφέρουσα και χρήσιμη λύση προκειμένου να διασφαλίσει τα συμφέροντά του.

Τα επιλεχθέντα κριτήρια βοηθούν τους αποφασίζοντες να συγκρίνουν τις επιλογές τους και να λάβουν μια απόφαση που ευθυγραμμίζεται με τα ενδιαφέροντα και τους στόχους τους. Αυτή η ιδέα είναι απαραίτητη στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, ειδικά σε περίπλοκα σενάρια όπως η επιλογή εναλλακτικών καυσίμων πλοίων.

Τα κριτήρια παρέχουν ένα δομημένο πλαίσιο για την αντικειμενική αξιολόγηση των εναλλακτικών. Καθορίζοντας συγκεκριμένα κριτήρια που αντικατοπτρίζουν διαφορετικές διαστάσεις του προβλήματος, οι αποφασίζοντες μπορούν να αναλύσουν την απόφαση σε διαχειρίσιμα στοιχεία. Αυτό βοηθά στην αποφυγή αποφάσεων που βασίζονται αποκλειστικά στη διαίσθηση ή στα συναισθήματα.

Τα κριτήρια επιτρέπουν στους αποφασίζοντες να δηλώσουν ρητά τις προτεραιότητες και τις προτιμήσεις τους. Διαφορετικά κριτήρια μπορεί να αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς στόχους, όπως οικονομική σκοπιμότητα, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τεχνική συμβατότητα και κανονιστική συμμόρφωση. Με τη στάθμιση αυτών των κριτηρίων, οι αποφασίζοντες μπορούν να υποδείξουν την ιεράρχηση των αξιών τους και τι ορίζεται ως μεγαλύτερη σημασία για αυτούς.

Επίσης, τα κριτήρια επιτρέπουν μια συγκριτική ανάλυση εναλλακτικών επιλογών. Κάθε εναλλακτική λύση αξιολογείται με βάση την απόδοσή της με βάση τα καθορισμένα κριτήρια. Αυτή η ανάλυση παρέχει έναν σαφή και δομημένο τρόπο

σύγκρισης των δυνατών και των αδυναμιών διαφορετικών επιλογών. Επιτρέπει στους αποφασίζοντες να εντοπίζουν συμβιβασμούς και να κάνουν συνειδητές επιλογές.

Σε περίπλοκες αποφάσεις, υπάρχουν συχνά πολλαπλές σκέψεις με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αντίστοιχα. Τα κριτήρια βοηθούν τους άμεσα εμπλεκόμενους - αποφασίζοντες να εξισορροπήσουν αυτές τις εκτιμήσεις. Για παράδειγμα, κατά την επιλογή εναλλακτικών καυσίμων πλοίων, ενδέχεται να χρειαστεί να σταθμιστούν οικονομικές εκτιμήσεις έναντι των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, της τεχνικής σκοπιμότητας και της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς.

Λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια, οι αποφασίζοντες μπορούν να μετριάσουν τους κινδύνους που σχετίζονται με την εστίαση αποκλειστικά σε μία πτυχή. Για παράδειγμα, κατά την επιλογή καυσίμων πλοίων, εάν μια εναλλακτική λύση έχει σημαντικό πλεονέκτημα σε ένα κριτήριο αλλά στερείται σε άλλα, οι αποφασίζοντες μπορούν να αξιολογήσουν τους πιθανούς κινδύνους και τα οφέλη πιο ολοκληρωμένα.

Στο πλαίσιο της επιλογής εναλλακτικών καυσίμων πλοίων, τα σωστά καθορισμένα κριτήρια επιλογής επιτρέπουν στους άμεσα εμπλεκόμενους να αξιολογούν συστηματικά διαφορετικά καύσιμα με βάση διάφορες διαστάσεις. Αυτή η διαδικασία δίνει τη δυνατότητα στους αποφασίζοντες να κάνουν επιλογές που είναι ενημερωμένες, ισορροπημένες και ευθυγραμμισμένες με τα ενδιαφέροντα και τις προτεραιότητές τους.

Σε περιπτώσεις εξέτασης πολλαπλών κριτηρίων, η ιεραρχική κατηγοριοποίηση αυτών αποτελεί συνήθης πρακτική, δημιουργώντας κύρια και δευτερεύοντα συναφή κριτήρια. Οι περισσότεροι μέθοδοι στις MCDM, κάνουν χρήση της έννοιας «*βαρύτητα των κριτηρίων*». Η έννοια αυτή εξηγείται ως η προτεραιότητα στη σειρά διάταξης των κριτηρίων στις επιλογές απόφασης αναφορικά με τη σημαντικότητα ή τον βαθμό συνεισφοράς τους στην τελική έκβαση της απόφασης. Τα βάρη των κριτηρίων υπολογίζονται με διάφορους τρόπους αναλόγως της επιλεχθείσας πολυκριτηριακής μεθόδου MCDM ¹⁵².

Τα κριτήρια δεν είναι πάντα εξίσου όλα σημαντικά σε ένα πλαίσιο λήψης αποφάσεων. Ορισμένα κριτήρια μπορεί να είναι πιο σημαντικά για την επιτυχία της απόφασης από άλλα. Ο ρόλος των βαρών αντικατοπτρίζει την αντίληψη του αποφασίζοντα για την ιεραρχία των κριτηρίων ως προς τη σημασία τους.

¹⁵² Roy, B. (1981). «*A multicriteria analysis for trichotomic segmentation problems*».

Σε πολλές αποφάσεις υπάρχουν αντικρουόμενα συμφέροντα. Η ανάθεση βαρών βοηθά τους αποφασίζοντες να βρουν μια ισορροπία μεταξύ αυτών των καταστάσεων. Για παράδειγμα, κατά την επιλογή εναλλακτικών καυσίμων πλοίων, τα οικονομικά οφέλη μπορεί να χρειαστεί να εξισορροπηθούν έναντι των περιβαλλοντικών ανησυχιών.

Τα βάρη παρέχουν έναν ποσοτικό τρόπο έκφρασης ποιοτικών προτιμήσεων. Αντί να λένε απλώς ότι ένα κριτήριο είναι πιο σημαντικό από ένα άλλο, οι αποφασίζοντες εκχωρούν αριθμητικές τιμές που αντικατοπτρίζουν το βαθμό σπουδαιότητας. Τα βάρη των κριτηρίων δηλώνουν την ανταγωνιστική φύση των κριτηρίων και οι τιμές τους δίνονται συγκριτικά με τα άλλα.

Κατά την αξιολόγηση εναλλακτικών, τα κριτήρια μπορεί να έχουν διαφορετικές μονάδες ή κλίμακες. Η εκχώρηση βαρών τυποποιεί τις συνεισφορές διαφορετικών κριτηρίων και τα καθιστά συγκρίσιμα. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τη συγκέντρωση των διαφορετικών κριτηρίων σε μια συνολική μέτρηση απόφασης.

Η ανάθεση βαρών προσθέτει διαφάνεια στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Επιτρέπει στους αποφασίζοντες να αιτιολογήσουν τις επιλογές τους και να κοινοποιήσουν το σκεπτικό πίσω από τις αποφάσεις τους στους ενδιαφερόμενους. Εξασφαλίζει επίσης ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται με συνέπεια, καθώς τα ίδια κριτήρια με τους ίδιους συντελεστές στάθμισης θα αποφέρουν τα ίδια αποτελέσματα.

Τα βάρη των κριτηρίων προέρχονται είτε από ρητή άμεση ανάθεση-εκχώρηση των αποφασιζόντων, είτε από έμμεση ανάθεση, μέσω της διαδικασίας της προδιάταξης – προκατάταξης.

Η ρητή ανάθεση περιλαμβάνει απευθείας δήλωση ή προσδιορισμό των βαρών για κάθε κριτήριο με βάση τις προτιμήσεις, τις γνώσεις ή τη συναίνεση των αποφασιζόντων. Οι ενδιαφερόμενοι ή αποφασίζοντες συλλογίζονται για τη σημασία του κάθε κριτηρίου. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν την πείρα τους, να διεξάγουν έρευνες ή να συμμετέχουν σε ομαδικές συζητήσεις για να καταλήξουν σε συναίνεση σχετικά με τη σχετική βαρύτητα των κριτηρίων.

Η έμμεση ανάθεση περιλαμβάνει τον καθορισμό βαρών μέσω της διαδικασίας προκαταρκτικής κατάταξης. Η σχετική σημασία των κριτηρίων συνάγεται από τις βαθμολογίες που τους δίνονται κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης προκατάταξης. Οι αποφασίζοντες ταξινομούν τις εναλλακτικές τους και βαθμολογούν τα κριτήρια με βάση

την αντιληπτή σημασία τους χωρίς να ορίζουν ρητά αριθμητικά βάρη. Στη συνέχεια, τα βάρη προέρχονται από τις βαθμολογίες, αντανακλώντας σιωπηρά τις προτεραιότητες των αποφασιζόντων, στο πλαίσιο της μεθοδολογίας λήψης απόφασης με την μέθοδο της UTASTAR που θα αναλύσουμε παρακάτω.

Τελικά, η ανάθεση βαρών βοηθά τους αποφασίζοντες να λαμβάνουν πιο ενημερωμένες, αντικειμενικές και καλά μελετημένες αποφάσεις ποσοτικοποιώντας τη σχετική σημασία διαφορετικών κριτηρίων.

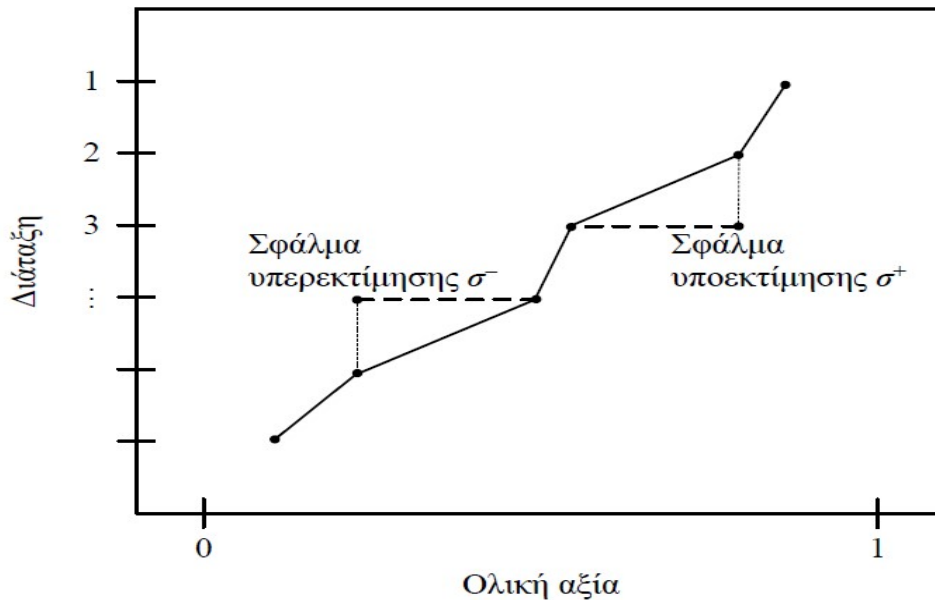
3.6 Μέθοδος UTASTAR

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της επιλογής εναλλακτικού καυσίμου, θα απαιτηθεί η χρήση μιας πολυκριτήριας μεθόδου όπου πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ του συνόλου των εναλλακτικών αποφάσεων και υπάρχει μεταβατική σχέση. Με αυτή την διαδικασία δημιουργείται μία κατάταξη εναλλακτικών, όπου ο απαφασίζων έχει τη δυνατότητα της καλύτερης αξιολόγησης καθώς και μετάβασης στην επόμενη επιλογή σε περιπτώσεις όπου η επιλεγθείσα λύση αποδειχτεί μη εφικτή ή μη κατάλληλη.

Η μέθοδος UTASTAR που θα χρησιμοποιηθεί έχει προταθεί από τους Siskos-Yannacopoulos¹⁵³, αποτελώντας έκδοση βελτίωσης της πρωταρχικής μεθόδου UTA. Στην αρχική έκδοση UTA¹⁵⁴, η κάθε δράση $a \in A$ έχει ένα μοναδικό σφάλμα $\sigma(a)$. Η συνάρτηση σφάλματος σε αυτή την περίπτωση δεν είναι επαρκής στην ελαχιστοποίηση της ολικής διασποράς στα σημεία της μονότονης καμπύλης στο παρακάτω διάγραμμα. Υφίσταται προβληματισμός επί των σημείων στο δεξιό μέρος της καμπύλης, όπου θα ήταν προτιμότερο να αφαιρεθεί κάποια ποσότητα αξίας χωρίς την προσθετική αύξηση στις αξίες των υπολοίπων.

¹⁵³ Siskos, J. and Yannacopoulos, D. (1985). «UTASTAR – An ordinal regression method for building additive value functions». *Investigação Operacional*, 5(1):39–53

¹⁵⁴ Jacquet-Lagrange E. and Siskos J., (1982). « Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 151–164.



Διάγραμμα 7. Καμπύλη μονότονης παλινδρόμησης (Πηγή: Σίσκος, 2008)

Η επιλεγόμενη μέθοδος μας παρέχει ένα πολύ σημαντικό προτέρημα/όφελος. Οι δρώντες στη διαδικασία απόφασης έχουν τη δυνατότητα μιας εμπειρικής εκτίμησης, στο σύστημα αξιών και προτιμήσεων τους με γνώμονα, τις υφιστάμενες μελέτες, τα ερευνητικά αποτελέσματα, την επιστήμη, τη βιβλιογραφία αλλά και την εμπειρία από τη πλευρά της εφαρμογής, προκειμένου να προβούν σε κατάταξη των επιλογών τους. Επιπλέον, η χρήση διπλής συνάρτησης σφάλματος επιτρέπει τη καλύτερη σταθεροποίηση της θέσης των σημείων/αποφάσεων.

Σε αυτή τη μελέτη, η μέθοδος UTASTAR χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συνάρτησης συνολικής χρησιμότητας. Παρέχει την ευκαιρία να ληφθεί μια ορθολογική απόφαση προσαρμόσιμη στη νοοτροπία του αποφασίζοντα που λαμβάνει υπόψη την κατάταξη, την ιεράρχηση, την επιλογή και την ταξινόμησή του.

Έστω $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ το σύνολο εναλλακτικών επιλογών, εκτιμώμενες βάσει προτιμήσεων από μια οικογένεια κριτηρίων $g = (g_1, g_2, \dots, g_n)$, από το σύνολο των απορραφνιζόντων $J=\{1, 2, \dots, p\}$. Έκαστο κριτήριο g δείχνει την αναπαράσταση μιας μονότονης ποιοτικής ή ποσοτικής μεταβλητής. Πιο συγκεκριμένα, ως προς την εκτίμηση των περιθωρίων (μερικών) συναρτήσεων αξίας, οι κλίμακες μέτρησης κάθε κριτηρίου διακριτοποιούνται σε ένα σύνολο σημείων ως εξής:

$$G_i = \{g_{i*} = g_i^1, g_i^2, \dots, g_i^l, \dots, g_i^{ai} = g_i^*\}$$

Ο εκάστοτε που λαμβάνει απόφαση παρέχει την προδιάταξη των επιλογών του συμφώνως με τις προτιμήσεις του, όπου οι επιλογές εναλλακτικών καυσίμων φέρουν αριθμούς μικρότερους από το καύσιμο που τελικά έχει τη καλύτερη αποτίμηση για αυτόν που λαμβάνει την απόφαση με τιμή κατάταξης 1 ($r_1^* = 1$). Στο σύνολο αναφοράς $A_k = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ υφίσταται «ανακατάταξη», προκειμένου τα εναλλακτικά καύσιμα να είναι διατεταγμένα συμφώνως της σειράς προτίμησης, ώστε η a_1 να αποτελεί την πρώτη επιλογή και η a_k να βρίσκεται στο τέλος της κατάταξης. Με δεδομένο ότι η κατάταξη επέχει ρόλο προδιάταξης, για κάθε ζεύγος επιλογών (a_j, a_{j+1}) ισχύει, είτε $a_j > a_{j+1}$ (προτίμηση) είτε $a_j \sim a_{j+1}$ (αδιαφορία).

Σύμφωνα με τα δεδομένα από το ερωτηματολόγιο για εναλλακτικές και κριτήρια, διαμορφώνεται ανάλογα ο παρακάτω πίνακας για κάθε λήπτη απόφασης:

Πίνακας 11. Αξιολόγηση εναλλακτικών με κριτήρια και κατάταξη του αποφασίζοντα.

Εναλλακτικές/ Κριτήρια	Κατάταξη/ Προδιάταξη	g_1	g_2	...	g_n
a_1	$r_{1_k}(a_1)$	$g_{1_k}(a_1)$	$g_{2_k}(a_1)$...	$g_{n_k}(a_1)$
a_2	$r_{2_k}(a_2)$	$g_{1_k}(a_2)$	$g_{2_k}(a_2)$...	$g_{n_k}(a_2)$
...
a_k	$r_{m_k}(a_k)$	$g_{1_k}(a_k)$	$g_{2_k}(a_k)$...	$g_{n_k}(a_k)$

Οι τιμές αξιολόγησης για έκαστο κριτήριο μπορούν να συμπληρώνονται από τους αποφασίζοντες ή να δίνονται εκ των προτέρων από το σύστημα. Επίσης, υπάρχει καθορισμός της μέγιστης - ελάχιστης τιμής, της μονοτονίας και του αριθμού διαστημάτων μεταξύ αυτών. Η τιμή της μονοτονίας είναι 0 όταν η καλύτερη τιμή < χειρότερης τιμής, όσο μικρότερη είναι η τιμή τόσο καλύτερο είναι το εναλλακτικό καύσιμο, διαφορετικά παίρνει τιμή 1. Υφίσταται δυνατότητα καθορισμού

υποδιαστημάτων τόσο των ποσοτικών όσο και των ποιοτικών κριτηρίων προκειμένου να συνεισφέρουν στην επίλυση του γραμμικού προβλήματος για ένα κριτήριο.

Πίνακας 12. Καθορισμός τιμών, μονοτονίας & διαστημάτων

Καλύτερη τιμή	$r^* = 1$	g_1^*	g_2^*	...	g_n^*
Χειρότερη τιμή	r^*	g_{1*}	g_{2*}		g_{n*}
Μονοτονία	0 όταν η καλύτερη τιμή < χειρότερης τιμής, διαφορετικά 1				
Διαστήματα		α_1	α_2		α_n

Για ένα κριτήριο που αξιολογούνται οι εναλλακτικές, το διάστημα $[g_1^*, g_{1*}]$ χωρίζεται σε $(\alpha_i - 1)$ ίσα υποδιαστήματα, και τα τελικά σημεία g_i^j κάθε υποδιαστήματος δίνονται από τον τύπο :

$$g_i^j = g_{i*} + \frac{j-1}{\alpha_i-1} (g_i^* - g_{i*}) \quad \forall j = 1, 2, \dots, \alpha_i.$$

Ακολουθεί η σύνθεση των κριτηρίων, η οποία προκύπτει από μια προσθετική συνάρτηση χρησιμότητας u και σφαλμάτων $\sigma^+(a)$, $\sigma^-(a)$ υποεκτίμησης και υπερεκτίμησης, αντίστοιχα:

$$U'(\mathbf{g}(a)) = \sum_{i=1}^n u_i(g_i(a)) - \sigma^+(a) + \sigma^-(a) \quad \forall a \in A$$

Οι περιορισμοί της μονοτονίας των κριτηρίων που τίθενται, μοντελοποιούνται με τους ακόλουθους μετασχηματισμούς των μεταβλητών w_{ij} :

$$w_{ij} = u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \text{ και } j = 1, 2, \dots, \alpha_i - 1$$

Με δεδομένο ότι η κατάταξη επέχει ρόλο προδιάταξης προτιμήσεων, για κάθε ζεύγος επιλογών (a_j, a_{j+1}) ισχύει, είτε $a_j > a_{j+1}$ (προτίμηση), είτε $a_j \sim a_{j+1}$ (αδιαφορία).

Η προσαρμογή των προσθετικών συναρτήσεων χρησιμότητας βασιζόμενη στην αξιολόγηση πολλαπλών κριτηρίων γίνεται κατά τρόπο τέτοιο προκειμένου η δομή από τις προκύπτουσες προτιμήσεις να είναι όσο το δυνατόν σε συνέπεια με την αρχική. Η

προτίμηση στη σειρά κατάταξης, εν μέσω σε δύο συνεχόμενες προτιμήσεις, ορίζεται ως Δ και ο υπολογισμός της παρατίθεται ως ακολούθως :

$$\Delta(a_k, a_{k+1}) = U(g(a_k)) - \sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k) - U(g(a_{k+1})) + \sigma^+(a_{k+1}) - \sigma^-(a_{k+1})$$

με τους παρακάτω περιορισμούς

$$\begin{aligned} \Delta(a_k, a_{k+1}) &\geq \delta \text{ εάν } a_k > a_{k+1} \\ \Delta(a_k, a_{k+1}) &= 0 \text{ εάν } a_k \sim a_{k+1} \end{aligned}$$

όπου δ ,ένας θετικός αριθμός που διαχωρίζει δύο διαδοχικές προτιμήσεις ισοδυναμίας της προδιάταξης.

3.6.1 Αλγόριθμος UTASTAR

Ως εκ τούτου, συμπερασματικά για τον αλγόριθμο UTASTAR συνοψίζονται τα ακόλουθα βήματα :

➤ **Βήμα 1:** Η ολική αξία των επιλογών $u(g(a_k)), k=1,2, \dots, m$ εκφράζεται αρχικώς ως συνάρτηση των αξιών $u_i(g_i)$ χειρότερης τιμής μηδέν και εν συνέχεια ως συνάρτηση των μεταβλητών w_{ij} :

$$\begin{aligned} u_i(g_i^1) &= 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \\ u_i(g_i^j) &= \sum_{t=1}^{j-1} w_{it} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \text{ και } j = 2, 3, \dots, a_i - 1 \end{aligned}$$

➤ **Βήμα 2:** Εισαγωγή δύο συναρτήσεων $\sigma^+(a), \sigma^-(a)$ σφάλματος στο A , εκφράζοντας για ένα ζεύγος διαδοχικών επιλογών προδιάταξης τις αναλυτικές εκφράσεις :

$$\begin{aligned} \Delta(a_k, a_{k+1}) &= U(g(a_k)) - \sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k) - U(g(a_{k+1})) \\ &\quad + \sigma^+(a_{k+1}) - \sigma^-(a_{k+1}) \end{aligned}$$

➤ **Βήμα 3:** Σχηματίζεται το παρακάτω πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού προς επίλυση :

$$[min]Z = \sum_{k=1}^m \sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\begin{aligned} \Delta(a_k, a_{k+1}) &\geq \delta \text{ εάν } a_k > a_{k+1} \forall k \\ \Delta(a_k, a_{k+1}) &= 0 \text{ εάν } a_k \sim a_{k+1} \forall k \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_i-1} w_{ij} &= 1 \\ w_{ij} &\geq 0, \quad \sigma^+(a_k) \geq 0, \quad \sigma^-(a_k) \geq 0 \quad \forall i, j \text{ και } k \end{aligned}$$

όπου δ ένας μικρός θετικός αριθμός.

➤ **Βήμα 4:** Επιλύονται τα γραμμικά συστήματα για ένα κριτήριο ξεχωριστά, προκειμένου στην εξεύρεση βέλτιστης λύσης στο γραμμικό προγραμματισμό. Δεδομένου ότι στη φάση αυτή δε λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα σ , τροποποιείται το διάνυσμα των μεταβλητών στο πλαίσιο μεγιστοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων, υπολογίζοντας το βαρύκεντρο για τις προσθετικές συναρτήσεις αξίας:

$$u_i(g_i^*) = \sum_{j=1}^{a_i-1} w_{ij} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Υπό τον νέο περιορισμό :

$$\sum_{k=1}^m (\sigma^+(a_k) + \sigma^-(a_k)) \leq Z^* + \varepsilon$$

όπου Z^* η βέλτιστη τιμή (σφάλμα) του γραμμικού προγραμματισμού στο βήμα 3 και ε : μικρός αριθμός με θετικό πρόσημο ή μηδέν.

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία - Μέρος 1^ο.

Εναλλακτικές επιλογές καυσίμων & κριτήρια επιλογής

4.1 Μεθοδολογία επίλυσης προβλήματος

Η εφαρμογή της θεωρίας λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDM¹⁵⁵) είναι η χρήση υπολογιστικών μεθόδων που ενσωματώνουν διάφορα κριτήρια και σειρά προτίμησης για την αξιολόγηση και την επιλογή της καλύτερης πρότασης μεταξύ πολλών εναλλακτικών με βάση το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Για την αποτελεσματική διαχείριση πολλών θεμάτων της ναυτιλιακής βιομηχανίας, η λήψη αποφάσεων σχετικά με τα εναλλακτικά καύσιμα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ο εντοπισμός του πιο κατάλληλου εναλλακτικού καυσίμου, είναι ένα πρόβλημα πολλαπλών κριτηρίων στο οποίο η διαδικασία λήψης αποφάσεων επηρεάζεται από διάφορα ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια.

Στα βασικά βήματα των ενεργειών για την επίλυση του προβλήματος ακολουθήθηκε η μεθοδολογία σύμφωνα με Roy (1985), όπως έχει περιγραφεί στην §3.4 παρούσας εργασίας. Στην διαδικασία επίλυσης του υφιστάμενου προβλήματος της ναυτιλιακής βιομηχανίας, αναφορικά με την επιλογή κατάλληλου εναλλακτικού καυσίμου πλοίων, συγκαταλέγονται στο Επίπεδο 1 (καθορισμός του αντικειμένου), ο προσδιορισμός των εναλλακτικών επιλογών – λύσεων (ορισμός του συνόλου των πιθανών ενεργειών A), όπου το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται, η υιοθέτηση της προβληματικής γ' – της κατάταξης, από την πλευρά του αναλυτή, σε συνδυασμό με την προβληματική α' – της επιλογής, από την πλευρά των αποφασιζόντων, λόγω της φύσης του προβλήματος και την ανάγκη παροχής τόσο μιας βιώσιμης επιλογής αλλά και τη δυνατότητα παροχής προτάσεων που έπονται για πιθανή εξέταση προς χρήση και υλοποίηση.

Στο Επίπεδο 2, πραγματοποιείται ο προσδιορισμός της συνεπούς οικογένειας κριτηρίων αξιολόγησης, η συλλογή δεδομένων για κάθε κριτήριο και εναλλακτική από αξιόπιστες πηγές, ο καθορισμός στάθμισης των κριτηρίων και η εξασφάλιση της υπόθεσης των ιδιοτήτων που πρέπει να έχουν τα κριτήρια με την παραδοχή ότι:

¹⁵⁵ Ματσατσίνης, Ν. (2022), «Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων» (Β' Έκδοση), Νέες Τεχνολογίες, Αθήνα (ΕΥΔΟΞΟΣ: 112706280)

❖ Τα κριτήρια αποτελούν συναρτήσεις μη φθίνουσες: Αυτό σημαίνει ότι υψηλότερες βαθμολογίες για τα κριτήρια είναι πιο ευνοϊκές.

❖ Τα κριτήρια είναι εξαντλητικά: Καλύπτονται όλες οι σχετικές πτυχές του προβλήματος απόφασης.

❖ Τα κριτήρια δεν είναι περιττά: Τα κριτήρια δεν επικαλύπτονται ή αντιγράφουν το ένα το άλλο.

Στο Επίπεδο 3, δημιουργείτε ένα μοντέλο που συγκεντρώνει μεμονωμένες αξιολογήσεις (προτιμήσεις) κάθε κριτηρίου σε μια συνολική χρησιμότητα για κάθε ενέργεια. Αυτό το βήμα περιλαμβάνει μαθηματικές και υπολογιστικές μεθόδους για τον συνδυασμό των κριτηρίων και την εξαγωγή μιας ταξινομημένης και συγκριτικής αξιολόγησης των διαθέσιμων ενεργειών. Ουσιαστικά, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR, και στη συνέχεια ερμηνεία και ανάλυση αποτελεσμάτων (Κεφάλαιο 5).

Το Επίπεδο 4 αποτελεί το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας και αναφέρεται στην υποστήριξη της απόφασης ή στην βοήθεια της απόφασης. Στο τελικό αυτό επίπεδο χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα που λαμβάνονται στο Επίπεδο 3 για την παροχή υποστήριξης αποφάσεων με γνώμονα το πρόβλημα που προσδιορίζεται στο Επίπεδο 1.

Αυτά τα τέσσερα επίπεδα αντιπροσωπεύουν μια δομημένη προσέγγιση για τη μοντελοποίηση αποφάσεων, ξεκινώντας με τον ορισμό του προβλήματος και καταλήγοντας στην πρακτική υποστήριξη αποφάσεων με βάση τα καθιερωμένα κριτήρια και προτιμήσεις.

Τα αποτελέσματα της UTASTAR δίνουν τη δυνατότητα στους διαχειριστές και τους αποφασίζοντες να ταξινομήσουν τις επιλογές και έτσι να δικαιολογήσουν την καταλληλότερη επιλογή ως το προτιμώμενο εναλλακτικό καύσιμο.

Η προτεινόμενη προσέγγιση προσφέρει μια νέα προοπτική στο πρόβλημα της επιλογής εναλλακτικού καυσίμου, υπολογίζοντας μεμονωμένες συναρτήσεις χρησιμότητας που αντιπροσωπεύουν τις σχετικές τιμές εναλλακτικών καυσίμων από την οπτική γωνία των υπευθύνων που λαμβάνουν αποφάσεις.

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι εναλλακτικές επιλογές καυσίμου και τα κριτήρια αξιολόγησης καθώς και όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για

την κατανόηση τους (Επίπεδο 1 & 2). Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου σε εστιασμένο σενάριο μελέτης περίπτωσης με σχετική ερμηνεία και ανάλυση των αποτελεσμάτων ολοκληρώνοντας το μονοπάτι της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. (Επίπεδο 3 & 4)

4.2 Εναλλακτικές επιλογές καυσίμου

Υπάρχουν εναλλακτικές επιλογές καυσίμων (ορισμός του συνόλου των πιθανών ενεργειών A), που έχουν αναπτυχθεί ως φιλικές προς το περιβάλλον και αποτελούν εναλλακτικές λύσεις έναντι των παραδοσιακών ορυκτών καυσίμων. Αυτά τα εναλλακτικά καύσιμα όπως έχει ήδη καταγραφεί, χρησιμοποιούνται συχνά σε μια προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μείωσης της εξάρτησης από εισαγόμενο πετρέλαιο και προώθησης της ενεργειακής ασφάλειας σύμφωνα με τους κανονισμούς και την νομοθεσία.

Τα καύσιμα ενδιαφέροντος προς επιλογή, αποτελώντας ταυτόχρονα τις εναλλακτικές επιλογές για την παρούσα εργασία έχουν αναλυτικά αναπτυχθεί και συγκριτικά παρουσιάζεται στο Κεφ.2 (§ 2.4 & § 2.5 αντίστοιχα). Συνοπτικά αναφερόμαστε στο υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), στο υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG), στο υδρογόνο (H_2), στην αμμωνία (NH_3), στην αιθανόλη (CH_3OH) και στα Βιοκαύσιμα.

4.3 Κριτήρια επιλογής εναλλακτικών καυσίμων

Η έρευνα στο πεδίο επιλογής εναλλακτικού καυσίμου, δημιούργησε προβληματισμούς όσον αφορά τα κριτήρια που οι αποφασίζοντες πρέπει να λάβουν υπόψη και να αξιολογήσουν, ώστε να συμπεριλάβουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος ικανοποίησης των στόχων και των συμφερόντων τους με την λήψη απόφασης που θα πάρουν.

Αν και η χρήση εναλλακτικού καυσίμου είναι μόνο μία από τις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη μείωση και τον μηδενισμό των εκπομπών που σχετίζονται με τα πλοία, είναι η μόνη μέθοδος που μπορεί να επιφέρει 100 % επιτυχία στη μείωση των εκπομπών και η δυνατότητα εφαρμογής και η αποδοχή της στην αγορά είναι εξαιρετικά υψηλή. Από την άλλη πλευρά, είναι μια δύσκολη διαδικασία για τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα να αντικατασταθούν από νέα καύσιμα λόγω της ισχυρής υποδομής των πρώτων, της δημοτικότητάς τους και των ευρέως διαδεδομένων δικτύων χρήσης τους. Τα εναλλακτικά καύσιμα πρέπει να πληρούν ορισμένα πολύ σημαντικά

κριτήρια προκειμένου να αντικαταστήσουν τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Ως πυλώνες κριτήρια μπορούν να θεωρηθούν τα οικονομικά, τα τεχνικά, τα περιβαλλοντικά καθώς και τα κοινωνικά και εν συνεχεία έπονται για κάθε πυλώνα τα υποκριτήρια.

Τα τεχνικά κριτήρια σχετίζονται με τη χρήση του καυσίμου επί του πλοίου και περιλαμβάνουν τροποποιήσεις κυρίων μηχανών, ηλεκτροπαραγωγικών ζευγών και μηχανημάτων, συνθήκες αποθήκευσης καυσίμου, περιορισμούς εφοδιασμού και υποδομής¹⁵⁶. Μια μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι τεχνικές συνθήκες θεωρούνται από τα πιο ουσιαστικά και σημαντικά κριτήρια για την ναυτιλιακή βιομηχανία¹⁵⁷. Οι τεχνικές συνθήκες των εναλλακτικών καυσίμων πρέπει να είναι τουλάχιστον κοντά στο επίπεδο των συμβατικών ορυκτών καυσίμων με απώτερο στόχο να τις ξεπεράσουν. Τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα δεν παρουσιάζουν ασυνήθιστες εκπλήξεις, καθώς χρησιμοποιούνται για πολλά χρόνια υπό αποδεδειγμένες συνθήκες και σχεδόν όλα τα υπάρχοντα συστήματα πλοίων έχουν αναπτυχθεί για συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Οι κινητήρες έχουν σχεδιαστεί, οι συνθήκες αποθήκευσης έχουν μελετηθεί κατάλληλα και ο εξοπλισμός κινητήρα έχει προσαρμοστεί σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των συμβατικών ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, οι υποδομές και οι εγκαταστάσεις εφοδιασμού έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των συμβατικών ορυκτών καυσίμων. Δεδομένου ότι η τεχνική υποδομή που απαιτείται από την πλειονότητα των εναλλακτικών καυσίμων είναι πολύ διαφορετική από εκείνη των συμβατικών καυσίμων, οποιαδήποτε τεχνική διευθέτηση πρέπει να γίνει σημαίνει πρόσθετο κόστος και απώλεια χρόνου. Επιπλέον, οι νέοι κανονισμοί ενέχουν τον κίνδυνο λαθών και ενδέχεται να προκαλέσουν πρόσθετο και απρόβλεπτο κόστος.

Στα οικονομικά κριτήρια περιλαμβάνονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις μηχανημάτων (και εξοπλισμού αυτών), το κόστος εξειδικευμένου προσωπικού (και εκπαίδευσης του), το κόστος υποδομής και το κόστος του κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών παραγωγής, διανομής, αποθήκευσης και ανεφοδιασμού, οι οποίες αποτελούν επίσης σημαντικούς παράγοντες^{158 159 160 161 162} στα

¹⁵⁶ Brynolf, S., et al. (2014).

¹⁵⁷ Mandić, N., et al. (2021). «*Multicriteria analysis of alternative marine fuels in sustainable coastal marine traffic*».

¹⁵⁸ Brynolf, S., et.al. (2014). «*Environmental assessment of marine fuels: Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol*».

¹⁵⁹ Andersson, K., et.al. (2020). «*Criteria and decision support for a sustainable choice of alternative marine fuels*».

¹⁶⁰ Hansson, J., et.al. (2020). «*The potential role of ammonia as marine fuel-based on energy systems modeling and multi-criteria decision analysis*».

¹⁶¹ Thomson, H., et.al. (2015). «*Natural gas as a marine fuel*».

¹⁶² Svanberg, M., (2018). «*Renewable methanol as a fuel for the shipping industry*».

εν λόγω κριτήρια. Η σημαντικότητα αυτού του κριτηρίου έναντι των υπόλοιπων είναι ότι το κόστος τοποθετείται πρώτο από τους πλοιοκτήτες¹⁶³. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των συμβατικών ορυκτών καυσίμων σε σύγκριση με τα εναλλακτικά καύσιμα είναι ότι διαθέτουν ισχυρή υποδομή βασισμένη σε εμπειρία αιώνων. Τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα δεν αναμένεται να επιφέρουν πρόσθετο κόστος, καθώς οι λειτουργικές τους αντιδράσεις είναι γνωστές. Το προσωπικό εκπαιδεύεται σε αυτά τα καύσιμα και δεν απαιτεί επιπλέον κόστος εκπαίδευσης. Για όλους αυτούς τους λόγους, το οικονομικό κριτήριο θεωρείται ως το πρώτο εμπόδιο που πρέπει να ξεπεραστεί για τη χρήση ενός εναλλακτικού καυσίμου σε παγκόσμια κλίμακα. Είναι επίσης το πιο δύσκολο εμπόδιο γιατί δημιουργεί έναν φαύλο κύκλο στον οποίο η ζήτηση παραμένει περιορισμένη, καθώς το κόστος στο σύστημα προσφοράς δεν μπορεί να μειωθεί χωρίς αύξηση της ζήτησης. Για το λόγο αυτό, ενδέχεται να απαιτούνται κρατικά κίνητρα για την υπέρβαση του οικονομικού κριτηρίου στο επιθυμητό επίπεδο.

Ένα εναλλακτικό καύσιμο αποδεκτό από την κοινωνία είναι ένα καύσιμο με υψηλές περιβαλλοντικές επιδόσεις. Τα περιβαλλοντικά κριτήρια λαμβάνουν υπόψη τη διασφάλιση της βιωσιμότητας στις θαλάσσιες μεταφορές, με αποδοτικά καύσιμα, φιλικά προς το περιβάλλον, με σεβασμό στους χερσαίους και θαλάσσιους πόρους, με μηδενικές ή χαμηλές εκπομπές άνθρακα καθώς και περιορισμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Επίσης, συμπεριλαμβάνονται τυχόν επιπτώσεις που αθροιστικά προκαλούν συνθήκες για την κλιματική αλλαγή.

Τα κοινωνικά κριτήρια περιλαμβάνουν τους κινδύνους που μπορεί να προκύψουν ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των διαφόρων διαδικασιών στο κύκλο ζωής του καυσίμου¹⁶⁴. Πρωτίστως, σε μια θαλάσσια μεταφορά πρέπει να διασφαλίζονται ο ανθρώπινος παράγοντας (επιβάτες και πλήρωμα) καθώς και το μεταφερόμενο φορτίο. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι κίνδυνοι που μπορεί να προκύψουν και να ληφθούν με ευαισθησία οι απαραίτητες προφυλάξεις. Ενώ τα γνωστά χαρακτηριστικά των συμβατικών ορυκτών καυσίμων και η εκτεταμένη διαδικασία εκπαίδευσης ελαχιστοποιεί τους κινδύνους που μπορεί να προκύψουν, η εξάλειψη νέων κινδύνων που προκύπτουν από τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των εναλλακτικών καυσίμων, μερικά από τα οποία είναι αρκετά δύσκολο να ξεπεραστούν, θα απαιτήσουν κάποια πρόσθετα μέτρα. Η νομοθεσία επίσης αποτελεί καίριο παράγοντα στην επιλογή

¹⁶³ Eise Fokkema, et al. (2017). «An investment appraisal method to compare LNG-fueled and conventional vessels».

¹⁶⁴ Hansson, J., et.al. (2020).

καυσίμου, ενεργώντας θετικά στις περιπτώσεις όπου το καύσιμο έχει δοκιμαστεί και υφίσταται κανονιστικό πλαίσιο, ενώ αποτελεί εμπόδιο για νέα καύσιμα δεδομένου του πρώιμου σταδίου ωριμότητας του καυσίμου στη ναυτιλιακή αγορά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κύριες κατηγορίες κριτηρίων και τα υποκριτήρια, για επιλογή εναλλακτικού ναυτιλιακού καυσίμου έχουν έρεισμα από τα κριτήρια που συμπεριλήφθηκαν στις μελέτες που αναφέρονται στη §1.3 της παρούσας εργασίας και ειδικότερα όσα παρουσιάζονται στο Παράρτημα I, πλην όμως αξιοποιήθηκαν σε διαφορετική μέθοδο πολυκριτήριας ανάλυσης : στην παρούσα εργασία έγινε χρήση της UTASTAR έναντι των AHP και ασαφούς TOPSIS που χρησιμοποιήθηκαν στις αναφερόμενες μελέτες.

Συμφώνως των ανωτέρω και ακολούθως της κρίσης των αποφασιζόντων επί του ερωτηματολογίου - Παραρτήματος II που τους δόθηκε, στο πλαίσιο του προσδιορισμού της συνεπούς οικογένειας κριτηρίων αξιολόγησης, επέλεξαν τα τελικά κριτήρια των εναλλακτικών επιλογών, προκειμένου να οδηγηθούν σε αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών, σε επόμενη φάση της μεθοδολογίας (Επίπεδο 3), όπως καταγράφεται παρακάτω. Τα τελικά κριτήρια χωρίζονται σε τέσσερεις κύριες κατηγορίες, όπου συμπεριλαμβάνονται τα τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια και αυτά με τη σειρά τους σε υποκατηγορίες όπως περιγράφονται και παρουσιάζονται:

❖ Τεχνολογικά κριτήρια

g1 – Διαθέσιμη υποδομή: Αναφέρεται στη δυνατότητα συμβατότητας με την υφιστάμενη υποδομή (συμπεριλαμβάνονται λιμένες, εγκαταστάσεις και υποδομές καυσίμων), καθώς και το επίπεδο ωριμότητας όσον αφορά τις διαδικασίες για την αποθήκευση, διανομή και ανεφοδιασμό των καυσίμων.

g2 – Αξιοπιστία παροχής: Αναφέρεται στην επάρκεια και το ποσοστό διαθεσιμότητας των πρώτων υλών που απαιτούνται, στις διαδικασίες της τρέχουσας παραγωγικής ικανότητας και χρήσης ως καύσιμα πλοίων, καθώς και της ενεργειακής ασφάλειας συμφώνως της παγκόσμιας κατανομής του δυναμικού εφοδιασμού και της πολιτικής σταθερότητας ή του ενδεχόμενου διακοπής του εφοδιασμού σε περιοχές με μεγάλο δείκτη εφοδιασμού και αποθεμάτων.

g3 – Προσαρμογή κινητήρων πλοίου: Αναφέρεται στο επίπεδο συμβατότητας με την υπάρχουσα υποδομή ναυτικών κινητήρων και τις όποιες τροποποιήσεις μετασκευές απαιτούνται.

❖ **Οικονομικά κριτήρια**

g4 – Λειτουργικό κόστος: Αναφέρεται στο κόστος (OPEX) που προκύπτει με γνώμονα την ποσότητα και την ποιότητα του πληρώματος που απαιτείται, την εκπαίδευση¹⁶⁵ του, το κόστος του τομέα ασφάλισης καθώς και το κόστος συντήρησης (δεν υπολογίζεται το κόστος καυσίμου).

g5 – Τιμή καυσίμου : Αντιπροσωπεύεται από την εκτιμώμενη σχετική διαφορά τιμής-κόστους για τα καύσιμα που μελετήθηκαν έχοντας ως βάση την τιμή bunker (εφόσον υφίσταται), την εκτίμηση για το κόστος παραγωγής και την εκτίμηση για τις τιμές αναφορικά με τις πρώτες ύλες παραγωγής καυσίμων.

g6 – Επενδυτικό κόστος: Αντιπροσωπεύεται από το κεφαλαιουχικό κόστος (CAPAX) που απαιτείται για τη πρόωση και την υποδομή εγκατάστασης, περιλαμβάνοντας το κόστος που αφορά κινητήρες, δεξαμενές καυσίμων, σωληνώσεων, αγωγών, συστημάτων ασφαλείας, ηλεκτρονικών συσκευών επεξεργασίας καυσίμου κ.λπ.

❖ **Περιβαλλοντικά κριτήρια**

g7 – Επιπτώσεις - κλιματική αλλαγή: Αντιπροσωπεύεται από το δείκτη υπερθέρμανσης λόγω εκπομπών CO_2 , CH_4 και N_2O σε ορισμένο χρόνο.

g8 – Εκπομπές καυσαερίων: Αντιπροσωπεύεται από το ποσοστό σχηματισμού σωματιδίων αναφορικά με PM , SO_2 και NO_x , τα οποία επιδρούν επιβαρυντικά στην υγεία.

g9 – Οξίνιση: Αντιπροσωπεύεται από το περιεχόμενο οξίνισης βάσει των εκπομπών NO_x και SO_2 προερχόμενων από την καύση, κυρίως ορυκτών καυσίμων. Ο ωκεανός έχει γίνει πιο όξινος τον περασμένο αιώνα λόγω της αύξησης της ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα που απορροφάται από την ατμόσφαιρα, οδηγώντας σε χαμηλότερο pH και μεγαλύτερη οξύτητα.

¹⁶⁵ International Maritime Organization, (2023). «*Training seafarers for a decarbonized future*» <https://www.imo.org/en/MediaCentre/Pages/WhatsNew-2014.aspx>

❖ Κοινωνικά κριτήρια

g10 – Ασφάλεια: Αναφέρεται στους κίνδυνους που σχετίζονται με τη διαχείριση του καυσίμου, τυχόν πυρκαγιά, έκρηξη, υγειονομικούς κινδύνους αναφορικά με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου καυσίμου όπως το σημείο ανάφλεξης, το εύρος της αναφλεξιμότητας τη τοξικότητα αλλά και ανησυχίες σχετικά με την μεταφορά, αποθήκευση και φόρτωση των καύσιμων.

g11 – Νομοθεσία: Αντιπροσωπεύεται από τις δυνατότητες για συμμόρφωση στους υφιστάμενους ή επικείμενους κανονισμούς όσον αφορά στις μειώσεις SO_x , NO_x & GHG .

Όλα τα τεχνολογικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια προσδιορίζονται ως ποιοτικά κριτήρια, ενώ τα οικονομικά κριτήρια αντίστοιχα ως ποσοτικά. Η διάκριση αυτή γίνεται λόγω της φύσης αυτών των κριτηρίων και του τρόπου με τον οποίο μετρώνται και αξιολογούνται. Πάραυτα, στη δικιά μας περίπτωση τόσο τα ποιοτικά όσο και τα ποσοτικά αξιολογούνται με την ίδια κλίμακα, όπως αιτιολογείται παρακάτω. (§ 4.4, σελ. 103)

Τα τεχνολογικά κριτήρια επικεντρώνονται στις τεχνολογικές πτυχές ενός προϊόντος ή διαδικασίας. Λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η καινοτομία, η αποτελεσματικότητα, η επεκτασιμότητα, η συμβατότητα και η τεχνική σκοπιμότητα. Η αξιολόγηση των τεχνολογικών πτυχών περιλαμβάνει την εξέταση παραγόντων όπως η χρηστικότητα, η προσαρμοστικότητα και η αξιοπιστία. Δεδομένου ότι αυτοί οι παράγοντες εκφράζονται συχνά με περιγραφικούς όρους και μπορεί να περιλαμβάνουν κρίσεις ειδικών, είναι πιο κατάλληλοι για ποιοτική αξιολόγηση. Επομένως, τα κριτήρια αυτά είναι δύσκολο να μετρηθούν με ακριβείς αριθμητικούς όρους, γι' αυτό και θεωρούνται ποιοτικά.

Τα οικονομικά κριτήρια αξιολογούν τις οικονομικές επιπτώσεις ενός έργου ή μιας απόφασης. Αυτά περιλαμβάνουν παράγοντες όπως το κόστος, τα έσοδα, τα κέρδη, η απόδοση της επένδυσης και η περίοδος απόσβεσης. Τα οικονομικά κριτήρια εκφράζονται συχνά με νομισματικούς όρους, καθιστώντας τα ποσοτικά και πιο απλά στη μέτρηση και τη σύγκριση. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι οικονομικές αξιολογήσεις μπορούν επίσης να περιλαμβάνουν ορισμένες ποιοτικές εκτιμήσεις, όπως η αξιολόγηση κινδύνου και η ανάλυση κόστους-οφέλους. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα

κριτήρια αυτά είναι συχνά ζωτικής σημασίας για τη λήψη αποφάσεων, καθώς παρέχουν έναν σαφή τρόπο σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων και προσδιορισμού της οικονομικής βιωσιμότητας ενός έργου ή μιας επένδυσης.

Τα περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολογούν τον αντίκτυπο ενός έργου ή μιας δραστηριότητας στο περιβάλλον. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν παράγοντες όπως το αποτύπωμα άνθρακα, τη ρύπανση, τη βιωσιμότητα και την εξάντληση των πόρων. Αυτοί οι παράγοντες είναι συχνά αλληλένδετοι και μπορεί να έχουν πολύπλοκες, έμμεσες επιπτώσεις. Ενώ ορισμένες πτυχές των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μπορούν να μετρηθούν ποσοτικά, οι ευρύτερες περιβαλλοντικές εκτιμήσεις συχνά απαιτούν ποιοτική ανάλυση λόγω της πολυπλοκότητας των οικοσυστημάτων και των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των δράσεων στο περιβάλλον.

Τα κοινωνικά κριτήρια αξιολογούν τις επιπτώσεις ενός έργου στην ανθρώπινη ευημερία, την ισότητα, την πολιτιστική κληρονομιά και τη συμμετοχή της κοινότητας. Αυτά τα κριτήρια μπορεί να περιλαμβάνουν παράγοντες όπως η κοινωνική συνοχή, η τοπική απασχόληση, η υγεία, η εκπαίδευση και η πολιτιστική διατήρηση. Περιλαμβάνουν παράγοντες όπως η κοινωνική ισότητα, η πολιτισμική ευαισθησία, η υγεία, η εκπαίδευση, η δημόσια αποδοχή και η ευημερία της κοινότητας. Οι πτυχές αυτές επηρεάζονται από υποκειμενικές αντιλήψεις, πολιτισμικά πλαίσια και την ποικιλόμορφη φύση των κοινωνικών αλληλεπιδράσεων και μπορεί να μην προσφέρονται εύκολα σε αριθμητική αναπαράσταση, καθιστώντας τις πιο κατάλληλες για ποιοτική αξιολόγηση.

Η διάκριση μεταξύ ποιοτικών και ποσοτικών κριτηρίων είναι σημαντική γιατί αναγνωρίζει τη διαφορετική φύση αυτών των κριτηρίων και τις μεθόδους που απαιτούνται για την αξιολόγησή τους. Ενώ τα ποιοτικά κριτήρια συχνά περιλαμβάνουν υποκειμενική κρίση, γνώμες ειδικών και αφηγηματικές αξιολογήσεις, τα ποσοτικά κριτήρια βασίζονται σε μετρήσιμα δεδομένα, υπολογισμούς και αριθμητικές συγκρίσεις. Αυτή η διάκριση βοηθά τους αποφασίζοντες να υιοθετήσουν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση κατά την αξιολόγηση έργων, λαμβάνοντας υπόψη ένα ευρύ φάσμα παραγόντων που συμβάλλουν στη συνολική επιτυχία και τον αντίκτυπο μιας απόφασης ή πρωτοβουλίας.

Στη περίπτωση που εξετάζουμε για την αξιολόγηση των κριτηρίων έχει επιλεγεί μια δεκαβάθμια κλίμακα (1-10), τόσο για τα ποιοτικά κριτήρια, όσο και για τα ποσοτικά, όπου 1 η χειρότερη τιμή και 10 αντίστοιχα η καλύτερη. Αυτή η προσέγγιση παρέχει έναν

δομημένο και τυποποιημένο τρόπο αξιολόγησης και σύγκρισης διαφορετικών κριτηρίων με βάση τη σχετική σημασία και την απόδοσή τους, βαθμολογώντας οι αποφασίζοντες κατ'εκτίμηση σύμφωνα με τις προτιμήσεις τους.

Η επιλογή της κλίμακας εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της αξιολόγησης, το επίπεδο ακρίβειας που απαιτείται και τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων και των ενδιαφερομένων που εμπλέκονται στη διαδικασία. Η επιλεγθείσα κλίμακα μέτρου με βαθμονόμηση 1-10 εφαρμόζεται στη παρούσα εργασία τόσο επί των ποιοτικών κριτηρίων που εκ της θεωρίας είναι αναμενόμενο, όσο και επί των ποσοτικών, όπου όμως θα αναμένονταν αποτύπωση τιμών, και αυτό λόγω μη διαθεσιμότητας αυτών ή και δυνατότητα εξεύρεσης τιμών στο σύνολο των εναλλακτικών καυσίμων για την ίδια περίοδο έρευνας, είτε από επίσημες πηγές της αγοράς, είτε από την βιβλιογραφία, είτε ακόμα και από το διαδίκτυο, γεγονός που αναδεικνύει ότι το επίπεδο ωριμότητας ως προς την υλοποίηση και την εκμετάλλευση δεν είναι η ίδια για όλα τα εξεταζόμενα εναλλακτικά καύσιμα.

Ωστόσο, για τα ποσοτικά κριτήρια λήφθηκαν υπόψη οι υφιστάμενες τιμές για όποια εναλλακτικά καύσιμα ήταν διαθέσιμες, η τάση της αγοράς, εκτιμήσεις και απόψεις επαγγελματιών του χώρου, ερευνητικά συγγράμματα καθώς και το επίπεδο ωριμότητας για κάθε καύσιμο, αποτυπώνοντας κατά αντιστοιχία τη βαθμονόμηση στη κλίμακα.

Η κλίμακα δέκα σημείων είναι εύκολη στην κατανόηση και στη χρήση. Παρέχει ένα σαφές εύρος από το χειρότερο (1) έως το καλύτερο (10) αποτέλεσμα, καθιστώντας ευκολότερο για τους αξιολογητές να ορίσουν βαθμολογίες με βάση την κρίση τους.

Επιπλέον, προσφέρει ένα λογικό επίπεδο ευαισθησίας, επιτρέποντας στους αξιολογητές να διακρίνουν μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων απόδοσης. Αυτή η ευαισθησία μπορεί να βοηθήσει στην πραγματοποίηση πιο διαφοροποιημένων αξιολογήσεων, ειδικά όταν υπάρχουν ανεπαίσθητες διαφορές μεταξύ των επιλογών που αξιολογούνται.

Χρησιμοποιώντας μια τυποποιημένη κλίμακα, οι αξιολογητές μπορούν να συγκρίνουν και να ταξινομούν διαφορετικές επιλογές αντικειμενικά. Αυτό διευκολύνει την καλύτερη λήψη αποφάσεων παρέχοντας ένα κοινό πλαίσιο για την αξιολόγηση διαφορετικών κριτηρίων.

Μια κλίμακα δέκα βαθμών ενθαρρύνει τους αξιολογητές να είναι πιο συνεπείς στις αξιολογήσεις τους. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της προκατάληψης και να διασφαλίσει ότι διαφορετικοί αξιολογητές χρησιμοποιούν ένα παρόμοιο μέτρο για τη μέτρηση διαφορετικών κριτηρίων.

Κατά την αξιολόγηση πολλαπλών κριτηρίων, μια κλίμακα δέκα βαθμών παρέχει έναν βολικό τρόπο για τη συγκέντρωση βαθμολογιών και τον υπολογισμό των συνολικών βαθμολογιών. Αυτές οι συγκεντρωτικές αξιολογήσεις μπορούν να βοηθήσουν στην ιεράρχηση επιλογών ή στην πραγματοποίηση συγκριτικών αναλύσεων.

Η κλίμακα μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί οπτικά, όπως μέσω διαγραμμάτων ράβδων ή γραφημάτων, γεγονός που διευκολύνει την επικοινωνία των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης στους ενδιαφερόμενους.

Στον προσδιορισμό των βαρών εκχωρούνται σχετικές σταθμίσεις σε κάθε κριτήριο με βάση τη σημασία τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω γνωμοδοτήσεων ειδικών, συζητήσεων με ενδιαφερόμενα μέρη ή χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση σύγκρισης κατά ζεύγη.

Κεφάλαιο 5. Μεθοδολογία - Μέρος 2° .

Εφαρμογή πολυκριτήριας μεθόδου και ανάλυση αποτελεσμάτων

5.1 Σενάριο μελέτης περίπτωσης

Αυτό το κεφάλαιο συνοψίζει την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR, δείχνοντας πώς μετατρέπει δεδομένα, προτιμήσεις και κριτήρια σε ένα δομημένο πλαίσιο αξιολόγησης. Η επακόλουθη ανάλυση των αποτελεσμάτων οδηγεί σε διορατικά συμπεράσματα που καθοδηγούν την επιλογή ενός κατάλληλου εναλλακτικού καυσίμου πλοίων, λαμβάνοντας υπόψη τις προοπτικές και τις στοχεύσεις των ενδιαφερομένων, καθώς και πολλαπλά κριτήρια αξιολόγησης.

Συγκεκριμένα, σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζουμε ένα εστιασμένο σενάριο μελέτης περίπτωσης, όπου εφαρμόζεται η μέθοδος UTASTAR για την επιλογή του καταλληλότερου εναλλακτικού καυσίμου πλοίων για τον στόλο μιας ναυτιλιακής εταιρείας. Οι αποφασίζοντες, αποτελούμενοι από επτά (7) στελέχη ναυτιλιακής εταιρείας, εξέφρασαν τις απόψεις τους μέσω ενός πίνακα επιλογών/αποφάσεων.

Η συλλογή δεδομένων διευκολύνθηκε μέσω ενός πίνακα επιλογών/αποφάσεων (matrix table), ενός ολοκληρωμένου εργαλείου που παρουσίαζε στους αποφασίζοντες έξι (6) εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα και έντεκα (11) κριτήρια επιλογής. Ο πίνακας επέτρεψε σε κάθε αποφασίζοντα να αξιολογήσει και να βαθμολογήσει την απόδοση κάθε καυσίμου με βάση τα καθορισμένα κριτήρια, αποτυπώνοντας αποτελεσματικά τις προτιμήσεις του. Τα κριτήρια του πίνακα προέκυψαν από την βιβλιογραφία, τις τεχνικές μελέτες και εκθέσεις, τις επιστημονικές δημοσιεύσεις και εν τέλει από το ερωτηματολόγιο ως Παράρτημα II, όπου ο κάθε αποφασίζων επέλεξε από μια ευρύτερη δεξαμενή κριτηρίων, τα τελικά έντεκα, για τα οποία υπήρξε κοινή αποδοχή από όλους τους συμμετέχοντες.

Έκαστος αποφασίζων κατέταξε τη σημασία των κριτηρίων και παρείχε βαθμολογίες για κάθε εναλλακτικό ναυτιλιακό καύσιμο με βάση την αντιληπτή απόδοσή του σε σχέση με αυτά τα κριτήρια.

5.2 Διαδικασία επίλυσης προβλήματος

Στο πλαίσιο επιλογής κατάλληλου εναλλακτικού ναυτιλιακού καυσίμου, και εντός του Επιπέδου 3 που βρισκόμαστε, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου UTASTAR. Ωστόσο, αρχικά κρίνεται αναγκαία η αποτύπωση των εναλλακτικών επιλογών – λύσεων (σύνολο ενεργειών A) και των κριτηρίων επιλογής, τα οποία αναφέρθηκαν στο προηγούμενο επίπεδο. Εν συνεχεία, οι αποφασίζοντες αποδίδουν τιμές στον πίνακα επιλογών/αποφάσεων, με γνώμονα τις προσωπικές προτιμήσεις και το σύστημα αξιών επί των κριτηρίων που απαιτούν τις δικές τους κρίσεις και αξιολογήσεις. Ακολουθώντας, οι αποφασίζοντες προβαίνουν σε κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών (διαδικασία προδιάταξης) δηλώνοντας τις προτιμήσεις τους. Η διαδικασία αξιολόγησης πραγματοποιείται για έκαστο αποφασίζοντα ξεχωριστά.

Οι ενέργειες που ακολουθούνται αποτυπώνονται ως προβολή της εφαρμογής της μεθόδου UTASTAR. στα κάτωθι βήματα :

Βήμα 1: Εισαγωγή δεδομένων . Η σειρά προδιάταξης των εναλλακτικών επιλογών και οι αξιολογήσεις των κριτηρίων για κάθε εναλλακτική, αποτελούν τα δεδομένα εισόδου στην μέθοδο UTASTAR, που ακολουθείται. Οι θέσεις των εναλλακτικών επιλογών σε συνδυασμό με την αξιολόγηση τους μέσω των κριτηρίων, χρησιμοποιούνται για να συναχθεί η σημασία ή το βάρος κάθε κριτηρίου. Έτσι επιτυγχάνεται η έμμεση αποτύπωση βαρών ανά κριτήριο δηλώνοντας την ανταγωνιστική φύση μεταξύ τους. Αυτό το βήμα θέτει τα θεμέλια για ολόκληρη της διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι, η επιλογή κλίμακας βαθμολογίας των κριτηρίων, η διαδικασία προσδιορισμού της μονοτονίας και του τύπου κάθε κριτηρίου, ο αριθμός των υποδιαστημάτων και των σημείων, καθώς και η τιμή κατωφλίου προτίμησης και ο αριθμός ϵ , αποτελούν μέρος των αρχικών ενεργειών του αναλυτή και είναι κρίσιμα για τον καθορισμό των συναρτήσεων χρησιμότητας, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στα επόμενα βήματα της ανάλυσης UTASTAR.

Βήμα 2: Προσδιορισμός αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της εφαρμοζόμενης μεθόδου, μας παρέχουν τιμές και διαγράμματα για τις προσθετικές συναρτήσεις αξίας (marginal utilities) εκάστου εναλλακτικού καυσίμου ανά κριτήριο, τα βάρη (weights) των κριτηρίων και την ολική αξία των εναλλακτικών, για τον κάθε αποφασίζοντα ξεχωριστά.

Βήμα 3: Υπολογισμός τιμών ολικής χρησιμότητας. Εστιάζει στον υπολογισμό των τιμών χρησιμότητας για κάθε εναλλακτική επιλογή με βάση τα δεδομένα που εισάγονται, τις πληροφορίες που συλλέγονται και τα βάρη των κριτηρίων που έχουν έμμεσα εκχωρηθεί. Αυτό το βήμα ποσοτικοποιεί την απόδοση κάθε εναλλακτικής λύσης.

Βήμα 4: Κατάταξη εναλλακτικών. Κατατάσσει τις εναλλακτικές με βάση τις υπολογισμένες τιμές χρησιμότητας τους. Οι εναλλακτικές κατατάσσονται με φθίνουσα σειρά, με την πιο προτιμώμενη εναλλακτική στην κορυφή.

Βήμα 5: Επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής. Τέλος, επιλέγεται η καλύτερη εναλλακτική με βάση την κατάταξη και τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας. Αυτή η εναλλακτική θεωρείται η καταλληλότερη επιλογή με βάση τα κριτήρια και τα αντίστοιχα βάρη τους.

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, δημιουργήθηκε ένας πίνακας αποφάσεων, όπου κάθε σειρά αντιπροσωπεύει μια εναλλακτική και κάθε στήλη αντιπροσωπεύει ένα κριτήριο (Παράρτημα ΙΙΙ). Οι εναλλακτικές που προτείνονται αποτυπώνονται στον πίνακα 12 με σύντομη περιγραφή. Ως κριτήρια (g) που θα χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη επιλογή εναλλακτικού ναυτιλιακού καυσίμου, προτείνονται κοινές επιλογές των αποφασιζόντων, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 13 μαζί με τα υποκριτήρια τους.

Στο πλαίσιο της επιλογής εναλλακτικών καυσίμων, τα κριτήρια περιλαμβάνουν:

- ❖ Διαθεσιμότητα και υποδομή: Ευκολία προμήθειας, διανομής και υπάρχουσας υποδομής ανεφοδιασμού.
- ❖ Τεχνική σκοπιμότητα: Συμβατότητα με κινητήρες πλοίων, απαιτούμενες τροποποιήσεις και πιθανές τεχνικές προκλήσεις.
- ❖ Κόστος: Αρχική επένδυση, λειτουργικό και επενδυτικό κόστος και πιθανή εξοικονόμηση πόρων μακροπρόθεσμα.
- ❖ Περιβαλλοντικές επιπτώσεις: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, οξειδίων του θείου, οξειδίων του αζώτου και σωματιδίων.

❖ Ενεργειακή απόδοση: Απόδοση καυσίμου και ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα.

❖ Ασφάλεια: Θέματα αποθήκευσης, ευφλεκτότητας και χειρισμού.

Τα αναφερόμενα κριτήρια είναι τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Τα ποιοτικά κριτήρια αφορούν το τεχνολογικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό πεδίο και τα ποσοτικά κριτήρια το πεδίο του κόστους (Οικονομικά κριτήρια). Όπως προαναφέρθηκε για λόγους μη διαθεσιμότητας επαρκών στοιχείων των ποσοτικών κριτηρίων, καθορίστηκε και για τις δυο κατηγορίες κριτηρίων η ίδια κλίμακα βαθμολογίας (§4.4 σελ. 103 παρούσας διατριβής).

Ο αποφασίζων καλείται να βαθμολογήσει υποκειμενικά έναντι των ποιοτικών κριτηρίων και αντικειμενικά έναντι των ποσοτικών κριτηρίων από την εμπειρία του και την υφιστάμενη εικόνα της αγοράς στη ναυτιλιακή βιομηχανία¹⁶⁶. Επίσης θα πρέπει να κατατάζει ιεραρχικά τα εναλλακτικά καύσιμα, ενέργεια πολύ σημαντική δεδομένου ότι η διαδικασία αυτή που επέχει ρόλο προδιάταξης λαμβάνει υπόψη περιορισμούς του γραμμικού προβλήματος που επιλύεται.

Ο πίνακας επιλογών/αποφάσεων είναι σε μορφή excel (Παράρτημα III), με σειρές που αντιπροσωπεύουν κάθε εναλλακτικό καύσιμο και στήλες που αντιπροσωπεύουν τις τιμές των κριτηρίων. Συμπληρώθηκε από όλους τους αποφασίζοντες, δίνοντας τιμές για κάθε κριτήριο σε κάθε εναλλακτικό καύσιμο (Παράρτημα IV).

¹⁶⁶ International Energy Agency (2022). «*The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector*». (<https://www.iea.org/reports/the-role-of-low-carbon-fuels-in-the-clean-energy-transitions-of-the-power-sector/executive-summary#abstract>)

Πίνακας 13. Εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα προς αξιολόγηση

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ	ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
LNG - Υγροποιημένο φυσικό αέριο	Το καύσιμό αυτό είναι φυσικό αέριο που έχει ψυχθεί σε υγρή μορφή για ευκολία και ασφάλεια αποθήκευσης καθώς και μεταφοράς. Τα συστατικά του είναι μεθάνιο (CH_4) κατά το μεγαλύτερο ποσοστό και έπονται σε μικρότερα ποσοστά το αιθάνιο, πεντάνιο, προπάνιο και βουτάνιο. Το καύσιμο υδρογονάνθρακα με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα και το υψηλότερο δυναμικό μείωσης του CO_2
LPG - Υγροποιημένο αέριο πετρελαίου	Το υγραέριο (LPG) είναι εξ ορισμού οποιοδήποτε μείγμα προπανίου και βουτανίου σε υγρή μορφή. Η ανάμειξη βουτανίου και προπανίου επιτρέπει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά πίεσης κορεσμού και θερμοκρασίας
H_2 - Υδρογόνο	Το υδρογόνο (H_2) μπορεί να παραχθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, για παράδειγμα με ηλεκτρόλυση ανανεώσιμων πηγών ύλης ή με αναμόρφωση φυσικού αερίου. Η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης θα μπορούσε να συνδυαστεί με τον αναπτυσσόμενο τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (e H_2 – Πράσινο υδρογόνο) που παρέχει, από τη φύση του, μόνο διακοπτόμενη ισχύ. Το υδρογόνο είναι ένας εξαιρετικός φορέας ενέργειας. Είναι ένα καθαρό καύσιμο και έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο από όλα τα χημικά καύσιμα.
NH_3 – Αμμωνία	Η αμμωνία ως χημική ουσία είναι NH_3 - ένα άτομο αζώτου συνδεδεμένο με τρία άτομα υδρογόνου. Είναι πιο εύκολο να αποθηκευτεί από το υδρογόνο. Η αμμωνία ερευνάται ως καύσιμο που μπορεί να καεί σε νέους κινητήρες και ως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος μεταφοράς υδρογόνου. Η αμμωνία παράγεται ήδη σε παγκόσμια κλίμακα και η τρέχουσα παραγωγική διαδικασία χρησιμοποιεί υδρογόνο που λαμβάνεται από φυσικό αέριο. Η «πράσινη» αμμωνία (επίσης αποκαλούμενη e-αμμωνία) είναι η αμμωνία που παράγεται με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το νερό αποσυντίθεται σε υδρογόνο και οξυγόνο και το υδρογόνο στη συνέχεια συνδυάζεται με άζωτο υπό πίεση και υψηλή θερμοκρασία.
CH_3OH - Μεθανόλη	Η μεθανόλη (CH_3OH) είναι μια οργανική χημική ουσία. Έχει παρόμοιες ιδιότητες με την αιθανόλη, η οποία μπορεί να παρασκευαστεί από καλαμπόκι και άλλα φυτικά υλικά και χρησιμοποιείται ευρέως σε μείγματα βενζίνης. Η μεθανόλη είναι ήδη διαθέσιμη και χρησιμοποιείται ως καύσιμο ναυτιλίας σήμερα. Ωστόσο, το μέλλον του ως καύσιμο μηδενικών εκπομπών GHG εξαρτάται από τον τρόπο παραγωγής του. Η μεθανόλη χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών GHG μπορεί να είναι ένας από τους δύο τύπους: βιομεθανόλη ή e-μεθανόλη. Η βιομεθανόλη δημιουργείται από απόβλητα βιομάζας που έχουν τον άνθρακα που απαιτείται για την παραγωγή μεθανόλης, όπως γεωργικά απόβλητα, λύματα ή απόβλητα ξύλου. Η e-μεθανόλη δημιουργείται συνδυάζοντας πράσινο υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα από τη δέσμευση άνθρακα, τη διαδικασία αφαίρεσης του άνθρακα απευθείας από την ατμόσφαιρα ή την έλξη του καθώς απελευθερώνεται από μια πηγή.
Βιοκαύσιμα - Biofuels	Προέρχεται από πρωτογενή βιομάζα ή υπολείμματα βιομάζας που μετατρέπονται σε υγρά ή αέρια καύσιμα. Τα πιο πολλά υποσχόμενα βιοκαύσιμα για τα πλοία: βιοντίζελ (π·Χ· φυτικό έλαιο), Βιοκαύσιμα επεξεργασμένο με HVO, BTL- βιομάζα σε υγρά, FAME- μεθυλεστέρας λιπαρών οξέων) και LBG (υγρό βιοαέριο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο)

Πίνακας 14. Κριτήρια αξιολόγησης εναλλακτικών καυσίμων

ΚΥΡΙΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΥΠΟΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ	ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	Αναφέρεται στη δυνατότητα συμβατότητας με την υφιστάμενη υποδομή (συμπεριλαμβάνονται λιμένες, εγκαταστάσεις και υποδομές καυσίμων), όσον αφορά τις διαδικασίες για την αποθήκευση, διανομή και ανεφοδιασμό των καυσίμων.
	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	Αναφέρεται στην επάρκεια και το ποσοστό διαθεσιμότητας των πρώτων υλών που απαιτούνται, στις διαδικασίες της τρέχουσας παραγωγικής ικανότητας και χρήσης ως καύσιμα πλοίων, καθώς και της ενεργειακής ασφάλειας συμφώνως της παγκόσμιας κατανομής του δυναμικού εφοδιασμού και της πολιτικής σταθερότητας ή του ενδεχόμενου διακοπής του εφοδιασμού σε περιοχές με μεγάλο δείκτη εφοδιασμού και αποθεμάτων.
	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	Αναφέρεται στο επίπεδο συμβατότητας με την υπάρχουσα υποδομή ναυτικών κινητήρων και τις όποιες τροποποιήσεις μετασκευές απαιτούνται.
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	Αναφέρεται στο κόστος (OPEX) που προκύπτει με γνώμονα την ποσότητα και την ποιότητα του πληρώματος που απαιτείται, την εκπαίδευση του, το κόστος του τομέα ασφάλισης καθώς και το κόστος συντήρησης (δεν υπολογίζεται το κόστος καυσίμου).
	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	Αντιπροσωπεύεται από την εκτιμώμενη σχετική διαφορά τιμής-κόστους για τα καύσιμα που μελετήθηκαν έχοντας ως βάση την τιμή bunker (εφόσον υφίσταται), την εκτίμηση για το κόστος παραγωγής και την εκτίμηση για τις τιμές αναφορικά με τις πρώτες ύλες παραγωγής καυσίμων.
	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	Αντιπροσωπεύεται από το κεφαλαιουχικό κόστος (CAPAX) που απαιτείται για τη πρόωση και την υποδομή εγκατάστασης, περιλαμβάνοντας το κόστος που αφορά κινητήρες, δεξαμενές καυσίμων, σωληνώσεων, αγωγών, συστημάτων ασφαλείας, ηλεκτρονικών συσκευών επεξεργασίας καυσίμου κ.λπ.
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ	ΕΠΗΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	Αντιπροσωπεύεται από το δείκτη υπερθέρμανσης λόγω εκπομπών CO_2 , CH_4 και N_2O σε ορισμένο χρόνο.
	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	Αντιπροσωπεύεται από το ποσοστό σχηματισμού σωματιδίων αναφορικά με PM, SO_2 και NO_x , τα οποία επιδρούν επιβαρυντικά στην υγεία.
	ΟΞΙΝΙΣΗ	Αντιπροσωπεύεται από το περιεχόμενο οξίνισης βάσει των εκπομπών NO_x και S SO_2 προερχόμενων από την καύση, κυρίως ορυκτών καυσίμων.
ΚΟΙΝΩΝΙΚΑ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	Αναφέρεται στους κίνδυνους που σχετίζονται με τη διαχείριση του καυσίμου, τυχόν πυρκαγιά, έκρηξη, υγειονομικούς κινδύνους αναφορικά με τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου καυσίμου όπως το σημείο ανάφλεξης, το εύρος της αναφλεξιμότητας τη τοξικότητα αλλά και ανησυχίες σχετικά με την μεταφορά, αποθήκευση και φόρτωση των καυσίμων.
	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ	Αντιπροσωπεύεται από τις δυνατότητες για συμμόρφωση στους υφιστάμενους ή επικείμενους κανονισμούς όσον αφορά στις μειώσεις SO_x , NO_x & GHG.

5.3 Υπολογισμός UTASTAR - Συναρτήσεις αξίας - Βάρη κριτηρίων

Συνολικά και ειδικότερα, έχουμε έξι (06) εναλλακτικές προτάσεις αναφορικά με επιλογές σε εναλλακτικό καύσιμο, έντεκα (11) κριτήρια ποσοτικά και ποιοτικά και εφτά (07) αποφασίζοντες, στελέχη ναυτιλιακής εταιρείας.

Πίνακας 15. Επιλογών/ αποφάσεων εναλλακτικών καυσίμων

ΕΠΙΛΟΓΕΣ/ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
		ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΟΞΙΝΗΣΗ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
LNG												
LPG												
H ₂												
NH ₃												
CH ₃ OH												
Βιοκαύσιμα												

Ο υπολογισμός UTASTAR είναι μια μαθηματική διαδικασία που συνδυάζει τις βαθμολογίες των κριτηρίων κάθε εναλλακτικής επιλογής καυσίμου με τα έμμεσα εκχωρημένα βάρη των κριτηρίων σύμφωνα με την προδιάταξη, για να δημιουργήσει μια συνολική βαθμολογία για κάθε εναλλακτική. Αυτή η συνολική βαθμολογία αντικατοπτρίζει τη σχετική καταλληλότητα ή προτίμηση κάθε εναλλακτικής σε σύγκριση με τις άλλες.

Στο πλαίσιο της μορφοποίησης - μοντελοποίησης του προβλήματος καθορίστηκε η μονοτονία του κάθε κριτηρίου, όπου στη περίπτωση μας επιλέχθηκε η τιμή 1 (καλύτερη τιμή > χειρότερης τιμής), ο τύπος του κριτηρίου, όπου για ποιοτικά κριτήρια επιλέχθηκε η τιμή 0, και για ποσοτικά κριτήρια επιλέχθηκε η τιμή 1. Επίσης καθορίστηκε η κλίμακα βαθμολογίας τόσο για τα ποιοτικά όσο και τα ποσοτικά κριτήρια, με χειρότερο τη τιμή 1 και καλύτερο τη τιμή 10, το πλήθος των υποδιαστημάτων και των σημείων σε 10, καθώς και η τιμή κατωφλίου προτίμησης $\delta=0,05$ και $\varepsilon = 0.0001$ (ε = ένας πολύ μικρός θετικός αριθμός ή μηδέν, ως βήμα 4, § 3.6.1 παρούσας). Όλα τα δεδομένα τροφοδοτήθηκαν σε πλατφόρμα προγραμματισμού MATLAB¹⁶⁷, η οποία αποτελεί κατάλληλο περιβάλλον για την μέθοδο UTASTAR η οποία εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.

¹⁶⁷ Mathworks (2023). «What is matlab» <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
Η MATLAB (MATrix LABoratory) είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, παρέχοντας ένα ευέλικτο και ισχυρό περιβάλλον που χρησιμοποιείται για ανάλυση δεδομένων, δημιουργία μοντέλων και αριθμητικούς υπολογισμούς. Η MATLAB παρέχει ένα περιβάλλον κατάλληλο για την εργασία με την UTASTAR.

Πίνακας 16. Καθορισμός μονοτονίας, τύπου, ελάχιστης – μέγιστης τιμής, διαστημάτων, έκαστου κριτηρίου.

Cri/atributes	Monot	Type	Worst	Best	a
YPODOMH	1	0	1	10	10
PAROXH	1	0	1	10	10
PROSARMOGH	1	0	1	10	10
LKOSTOS	1	1	1	10	10
TIMH	1	1	1	10	10
EPKOSTOS	1	1	1	10	10
KLIMA	1	0	1	10	10
EKPOMPES	1	0	1	10	10
OXINISH	1	0	1	10	10
ASFALEIA	1	0	1	10	10
NOMOTHESIA	1	0	1	10	10

Η διαδικασία έλαβε χώρα ξεχωριστά για κάθε αποφασίζοντα, επιλέγοντας την αξιολόγηση του, τις τιμές δηλαδή που θα ορίσει για κάθε εναλλακτική και κάθε κριτήριο, σύμφωνα με τις υποδείξεις που του είχαν χορηγηθεί. Με αυτό τον τρόπο έκαστος από τους αποφασίζοντες συμπλήρωσε κατά σειρά προτίμησης των εναλλακτικών καυσίμων στο πεδίο κατάταξη, το οποίο αποτελεί τη προδιάταξη των επιλογών του κάθε αποφασίζοντα και εν συνεχεία κατά κρίση και κατά προσέγγιση του ιδίου, συμπληρώθηκαν τα υπόλοιπα πεδία των κριτηρίων με αξιολόγηση δεκαβάθμιας κλίμακας (1-10), όπου 1 η χειρότερη και 10 αντίστοιχα η καλύτερη αξιολόγηση. Έτσι εξέφρασε την προτίμηση του για κάθε εναλλακτικό καύσιμο στο πεδίο κατάταξη και βαθμολόγησε τις έξι εναλλακτικές επιλογές στα έντεκα κριτήρια. (ως Παράρτημα IV).

Ως αποτέλεσμα λάβαμε τις προσθετικές συναρτήσεις αξίας (marginal utilities) εκάστου εναλλακτικού καυσίμου ανά κριτήριο, τα βάρη (weights) των κριτηρίων και την ολική αξία των εναλλακτικών. Παράθεση των αποτελεσμάτων UTASTAR ανά αποφασίζοντα βρίσκουμε στο Παράρτημα V της παρούσης.

Η συνάρτηση χρησιμότητας διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην ανάλυση απόφασης πολλαπλών κριτηρίων. Προσδιορίζει ποσοτικά τη σχέση μεταξύ των επιπέδων απόδοσης μεμονωμένων κριτηρίων και της συνολικής χρησιμότητας που προκύπτει από κάθε εναλλακτική λύση. Αυτή η συνάρτηση μετατρέπει τις ποιοτικές αξιολογήσεις και τις αριθμητικές βαθμολογίες κριτηρίων σε μια κοινή αριθμητική κλίμακα, επιτρέποντας τη σύγκριση διαφορετικών κριτηρίων.

Ο προσδιορισμός των βαρών προκύπτει από εκχώρηση σχετικών σταθμίσεων σε κάθε κριτήριο με βάση τη σημασία τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαδικασία της προδιάταξης όπου ο αποφασίζων επιλέγει τη σειρά κατάταξης των εναλλακτικών καυσίμων στον πίνακα επιλογών/αποφάσεων, δείχνοντας τις προτιμήσεις του με αρίθμηση από το 1 μέχρι το 6, όπου το 1 είναι η καλύτερη τιμή

και 6 η χειρότερη, σε συνδυασμό με την αξιολόγηση των επιλογών μέσω βαθμολογίας των κριτηρίων.

Όταν τα επτά στελέχη της ναυτιλιακής εταιρείας (αποφασίζοντες), ταξινομούν τα εναλλακτικά καύσιμα, εκφράζουν σιωπηρά τις προτιμήσεις τους για κάθε επιλογή καυσίμου. Με την ανάθεση ιεραρχικών βαθμών, ουσιαστικά υποδεικνύουν ποια καύσιμα πιστεύουν ότι είναι πιο κατάλληλα ή σημαντικά για το συγκεκριμένο πλαίσιο και τους στόχους τους.

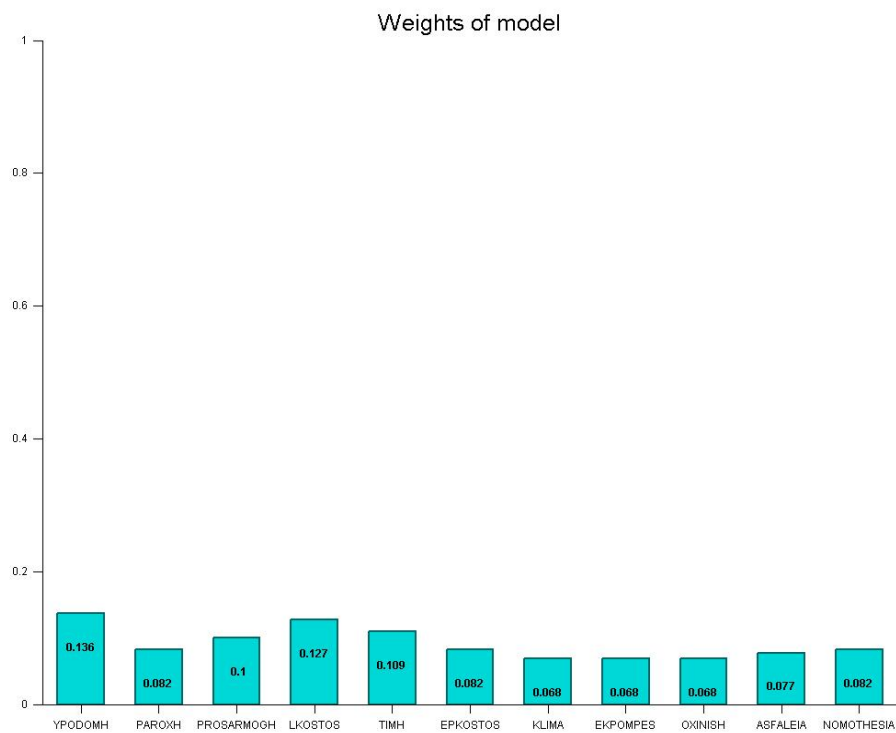
Η προκατάταξη εναλλακτικών καυσίμων επηρεάζει έμμεσα τα βάρη των κριτηρίων, επειδή η θέση κάθε καυσίμου στην κατάταξη αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο επίπεδο σπουδαιότητας. Όσο πιο ευνοϊκά κατατάσσεται ένα καύσιμο, τόσο μεγαλύτερη είναι η υπονοούμενη σημασία του και κατ' επέκταση, τα κριτήρια που σχετίζονται με αυτό το καύσιμο λαμβάνουν υψηλότερα βάρη.

5.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

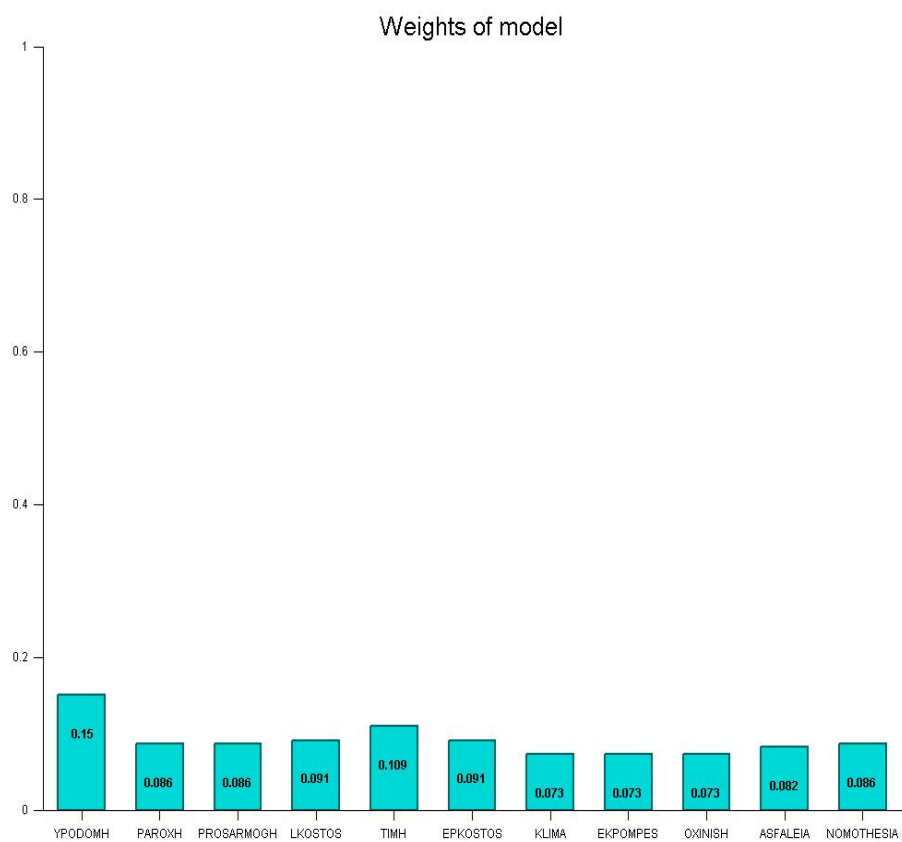
Όταν οι αποφασίζοντες ταξινομούν τα εναλλακτικά καύσιμα, κάνουν μια σχετική σύγκριση της συνολικής καταλληλότητάς τους. Αυτό σημαίνει ότι λαμβάνουν έμμεσα υπόψη τα κριτήρια που έχουν τη μεγαλύτερη σημασία για αυτούς κατά την αξιολόγηση των καυσίμων. Τα καύσιμα υψηλότερης κατάταξης θεωρείται ότι ευθυγραμμίζονται καλύτερα με τις προτιμήσεις και τους στόχους τους.

Δεδομένου ότι οι ταξινομήσεις γίνονται στο συγκεκριμένο πλαίσιο επιλογής καυσίμων πλοίων, τα προκύπτοντα βάρη κριτηρίων θα προσαρμοστούν σε αυτό το πλαίσιο. Οι σταθμίσεις αντικατοπτρίζουν πόσο σημαντικό είναι κάθε κριτήριο κατά την αξιολόγηση των καυσίμων πλοίων, όπως γίνεται αντιληπτό από τους αποφασίζοντες. Τα βάρη των κριτηρίων για ένα αποφασιζόμενο αθροίζουν στην μονάδα (μεταβελτιστοποίηση).

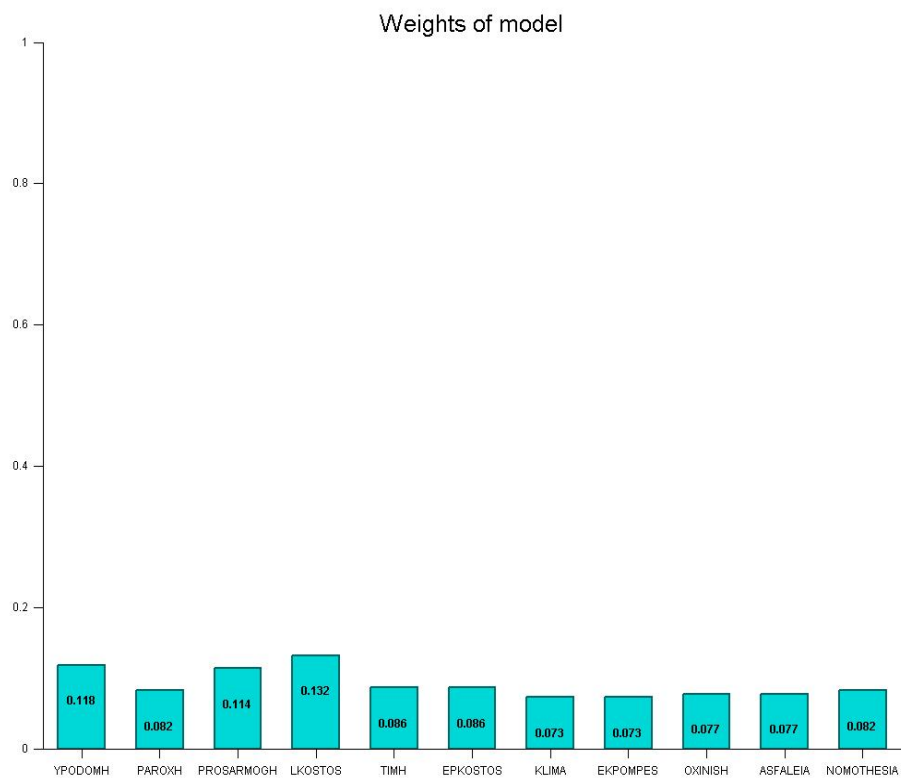
Η διαδικασία αυτή της κανονικοποίησης στη μονάδα πραγματοποιείται από την ακολουθούμενη μέθοδο UTASTAR. Η διαδικασία κανονικοποίησης περιλαμβάνει τη διαίρεση κάθε βάρους με το άθροισμα όλων των βαρών, διασφαλίζοντας ότι τα βάρη κάθε αποφασιζόμενου είναι σε συνεπή κλίμακα, διευκολύνοντας τη σύγκριση των προτιμήσεων και τη συμβολή τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Τα κανονικοποιημένα βάρη χρησιμοποιούνται στη συνέχεια σε επόμενους υπολογισμούς, όπως στον υπολογισμό των σταθμισμένων τιμών χρησιμότητας.



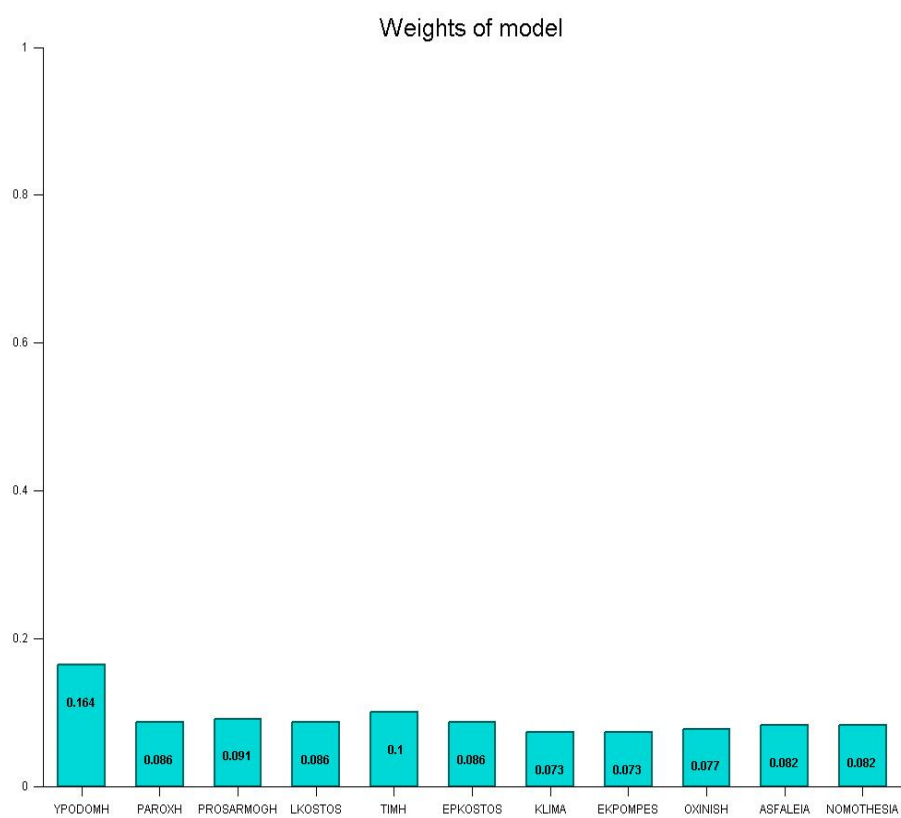
Διάγραμμα 8: Κατανομή βαρών για τον 1^ο αποφασίζοντα.



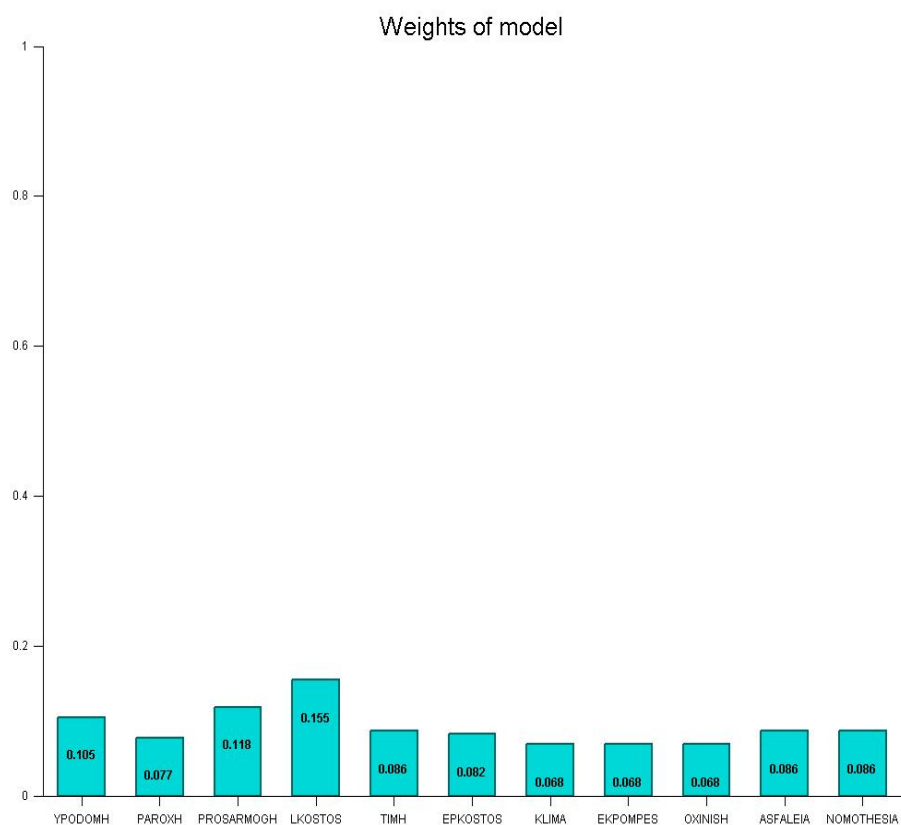
Διάγραμμα 9: Κατανομή βαρών για τον 2^ο αποφασίζοντα.



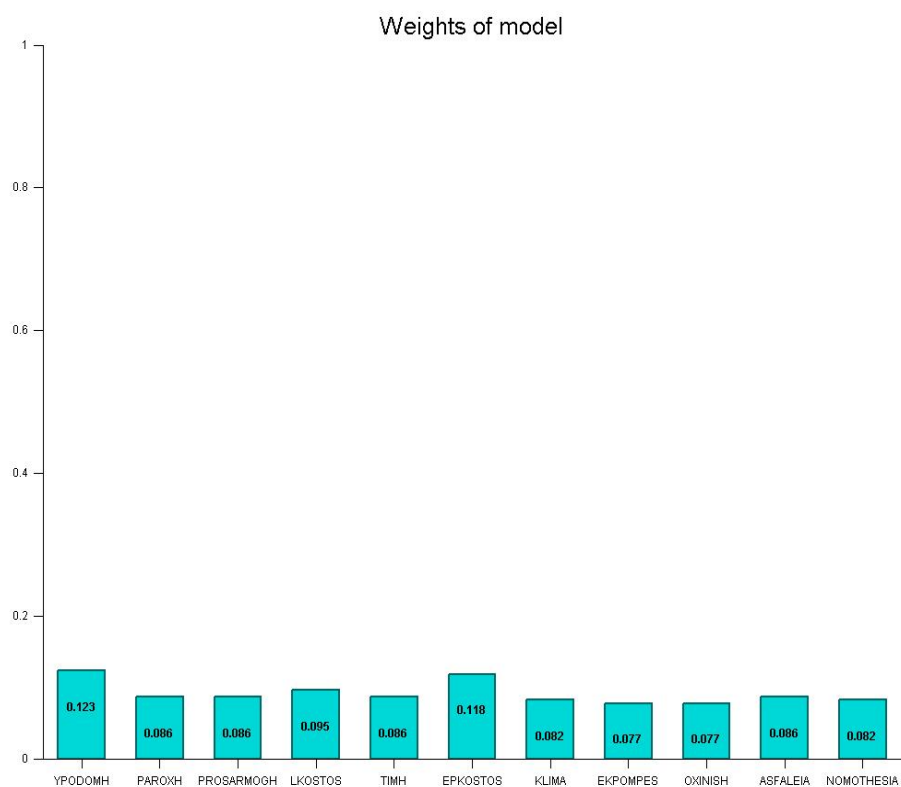
Διάγραμμα 10: Κατανομή βαρών για τον 3^ο αποφασίζοντα.



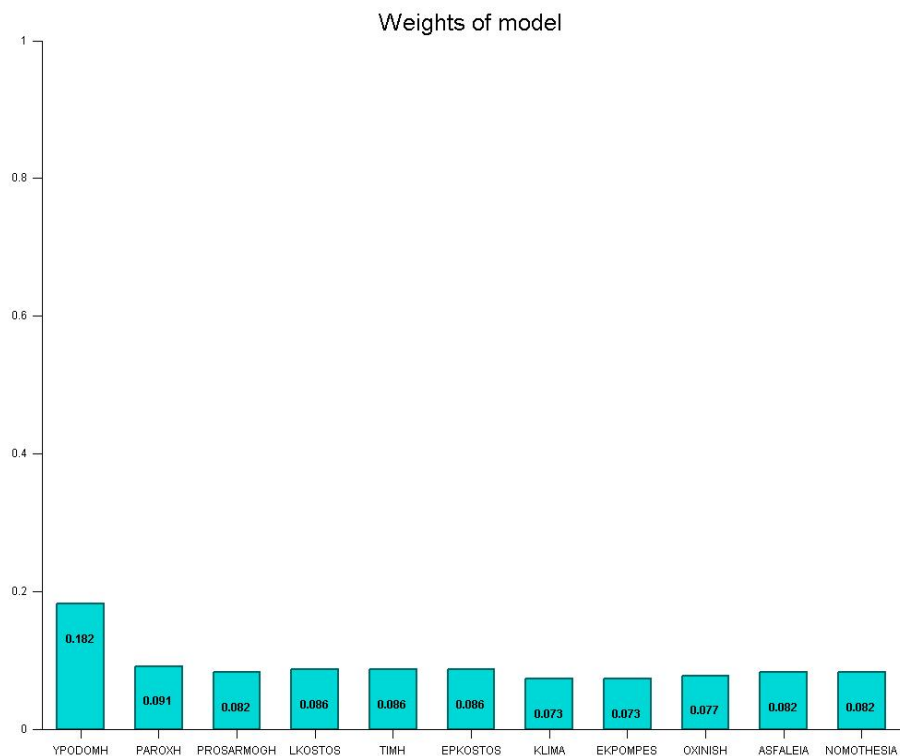
Διάγραμμα 11: Κατανομή βαρών για τον 4^ο αποφασίζοντα.



Διάγραμμα 12: Κατανομή βαρών για τον 5^ο αποφασίζοντα.



Διάγραμμα 13: Κατανομή βαρών για τον 6^ο αποφασίζοντα.



Διάγραμμα 14: Κατανομή βαρών για τον 7^ο αποφασίζοντα.

Με αυτή την διαδικασία, στη περίπτωση μας, όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα 8, 9, 11, 13, 14 (βάρη για τους αποφασίζοντες 1, 2, 4, 6 και 7 αντίστοιχα), προκύπτει ότι το κριτήριο «Υποδομή» για τους συγκεκριμένους αποφασίζοντες είναι σημαντικό και παρουσιάζει μεγάλη σπουδαιότητα, δεδομένου των επιλογών και των προτιμήσεων τους.

Αντίστοιχα, για τους αποφασίζοντες 3 και 5, προκύπτει ότι το κριτήριο «Λειτουργικό Κόστος» παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και έχει την μεγαλύτερη σπουδαιότητα, δεδομένου των επιλογών και των προτιμήσεων τους, σύμφωνα με τα διαγράμματα 10 και 12 παρούσας παραγράφου.

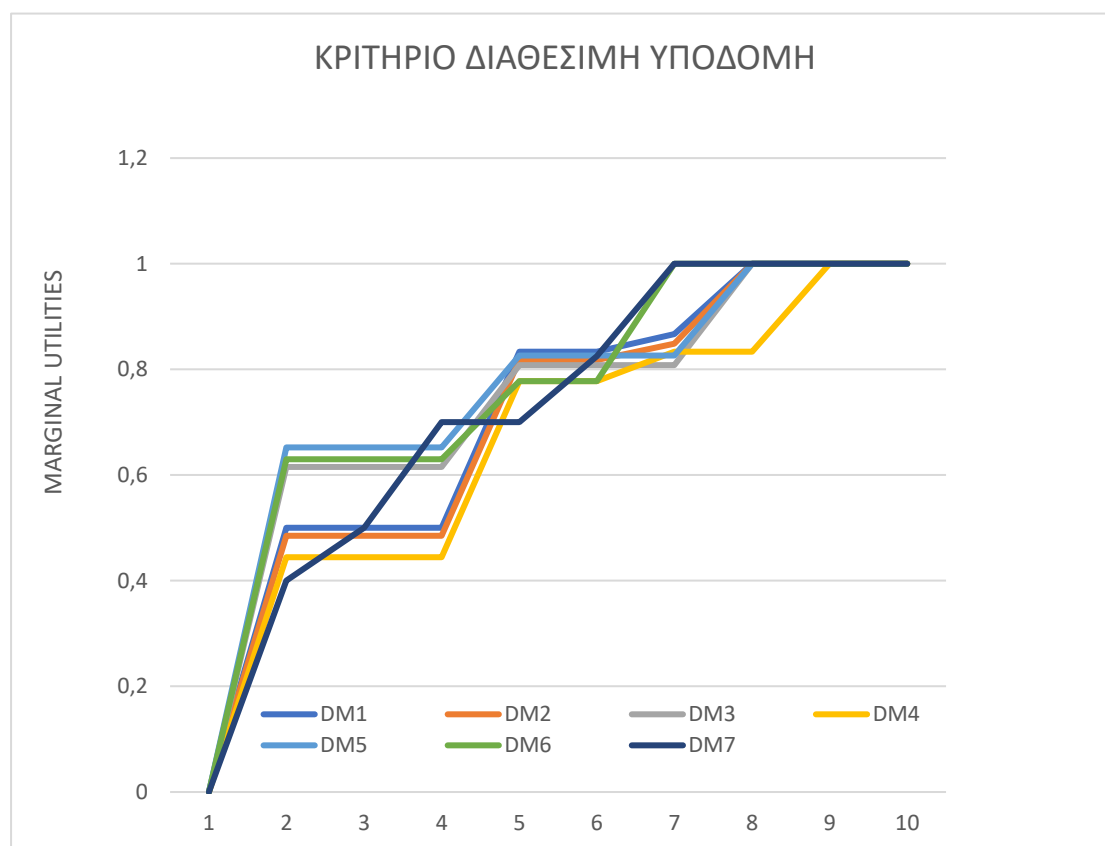
Η τάση όλων των αποφασιζόντων κρίνεται πανομοιότυπη όσον αφορά τα περιβαλλοντικά κριτήρια («Κλιματική αλλαγή», «Επιπτώσεις σε ατμόσφαιρα», «Οξίνιση»), όπου καταγράφεται η μικρότερη σπουδαιότητα συμφώνως των επιλογών τους. Συμπεραίνουμε επομένως ότι, για αυτή την ομάδα κριτηρίων δεν υφίσταται σημαντικό ενδιαφέρον από τους αποφασίζοντες, εκχωρώντας μικρό βάρος κριτηρίων. Η ικανοποίηση των περιβαλλοντικών περιορισμών όλων των εναλλακτικών, με τα υφιστάμενα δεδομένα, φαίνεται να αποτελεί την εξήγηση αυτής της τάσης.

Αυτή η μέθοδος διασφαλίζει ότι τα τελικά βάρη επηρεάζονται από τις προτιμήσεις και τις προοπτικές των αποφασιζόντων, καθώς και ότι τα κριτήρια που ευθυγραμμίζονται με τις προτιμήσεις τους, λαμβάνουν μεγαλύτερη βαρύτητα.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι οι κατατάξεις που έδωσε η UTASTAR ταυτίζονται πλήρως με τις προ-διατάξεις όλων των αποφασίζόντων (Kendall's Tau = 1).

Αναφορικά με τις προσθετικές συναρτήσεις αξίας (marginal utilities) ανά κριτήριο του κάθε αποφασίζοντα, έχουν κανονικοποιηθεί από την ακολουθούμενη μέθοδο UTASTAR, προκειμένου να είναι συγκρίσιμη η συμπεριφορά και οι προτιμήσεις του κάθε αποφασίζοντα.

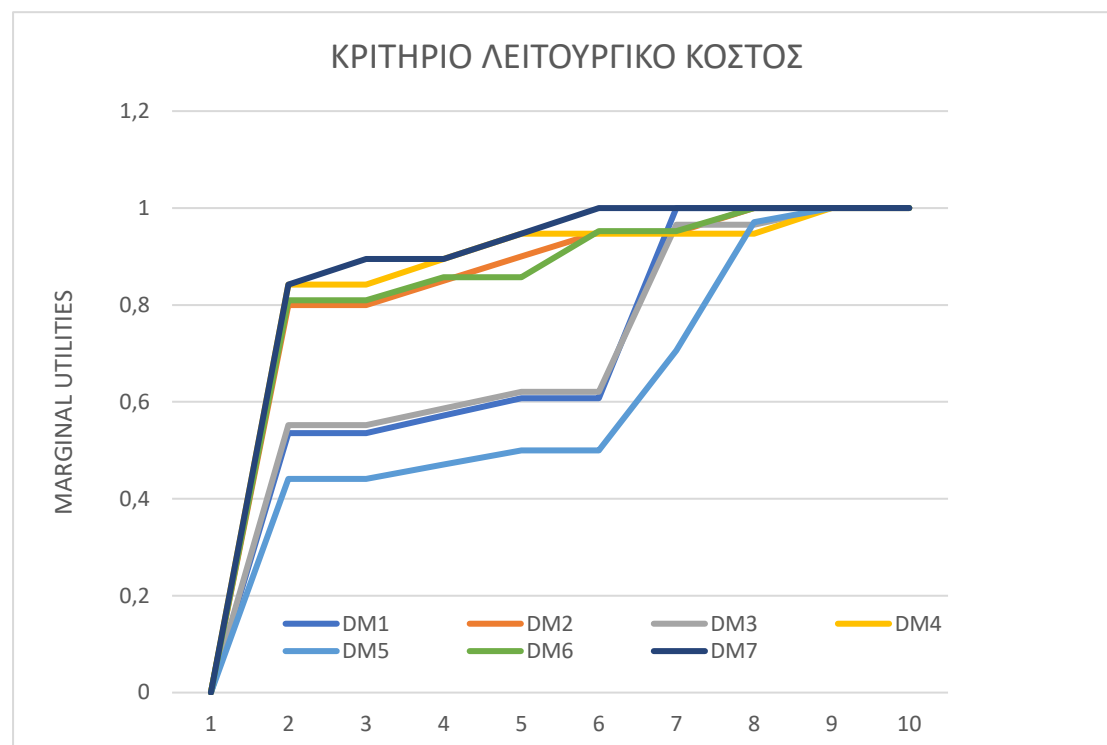
Συναφώς, συμφώνως των γραμμικών αναπαραστάσεων όπως έχουν αποδοθεί συνολικά ανά κριτήριο για όλους τους αποφασίζοντες στο Παράρτημα VI, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα :



Διάγραμμα 15: Αποτύπωση προσθετικών συναρτήσεων αξίας των επτά αποφασίζόντων για το κριτήριο «Διαθέσιμη Υποδομή».

➤ Στο κριτήριο «Διαθέσιμη Υποδομή», διαφαίνεται ότι οι αποφασίζοντες λαμβάνουν πολύ σοβαρά υπόψη τις διακυμάνσεις των τιμών του συγκεκριμένου κριτηρίου σε όλο το εύρος της βαθμονόμησης αυτού, αξιολογώντας το ως το κριτήριο με την μεγαλύτερη επιρροή στην απόφασή τους. Για τα υπόλοιπα τεχνολογικά κριτήρια «Αξιοπιστία Παροχής» & «Προσαρμογή Κινητήρων Πλοίου», υφίσταται μικρότερη επιρροή στην λήψη απόφασης, πλην όμως συνολικά και αθροιστικά τα τεχνολογικά κριτήρια αποτελούν τον κύριο παράγοντα που έχει επίδραση στην απόφαση επιλογής.

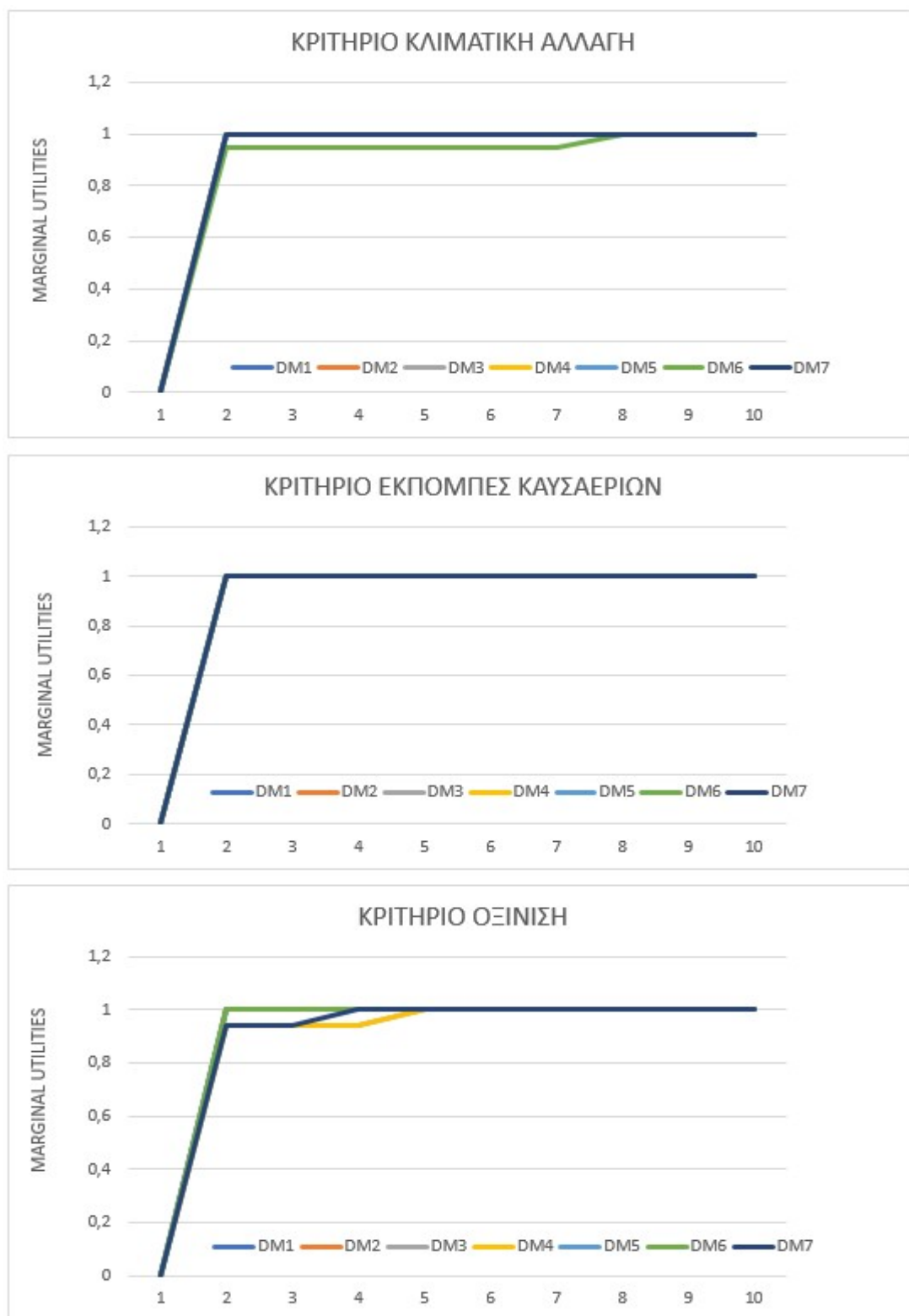
Πιθανόν σε μεταγενέστερο χρόνο και ιδίως όσον αφορά νέες παραγγελίες πλοίων να αλλάξουν οι συσχετισμοί και οι παραδοχές και κάποιο εκ των δυο άλλων προτιμήσεων να προηγείται στη βαθμολογία των τεχνολογικών κριτηρίων.



Διάγραμμα 16: Αποτύπωση προσθετικών συναρτήσεων αξίας των επτά αποφασιζόντων για το κριτήριο «Λειτουργικό Κόστος».

➤ Στο κριτήριο «Λειτουργικό Κόστος» (Διάγραμμα 16) διαφαίνεται ότι οι αποφασίζοντες λαμβάνουν σοβαρά υπόψη τις διακυμάνσεις των τιμών του συγκεκριμένου κριτηρίου σε όλο το εύρος της βαθμονόμησης αυτού, αξιολογώντας το ως το κριτήριο με την αμέσως μεγαλύτερη επιρροή στην απόφασή τους. Επιπρόσθετα, η μορφή των καμπυλών του διαγράμματος 16 μας παρέχει πληροφορίες. Συγκεκριμένα, οι συναρτήσεις των αποφασιζόντων 2, 4, 6, και 7 στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω, που σημαίνει ότι οι αποφασίζοντες είναι μη απαιτητικοί, αποφεύγουν το ρίσκο και ικανοποιούνται με μικρές μεταβολές των τιμών του κριτηρίου, ενώ οι αποφασίζοντες 1, 3 και 5 κινούνται σε χαμηλότερο επίπεδο, κινούμενοι προς τη διαγώνιο εκφράζοντας ένα βαθμό αδιαφορίας, μετά τα πρώτα επίπεδα εκτίμησης του κριτηρίου.

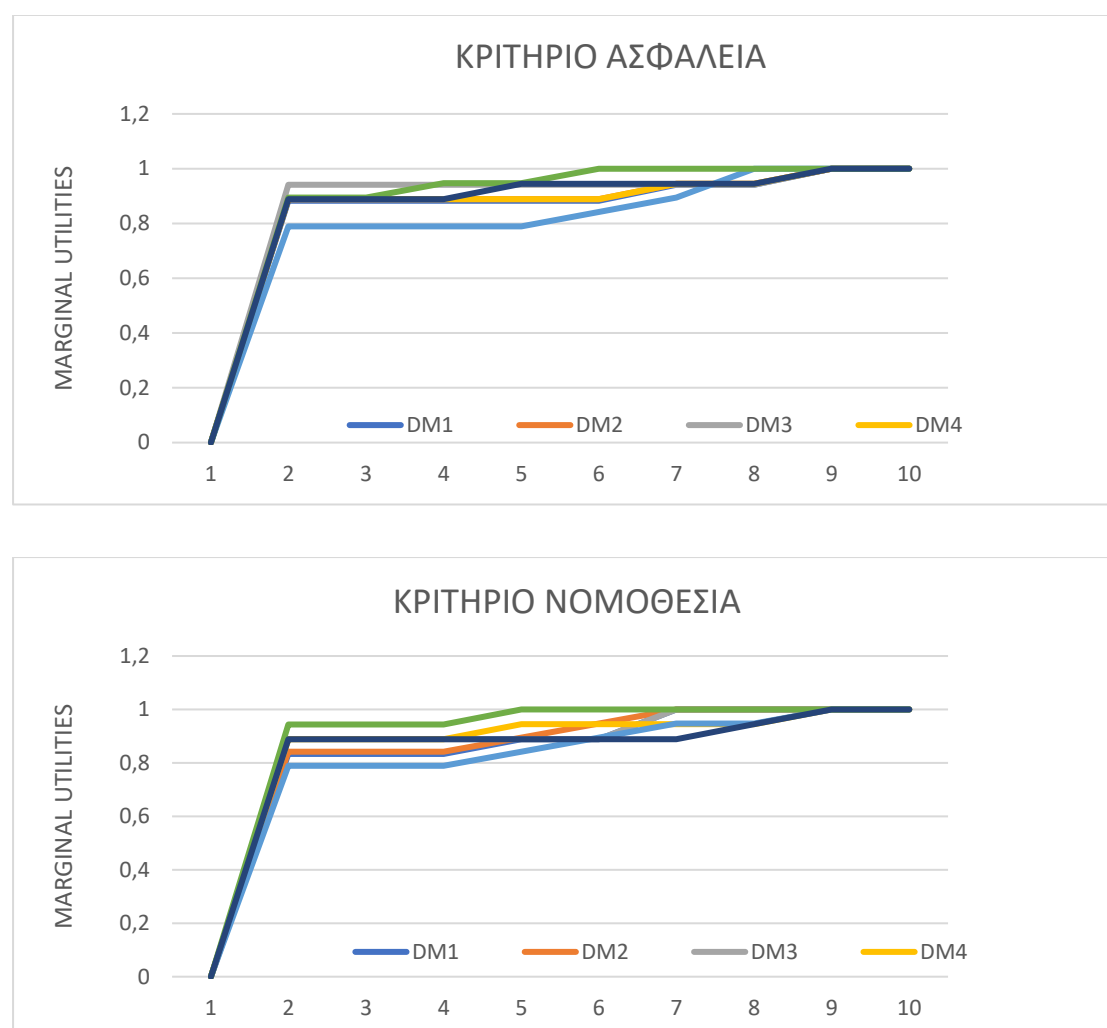
➤ Για τα υπόλοιπα οικονομικά κριτήρια, «Τιμή Καυσίμου» & «Επενδυτικό Κόστος» (Παράρτημα VI), υφίσταται μικρότερη αλλά σημαντική επιρροή στην λήψη απόφασης, και συνολικά εκτιμάται ότι ο οικονομικός παράγοντας έπεται οριακά του τεχνολογικού στην απόφαση επιλογής.



Διάγραμμα 17 : Αποτύπωση προσθετικών συναρτήσεων αξίας των επτά αποφασιζόντων για τα περιβαλλοντικά κριτήρια.

➤ Τα περιβαλλοντικά κριτήρια στο σύνολο τους δείχνουν ότι δεν επηρεάζουν σημαντικά τη λήψη απόφασης δεδομένου ότι οποιαδήποτε βελτίωση σε αυτή την κατηγορία κριτηρίων δεν προσθέτει ιδιαίτερη αξία στην συνάρτηση χρησιμότητας για ένα από τα κριτήρια. Το εύρος χρησιμότητας διακυμαίνεται από ελάχιστο έως

καθόλου. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι όλες οι εναλλακτικές επιλογές καυσίμων που εξετάζονται πληρούν τους υφιστάμενους περιβαλλοντικούς περιορισμούς.



Διάγραμμα 18: Αποτύπωση προσθετικών συναρτήσεων αξίας των επτά αποφασιζόντων για τα κοινωνικά κριτήρια.

➤ Τα κοινωνικά κριτήρια δείχνουν ότι επηρεάζουν λιγότερο τους αποφασίζοντες στη λήψη απόφασης από τα τεχνολογικά και οικονομικά κριτήρια, θα μπορούσε να οριστεί μέχρι του σημείου επιρροής των τεχνολογικών και οικονομικών παραγόντων.

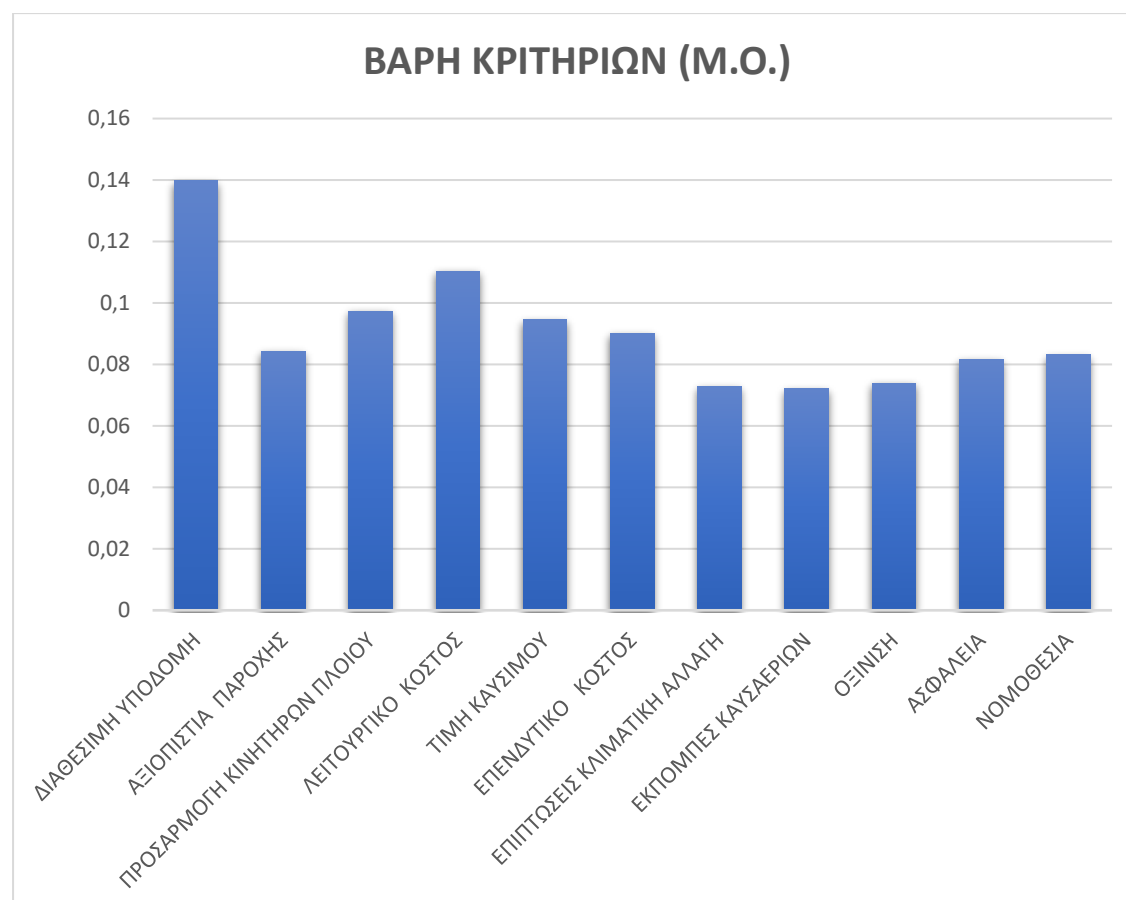
Οι τάσεις των αποφασιζόντων στις επιλογές τους κρίνεται πανομοιότυπη, προσβλέποντας στην απρόσκοπτη συνέχιση λειτουργίας του κλάδου, εστιάζοντας κυρίως στους τεχνολογικούς και οικονομικούς παράγοντες, λιγότερο στους κοινωνικούς και στους απαραίτητους περιβαλλοντικούς.

Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και από τη βαρύτητα των κριτηρίων τόσο ανά αποφασίζοντα για κάθε κριτήριο όσο και από τον μέσο όρο (Μ.Ο.) των τιμών όλων των αποφασιζόντων για έκαστο κριτήριο.

Ο υπολογισμός του μέσου όρου των βαρών των κριτηρίων προκύπτει αθροίζοντας τα κανονικοποιημένα βάρη που έχουν έμμεσα εκχωρηθεί από κάθε αποφασίζοντα για ένα συγκεκριμένο κριτήριο και στη συνέχεια διαιρώντας τα με τον συνολικό αριθμό των αποφασιζόντων. (Πίνακας 17 - Διάγραμμα 19).

Πίνακας 17. Εξεύρεση Μ.Ο. βαρών κριτηρίων

	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
DM/CRI	ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΟΞΙΝΙΣΗ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
DM 1	0,136	0,082	0,1	0,127	0,109	0,082	0,068	0,068	0,068	0,077	0,082
DM 2	0,15	0,086	0,086	0,091	0,109	0,091	0,073	0,073	0,073	0,082	0,086
DM 3	0,118	0,082	0,114	0,132	0,086	0,086	0,073	0,073	0,077	0,077	0,082
DM 4	0,164	0,086	0,091	0,086	0,1	0,086	0,073	0,073	0,077	0,082	0,082
DM 5	0,105	0,077	0,118	0,155	0,086	0,082	0,068	0,068	0,068	0,086	0,086
DM 6	0,123	0,086	0,086	0,095	0,086	0,118	0,082	0,077	0,077	0,086	0,082
DM 7	0,182	0,091	0,086	0,086	0,086	0,086	0,073	0,073	0,077	0,082	0,082
AV. UT.	0,1397143	0,0842857	0,0972857	0,1102857	0,0945714	0,0901429	0,0728571	0,0721429	0,0738571	0,0817143	0,0831429

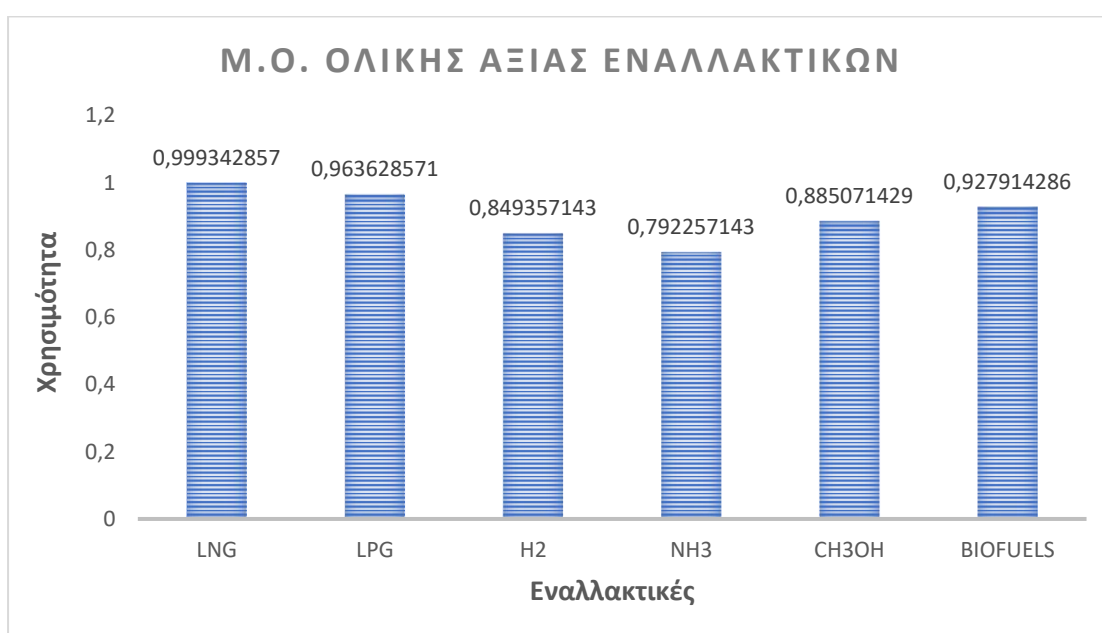


Διάγραμμα 19. Μέσος όρος βαρών κριτηρίων

Έχοντας δεδομένα όλα τα παραπάνω ακολουθεί ο υπολογισμός του μέσου όρου της ολικής χρησιμότητας για κάθε επιλογή καυσίμου με απώτερο σκοπό την τελική κατάταξη των εναλλακτικών. Η βαθμολογία της ολικής χρησιμότητας για κάθε εναλλακτική επιλογή καυσίμου, έκαστου αποφασίζοντα, προκύπτει από τα αποτελέσματα της UTASTAR (Παράρτημα V, §Γ για κάθε αποφασίζοντα), τα οποία έχουν καταγραφεί στον παρακάτω πίνακα. Επομένως, ο υπολογισμός για την εύρεση του μέσου όρου της ολικής χρησιμότητας προκύπτει διαιρώντας το άθροισμά των ολικών αξιών για κάθε εναλλακτική με το πλήθος των αποφασιζόντων που αξιολόγησαν σχετικά (ως Πίνακας 18 & Διάγραμμα 20).

Πίνακας 18. Εξεύρεση Μ.Ο. ολικής αξίας εναλλακτικών (οι τιμές του πίνακα προκύπτουν για κάθε αποφασίζοντα από την ολική αξία για κάθε εναλλακτική, Παράρτημα V, §Γ για κάθε αποφασίζοντα)

DM/ALT	LNG	LPG	H ₂	NH ₃	CH ₃ OH	BIOFUELS
DM 1	1	0,95	0,8	0,7501	0,85	0,9
DM 2	1	1	0,85	0,8001	0,9	0,95
DM 3	1	0,95	0,85	0,8	0,9	0,9
DM 4	1	0,95	0,85	0,8001	0,9	0,95
DM 5	1	0,95	0,8	0,75	0,9	0,85
DM 6	0,9954	0,9454	0,8955	0,8455	0,8955	0,9954
DM 7	1	1	0,9	0,8	0,85	0,95
AV. UT.	0,99934286	0,96363	0,8493571	0,7922571	0,885071429	0,927914286



Διάγραμμα 20. Μέσος όρος ολικής αξίας εναλλακτικών

Ως εκ τούτου, από τα δεδομένα που έχουμε δύναται να προκύψει και να προσδιοριστεί η τελική κατάταξη της ολικής χρησιμότητας των εναλλακτικών καυσίμων, με βάση τις συνολικές τιμές χρησιμότητας τους. Η εναλλακτική με την υψηλότερη συνολική αξία χρησιμότητας θεωρείται η καλύτερη εναλλακτική.

Πίνακας 19. Ολική χρησιμότητα εναλλακτικών καυσίμων και τελική κατάταξη ολικών χρησιμοτήτων εναλλακτικών καυσίμων

<i>Ολική χρησιμότητα εναλλακτικών καυσίμων</i>		<i>Τελική κατάταξη ολικών χρησιμοτήτων εναλλακτικών καυσίμων</i>	
LNG =	0,99934286	LNG =	0,99934286
LPG =	0,96363	LPG =	0,96363
H ₂ =	0,8493571	Βιοκαύσιμα =	0,927914286
NH ₃ =	0,7922571	CH ₃ OH =	0,885071429
CH ₃ OH =	0,885071429	H ₂ =	0,8493571
Βιοκαύσιμα =	0,927914286	NH ₃ =	0,7922571

Συνεπώς, έχοντας τα στοιχεία της τελικής κατάταξης των ολικών χρησιμοτήτων των εναλλακτικών εξεταζόμενων καυσίμων διαπιστώνουμε ότι το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) έρχεται πρώτο στις προτιμήσεις των αποφασίζόντων, ακολουθούν το Υγροποιημένο Αέριο Πετρελαίου (LPG) και τα Βιοκαύσιμα, ενώ έπονται η Μεθανόλη, το Υδρογόνο και η Αμμωνία. Η επιλογή αφορά την χρονική περίοδο που διανύουμε και το εγγύς μέλλον, βασιζόμενη στα κριτήρια που αναλύθηκαν και τις επικρατούσες συνθήκες κατά την περίοδο της μελέτης.

Με βάση τις συγκεντρωτικές προτιμήσεις και το πρόβλημα που προσδιορίζεται στο Επίπεδο 1, η παραπάνω διαδικασία εντάσσεται στο Επίπεδο 4 της ακολουθούμενης μεθοδολογίας, για να βοηθηθούν οι αποφασίζοντες προκειμένου να επιλέξουν την καλύτερη πορεία δράσης από το σύνολο των εναλλακτικών επιλογών.

Το μικρό εύρος της διαφοράς μεταξύ όλων των εναλλακτικών επιλογών, ουσιαστικά αποτυπώνει το μέγεθος της δυσκολίας για λήψη απόφασης στο συγκεκριμένο πρόβλημα την παρούσα χρονική περίοδο. Οι δρώντες στον ναυτιλιακό χώρο το γνωρίζουν καλά και επιστημονικά εργαλεία όπως η μέθοδος UTASTAR, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, τους οδηγεί στη διασφάλιση μιας διαφανούς διαδικασίας λήψης απόφασης και τους παρέχει μια ολοκληρωμένη και κατανοητή πρόταση επιλογής εναλλακτικού καυσίμου.

Κεφάλαιο 6.

Συμπεράσματα

6.1 Διαπιστώσεις

Το παρόν δοκίμιο κάνει χρήση της γνωστής μεθόδου UTASTAR για να προβεί στη κατανόηση της συμπεριφοράς των αποφασιζόντων στη ναυτιλιακή βιομηχανία σε ζητήματα επιλογής εναλλακτικών προτάσεων και συγκεκριμένα σε επίλυση προβλήματος απόφασης με πολλαπλά κριτήρια αναφορικά με την επιλογή κατάλληλου εναλλακτικού ναυτιλιακού καυσίμου για τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων.

Η συνεχώς διευρυμένη σε παγκόσμιο επίπεδο ζήτηση για θαλάσσιες μεταφορές, προσauxάνει όλο και περισσότερο τη ποσότητα χρήσης ενέργειας, παράγοντας μεγάλες ποσότητες αερίων θερμοκηπίου (GHGs) και οξειδίων του θείου (SO_x) και του αζώτου (NO_x), έχοντας αρνητική συνεισφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση και συντελώντας στο ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας παγκοσμίως, με συνακόλουθες συνέπειες που ενδέχεται να έχει για τον άνθρωπο και τον πλανήτη.

Οι αρμόδιοι φορείς έχουν αναλάβει ενέργειες για την αντιμετώπιση του φαινομένου και έχουν υιοθετήσει πλαίσιο νομοθετημάτων και κατάλληλων μέτρων τόσο για βραχυπρόθεσμα όσο και μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα αποτελέσματα. Ο ναυτιλιακός κόσμος ενθαρρύνει τους επιστημονικούς ερευνητές και τους ειδικούς στα καύσιμα και στους κινητήρες ως προς την διερεύνηση και την διενέργεια ερευνών επί βιώσιμων και εναλλακτικών καυσίμων.

Η επιλογή εναλλακτικού καυσίμου είναι πολύπλοκη καθώς υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι λύσεων για τις επόμενες δεκαετίες έως ότου μια πιο μόνιμη και εντελώς απαλλαγμένη από άνθρακα λύση είναι πλήρως διαθέσιμη παγκοσμίως. Η καθυστέρηση μεταξύ της σταδιακής κατάργησης των υφιστάμενων πλοίων με ενδιάμεσες λύσεις για τη μείωση των αποτυπωμάτων άνθρακα αποτελεί μια οικονομική πρόκληση.

Για να επιτευχθεί πραγματική απαλλαγή από τις εκπομπές άνθρακα, η ναυτιλιακή βιομηχανία πρέπει να εξετάσει εναλλακτικές επιλογές καυσίμων σε μια σωστή βάση. Μόνο μέσω μιας πλήρους ανάλυσης του κύκλου ζωής μπορεί να αξιολογηθεί ορθά ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των καυσίμων. Με γενική διάρκεια ζωής τουλάχιστον 20 ετών, πολλά από τα πλοία που λειτουργούν σήμερα θα

εξακολουθήσουν να κυκλοφορούν την επόμενη δεκαπενταετία, ως εκ' τούτου απαιτείται σημαντικός χρόνος για την ανανέωση του υπάρχοντος παγκόσμιου στόλου.

Ακόμη και τότε, η βέλτιστη επιλογή καυσίμου μπορεί να διαφέρει για διαφορετικούς τύπους πλοίων - σκαφών που λειτουργούν σε διαφορετικές περιοχές ή εκτελούν διαφορετικές εργασίες. Οι πλοιοκτήτες θα πρέπει να αξιολογήσουν προσεκτικά το επενδυτικό και λειτουργικό κόστος για να κάνουν τις επιλογές τους για τον στόλο τους.

Η παρούσα μελέτη εστιάζει όσο το δυνατόν, σε μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση επί του προβλήματος, προκειμένου να αποδοθεί ερευνητικό έργο εστιασμένο από την οπτική γωνία των πλοιοκτητών και των διαχειριστών πλοίων. Το παρόν δοκίμιο συντάχθηκε με γνώμονα τις προτιμήσεις των δρώντων εταιρείας της ναυτιλιακής κοινότητας, ως οι τελικοί αποφασίζοντες και τελικοί χρήστες, προσπαθώντας να δώσει απαντήσεις αναφορικά με την καλύτερη επιλογή βιώσιμου εναλλακτικού ναυτιλιακού καυσίμου για τη δεδομένη χρονική περίοδο αλλά και για το εγγύς μέλλον, μεταξύ έξι (6) επιλογών και κάνοντας χρήση έντεκα (11) ποιοτικών και ποσοτικών κριτηρίων, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά χαρακτηριστικά. Τα δεδομένα εισάγονται στη UTASTAR που τρέχει σε πλατφόρμα προγραμματισμού MATLAB και το πρόβλημα μοντελοποιείται κατάλληλα, συμφώνως των προτιμήσεων. Η MATLAB παρέχει ένα ευέλικτο και ισχυρό περιβάλλον για την εργασία με την UTASTAR και επιτρέπει την αυτοματοποίηση πολλών εργασιών εισαγωγής και ανάλυσης δεδομένων.

Η σειρά κατάταξης των ολικών χρησιμότητων των εξεταζόμενων εναλλακτικών καυσίμων στο κεφάλαιο 5, μας υποδεικνύει ότι το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) ήδη αποτελεί και θα συνεχίσει να αποτελεί την καλύτερη επιλογή των επόμενων ετών ως καύσιμο μετάβασης ή και σε πολλές περιπτώσεις μόνιμης λύσης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις παραγγελίες νεότευκτων πλοίων¹⁶⁸, όπου ως βασικό καύσιμο πρόωσης έχει επιλεγεί το LNG. Η πρόκληση που έχει να αντιμετωπίσει το συγκεκριμένο καύσιμο αν και πληροί τους υφιστάμενους νομοθετικούς περιορισμούς, είναι η μείωση της διαρροής μεθανίου με χρήση καλύτερης τεχνολογίας κινητήρα ή εξεύρεση

¹⁶⁸ Shipmanagment, (2023). «Clarksons Shipbuilding Review 2022»
<https://shipmanagementinternational.com/clarksons-shipbuilding-review-2022-shows-lng-and-container-vessels-dominated-new-orders/> & <https://insights.clarksons.net/2022-shipbuilding-review/>

διαδικασίας δέσμευσης του μεθανίου, προκειμένου να επιτευχθούν και οι μακροπρόθεσμοι στόχοι της ναυτιλιακής βιομηχανίας, μηδενικών ρύπων.

Το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG), ως αμέσως επόμενη επιλογή συγκεντρώνει πολλά χαρακτηριστικά του υγροποιημένου φυσικού αερίου αλλά υπολείπεται στο τομέα της παραγωγής, καθιστώντας το μέρος της λύσης στην επιλογή εναλλακτικού καυσίμου αλλά όχι σε εκτεταμένο πεδίο, και η χρήση του είναι κυρίως για κάλυψη αναγκών μικρών θαλασσίων αποστάσεων.

Τα βιοκαύσιμα (Biofuels) που έπονται στη κατάταξη ολικής χρησιμότητας έχουν μεγάλες δυνατότητες, αποτελώντας το είδος του καυσίμου με ευρεία αποδοχή, δεδομένου των χαρακτηριστικών τους και της δυνατότητας τους να χρησιμοποιούνται συνδυαστικά με άλλα καύσιμα (διαδικασία drop-in). Η πρόκληση που έχουν να αντιμετωπίσουν τα βιοκαύσιμα είναι αρνητικές επιπτώσεις στο φαινόμενο οξίνισης και ευτροφισμού κατά την παραγωγή και τη διάθεση.

Η μεθανόλη (CH_3OH) ως η αμέσως επόμενη επιλογή, παράγεται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένου του άνθρακα, του φυσικού αερίου, της βιομάζας ή ακόμη και απευθείας από το CO_2 και το υδρογόνο. Έχει παρόμοιες ιδιότητες με το LNG αλλά είναι ακριβότερο στην παραγωγή του. Οι εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού είναι περιορισμένες και θα απαιτούσε εκτεταμένες επενδύσεις υποδομής.

Το υδρογόνο έπεται στη κατάταξη, και είναι το καύσιμο το οποίο παράγει μηδενικές εκπομπές CO_2 . Το κυριότερο πρόβλημα είναι ότι, ανάλογα με την κατάστασή του, η ενεργειακή πυκνότητα του είναι 4-8 φορές μικρότερη από τα παραδοσιακά καύσιμα. Για να ρευστοποιηθεί το υδρογόνο πρέπει να διατηρηθεί στους -253°C σε ατμοσφαιρική πίεση. Είναι επίσης πολύ εύφλεκτο, καθιστώντας δύσκολη την ασφαλή μεταφορά του. Η αποθήκευση και η μεταφορά του υδρογόνου υπό άλλη μορφή, για παράδειγμα σε φυσικό αέριο, και εν συνεχεία μετατροπή ξανά σε υδρογόνο επί του πλοίου, θα βοηθούσε δυνητικά την αποφυγή ή ελαχιστοποίηση αρκετών προβλημάτων. Τα συνθετικά καύσιμα έχοντας ως βάση το υδρογόνο με χαμηλές και μηδενικές εκπομπές, θα γίνουν ευρέως διαθέσιμα μόνο όταν διατεθεί επαρκής δυναμικότητα ανανεώσιμων πηγών ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή τους.

Η αμμωνία σύμφωνα με την έρευνα και τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αποτελεί την τελευταία επιλέξιμη λύση. Ως καύσιμο σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης έχει μηδενικές εκπομπές CO_2 κατά τη χρήση, πλην όμως έχει πολύ χαμηλότερη

ενεργειακή πυκνότητα, διπλάσιο βάρος και χρειάζεται τριπλάσιο χώρο για την ίδια ποσότητα ενέργειας από τα παραδοσιακά καύσιμα. Η αμμωνία είναι επίσης καυστική και τοξική, επομένως οι εγκαταστάσεις χειρισμού, μεταφοράς και αποθήκευσης πρέπει να προσαρμοστούν ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια. Επίσης η βιομηχανική παραγωγή αμμωνίας εκπέμπει περισσότερο CO_2 από οποιαδήποτε άλλη χημική αντίδραση. Ενώ οι επιστήμονες σημειώνουν πρόοδο προς καθαρότερες μεθόδους παραγωγής, δεν είμαστε ακόμη εκεί.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έναντι των μελετών που αναφέρθηκαν στην § 1.3, για τις επιλογές εναλλακτικών καυσίμων του σήμερα και της επόμενης μέρας, παρουσιάζουν κοινή πρώτη εναλλακτική επιλογή (LNG), μονάχα με την μελέτη των Julia Hanssona, Stina Manssonc, Selma Brynolfa, Maria Grahna, από την Σουηδία, που όμως διαφοροποιούνται στην υπόλοιπη κατάταξη. Τα κριτήρια που έλαβαν υπόψη και αξιολόγησαν οι αποφασίζοντες ήταν σχεδόν πανομοιότυπα και αφορούσαν οικονομικές, τεχνολογικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές πτυχές. Τα οικονομικά κριτήρια παρουσίασαν υψηλή σημαντικότητα και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σύμφωνα με τις προτιμήσεις των πλοιοκτητών στον ρόλο των αποφασιζόντων τόσο στις τρεις μελέτες, όσο και στο παρόν δοκίμιο, αν και στην περίπτωση μας η διαφορά είναι οριακή έναντι των τεχνολογικών κριτηρίων. Η ανωτέρω διαπίστωση δεν αποτελεί έκπληξη, δεδομένου ότι η κερδοφορία κερδίζει τη μεγαλύτερη προσοχή των αρμοδίων για τη λήψη αποφάσεων (πλοιοκτήτες και φορείς εκμετάλλευσης).

Η βιομηχανία λαμβάνει επενδυτικές αποφάσεις τώρα σε νέες κατασκευές που θα επηρεάσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σήμερα και για τα επόμενα 20-25 χρόνια, την τυπική διάρκεια ζωής ενός σκάφους. Είναι σημαντικό οι αξιολογήσεις των εναλλακτικών οδών ναυτιλιακού καυσίμου να γίνονται σε μια βάση όμοιων τύπων καυσίμων. Η συζήτηση για εναλλακτικά καύσιμα πολύ συχνά συγκρίνει τις πράσινες εκδόσεις της αμμωνίας και της μεθανόλης με ορυκτά ή γκρι LNG. Αυτές οι πράσινες εκδόσεις αμμωνίας και μεθανόλης απέχουν ακόμη μερικά χρόνια από την εμπορική ετοιμότητα και δικαίως θα πρέπει να συγκριθούν με τις αντίστοιχες πράσινες εκδόσεις του μεθανίου, όπως το bioLNG ή το e-LNG (γνωστό και ως ανανεώσιμο συνθετικό LNG).

Σχεδόν όλα τα εναλλακτικά καύσιμα σήμερα, συμπεριλαμβανομένου του LNG, βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Στην πραγματικότητα, τα περισσότερα παράγονται από φυσικό αέριο. Το LNG είναι απλώς φυσικό αέριο που έχει ψυχθεί στο σημείο να

υγροποιηθεί. Το φυσικό αέριο, και μερικές φορές ο άνθρακας, είναι επίσης η πρώτη ύλη για όλη σχεδόν την παραγωγή μεθανόλης, αμμωνίας και υδρογόνου.

Οι αγορές ενέργειας θα παραμείνουν πιθανώς επιρρεπείς σε επιρροές από γεωπολιτικά γεγονότα και η τιμολόγηση θα επηρεάσει αναμφίβολα την επιλογή των μελλοντικών καυσίμων. Τέλος, η διαθεσιμότητα καυσίμων και η υποδομή θα επηρεάσουν τα καύσιμα που αναδεικνύονται.

Η έκθεση στην τιμολόγηση του άνθρακα μπορεί να φαίνεται σαν απειλή για ορισμένους πλοιοκτήτες και ναυλωτές. Ο στόχος, σε τελική ανάλυση, είναι να ενθαρρυνθεί η μετάβαση σε πράσινα καύσιμα που πιθανότατα θα είναι πιο ακριβά από τα ορυκτά καύσιμα, συνοδευόμενα από δαπανηρές αλλαγές στη λειτουργία. Αλλά αυτά τα κίνητρα και οι ποινές μπορούν επίσης να προσφέρουν ευρύ περιθώριο κέρδους σε όσους τα κατανοούν πλήρως.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα δύο συστήματα τιμολόγησης του άνθρακα της ΕΕ στα οποία θα υπόκειται σύντομα η ναυτιλία. Το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της ΕΕ (ETS), από το 2024, θα αποτελεί βασικό μέσο πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με αυτό το σύστημα, ορίζεται ένα ανώτατο όριο στη συνολική ποσότητα αερίων θερμοκηπίου που μπορούν να εκπέμψουν οι συμμετέχουσες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της ναυτιλίας. Οι εταιρείες λαμβάνουν δικαιώματα εκπομπών, τα οποία μπορούν είτε να χρησιμοποιήσουν είτε να συναλλάσσονται με άλλες εταιρείες. Εάν μια εταιρεία μειώσει τις εκπομπές της κάτω από το όριο της, μπορεί να πουλήσει τα πλεονάζοντα δικαιώματα σε άλλη εταιρεία που χρειάζεται περισσότερα δικαιώματα για να καλύψει τις εκπομπές της.

Το FuelEU Maritime είναι ένας μηχανισμός, μια νέα πρόταση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που στοχεύει στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τον ναυτιλιακό τομέα θέτοντας ένα όριο στην ένταση άνθρακα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται από πλοία που καταπλέουν σε λιμάνια της ΕΕ, ο οποίος θα τεθεί σε ισχύ το 2025. Σύμφωνα με αυτήν την πρόταση, ένας συντελεστής έντασης άνθρακα θα εκχωρηθεί σε κάθε καύσιμο, ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στον κύκλο ζωής που σχετίζονται με την παραγωγή, τη μεταφορά και την καύση του καυσίμου. Τα πλοία θα πρέπει να χρησιμοποιούν καύσιμα με συντελεστή έντασης άνθρακα κάτω από ένα ορισμένο όριο, το οποίο θα γίνεται σταδιακά αυστηρότερο με την πάροδο του χρόνου.

Τόσο το EU ETS όσο και το FuelEU Maritime μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη λύση του προβλήματος της εύρεσης του καλύτερου εναλλακτικού καυσίμου πλοίων. Για παράδειγμα, το EU ETS μπορεί να παράσχει οικονομικό κίνητρο στους πλοιοκτήτες να στραφούν σε καθαρότερα καύσιμα, επιτρέποντάς τους να πουλήσουν δικαιώματα υπέρβασης εκπομπών, τα οποία μπορούν να αποφέρουν πρόσθετα έσοδα. Ομοίως, το FuelEU Maritime μπορεί να παρέχει ένα ρυθμιστικό πλαίσιο που ενθαρρύνει τη χρήση καθαρότερων καυσίμων θέτοντας ένα όριο στην ένταση άνθρακα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται από πλοία που καταπλέουν σε λιμάνια της ΕΕ.

Επιπλέον, και οι δύο πολιτικές μπορούν να δημιουργήσουν ίσους όρους ανταγωνισμού για όλους τους πλοιοκτήτες που δραστηριοποιούνται στην ΕΕ, καθώς όλοι θα υπόκεινται στους ίδιους κανονισμούς εκπομπών. Αυτό μπορεί να προωθήσει τον θεμιτό ανταγωνισμό και να αποτρέψει ορισμένους πλοιοκτήτες από το να αποκτήσουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα χρησιμοποιώντας φθηνότερα, αλλά πιο ρυπογόνα καύσιμα.

Αναφορικά με την μέθοδο UTASTAR, αποτελεί ένα εργαλείο προσέγγισης λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων που μπορεί να βοηθήσει στις προσπάθειες απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές, επιτρέποντας στους αποφασίζοντες να αξιολογήσουν και να συγκρίνουν διαφορετικές επιλογές με βάση πολλαπλά κριτήρια.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο UTASTAR, οι αποφασίζοντες μπορούν να εντοπίσουν τις επιλογές που αποδίδουν καλύτερα σε όλα τα κριτήρια, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που σχετίζονται με την απαλλαγή από τον άνθρακα. Ως εκ τούτου, έχοντας ως εναλλακτικές επιλογές δύο ή περισσότερες πηγές ενέργειας, η μέθοδος UTASTAR μπορεί να βοηθήσει στο προσδιορισμό καυσίμου με χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα, λαμβάνοντας επίσης υπόψη και άλλους παράγοντες όπως η διαθέσιμη υποδομή, το κόστος ή οποιοδήποτε άλλο κριτήριο που θεωρείται σημαντικό.

Συνολικά, η μέθοδος UTASTAR μπορεί να βοηθήσει και μελλοντικά τους εμπλεκόμενους και τους αποφασίζοντες να δώσουν προτεραιότητα στις προσπάθειες απαλλαγής από τον άνθρακα, παρέχοντας μια διαφανή και αυστηρή προσέγγιση για την αξιολόγηση και τη σύγκριση διαφορετικών επιλογών.

6.2 Προτάσεις - προοπτικές

Η εύρεση ενός κατάλληλου εναλλακτικού καυσίμου πλοίων περιλαμβάνει την εξέταση μιας ποικιλίας παραγόντων όπως η συμβατότητα με την υπάρχουσα υποδομή, η διαθεσιμότητα, το κόστος, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και οι κανονιστικές απαιτήσεις. Ακολουθούν ορισμένες μέθοδοι και τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση κατάλληλων εναλλακτικών καυσίμων πλοίων:

✓ Ανασκόπηση βιβλιογραφίας: Η διεξαγωγή λεπτομερούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης της υφιστάμενης μέχρι σήμερα έρευνας και δημοσιεύσεων σχετικά με εναλλακτικά καύσιμα πλοίων μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό των πιο υποσχόμενων επιλογών.

✓ Τεχνοοικονομική ανάλυση: Η τεχνοοικονομική ανάλυση περιλαμβάνει την αξιολόγηση της σκοπιμότητας χρήσης εναλλακτικών καυσίμων με βάση τις τεχνικές ιδιότητες, το κόστος επένδυσης και κόστος συντήρησης καθώς και τα πιθανά οφέλη τους.

✓ Εκτίμηση του κύκλου ζωής: Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής περιλαμβάνει την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης διαφορετικών εναλλακτικών καυσίμων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, από την παραγωγή έως τη διάθεση και την χρήση τους.

✓ Ανάλυση αγοράς: Μια ανάλυση αγοράς μπορεί να βοηθήσει στον προσδιορισμό της διαθεσιμότητας, του κόστους, της προσφοράς και της ζήτησης για διαφορετικά εναλλακτικά καύσιμα.

✓ Πιλοτικές μελέτες: Οι πιλοτικές μελέτες περιλαμβάνουν τη δοκιμή διαφορετικών εναλλακτικών καυσίμων σε πραγματικές συνθήκες για την αξιολόγηση της απόδοσης και της καταλληλότητάς τους.

✓ Ρυθμιστική ανάλυση: Μια ρυθμιστική ανάλυση περιλαμβάνει την αξιολόγηση των κανονιστικών απαιτήσεων και κινήτρων για διαφορετικά εναλλακτικά καύσιμα.

✓ Συμμετοχή ενδιαφερομένων: Η συνεργασία με ενδιαφερόμενους φορείς, όπως παράγοντες του κλάδου, περιβαλλοντικές ομάδες και κυβερνητικές υπηρεσίες μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό και την αντιμετώπιση βασικών ανησυχιών και προκλήσεων που σχετίζονται με τα εναλλακτικά καύσιμα πλοίων.

Ο συνδυασμός αυτών των μεθόδων και τεχνικών μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό και την αξιολόγηση των καταλληλότερων εναλλακτικών καυσίμων πλοίων με βάση ένα ολοκληρωμένο σύνολο παραγόντων και σε προϋπολογισμένες συνθήκες που όμως συνεχώς αλλάζουν.

Ακολουθούν ορισμένα εργαλεία που μπορούν να βοηθήσουν στην εύρεση κατάλληλων εναλλακτικών καυσίμων πλοίων:

➤ Μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDM) όπως UTASTAR όπου και αναφερθήκαμε, AHP και TOPSIS, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στη συστηματική ανάλυση και ιεράρχηση διαφορετικών επιλογών με βάση πολλαπλά κριτήρια.

➤ Λογισμικό μοντελοποίησης, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της απόδοσης και της σκοπιμότητας διαφορετικών εναλλακτικών καυσίμων πλοίων υπό διάφορες συνθήκες.

➤ Διάφορες βάσεις δεδομένων, όπου μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για εναλλακτικά καύσιμα πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των ιδιοτήτων, της διαθεσιμότητας και του κόστους τους.

➤ Εργαλεία αξιολόγησης κύκλου ζωής, όπου μπορούν να βοηθήσουν στην αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου από τη χρήση διαφορετικών εναλλακτικών καυσίμων πλοίων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους.

➤ Ανάλυση σεναρίων, η οποία περιλαμβάνει την αξιολόγηση της πιθανής επίδρασης διαφορετικών σεναρίων στην επιλογή του καυσίμου. Για παράδειγμα, ένα σενάριο θα μπορούσε να είναι η εισαγωγή νέων κανονισμών που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα ή το κόστος ορισμένων καυσίμων.

➤ Εγκαταστάσεις δοκιμών σε πιλοτική κλίμακα, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δοκιμή της απόδοσης διαφορετικών εναλλακτικών καυσίμων πλοίων υπό πραγματικές συνθήκες.

➤ Η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence) μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία αναλύοντας τεράστιες ποσότητες δεδομένων, προβλέποντας αποτελέσματα και βελτιστοποιώντας λύσεις.

➤ Πλατφόρμες εμπλοκής ενδιαφερομένων, όπως διαδικτυακά φόρουμ, εργαστήρια και συνέδρια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αλληλεπίδραση με τους ενδιαφερόμενους και τη συλλογή σχολίων σχετικά με εναλλακτικά καύσιμα πλοίων.

Η χρήση αυτών των εργαλείων μπορεί να βοηθήσει στην παροχή πληροφοριών και δεδομένων που είναι απαραίτητα για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τα κατάλληλα εναλλακτικά καύσιμα πλοίων.

Επιπρόσθετα, στο πλαίσιο εύρεσης του καλύτερου εναλλακτικού καυσίμου πλοίων, το πεδίο μελέτης της επιχειρησιακής έρευνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που θα αναπαριστούν το πρόβλημα απόφασης και θα βοηθήσουν στον εντοπισμό της πιο αποτελεσματικής λύσης. Τα μοντέλα επιχειρησιακής έρευνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναπαραστήσουν πολύπλοκα συστήματα, να λάβουν υπόψη πολλαπλά κριτήρια απόφασης και να ενσωματώσουν την αβεβαιότητα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Για παράδειγμα, τεχνικές επιχειρησιακής έρευνας όπως ο γραμμικός προγραμματισμός και η βελτιστοποίηση ροής δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των βέλτιστων διαδρομών για τη ναυτιλία, ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση καυσίμου και το κόστος. Ομοίως, τεχνικές ανάλυσης αποφάσεων, όπως τα

δέντρα αποφάσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των κινδύνων και των οφελών που σχετίζονται με διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις καυσίμου.

Επιπλέον, η επιχειρησιακή έρευνα μπορεί να βοηθήσει τους εμπλεκόμενους και τους αποφασίζοντες να εντοπίσουν αντισταθμίσεις μεταξύ διαφορετικών κριτηρίων και να αναπτύξουν καλύτερη κατανόηση του αντίκτυπου των αποφάσεών τους. Για παράδειγμα, τα μοντέλα επιχειρησιακής έρευνας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού και οικονομικού κόστους διαφορετικών εναλλακτικών καυσίμων, βοηθώντας τους δρώντες να κάνουν πιο ενημερωμένες επιλογές.

Ειδικότερα, η χρήση των MCDA μπορεί να βοηθήσει στη διασφάλιση μιας διαφανούς και συστηματικής διαδικασίας λήψης αποφάσεων και μπορεί να παρέχει στους αποφασίζοντες μια ολοκληρωμένη κατανόηση των δυνατών και των αδυναμιών κάθε εναλλακτικού καυσίμου. Αξιολογώντας προσεκτικά τα κριτήρια και σταθμίζοντάς τα κατάλληλα, οι αποφασίζοντες μπορούν να επιλέξουν το εναλλακτικό καύσιμο που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες και τους στόχους τους, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τους πολύπλοκους συμβιβασμούς που εμπλέκονται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Συνολικά, η επιχειρησιακή έρευνα μπορεί να προσφέρει ένα πολύτιμο πλαίσιο για την ανάλυση σύνθετων προβλημάτων λήψης αποφάσεων στη ναυτιλιακή βιομηχανία και μπορεί να βοηθήσει τους εμπλεκόμενους και τους μελλοντικούς αποφασίζοντες να εντοπίσουν τις πιο αποτελεσματικές και βιώσιμες λύσεις.

Μια άλλη προσέγγιση είναι η εξέταση υβριδικών λύσεων, οι οποίες συνδυάζουν τη χρήση διαφορετικών καυσίμων, τεχνολογιών και ενέργειας, όπως μπαταρίες, κυψέλες καυσίμου αλλά και χρήση της ηλιακής, αιολικής και κυματικής ενέργειας ως υποβοήθηση στη πρόωση κάποιων τύπων πλοίων. Αυτές οι λύσεις μπορούν ενδεχομένως να προσφέρουν ένα πιο ευέλικτο και αποδοτικό σύστημα, καθώς υφίσταται η δυνατότητα και να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων και την κατανάλωση καυσίμου. Ωστόσο, μπορεί επίσης να απαιτούν σημαντικές επενδύσεις και να αντιμετωπίζουν τεχνολογικούς και ρυθμιστικούς περιορισμούς και φραγμούς. Το εκτεταμένο πεδίο έρευνας και εφαρμογής των νέων τεχνολογιών πρώτα στους χερσαίους τομείς πριν την υιοθέτηση τους από την ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί σύνηθες πεπραγμένο, αποτελώντας ταυτόχρονα καθοριστικό παράγοντα στη βιωσιμότητα των εναλλακτικών καυσίμων στη ναυτιλία.

Για την αλλαγή των καυσίμων πλοίων συνεπάγονται σημαντικές αλλαγές σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού καυσίμων από την εξόρυξη και την παραγωγή έως την αποθήκευση και τη διανομή. Η ανάλυση του κύκλου ζωής του καυσίμου θα απαιτήσει άνευ προηγουμένου συνεργασία μεταξύ όλων των ενδιαφερομένων στην παραγωγή ενέργειας και τη ναυτιλιακή βιομηχανία. Επιπλέον, ενδιαφερόμενοι φορείς όπως πλοιοκτήτες, ναυλωτές, προμηθευτές καυσίμων, ρυθμιστικές αρχές και περιβαλλοντικές οργανώσεις πρέπει να συνεργαστούν για να προωθήσουν τη χρήση βιώσιμων εναλλακτικών καυσίμων πλοίων και να αναπτύξουν ένα πιο ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη λήψη αποφάσεων.

Στις προτάσεις της εργασίας περιλαμβάνεται και η επανάληψη της πολυκριτήριας μεθόδου σε περιοδικά χρονικά διαστήματα (προτείνεται ανά έτος), λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά τα νέα δεδομένα, τους παράγοντες που επηρεάζουν τη λήψη απόφασης, καθώς και τις επικρατούσες συνθήκες και τάσεις προκειμένου να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων, που θα απαρτίσει χρονικό αποτύπωμα στο τομέα της λήψης απόφασης και θα αποτελεί ένα ακόμα εργαλείο βοήθειας για την επιλογή όσο το δυνατόν ορθότερης απόφασης. Δεδομένα και παράγοντες λήψης απόφασης που ισχύουν σήμερα, στα επόμενα χρόνια πιθανόν να έχουν μεταβληθεί κατά πολύ τόσο η ισχύς όσο και η δυναμική τους. Για παράδειγμα, το κριτήριο «Διαθέσιμη Υποδομή» που σήμερα διαφαίνεται να αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες επιλογής εναλλακτικού καυσίμου, στηριζόμενο κυρίως στην τεχνική υποδομή αλλά και στην εξασφάλιση οικονομικών πόρων, στα επόμενα χρόνια δεδομένης της ωρίμανσης επί των επικείμενων αλλαγών, ίσως αποτελεί τετριμμένο κριτήριο με μικρή έως καθόλου ισχύ και ενδιαφέρον στη διαδικασία λήψης απόφασης.

Συνοψίζοντας, η επίλυση του προβλήματος απαιτεί συλλογική προσπάθεια από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς και την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων και τεχνικών. Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παράγοντες και τις επικρατούσες συνθήκες, μπορούμε να λάβουμε τεκμηριωμένες αποφάσεις και να διασφαλίσουμε ένα πιο βιώσιμο μέλλον για τη ναυτιλιακή βιομηχανία.

Βιβλιογραφία

- Agrawal H., Malloy Q.G.J., Welch W.A., Miller J. W., Cocker D.R. (2008). «In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean-going container vessel». *Atmospheric Environment*.
- Ančić, I., Perčić, M., & Vladimir, N. (2020). «Alternative power options to reduce carbon footprint of ro-ro passenger fleet: A case study of Croatia». *Journal of Cleaner Production*, 271, 122638. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122638>
- Andersson, K., & Salazar, C. M. (2015). «Methanol as a Marine Fuel Report». In FCBI Energy.
- Andersson, K., Brynolf, S., Hansson, J., & Grahn, M. (2020). «Criteria and decision support for a sustainable choice of alternative marine fuels». *Sustainability*, 12(9), 3623. <https://doi.org/10.3390/su12093623>
- Andersson, K. Salazar, C.M. «Methanol as a Marine Fuel». FCBI Energy. 2015. Διαθέσιμο στον ιστότοπο <https://www.methanol.org/wpcontent/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>
- Ammar, N. R. (2019). «An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular container ship». *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.02.001>
- Ash Nick and Scarbrough Tim, (2019). «*Sailing on Solar - Could green ammonia decarbonise international shipping?*» Technical report, https://www.researchgate.net/publication/332845713_Sailing_on_Solar_-_Could_green_ammonia_decarbonise_international_shipping
- Arteconi, A., Brandoni, C., Evangelista, D., & Polonara, F. (2010). «*Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe*». *Applied Energy*, 87(6), 2005–2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.11.012>
- Badi I., Pamucar D., (2020). «*Supplier selection for steelmaking company by using combined Grey MARCOS methods*», *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 3(2), pp. 37-48.
- Bana e Costa, C.; Vansnick, J. «*MACBETH: An interactive path towards the construction of cardinal value functions*». *Int. Trans. Oper. Res.* 1994, 1, 387–500.

- Belton, V.; Stewart, T. (2002.). «*Multiple Criteria Decision Analysis—An Integrated Approach*». Kluwer Academic Press: Boston, MA, USA.
- Bengtsson S, Andersson K, and Fridell E.,(2011). «*A comparative life cycle assessment of marine fuels: Liquefied natural gas and three other fossil fuels*». Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 225(2):97–110. ISSN 14750902. doi: 10.1177/1475090211402136.
- BIMCO, (2019). «*The supply and use of 0.50%-sulphur marine fuel*». Cruise Lines International Association (CLIA), International Association of Independent Tanker Owners (INTERTANKO), International Chamber of Shipping (ICS), and International Group of P&I Clubs (IGP&I). Technical report.
- Brans J.P., Vincke P., (1985). «*Note-A Preference Ranking Organisation Method: The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making*». Manag. Sci. 1985, 31, 647–656.
- Brynnolf Selma, Fridell Erik, Andersson Karin, (2014). «*Environmental assessment of marine fuels: Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol*». Journal of Cleaner Production, 74:86–95, ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.052.
- Cengiz Deniz and Burak Zincir, (2016). «*Environmental and economical assessment of alternative marine fuels*». Journal of Cleaner Production, 113:438–449, 2 2016. ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.089.
- Charnes A., Cooper W.W., Ferguson, R.O., (1955). «*Optimal estimation of executive compensation by linear programming*». Management Science, 1 (2), 138-151.
- Charnes A., Cooper W.W., (1961). «*Management models and industrial applications of linear programming*». Wiley, New York.
- Colson G., De Bruyn C., (1989). «*Models and Methods in Multiple Objectives Decision Making, Models and Methods in Multiple Criteria Decision Making*», Pergamon Press: Oxford, UK.
- Council of the European Union, (2022). «*Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a carbon border adjustment mechanism (CBAM) – Compromise Text*». Chapter II. Διαθέσιμο στον ιστότοπο <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-16060-2022-INIT/en/pdf>

- Council of the European Union, (2023). «*FuelEU Maritime initiative: Provisional agreement to decarbonise the maritime sector*». Διαθέσιμο στον ιστότοπο <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/23/fueleu-maritime-initiative-provisional-agreement-to-decarbonise-the-maritime-sector/>
- Council of the European Union, (2023). «*Infographic - Fit for 55: increasing the uptake of greener fuels in the aviation and maritime sectors*» Διαθέσιμο στον ιστότοπο <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/>
- Coronado, C.R.; Carvalho, J.A.; Yoshioka, J.T.; Silveira, J.L. «*Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel*». Appl. Therm. Eng. 2009, 29, 1887–1892.
- De Montis A., De Toro P., Droste-Franke B., Omann I., Stagl S., (2000). Dyer, J.S., (2005). «MAUT—Multiattribute utility theory. In Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys», Springer: New York, NY, USA, pp. 265–292.
- De Toro Pasquale, Omann Ines, Droste-Franke Bert, (2004). «*Criteria for quality assessment of mcda methods*», In 3rd Biennial Conference of the European Society for Ecological Economics, Vienna, pp. 3-6.
- Despotis D., Yannacopoulos D., and Zopounidis C., (1990). «*A review of the UTA multicriteria method and some improvements*», Found. Comput.
- Dimitriou, P., & Javaid, R. (2020). «*A review of ammonia as a compression ignition engine fuel*». *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), 7098-7118. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.209>
- E4Tech. (2018). «*Master plan for CO2 reduction in the Dutch shipping sector*» - Biofuels for shipping. Technical report, www.platformduurzamebiobrandstoffen.nl.
- Eise Fokkema, J., Buijs, P., & Vis, I. F. A. (2017). «*An investment appraisal method to compare LNG-fueled and conventional vessels*». *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 56, 229-240. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.021>

- Elishav, O., Mosevitzky Lis, B., Miller, E. M., Arent, D. J., Valera-Medina, A., Grinberg Dana, A., Shter, G. E., & Grader, G. S. (2020). «*Progress and prospective of nitrogen-based alternative fuels*». *Chemical Reviews*, 120(12), 5352-5436. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00538>
- Elishav, O., Mosevitzky Lis, B., Miller, E. M., Arent, D. J., Valera-Medina, A., Grinberg Dana, A., Shter, G. E., & Grader, G. S. (2020). «*Progress and prospective of nitrogen-based alternative fuels*». *Chemical Reviews*, 120(12), 5352-5436. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00538>
- Ellis, J., & Tanneberger, K. (2015). «*Study on the Use of Ethyl and Methyl Alcohol as Alternative Fuels in Shipping*». In EMSA.
- European Commission (2022). «*New shipping fuel standards to reduce sulphur air pollutants in the Mediterranean by 80%*». Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://environment.ec.europa.eu/news/new-shipping-fuel-standards-reduce-sulphur-air-pollutants-mediterranean-80-2022-12-16_en
- Figueira J. Greco S.; Ehrgott M. (2005). «*Multiple Criteria Decision Analysis—State of the Art Survey*» Springer: New York, NY, USA.
- Fishburn, P.C. (1978), «*A survey of multiattribute/multicriterion evaluation theories. In Multiple Criterion Problem Solving*», Zionts, S., Ed.; Springer: Heidelberg, Germany, pp. 181–224
- Fishburn P. C., (1966) «*A Note on Recent Developments in Additive Utility Theories for Multiple-Factor Situations*», *Oper. Res.*, vol. 14, no. 6, pp. 1143–1148.
- Gallucci, M. (2021). «*Why the Shipping Industry Is Betting Big on Ammonia*». IEEE Spectrum. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://spectrum.ieee.org/transportation/marine/why-the-shipping-industry-is-betting-big-on-ammonia>.
- Gamper C. D., Thöni M., Week-Hannemann H. (2006). «*A conceptual approach for the use of cost benefit and multi criteria analysis in natural hazard management*». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (6), 293–302.
- Geneletti Davide, (2019). «*Multicriteria Analysis for Environmental Decision-Making*». Anthem Press, <https://doi.org/10.2307/j.ctvhhh9x>

- Ghorbani, A. (2011). «*A comparative study of combustion performance and emission of biodiesel blends and diesel in an experimental boiler*». Appl. Energy, 88, 4725–4732.
- Greco, S., M. Ehrgott, J. Figueira (eds.), (2016). «*Multiple Criteria Decision Analysis, - State of the Art – Surveys*» (2nd Edition), International Series in Operations Research and Management Science, Springer.
- Greco S. , Matarazzo B., Slowinski R., (2001). «*Rough sets theory for multicriteria decision analysis European Journal of Operational Research*» 129 , pp. 1-47
- Guitouni, A.; Martel, J.M.; Vincke, P.; North, P.B., (1998). «A Framework to Choose a Discrete Multicriterion Aggregation Procedure», Defence research establishment valcartier (DREV): Ottawa, ON, Canada, Διαθέσιμο στον ιστότοπο:
<https://pdfs.semanticscholar.org/27d5/9c846657268bc840c4df8df98e85de66c562.pdf> .
- Guarini, M.R.; Chiovitti, A.; Battisti, F.; Morano, P., (2017). «*An Integrated Approach for the Assessment of Urban Transformation Proposals in Historic and Consolidated Tissues*». In Computational Science and Its Applications—ICCSA 2017; Springer: Cham, Switzerland, 2017; pp. 562–574.
- Guarini, M.R.; Chiovitti, A.; Battisti, F.; Morano, P., (2017). «*Public Initiatives of Settlement Transformation: A Theoretical-Methodological Approach to Selecting Tools of Multi-Criteria Decision Analysis*».
- Guitouni, A., Martel, J.-M., 1998, «*Tentative guidelines to help choosing an appropriate mcda method*», European journal of operational research, 109(2), pp. 501-521.
- Hansson Julia, Månsson Stina, Brynolf Selma, and Grahn Maria, (2019). «*Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders*». Biomass and Bioenergy, 126:159–173. ISSN 18732909. doi: 10.1016/j.biombioe.2019.05.008.
- Hansson Julia, Brynolf Selma, Fridell Erik, and Lehtveer Mariliis, (2020). «*The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel—Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis*». Sustainability, 12(8):3265, ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su12083265. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/8/3265>.

- Hansson Julia, Fridell Erik, and Brynolf Selma, (2020). «On the potential of ammonia as fuel for shipping – A synthesis of knowledge». https://www.lighthouse.nu/sites/www.lighthouse.nu/files/rapport_ammoniak.pdf.
- Hartog, J.A.; Hinloopen, E.; Nijkamp, P., (1989). «*A sensitivity analysis of multi-criteria choice-methods: An application on the basis of the optimal site selection for a nuclear power plant*». Energy Econ. 11, 293–300.
- Hwang, C.L., Yoon, K., (1981). «*Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*», Springer: Heidelberg, Germany.
- Ishizaka, A.; Nemery, P. (2013). «*Multi-Criteria Decision Analysis, Methods and Software*», Wiley and Sons Ltd.: Chichester, UK.
- Jacquet-Lagrange, E. and Siskos J., (1982). «*Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method*», Eur. J. Oper. Res., vol. 10, no. 2, pp. 151–164. Jun.
- Jacquet-Lagrange, E., Siskos, Y., (2001). «*Preference disaggregation: 20 years of mcdm experience*», European Journal of Operational Research, 130(2), pp. 233-245.
- Καλλίγερος, Σ., Αντωνάκος, Π., Μελανιτης, Ν. & Ζαννίκου, Υ., (2010). «*Ναυτιλιακά Καύσιμα-Προδιαγραφές Προοπτικές*». Ναυσίβιος Χώρα, ΣΝΔ
- Khanh Q. Bui, Aykut I Olcer, Momoko Kitada και Fabio Ballini, (2020). «*Selecting technological alternatives for regulatory compliance towards emissions reduction from shipping: An integrated fuzzy multi-criteria decision-making approach under vague environment*». Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://www.researchgate.net/publication/341887790_Selecting_technological_alternatives_for_regulatory_compliance_towards_emissions_reduction_from_shipping_An_integrated_fuzzy_multi-criteria_decision-making_approach_under_vague_environment
- Klapka, J.; Piños, P.,(2002). «*Decision support system for multicriterial R&D and information systems projects selection*». Eur. J. Oper. Res. 2002, 140, 434–446.
- Keeney R.L., Raiffa H., (1993). «*Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*», Cambridge University Press: Cambridge, UK.

- Keeney R. L., Raiffa H., and Rajala D. W. (1979). «*Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*», IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., vol. 9, no. 7, pp. 403–403,.
- Kenn, P. G. W. (1978). «*Decision support systems: an organizational perspective*». Reading, Mass., Addison-Wesley Pub. Co.
- Kizielewicz B., Wątróbski J., Sałabun W., (2020). «*Identification of relevant criteria set in the mcda process—wind farm location case study*», Energies, 13(24), 6548.
- Kizielewicz B., Sałabun W., (2020). «*A new approach to identifying a multi-criteria decision model based on stochastic optimization techniques*», Symmetry, 12(9), 1551 <https://doi.org/10.3390/sym12091551>
- Kobayashi, H.; Hayakawa, A.; Somaratne, K.D.K.A.; Okafor, E.C. «*Science and technology of ammonia combustion*». Proc.
- Koopmans T.C., (1951) «*Activity Analysis of Production and Allocation*». (New York : John Wiley (London : Chapman and Hall))
- Kuimov D N, Minkin M S, and Lukyanov A D. Low-Sulfur Fuel and Oil Production. In Materials Engineering and Technologies for Production and Processing II, volume 870 of Materials Science Forum, pages 671–676. Trans Tech Publications Ltd, 2016. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.671
- Kim, K., Roh, G., Kim, W., & Chun, K. (2020). «*A preliminary study on an alternative ship propulsion system fueled by ammonia: Environmental and economic assessments*». *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 183. <https://doi.org/10.3390/jmse8030183>
- Konnov, A. A. (2019). «*Yet another kinetic mechanism for hydrogen combustion*». *Combustion and Flame*, 203, 1422. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.01.032>
- Lee, H. J., Yoo, S. H., & Huh, S. Y. (2020). «*Economic benefits of introducing LNG-fuelled ships for imported flour in South Korea*». *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, 102220. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.102220>

- Lehtoranta, K., Koponen, P., Vesala, H., Kallinen, K., & Maunula, T. (2021). «*Performance and regeneration of methane oxidation catalyst for LNG ships*». *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 111. <https://doi.org/10.3390/jmse9020111>
- Langemeyer J., Gomez-Baggethun E., Haase D., Scheuer S., Elmqvist T. «Bridging the gap between ecosystem service assessments and land-use planning through Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)». *Environmental Science & Policy*.
- Laursen, R., Barcarolo, D., Patel, H., Dowling, M., Penfold, M., Faber, J., Király, J., van der Ven, R., Pang, E., van Grinsven, A., (2022). «*Potential of Ammonia as Fuel in Shipping*» (American Bureau of Shipping, CE Delft, and Arcsilea). European Maritime Safety Agency (EMSA)
- Mandic Nikola, Ukic Boljat Helena, Kekez Toni & Luttenberger Lidija Runko, (2021). «*Multicriteria Analysis of Alternative Marine Fuels in Sustainable Coastal Marine Traffic*». DOI: 10.3390/app11062600. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://www.researchgate.net/publication/350082042_Multicriteria_Analysis_of_Alternative_Marine_Fuels_in_Sustainable_Coastal_Marine_Traffic
- Manouchehrinia, B., Dong, Z., & Gulliver, T. A. (2020). «*Well to - Propeller environmental assessment of natural gas as a marine transportation fuel in British Columbia, Canada*». *Energy Reports*, 6, 802-812. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.016>
- Ματσατσίνης, Ν. (2022), «*Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων*» (Β' Έκδοση), Νέες Τεχνολογίες, Αθήνα (ΕΥΔΟΕΟΣ: 112706280).
- Ματσατσίνης, Ν. (2010), «*Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων*», Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα.
- Ματσατσίνης Νικόλαος, Ζαπουνίδης Κωνσταντίνος,(2007). «*Συστήματα Αποφάσεων με Πολλαπλά Κριτήρια*», ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ
- Matsatsinis, N. F., E. Grigoroudis & A. Samaras, (2005). «*Aggregation and Disaggregation of References for Collective Decision-Making*». *Group Decision and Negotiation* 14 (3): 217–232.
- Matsatsinis, N.F., A.P. Samaras (2001), «*MCDA and preference disaggregation in group decision support systems*», *European Journal of Operational Research*, vol. 130, no. 2, pp. 414-429.

- Moldanova J., Fridell E., Popovicheva O., Demirdjian B., Tishkova V., Faccinnetto A., Focsa C. (2009). «*Characterisation of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine*». Atmospheric Environment, σσ. 2632-2641.
- Mouly, George J., (1963). «*The Science of Educational Research*». New York: American Book Company.
- Μελανίτης Ν.Ε. (2004). «*Τεχνολογία καυσίμων και λιπαντικών*». Σημειώσεις μαθήματος, ΣΝΔ
- Neumann J. Von and Morgenstern O., (1944) «*Theory of Games and Economic Behavior*». Princeton University Press, Princeton, NJ
- Nijkamp P.; Beinat E., (1998). «*Multi-Criteria Analysis for Land Use Management*», Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands.
- Noor, C.W.; Noor, M.M.; Mamat, R., (2018). «*Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review*». Renew. Sustain. Energy Rev. 94, 127–142.
- Nutt D. J., Phillips L. D., Balfour D., Curran H. V., Dockrell M., Foulds J., Fagerstrom K., Letlape K., Milton A., Polosa R., Ramsey J., Sweanor D., (2014), «*Estimating the harms of nicotine-containing products using the mcda approach*», European addiction research, 20(5), pp. 218-225.
- Olmer, N., Comer, B., Roy, B., Mao, X., Rutherford, D. (2017). «*Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την παγκόσμια ναυτιλία, 2013–2015*». Το Διεθνές Συμβούλιο για τις Καθαρές Μεταφορές (ICCT), Ουάσιγκτον
- Marakas, M.G., (2003). «*Decision Support Systems in the 21st Century*; Prentice Hall: Upper Saddle River», NJ, USA Volume 134
- Pardalos P.M., Siskos Y., Zopounidis C., (1995). «*Advances in multicriteria analysis*». Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Pan, H., Pournazeri, S., Princevac, M., Miller, J. W., Mahalingam, S., Khan, M. Y., Jayaram, V., & Welch, W. A. (2014). «*Effect of hydrogen addition on criteria and greenhouse gas emissions for a marine diesel engine*». International Journal of Hydrogen Energy, 39(21), 11336–11345. <https://doi.org>
- Παπαευαγγέλου Τ., (2022). «*Καύσιμα - Λιπαντικά*». Επιμέλεια Μαΐστρου Γεωργίου, Δ' Έκδοση, Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου

- Pavlenko Nikita, Comer Bryan, Zhou Yuanrong, Clark Nigel, and Rutherford Dan, (2020). «*The climate implications of using LNG as a marine fuel*». www.theicct.org.
- Plana, C., Armenise, S., Monzon, A., & Garcia-Bordeje, E. (2010). «*Ni on alumina-coated cordierite monoliths for in situ generation of CO-free H₂ from ammonia*». *Journal of Catalysis*, 275(2), 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2010.07.026>
- Power, D.J. (2007). «*A Brief History of Decision Support Systems*» DSS Resources. COM.
- Riley E.J., Schnurr Tony Walker R., (2019). «*Marine Transportation and Energy Use*» Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/bunker-fuel>
- Raucci C, Calleya J, Suarez de la Fuente S, Pawling R., (2015). «*Hydrogen on board ship: A first analysis of key parameters and implications*». International Conference on Shipping in Changing Climates.
- Ryste, J. A. (2019). «*Comparison of alternative marine fuels*». Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://sea-lng.org/wpcontent/uploads/2019/09/19-09-16_Alternative_Marine-Fuels-Study_final_report.pdf
- Roy B., (1968).«*Classement et choix en pr'esence de points de vue multiples: La m'ethode-ELECTRE*» *R.I.R.O*, 8:57–75
- Roy, B. (1981). «*A multicriteria analysis for trichotomic segmentation problems*». In P.Nijkamp and J.Spronk (eds): *Multiple Criteria Analysis*, Gower Publ. Comp.: 245-257.
- Roy, B., (1985). «*Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*», Economica: Paris, France.
- Roy B., Bouyssou D., (1993). «*Aide Multicritère à la Décision: Methodes et Cas*» Economica: Paris, France
- Roy, B., (1968). «*Classement et choix en presence de points de vue multiples: La méthode ELECTRE*». *Rev. Fr. Inform. Rech. Opér.* 1968, 8, 57–75.
- Roy B., (1996). «*Multicriteria methodology for decision aiding*». Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- Saaty T., (1977). «*A scaling Method for priorities in hierarchical structures*». J. Math. Psychol., 15, 234–281.
- Saaty, T.L., (2001). «*Analytic network process*». In Encyclopedia of Operations Research and Management Science; Springer: New York, NY, USA, 2001; pp. 28–35.
- Savage L.J.. (1954). «*The Foundations of Statistics*». John Wiley & Sons, New York
- Sałaun W., Wątróbski J., Shekhovtsov A., (2020a). «*Are mcda methods benchmarkable? a comparative study of topsis, vikor, copras, and promethee ii methods*», Symmetry, 12(9), 1549.
- Schinas, O., & Butler, M. (2016). «*Feasibility and commercial considerations of LNG - fueled ships*». Ocean Engineering, 122, 84-96.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.04.031>
- Shekhovtsov A., Kołodziejczyk J, (2020). «*Do distance-based multi-criteria decision analysis methods create similar rankings?*», Procedia Computer Science, 176, pp. 3718-3729
- Siddiqui, O.; Ishaq, H.; Dincer, I. (2020). «*Experimental investigation of improvement capability of ammonia fuel cell performance with addition of hydrogen*». Energy Convers. Manag., 205, 112372.
- Σίσκος, Γ. (2008), Μοντέλα Αποφάσεων, Αθήνα : Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.
<https://www.unipi.gr/faculty/ysiskos/> .
- Siskos, Y., E. Grigoroudis, N.F. Matsatsinis (2016), «*State of the Art – Surveys*» (2nd Edition), UTA methods, in: S. Greco, M. Ehrgott, J. Figueira (eds.), Multiple Criteria Decision Analysis, International Series in Operations Research and Management Science, vol. I, pp. 315-362, Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_9
- Siskos Y. and Grigoroudis E., “New Trends in Aggregation-Disaggregation Approaches,” Springer, 2010, pp. 189–214.
- Siskos Y., Grigoroudis E., and Matsatsinis N. F., (2005). «*UTA Methods*» in Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, New York: Springer-Verlag, pp. 297–334. (Part of the International Series in Operations Research & Management Science book series)

- Siskos, J. and Yannacopoulos, D. (1985). «*UTASTAR – An ordinal regression method for building additive value functions*». *Investigação Operacional*, 5(1):39–53
- Smith T., Raucci, C., Sabio, N., Argyros, D. (2014b). «*Παγκόσμιες τάσεις καυσίμων πλοίων 2030*». Lloyds Register Marine; University College London Energy Institute, Λονδίνο.
- Stancin, H.; Mikulčić, H.; Wang, X.; Duić, N. (2020). «*A review on alternative fuels in future energy system*». *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 128, 109927.
- Svanberg, M., Ellis, J., Lundgren, J., & Landalv, I. (2018). «*Renewable methanol as a fuel for the shipping industry*». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1217–1228. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.058>
- Taccani, R., Malabotti, S., Dall’Armi, C., & Micheli, D. (2020). «*High energy density storage of gaseous marine fuels: An innovative concept and its application to a hydrogen powered ferry*». *International Shipbuilding Progress*, 67(1), 29–52. <https://doi.org/10.3233/ISP-190274>
- Thomson Heather, James J. Corbett, and James J. Winebrake, (2015). «*Natural gas as a marine fuel*». *Energy Policy*, 87:153–167, ISSN 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2015.08.027.
- Trivyza, N. L., Cheliotis, M., Boulougouris, E., & Theotokatos, G. (2020). «*Safety and reliability analysis of an ammonia powered fuel-cell system*». *Safety*, 7, 80. <https://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-30885-cd>
- Tuner, M. (2015). «*Combustion of alternative vehicle fuels in internal combustion engines. A report on engine performance from combustion of alternative fuels based on literature review*». Report within project «*A pre-study to prepare for interdisciplinary research on future alternative transportation fuels*», financed by The Swedish Energy Agency.

- Tuner, M., Aakko-Saksa, P., & Molander, P. (2018). *«Engine technology, research, and development for methanol in internal combustion Engines: SUMMETH-Sustainable marine methanol, Deliverable D3.1.»* Διαθέσιμο στον ιστότοπο: from http://summeth.marinemethanol.com/reports/SUMMETH-WP3_fnl.pdf Zlaugotne Beate, Zihare Lauma, Balode Lauma, Kalnbalkite Antra, Khabdullin Aset, BLUMBERGA Dagnija, (2020). *«Multi-Criteria Decision Analysis Methods Comparison»*, Environmental and Climate Technologies 2020, vol. 24, no. 1, pp. 454–471.
- Valera-Medina, A., Baej, H., Syred, N., Chong, C. T., & Bowen, P. (2017). *«Coherent structure impacts on blowoff using various syngases»*. *Energy Procedia*, 105, 1356-1362. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.500>
- Vandebroek, L.; Berghman, J. (2012). *«Safety Aspects of the use of LNG for Marine Propulsion»*. *Procedia Eng.* 45, 21–26.
- Veldhuis, I.J.S.; Richardson, R.N.; Stone, H.B.J., (2007). *«Hydrogen fuel in a marine environment»*. *Int. J. Hydrogen Energy* 32, 2553–2566.
- Verhelst, S., Turner, J. W., Sileghem, L., & Vancoillie, J. (2019). *«Methanol as a fuel for internal combustion engines»*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 43-88. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001>
- Vermeire Monique B., (2021) *«Everything you need to know about marine fuels»* Chevron Products and Technology in Belgium. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://www.chevronmarineproducts.com/content/dam/chevron-marine/fuels-brochure/Chevron_Everything%20You%20Need%20To%20Know%20About%20Marine%20Fuels_v8-21_DESKTOP.pdf
- Vincke, P., (1989). *«L'aide Multicritère à la Décision»*, Édition de l'Université de Bruxelles; Bruxelles: Brussels, Belgium.
- Wang, Y.; Gu, Y.; Zhang, H.; Yang, J.; Wang, J.; Guan, W.; Chen, J.; Chi, B.; Jia, L.; Muroyama, H.; et al., (2020). *«Efficient and durable ammonia power generation by symmetric flat-tube solid oxide fuel cells»*. *Appl. Energy* 270, 115185.
- Widrow B. and Hoff M. E., Adaptive Switching Circuits, 1960 WESCON Convention, Record Part 4, pp. 96-104; Human Neurobiology, 4,229(1985).

Ye, F.; Wang, Z.; Xu, C.; Yuan, M.; Liu, P.; Yang, W.; Liu, G., (2020). «*Mechanism and kinetic study of pulse electrodeposition process of Pt/C catalysts for fuel cells*». *Renew. Energy* 145, 514–520.

Πηγές διαδικτύου

Alternative marine fuels, (2023). «How do alternative marine fuel prices compare to VLSFO prices?». Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.argusmedia.com/en/hubs/alternative-marine-fuels>

Alternative Fuels Data Center. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://afdc.energy.gov/fuels/prices.html>

Data Mining Resources <http://www.scd.ucar.edu/hps/GROUPS/dm/dm.html>

DNV GL. (2019). «*Comparison of Alternative Marine Fuels*». pages 1–65, https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2019/09/19-09-16_Alternative-Marine-Fuels-Study_final_report.pdf.

DNV. (2018). «*Maritime Forecast to 2050*», Energy Transition Outlook. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://eto.dnv.com/2018/maritime>.

DNV, (2023). «*EU ETS: Preliminary agreement to include shipping in the EU's Emission Trading System from 2024*». Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.dnv.com/news/eu-ets-preliminary-agreement-to-include-shipping-in-the-eu-s-emission-trading-system-from-2024-238068>

Environment (2023). «*Alternative Sources of Power*». Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.emsa.europa.eu/sustainable-shipping/alternative-fuels.html>

Global Petrol Prices. Retail energy price data. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: Gasoline and diesel prices by country | GlobalPetrolPrices.com

Greenvoyage 2050, IMO, (2023). «*Alternative marine fuels: Regulatory mapping*». Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://greenvoyage2050.imo.org/alternative-marine-fuels-regulatory-mapping/>

IEA. (2019). «*The future of hydrogen*». In International Energy Agency. <https://doi.org/10.1787/1e0514c4-en>

- IEA. (2020). «*Key world energy statistics*». In International Energy Agency. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.iea.org/reports/key-worldenergy-statistics-2020>
- International energy agency (2022). «The Role of Low-Carbon Fuels in the Clean Energy Transitions of the Power Sector» <https://www.iea.org/reports/the-role-of-low-carbon-fuels-in-the-clean-energy-transitions-of-the-power-sector/executive-summary>
- International energy agency (2020). Indicative shipping fuel cost ranges <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/indicative-shipping-fuel-cost-ranges>
- International Maritime Organization, (2023). «*Training seafarers for a decarbonized future*» <https://www.imo.org/en/MediaCentre/Pages/WhatsNew-2014.aspx>
- IMO. Marine Environment/ Pollution Prevention/ «*Decarbonization and Clean air in shipping*». Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Decarbonization%20and%20Clean%20air%20in%20shipping.aspx>
- SEA\LNG Ltd (2019). «Comparison of Alternative Marine Fuels». Report Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2019/09/SEA-LNG-DNV-GL-Comparison-of-Alternative-Marine-Fuels-2019_09.pdf
- NorthStandard, (2023). Alternative fuels. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.standard-club.com/knowledge-news/alternative-fuels/faqs/>
- Shipmanagment, (2023). «Clarksons Shipbuilding Review 2022» Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://shipmanagementinternational.com/clarksons-shipbuilding-review-2022-shows-lng-and-container-vessels-dominated-new-orders/> & <https://insights.clarksons.net/2022-shipbuilding-review/>
- SINAY Maritime data solution (2022). «Alternative Fuels In The Shipping Industry And Why We Need Them». Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://sinay.ai/en/alternative-fuels-in-the-shipping-industry-and-why-we-need-them/>
- Whitepaper Alternative fuels outlook for shipping (2022). Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/alternative-fuels-outlook-shipping>

- ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΗ ΚΕΝΗ -

Παράρτημα Ι



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΔΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ”

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

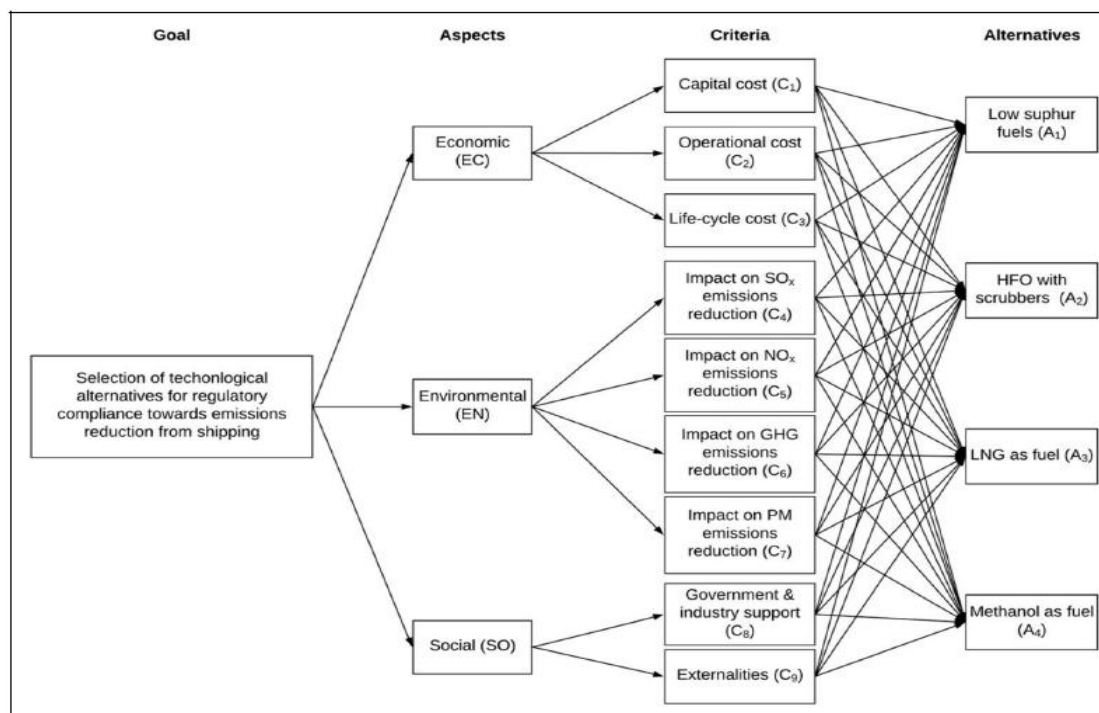
(Αναφερθείσες μελέτες στο Κεφ. 1 § 3 παρούσας εργασίας)

Κριτήρια που χρησιμοποίησε η κάθε μέθοδος & βάρη που τους αποδόθηκαν

❖ Από την μελέτη των Khanh Q. Bui, Aykut I Olcer, Momoko Kitada και Fabio Ballini, (2020). « *Selecting technological alternatives for regulatory compliance towards emissions reduction from shipping: An integrated fuzzy multi-criteria decision-making approach under vague environment* ».

Κριτήρια που χρησιμοποίησε η μέθοδος

Η αξιολόγηση για τεχνολογικές εναλλακτικές λύσεις για τη μείωση των εκπομπών από τα πλοία έχει εξεταστεί σε δύο επίπεδα: πτυχές και κριτήρια. Με βάση την έννοια της βιώσιμης ανάπτυξης, η επιλογή των πτυχών ορίζεται ως τρεις πυλώνες που απεικονίζονται παρακάτω, με στόχο την επίτευξη οικονομικής ευημερίας, περιβαλλοντικής υγείας και κοινωνικής ευθύνης.



Σχήμα 1: Ιεραρχικό πλαίσιο λήψης αποφάσεων για την επιλογή εναλλακτικών λύσεων για κανονιστική συμμόρφωση προς τη μείωση των εκπομπών από τη ναυτιλία.

Βάρη που αποδόθηκαν στα κριτήρια

(Βάρη οικονομικής, περιβαλλοντικής και κοινωνικής πτυχής.)

Πίνακας 1. Απεικόνιση βαρών οικονομικής, περιβαλλοντικής και κοινωνικής πτυχής.

Aspects	Fuzzy weight	Normalized weight
EC	(0.3428, 0.6488, 1.1944)	0.7523
EN	(0.1425, 0.2693, 0.5291)	0.2477
SO	(0.0543, 0.0819, 0.1297)	0.0000

EC: economic; EN: environmental; SO: social.

Πίνακας 2. Βάρη κριτηρίων από οικονομική άποψη.

Criteria	Fuzzy weight	Normalized weight
C ₁	(0.3235, 0.6341, 1.2034)	0.7124
C ₂	(0.1473, 0.2823, 0.5616)	0.2876
C ₃	(0.0551, 0.0835, 0.1365)	0.0000

Πίνακας 3. Βάρη κριτηρίων σε περιβαλλοντική πτυχή.

Criteria	Fuzzy weight	Normalized weight
C ₄	(0.3011, 0.5191, 0.8632)	0.6619
C ₅	(0.1388, 0.2543, 0.5027)	0.2861
C ₆	(0.0934, 0.1800, 0.3300)	0.0520
C ₇	(0.0315, 0.0466, 0.0747)	0.0000

Πίνακας 3. Βάρη κριτηρίων σε κοινωνικό επίπεδο.

Criteria	Fuzzy weight	Normalized weight
C ₈	(0.4255, 0.7000, 1.1846)	1.0000
C ₉	(0.2031, 0.3000, 0.4062)	0.0000

Το ολικό ασαφές βάρος του κριτηρίου C1 = το ασαφές βάρος του C1 σε οικονομική πτυχή * το κανονικοποιημένο βάρος της οικονομικής πτυχής = (0,3235, 0,6341, 1,2034) * 0,7523=(0,2434, 0,4771 0,9053). Κάνοντας τον ίδιο τρόπο, ο Πίνακας 4 αντιπροσωπεύει τα ολικά ασαφή βάρη των κριτηρίων.

Πίνακας 4. Ολικά ασαφή βάρη των κριτηρίων

Criteria	Global fuzzy weight
C ₁	(0.2434, 0.4771, 0.9053)
C ₂	(0.1108, 0.2124, 0.4225)
C ₃	(0.0415, 0.0629, 0.1027)
C ₄	(0.0746, 0.1286, 0.2138)
C ₅	(0.0344, 0.0630, 0.1245)
C ₆	(0.0231, 0.0446, 0.0817)
C ₇	(0.0078, 0.0115, 0.0185)
C ₈	(0.0000, 0.0000, 0.0000)
C ₉	(0.0000, 0.0000, 0.0000)

❖ Όλα τα στοιχεία έχουν εξαχθεί από τη μελέτη θέματος.

❖ Από την μελέτη των Julia Hanssona, Stina Manssonc, Selma Brynolf, Maria Grahna (2019). «*Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders*»

Κριτήρια και υποκριτήρια που λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή εναλλακτικών καυσίμων πλοίων.

Πίνακας 1. Κριτήρια και υποκριτήρια για την επιλογή εναλλακτικών καυσίμων.

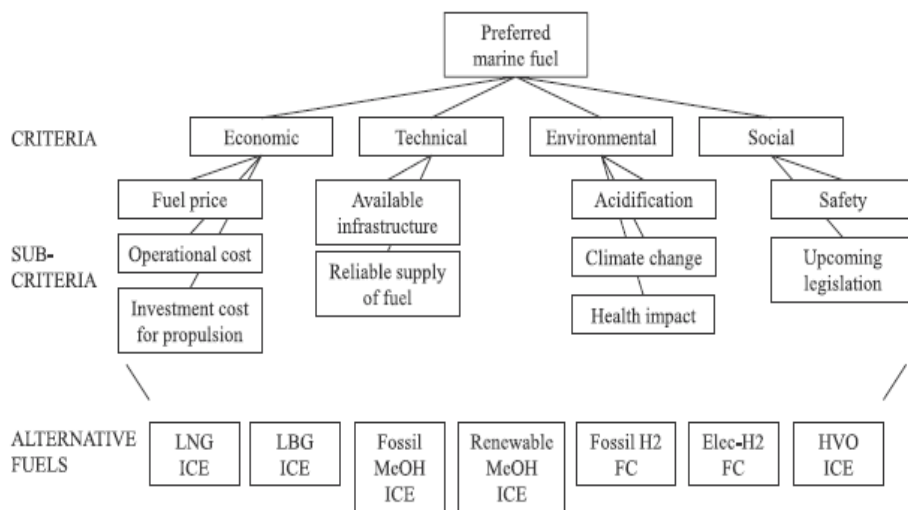
Main criterion	Sub-criterion	Definition and delimitation
Economic	Investment cost for propulsion	Represented by the capital cost of propulsion and associated on-board infrastructure per installed engine capacity (i.e., normalized to the power output) and includes cost of engines, fuel tanks, pipelines, gas alarm systems, and fuel processors, etc., on-board.
	Operational cost Fuel price	Refers to cost of crew, crew training, insurance, and maintenance cost (excluding fuel cost). Represented by the estimated relative price/cost differences among the investigated fuels based on bunker price (when available), production cost estimates, and estimates of raw-material prices and fuel production efficiencies.
Technical	Available infrastructure	Refers to compatibility with existing infrastructure (including ports, fuel infrastructure, and engines), current amount of storage, distribution, and bunkering facilities as well as maturity of ship propulsion technology.
	Reliable supply of fuel	Refers to raw material availability, current production capacity and use as marine fuel, as well as energy security indicated by global distribution of supply potential and political stability or risk for supply disruptions in countries with large supply potential [49–52]. For natural gas, raw material availability depends on the reserves, and for biofuels it depends on the annual biomass production level, which is influenced by land availability and forestry and/or waste streams.
Environmental	Acidification	Represented by acidification potential based on NO _x and SO ₂ emissions from combustion of fuels ^a .
	Health impact	Represented by particulate matter formation potential (in terms of PM _{2.5} -equivalents) from combustion considering PM ₁₀ , SO ₂ and NO _x . PM is extremely small particles or liquids like dust, smog, and soot and is the main contributor to health impacts from shipping [3].
Social	Climate change ^b	Represented by the global warming potential for CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O emissions in a 100-year time horizon (GWP ₁₀₀) [53] from a lifecycle, well-to-propeller ^c , perspective.
	Safety	Includes the risk of fire, explosion, and health hazards related to handling the fuel, which depend on fuel properties such as auto-ignition point, flammability range, flashpoint, and toxicity.
	Upcoming legislation	Represented by the possibility for meeting known regulations connected to SO _x , NO _x , and GHG reductions linked to SECA and NECA ^d , and existing GHG reductions targets as well as possible future emission regulations (e.g., connected to particle and ammonia emissions)

^a Acidification potential is based on NO_x and SO₂ emissions from combustion using characterisation factors for acidification potential based accumulated exceedance methods for NO_x and SO₂.

^b Since the environmental assessment has an attributional LCA perspective that considers emissions from the activities within the product life cycle only, indirect land use changes should not be considered.

^c Including e.g., methane emissions (leakage) from biogas plants and upgrading facilities and direct land use effects in terms of GHG impact.

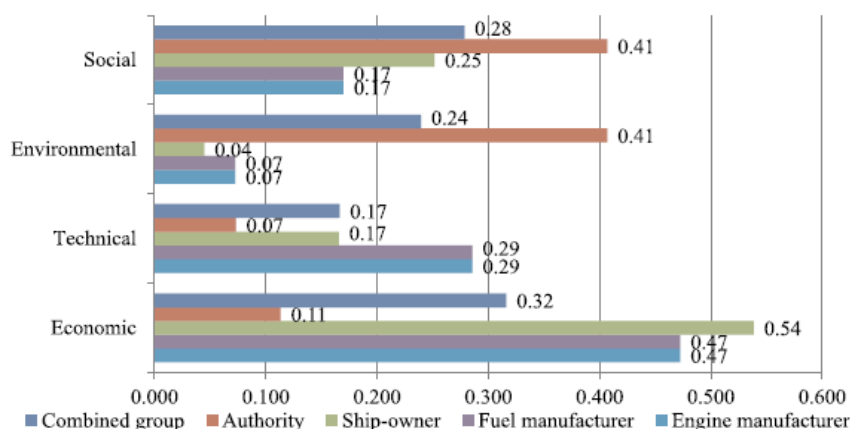
^d SECA and NECA means Emission Control areas for shipping linked to regulations of sulphur and NO_x.



Σχήμα 1. Δέντρο ιεραρχίας για το πρόβλημα απόφασης κατά την επιλογή του εναλλακτικού καυσίμου πλοίων με την υψηλότερη συνολική απόδοση για τα κριτήρια και τα υποκριτήρια που περιλαμβάνονται.

Βάρη που αποδόθηκαν στα κριτήρια

Για καθένα από τα κύρια κριτήρια, η σχετική σημασία παρουσιάζεται στο Σχ. 2 για τη συνδυασμένη ομάδα και για τις τέσσερις ομάδες ενδιαφερομένων (εκφρασμένες ως κανονικοποιημένες προτεραιότητες). Η σχετική σημασία κάθε υποκριτηρίου (εκφρασμένη ως κανονικοποιημένες προτεραιότητες) παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Η κατανομή των βαρών (κανονικοποιημένες προτεραιότητες) από τις επιμέρους συγκρίσεις κριτηρίων και υποκριτηρίων ανά ζεύγη για όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.



Σχήμα 2. Η σχετική σημασία των κύριων κριτηρίων.

Πίνακας 2. Η σχετική σημασία των υποκριτηρίων.

Sub-criteria	Priority (Priority order in parenthesis)				
	Combined all stakeholders	Authorities	Ship-owners	Fuel producers	Engine manufacturers
Investment cost	0.26 (2)	0.25 (2)	0.20 (2)	0.23 (2)	0.23 (2)
Operational cost	0.16 (3)	0.25 (2)	0.07 (3)	0.12 (3)	0.12 (3)
Fuel price	0.58 (1)	0.50 (1)	0.73 (1)	0.65 (1)	0.65 (1)
Acidification	0.21 (3)	0.19 (2)	0.10 (3)	0.11 (3)	0.26 (2)
Climate change	0.50 (1)	0.73 (1)	0.67 (1)	0.58 (1)	0.11 (3)
Health impact	0.30 (2)	0.08 (3)	0.23 (2)	0.31 (2)	0.64 (1)
Available infrastructure	0.29 (2)	0.17 (2)	0.20 (2)	0.20 (2)	0.20 (2)
Reliable supply of fuel	0.71 (1)	0.83 (1)	0.80 (1)	0.80 (1)	0.80 (1)
Safety	0.48 (2)	0.25 (2)	0.80 (1)	0.17 (2)	0.17 (2)
Upcoming legislation	0.52 (1)	0.75 (1)	0.20 (2)	0.83 (1)	0.83 (1)

Πίνακας 3. Κατανομή προτεραιοτήτων από την επιμέρους ανά ζεύγη σύγκριση κριτηρίων και υποκριτηρίων για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς.

	Min. priority	Max. priority	Median priority
Economic	0.035	0.632	0.420
Technical	0.055	0.286	0.113
Environmental	0.047	0.514	0.229
Social	0.055	0.564	0.222
Investment cost	0.105	0.637	0.243
Operational cost	0.072	0.481	0.105
Fuel price	0.200	0.731	0.637
Acidification	0.069	0.455	0.163
Climate change	0.091	0.731	0.582
Health impact	0.105	0.594	0.279
Available infrastructure	0.125	0.750	0.250
Reliable supply of fuel	0.250	0.875	0.750
Safety	0.167	0.833	0.333
Upcoming Legislation	0.167	0.833	0.667

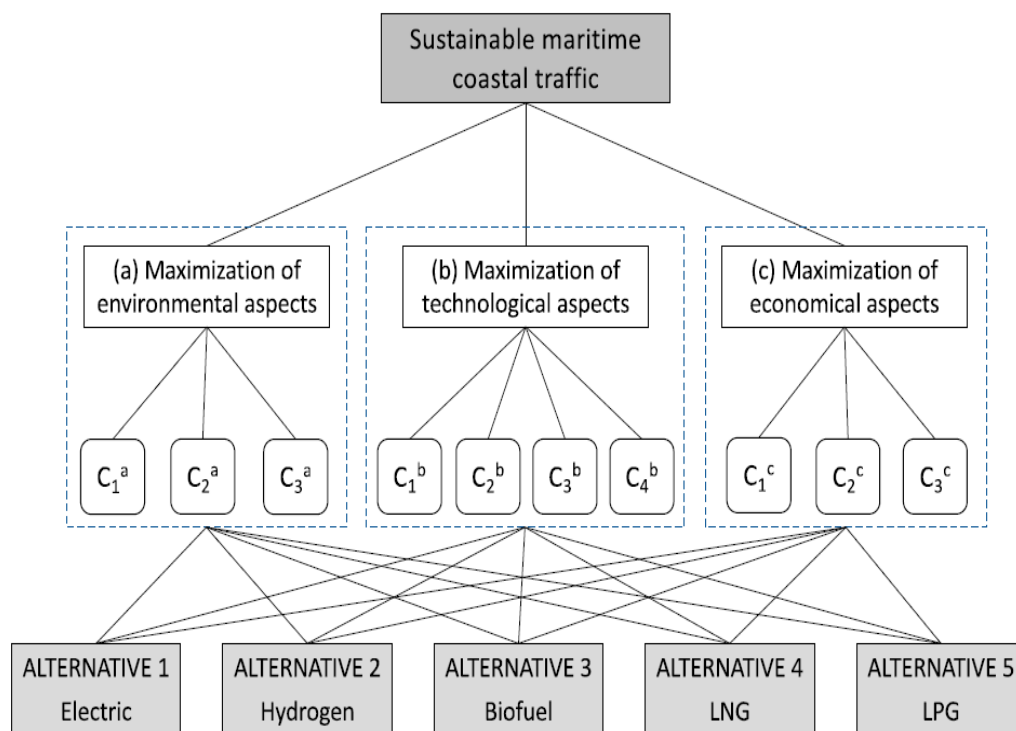
❖ Όλα τα στοιχεία έχουν εξαχθεί από τη μελέτη θέματος.

❖ Από την μελέτη των Nikola Mandic, Helena Ukić Boljat, Toni Kekez και Lidija Runko Luttenberger, (2021). «*Multicriteria Analysis of Alternative Marine Fuels in Sustainable Coastal Marine Traffic*»

Κριτήρια που χρησιμοποίησε η μέθοδος

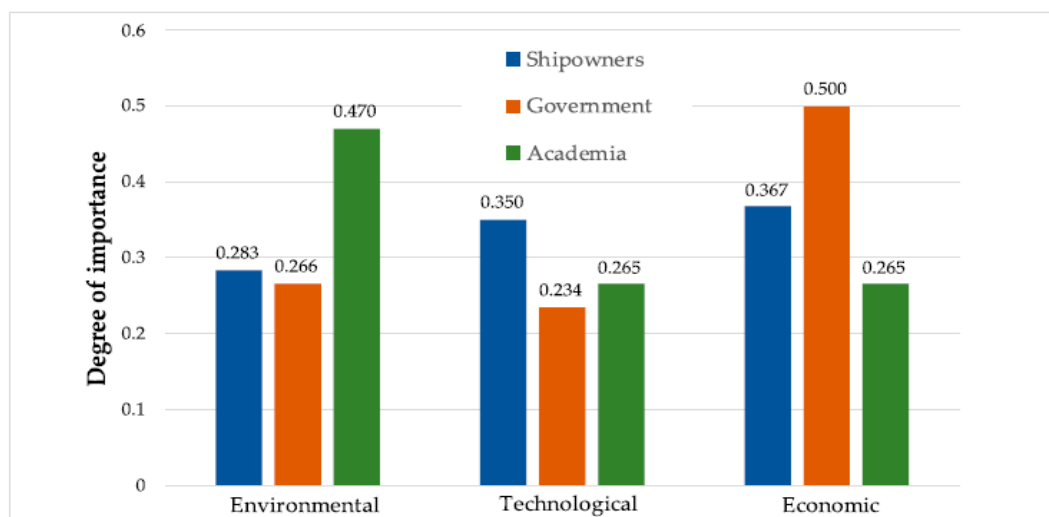
Πίνακας 1. Επιλεγμένα κριτήρια για κάθε ομάδα κριτηρίων

Group	Criteria
Environmental	Climate change impact C_1^a Acidification C_2^a Exhaust emissions C_3^a
Technological	Available infrastructure C_1^b Reliability of supply C_2^b Adaptation of ship engines C_3^b Safety of fuel C_4^b
Economical	Investment C_1^c Operational cost C_2^c Fuel price C_3^c



Σχήμα 1. Ιεραρχική δομή του προβλήματος επιλογής εναλλακτικών καυσίμων.

Βάρη που αποδόθηκαν στα κριτήρια



Σχήμα 2. Ορισμός της σημασίας των διαφορετικών στόχων

Πίνακας 2. Επισκόπηση της αξιολόγησης της σημασίας των κριτηρίων από τρεις ομάδες ενδιαφερομένων.

Criteria	Shipowners	Government	Academia
Climate change impact C_1^a	0.367	0.333	0.346
Acidification C_2^a	0.300	0.333	0.308
Exhaust emissions C_3^a	0.333	0.333	0.346
Available infrastructure C_1^b	0.273	0.242	0.237
Reliability of supply C_2^b	0.273	0.242	0.237
Adaptation of ship engines C_3^b	0.204	0.242	0.263
Safety of fuel C_4^b	0.250	0.274	0.263
Investment C_1^c	0.294	0.310	0.345
Operational cost C_2^c	0.294	0.345	0.310
Fuel price C_3^c	0.412	0.345	0.345

Πίνακας 3. Επισκόπηση των αποτελεσμάτων των σταθμίσεων κανονικοποιημένων κριτηρίων που προέκυψαν από τρεις ομάδες ενδιαφερομένων.

Criteria	Shipowners	Government	Academia	Average
Climate change impact C_1^a	0.1039	0.0886	0.1626	0.1184
Acidification C_2^a	0.0849	0.0886	0.1448	0.1061
Exhaust emissions C_3^a	0.0941	0.0886	0.1626	0.1151
Available infrastructure C_1^b	0.0956	0.0566	0.0628	0.0717
Reliability of supply C_2^b	0.0956	0.0566	0.0628	0.0717
Adaptation of ship engines C_3^b	0.0714	0.0566	0.0697	0.0659
Safety of fuel C_4^b	0.0875	0.0643	0.0697	0.0738
Investment C_1^c	0.1079	0.1551	0.0914	0.1181
Operational cost C_2^c	0.1079	0.1725	0.0822	0.1209
Fuel price C_3^c	0.1512	0.1725	0.0914	0.1384

❖ Όλα τα στοιχεία έχουν εξαχθεί από τη μελέτη θέματος.

Παράρτημα II



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΑΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ”

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Ερωτηματολόγιο επιλογής κριτηρίων εναλλακτικών καυσίμων

Ποια κριτήρια θεωρείται κατάλληλα να συμπεριληφθούν σε μελέτη επιλογής εναλλακτικών καυσίμων στη ναυτιλιακή βιομηχανία στο πλαίσιο μείωσης των εκπομπών ρύπων ;

	Κριτήρια	Ναι/Όχι	Παρατηρήσεις	
Τεχνικά Κριτήρια	Διαθέσιμη υποδομή			✓
	Αξιοπιστία παροχής			✓
	Προσαρμογή κινητήρα πλοίου			✓
	Ανεφοδιασμός			
	Διαδικασίες διανομής αποθήκευσης			
Οικονομικά κριτήρια	Λειτουργικό κόστος			✓
	Τιμή καυσίμου			✓
	Επενδυτικό κόστος			✓
	Κόστος συντήρησης			
	Κόστος τροποποιήσεων - μετασκευών εγκατάστασης			
	Κόστος εκπαίδευσης πληρωμάτων			
	Κόστος παραγωγής			
	Κόστος κύκλου ζωής			
Περβαλλοντικά κριτήρια	Κλιματική αλλαγή			✓
	Επιπτώσεις σε ατμόσφαιρα			✓
	Εκπομπές καυσαερίων			
	Οξίνιση			✓
Κοινωνικά κριτήρια	Ηθική			
	Ασφάλεια			✓
	Νομοθεσία			✓

❖ Με ✓ έχουν μαρκκαριστεί οι τελικές επιλογές των αποφασιζόντων.

Παράρτημα III



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΑΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Πίνακας επιλογών/ κριτηρίων εναλλακτικών καυσίμων

ΕΠΙΛΟΓΕΣ/ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
		ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΙΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΟΞΙΝΗΣΗ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
LNG												
LPG												
H ₂												
NH ₃												
CH ₃ OH												
Βιοκαύσιμα												

Ο Πίνακας επιλογών / κριτηρίων σε μελέτη επιλογής εναλλακτικών καυσίμων στη ναυτιλιακή βιομηχανία στο πλαίσιο μείωσης των εκπομπών ρύπων, παρακαλείται να συμπληρωθεί κατά σειρά προτίμησης των εναλλακτικών καυσίμων στο πεδίο κατάταξης, το οποίο θα αποτελεί τη προδιάταξη των επιλογών του αποφασίζοντα και εν συνεχεία κατά κρίση και κατά προσέγγιση αυτού, να συμπληρωθούν τα υπόλοιπα πεδία των κριτηρίων με αξιολόγηση δεκαβάθμιας κλίμακας (1-10), όπου 1 η χειρότερη και 10 αντίστοιχα η καλύτερη αξιολόγηση.

(Παραδοχή: Επιλέχθηκε η κλίμακα 1-10 τόσο των ποιοτικών όσο και των ποσοτικών κριτηρίων, λόγω μη διαθεσιμότητας τιμών ή και δυνατότητα εξεύρεσης στο σύνολο των εναλλακτικών καυσίμων για την ίδια περίοδο έρευνας, τόσο από επίσημες πηγές της αγοράς, όσο και από την βιβλιογραφία καθώς και το διαδίκτυο.

(Σημείωση: Το παρόν αρχείο έχει δοθεί σε μορφή excel στους αποφασίζοντες)

Παράρτημα IV



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΑΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ”

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΕΝΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ-ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΑΠΟ 7 ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΕΣ (DM)

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗ UTASTAR

DECISION MAKER 1

ΕΠΙΛΟΓΕΣ/ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
		ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΘΕΞΙΝΕΟ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
LNG	1	9	9	7	9	8	9	5	5	5	9	9
LPG	2	7	7	6	8	8	7	3	2	5	8	8
H2	5	2	3	6	4	5	4	9	9	9	6	4
NH3	6	4	3	4	3	2	3	8	9	6	5	4
CH3OH	4	6	6	8	4	4	4	8	9	7	5	4
Βιοκαύσιμα	3	7	7	7	6	7	7	8	8	7	8	6

DECISION MAKER 2

ΕΠΙΛΟΓΕΣ/ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
		ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΘΕΞΙΝΕΟ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
LNG	1	9	9	7	9	8	9	5	5	5	9	9
LPG	1	8	8	6	8	8	8	6	5	5	9	9
H2	4	3	3	6	4	5	4	9	9	9	6	4
NH3	5	4	3	4	3	2	3	8	9	6	5	4
CH3OH	3	6	6	8	5	4	5	8	9	7	5	5
Βιοκαύσιμα	2	7	7	7	7	7	7	8	8	7	8	6

DECISION MAKER 3

ΕΠΙΛΟΓΕΣ/ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
		ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΗΣΙΝΙΟ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
LNG	1	8	8	7	9	8	9	5	6	6	9	9
LPG	2	7	7	6	8	8	7	4	4	6	8	8
H2	4	2	3	6	4	5	4	9	9	9	6	4
NH3	5	4	3	4	3	3	3	8	9	4	5	4
CH3OH	3	6	6	8	6	6	6	8	9	7	5	4
Βιοκαύσιμα	3	7	7	7	6	7	7	8	8	7	8	6

DECISION MAKER 4

ΕΠΙΛΟΓΕΣ/ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
		ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΗΣΙΝΙΟ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
LNG	1	9	9	7	9	8	9	5	5	5	9	9
LPG	2	8	8	8	8	8	7	5	5	5	8	8
H2	4	2	3	6	4	5	4	9	9	9	6	4
NH3	5	4	3	4	3	2	3	8	9	4	5	4
CH3OH	3	6	6	8	4	4	4	8	9	7	5	4
Βιοκαύσιμα	2	7	8	7	6	7	7	8	8	8	8	6

DECISION MAKER 5

ΕΠΙΛΟΓΕΣ/ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
		ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΟΞΙΝΙΟ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
LNG	1	9	9	8	9	8	9	5	5	5	9	9
LPG	2	7	7	7	8	8	7	5	5	5	8	8
H2	5	2	3	6	4	5	4	9	9	9	6	4
NH3	6	4	3	4	3	2	3	8	9	6	5	4
CH3OH	3	7	7	8	7	6	7	8	9	7	7	6
Βιοκαύσιμα	4	7	7	7	6	7	7	8	8	7	7	5

DECISION MAKER 6

ΕΠΙΛΟΓΕΣ/ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
		ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΗΣΙΝΙΟ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
LNG	1	8	8	7	9	8	8	5	7	4	10	8
LPG	2	6	7	6	7	7	7	6	6	6	9	8
H2	3	4	5	5	4	6	6	8	9	10	5	5
NH3	4	4	4	3	3	6	3	7	10	5	3	4
CH3OH	3	6	7	6	5	5	5	8	10	6	5	5
Βιοκαύσιμα	1	9	8	8	8	7	9	9	9	8	9	5

DECISION MAKER 7

ΕΠΙΛΟΓΕΣ/ ΚΡΙΤΗΡΙΑ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΙ			ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ			ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ			ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ	
		ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΥΠΟΔΟΜΗ	ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ	ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΠΛΟΙΟΥ	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	ΗΣΙΝΙΟ	ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ
LNG	1	9	10	9	9	8	9	7	6	6	9	9
LPG	1	7	9	8	7	7	6	7	6	7	9	9
H2	3	5	5	5	4	6	5	9	10	10	7	6
NH3	5	2	3	2	2	4	2	9	10	3	4	7
CH3OH	4	3	4	5	5	4	4	9	10	7	8	7
Βιοκαύσιμα	2	6	6	9	8	6	6	9	10	7	8	8

❖ Στο πλαίσιο της μορφοποίησης - μοντελοποίησης του προβλήματος, καθορίστηκε η μονοτονία, ο τύπος, η κλίμακα βαθμολογίας των κριτηρίων, το πλήθος των υποδιαστημάτων, των σημείων καθώς και η τιμή κατωφλίου προτίμησης $\delta=0,05$ και $\varepsilon = 0.0001$

Cri/atributes	Monot	Type	Worst	Best	a
ΥΠΟΔΟΜΗ	1	0	1	10	10
ΠΑΡΟΧΗ	1	0	1	10	10
ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ	1	0	1	10	10
ΛΚΟΣΤΟΣ	1	1	1	10	10
ΤΙΜΗ	1	1	1	10	10
ΕΡΚΟΣΤΟΣ	1	1	1	10	10
ΚΛΙΜΑ	1	0	1	10	10
ΕΚΠΟΜΠΕΣ	1	0	1	10	10
ΟΧΙΝΙΣΗ	1	0	1	10	10
ΑΣΦΑΛΕΙΑ	1	0	1	10	10
ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ	1	0	1	10	10

Παράρτημα V



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΔΑΚΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ”

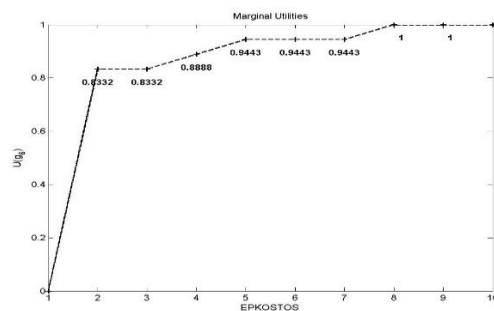
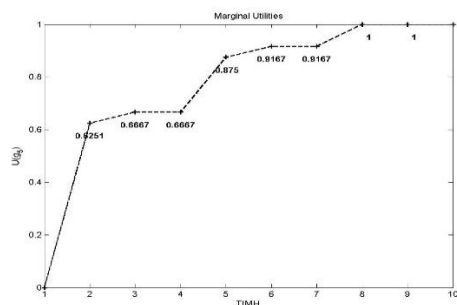
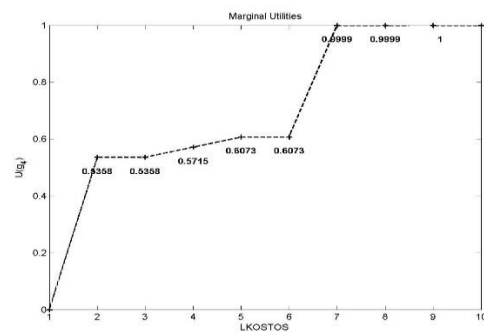
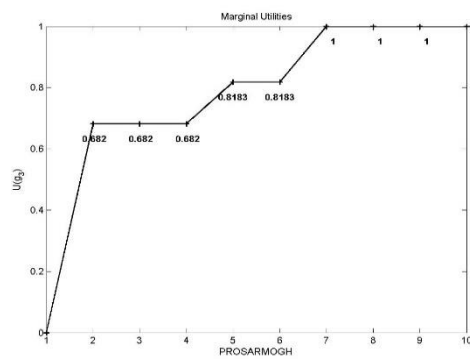
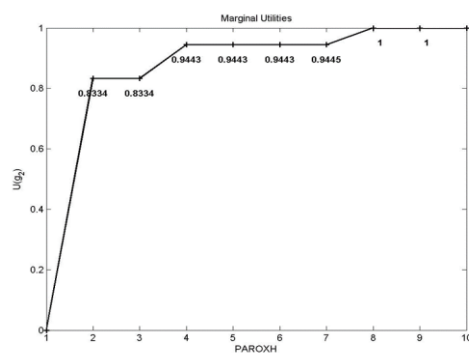
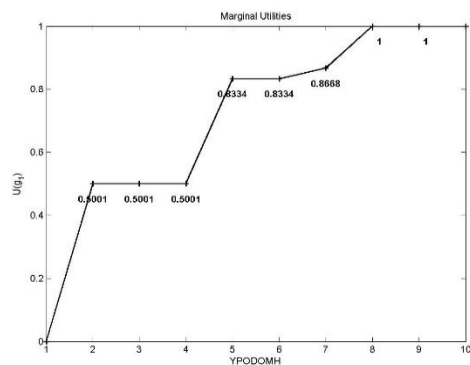
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

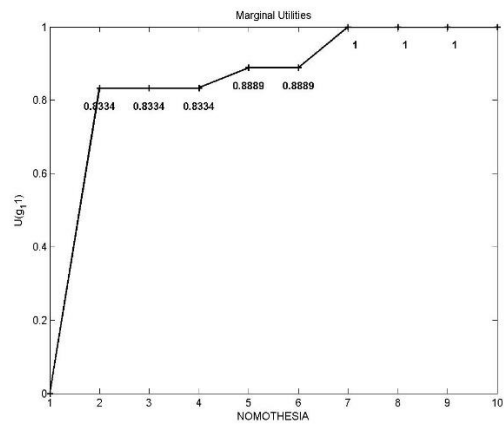
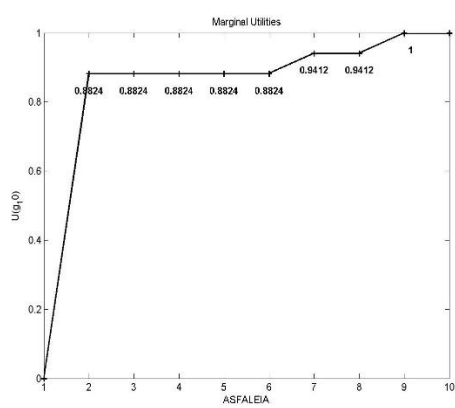
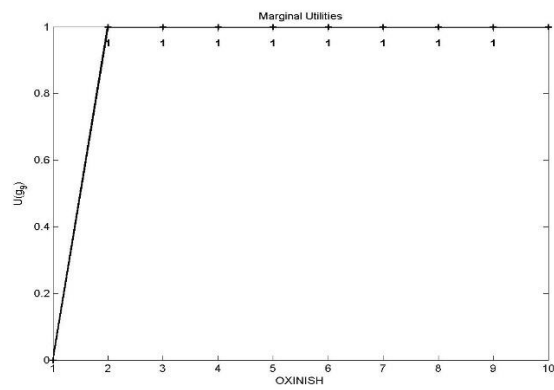
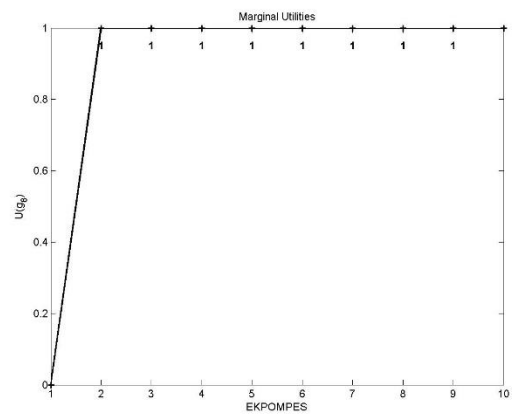
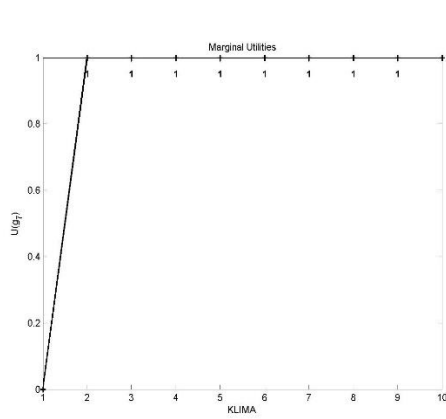
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ UTASTAR

DECISION MAKER 1

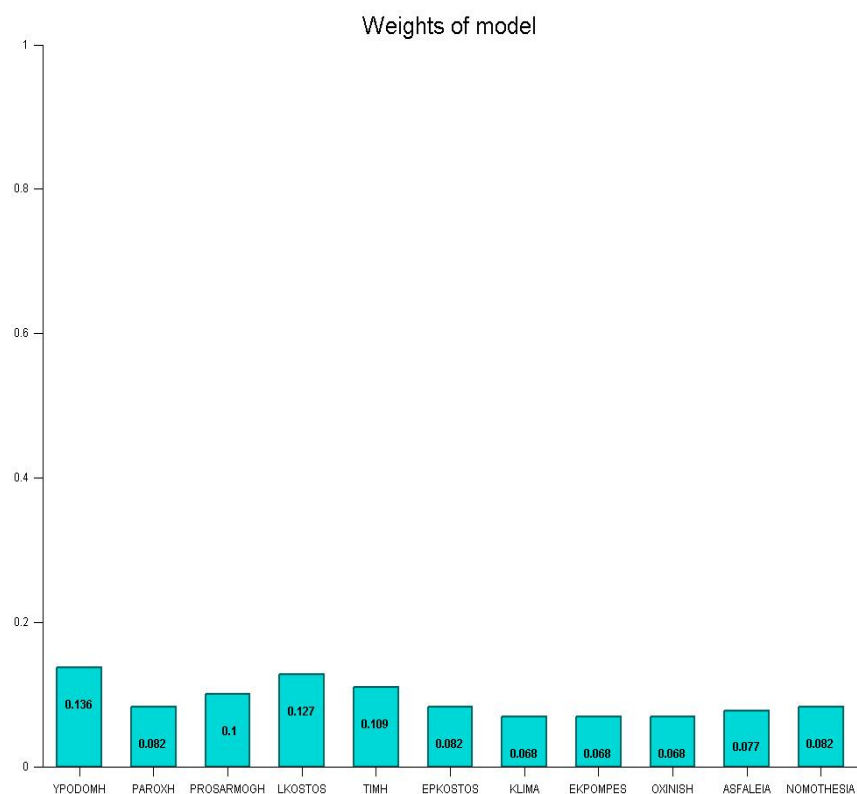
Ακολουθούν αποτελέσματα με Kendall's Tau = 1 και παραμέτρους επίλυσης $\delta = 0.05$, $\epsilon = 0.0001$

Α. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΞΙΑΣ 1^{ΟΥ} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

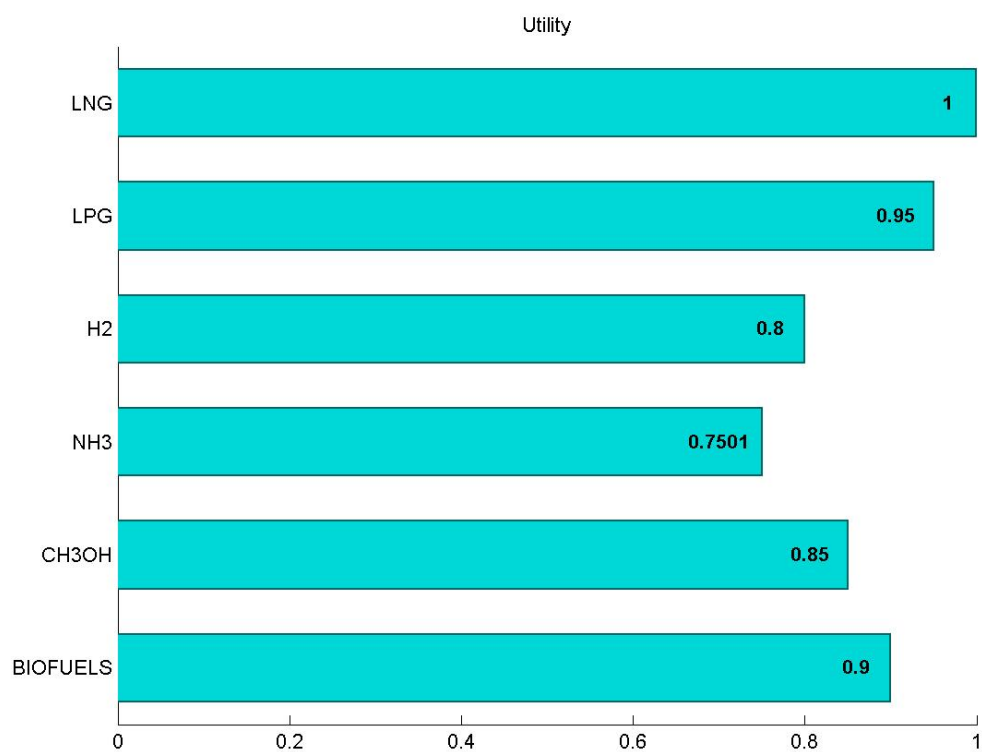




Β. ΒΑΡΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ 1^{ΟΥ} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ



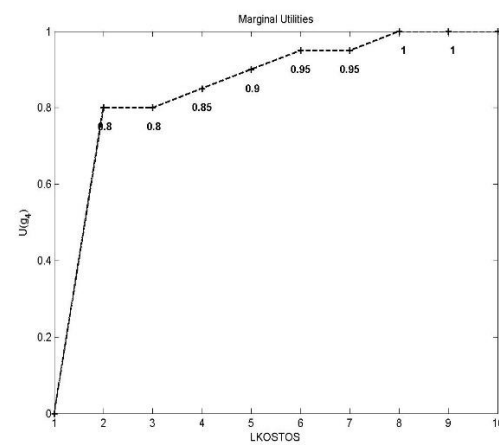
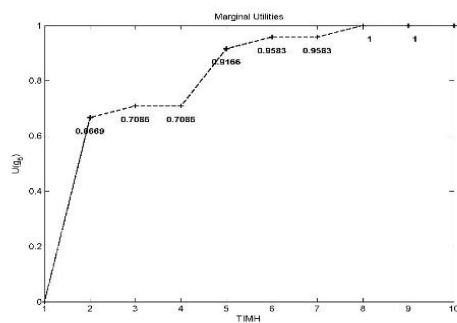
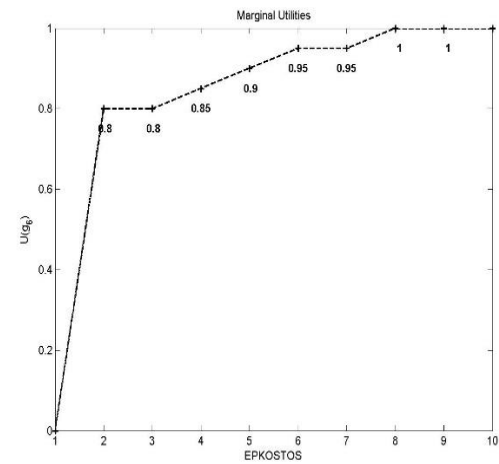
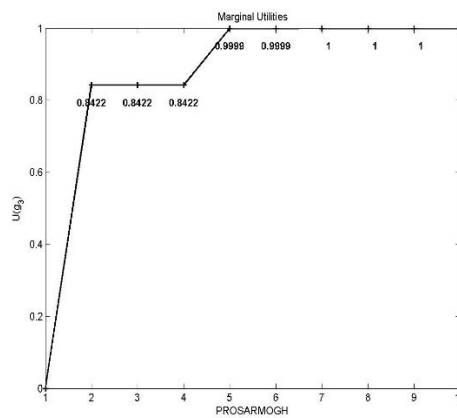
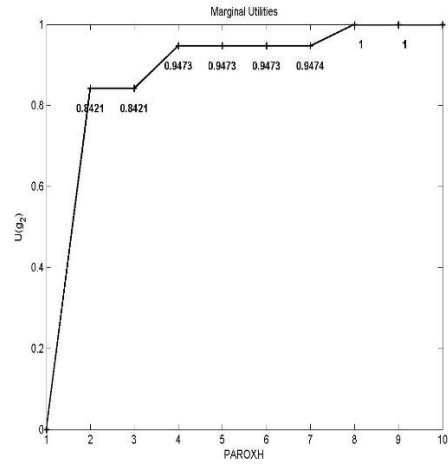
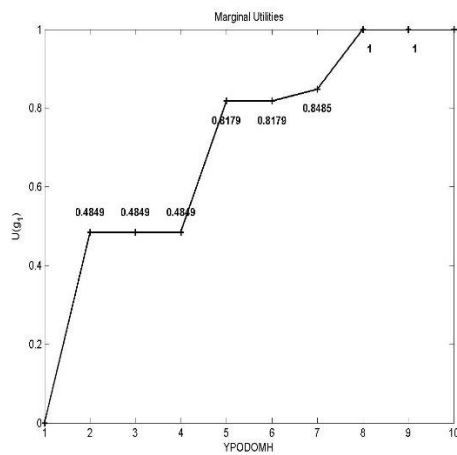
Γ. ΟΛΙΚΗ ΑΞΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ 1^{ΟΥ} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ

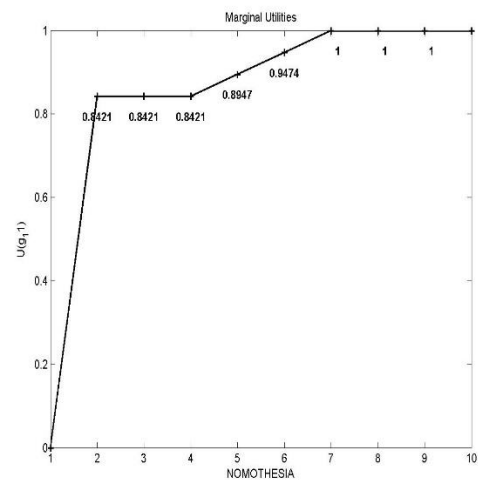
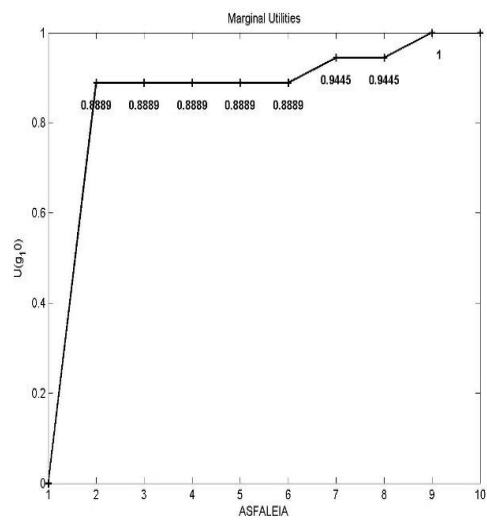
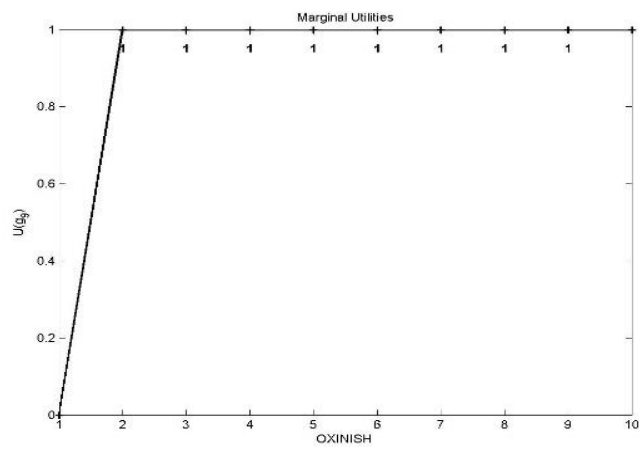
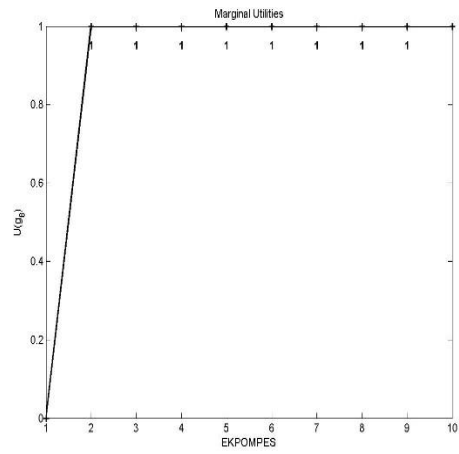
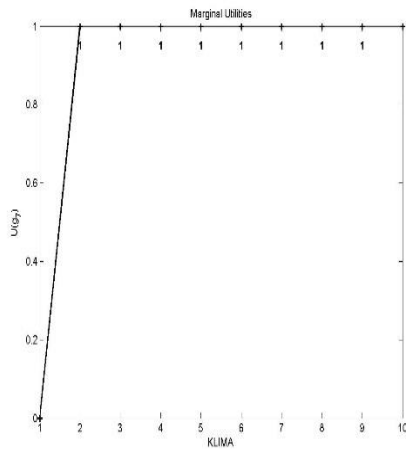


DECISION MAKER 2

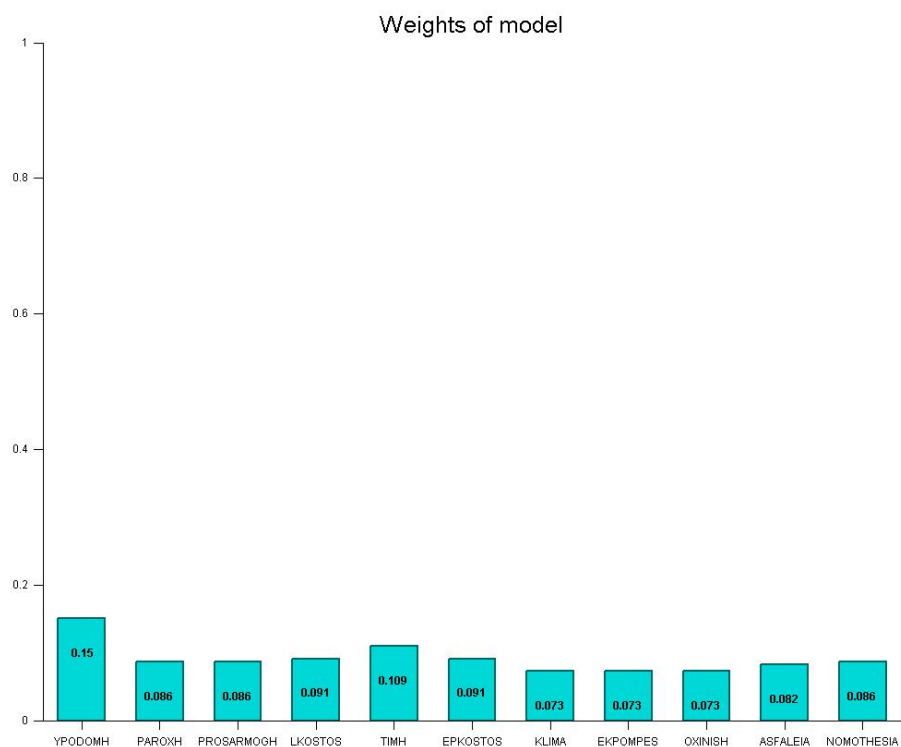
Ακολουθούν αποτελέσματα με Kendall's Tau = 1 και παραμέτρους επίλυσης $\delta = 0.05$, $\epsilon = 0.0001$

Α. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΞΙΑΣ 2^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

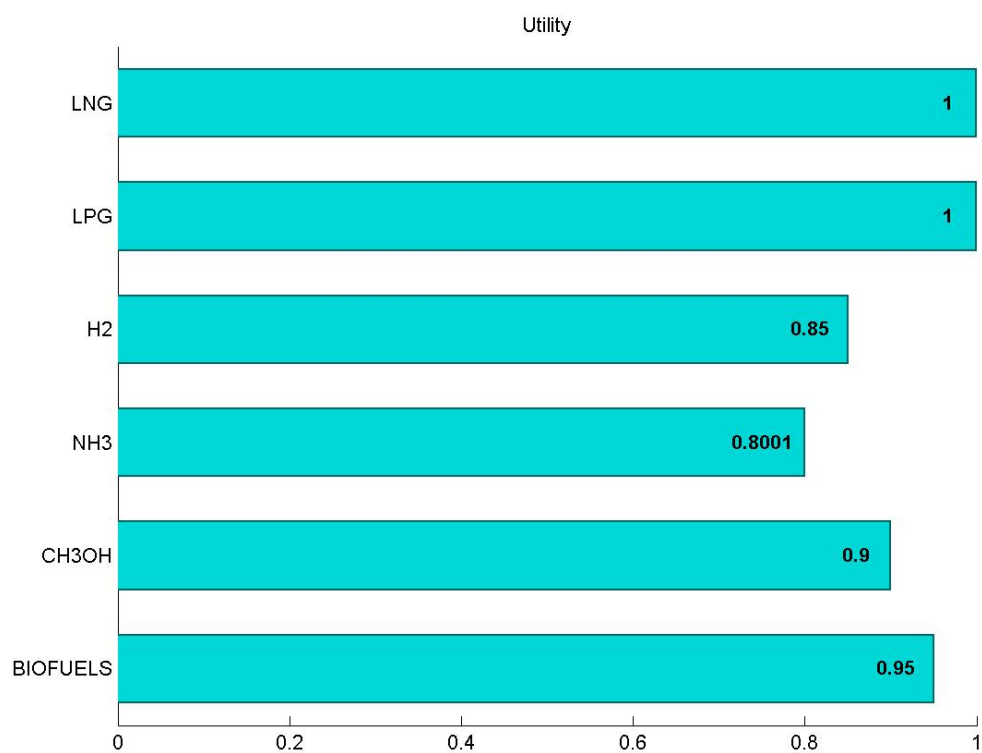




Β. ΒΑΡΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ 2^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ



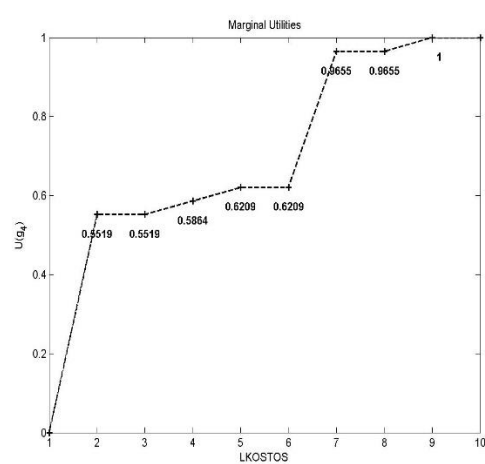
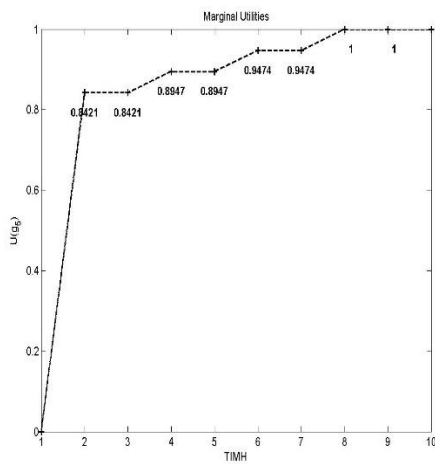
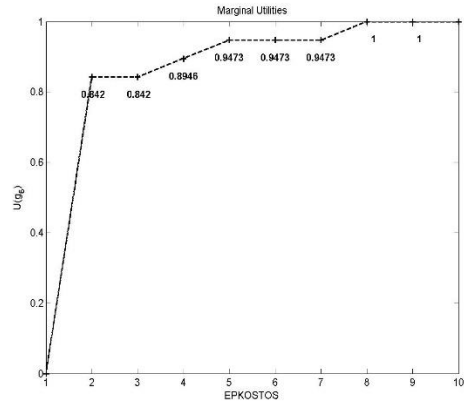
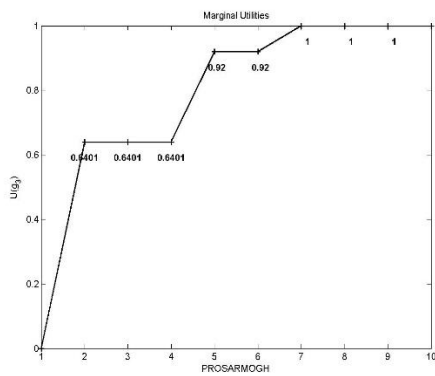
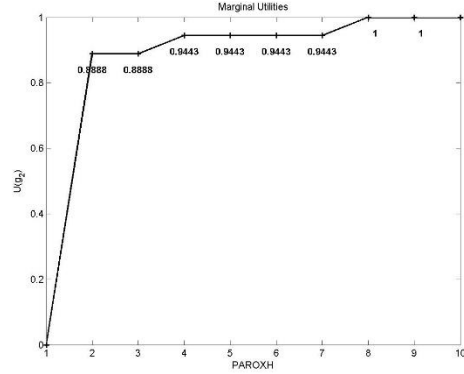
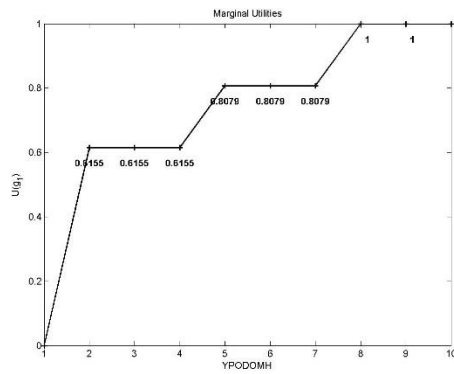
Γ. ΟΛΙΚΗ ΑΞΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ 2^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ

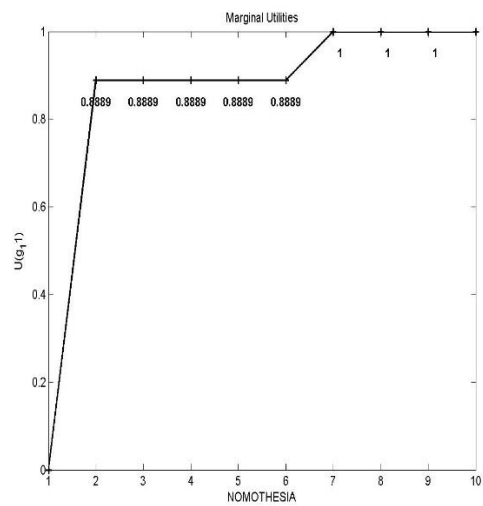
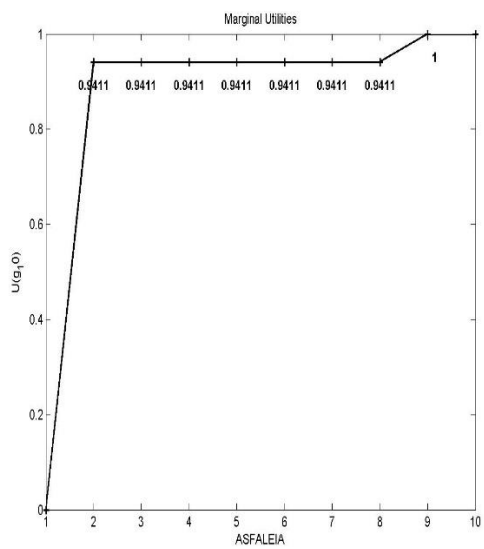
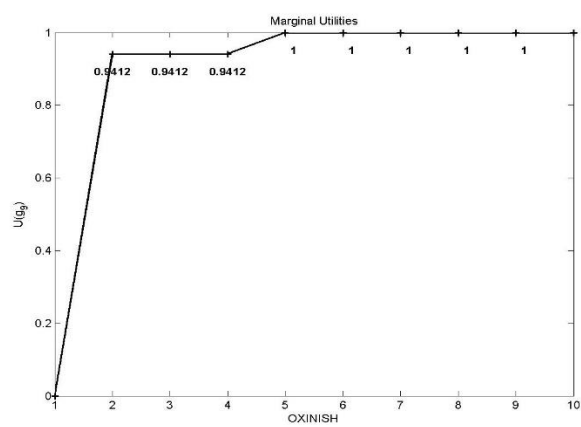
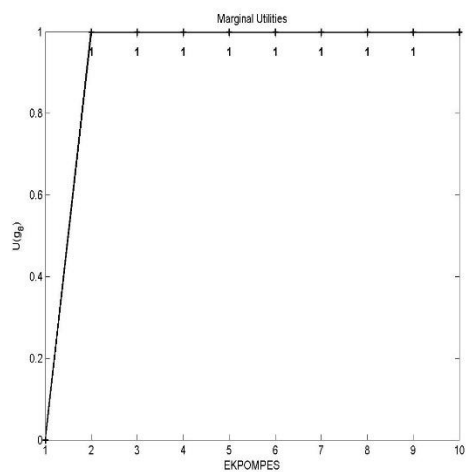
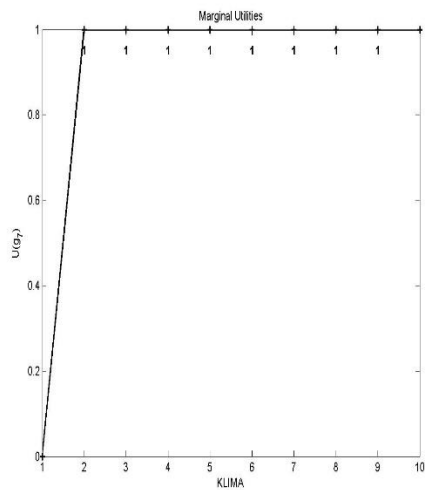


DECISION MAKER 3

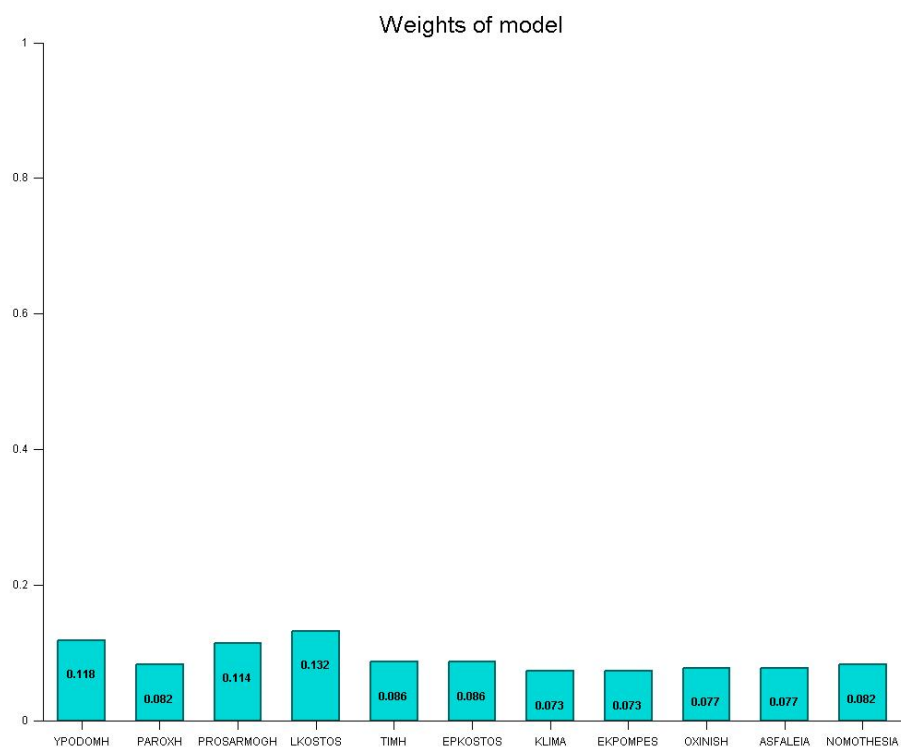
Ακολουθούν αποτελέσματα με Kendall's Tau = 1 και παραμέτρους επίλυσης $\delta = 0.05$, $\epsilon = 0.0001$

Α. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΞΙΑΣ 3^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

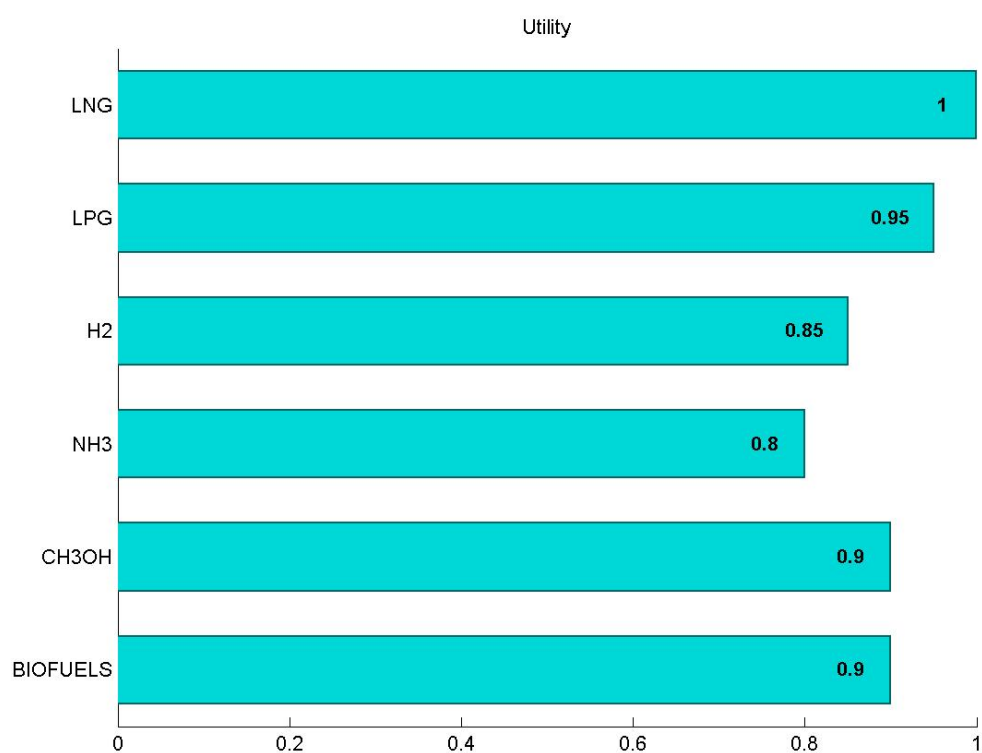




Β. ΒΑΡΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ 3^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ



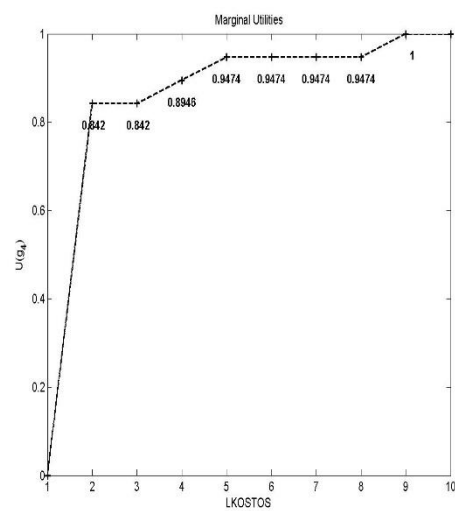
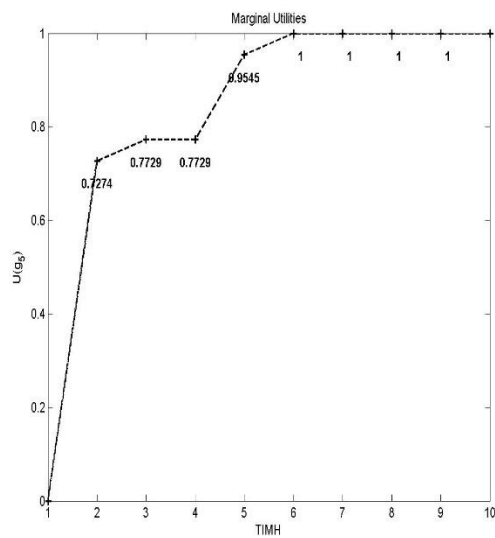
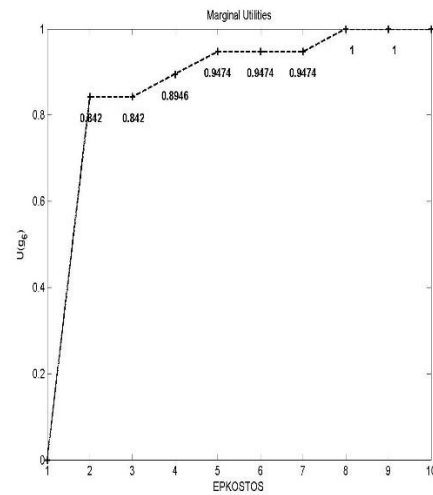
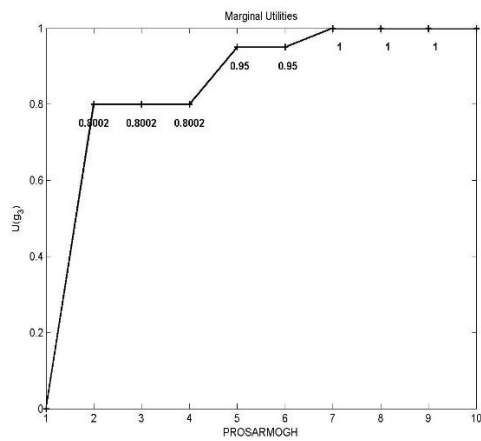
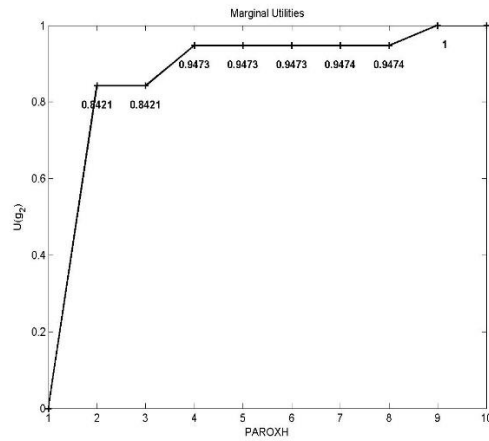
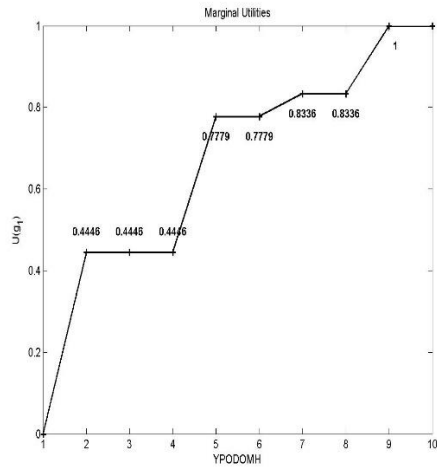
Γ. ΟΛΙΚΗ ΑΞΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ 3^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ

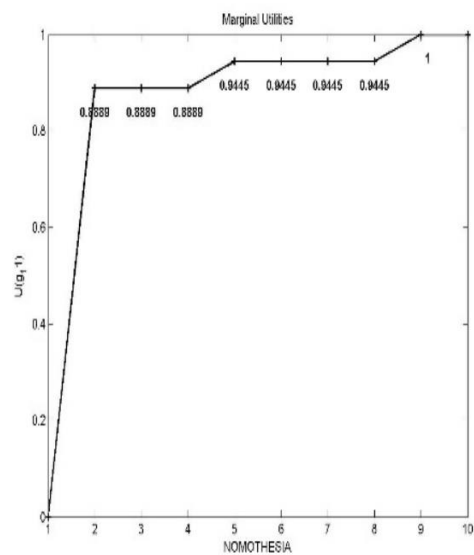
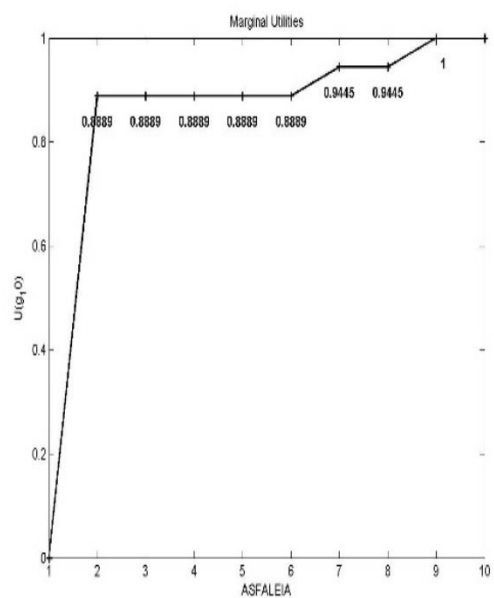
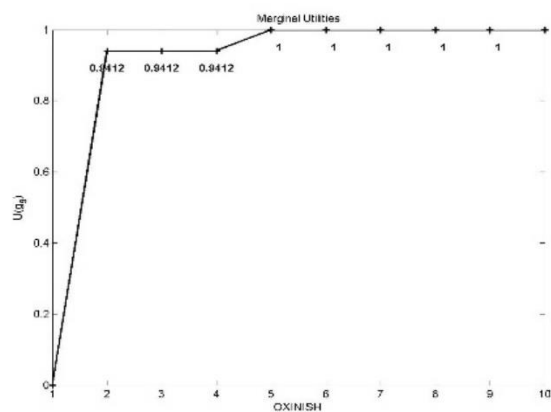
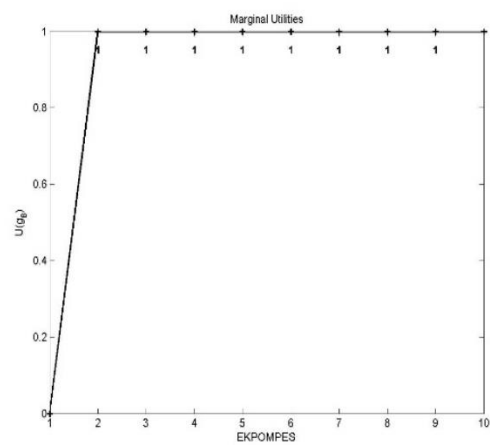
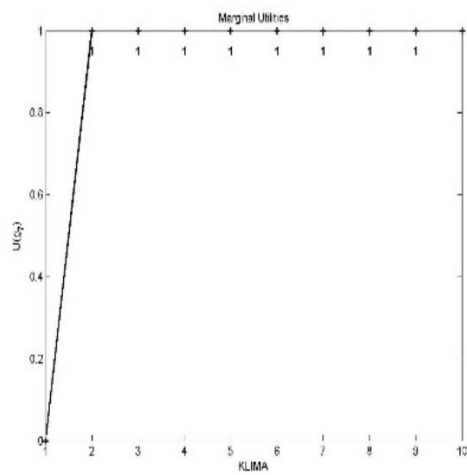


DECISION MAKER 4

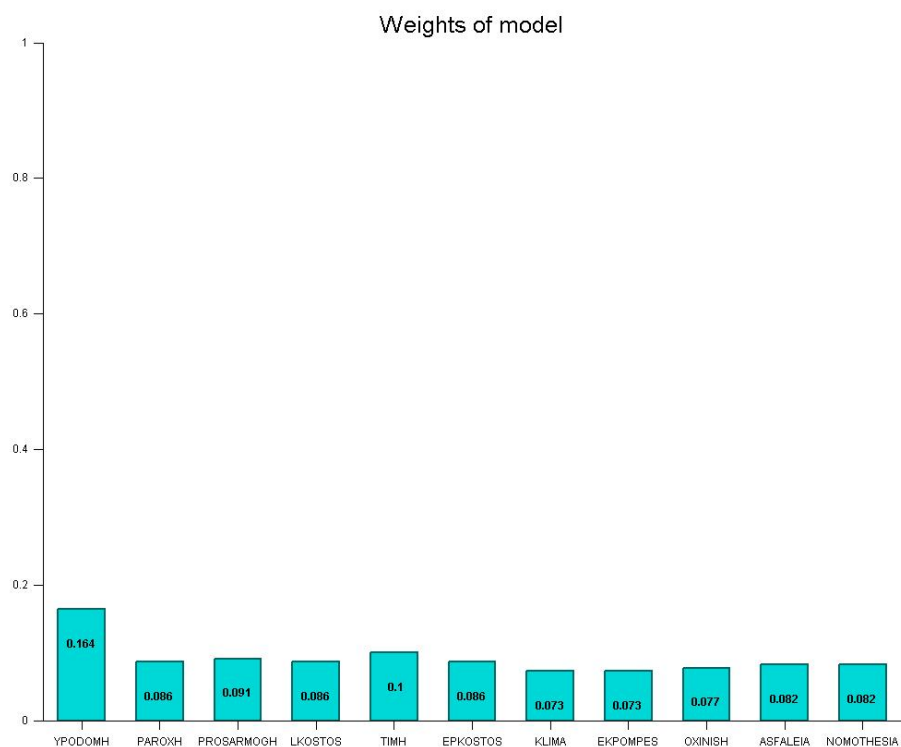
Ακολουθούν αποτελέσματα με Kendall's Tau = 1 και παραμέτρους επίλυσης $\delta = 0.05$, $\epsilon = 0.0001$

Α. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΞΙΑΣ 4^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

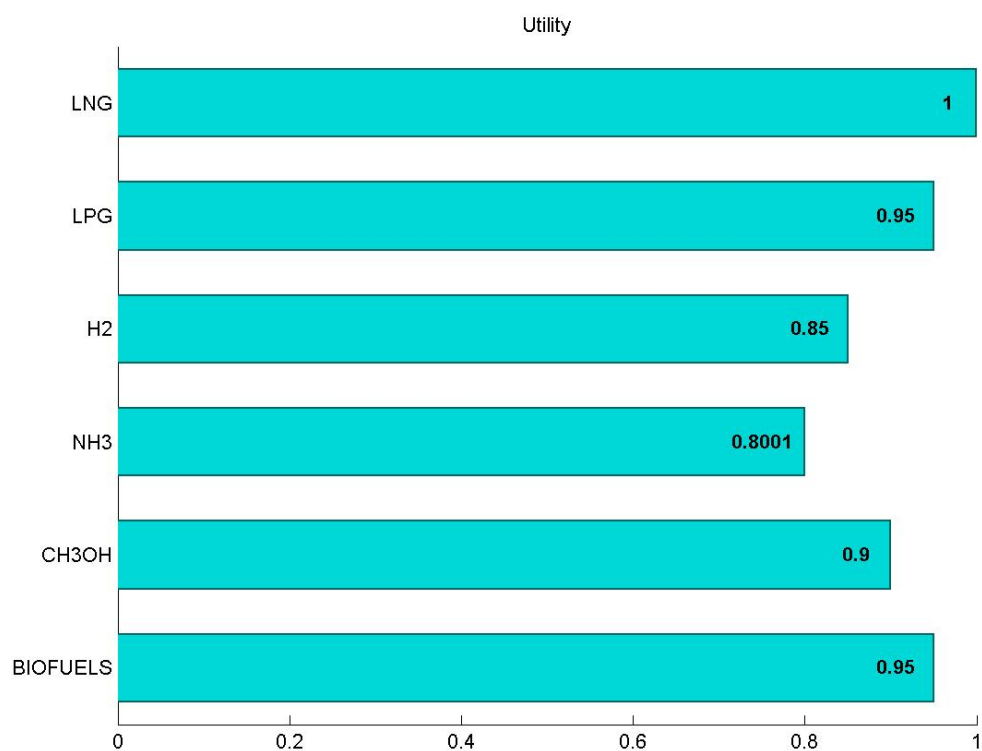




Β. ΒΑΡΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ 4^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ



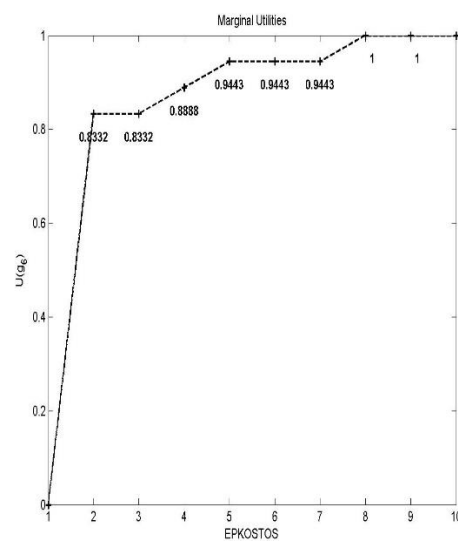
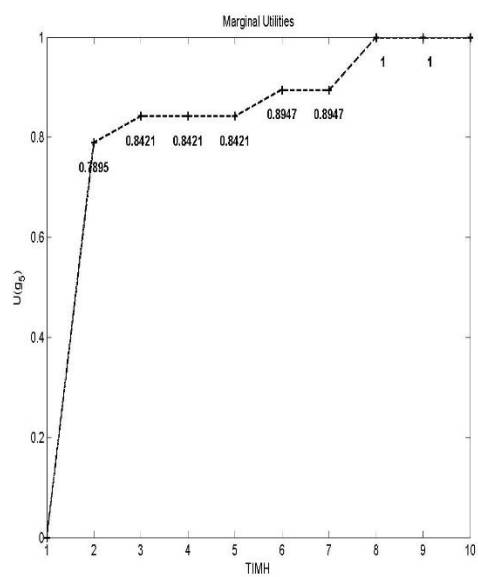
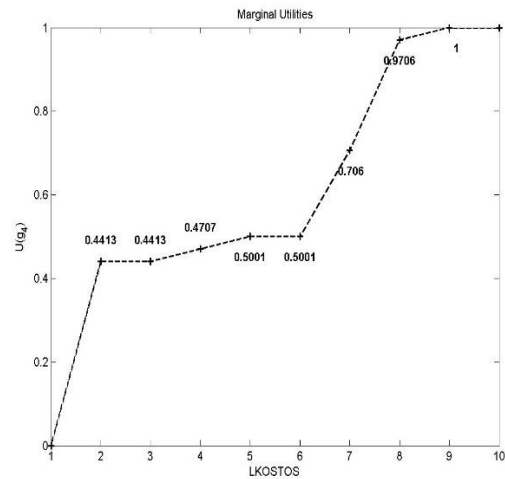
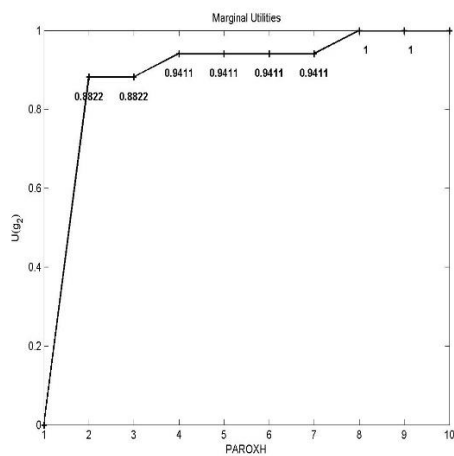
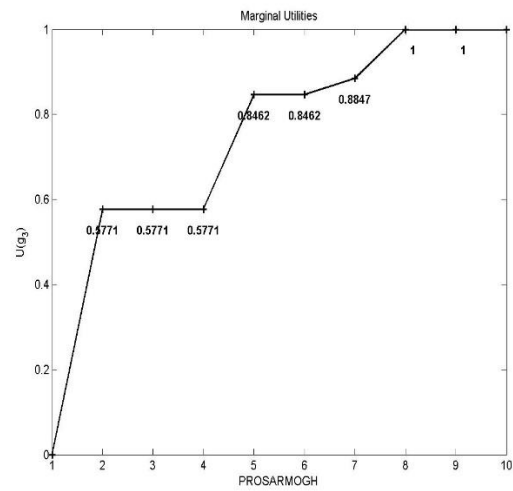
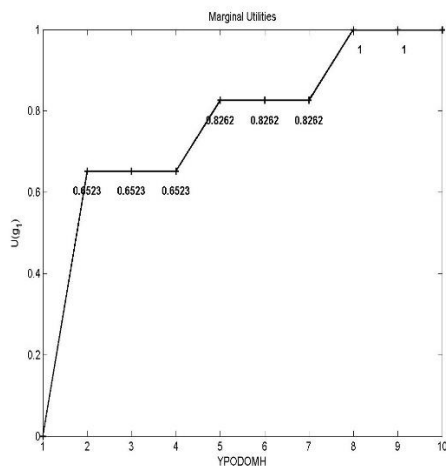
Γ. ΟΛΙΚΗ ΑΞΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ 4^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ

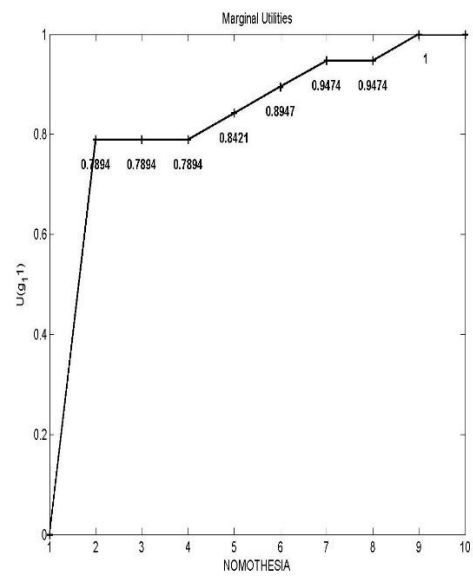
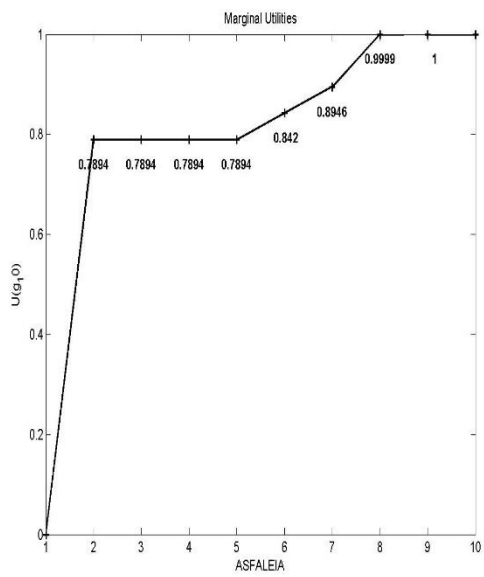
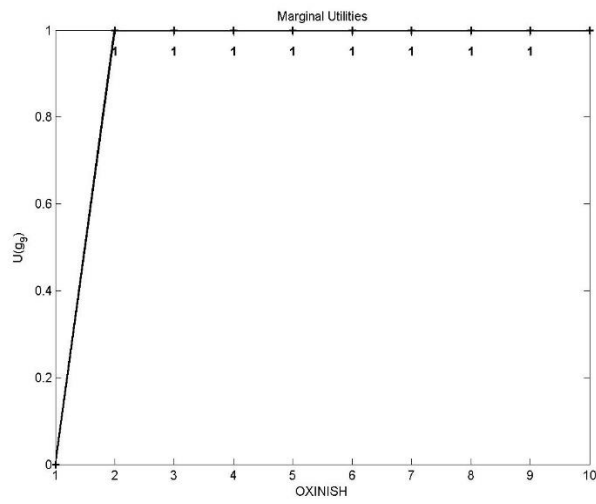
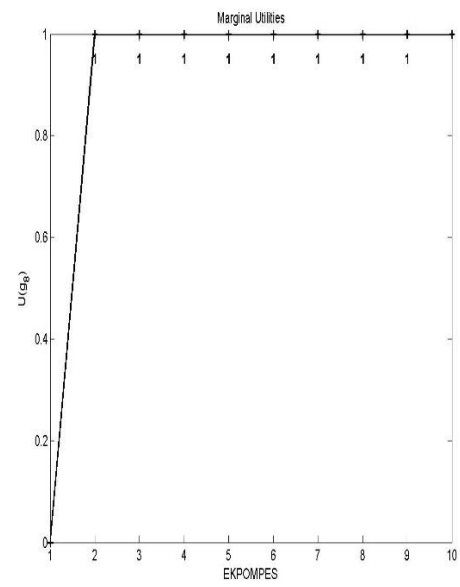
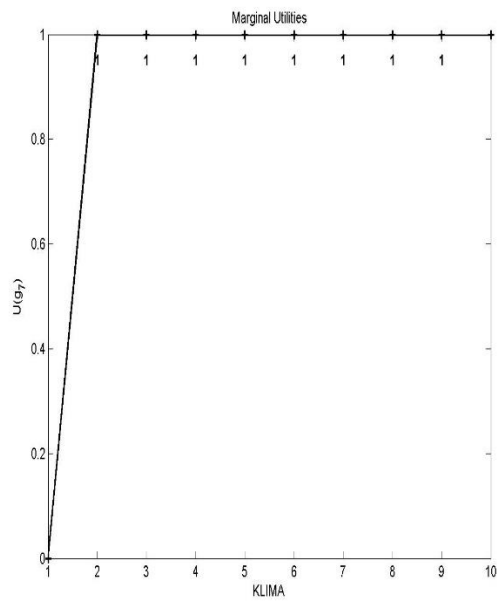


DECISION MAKER 5

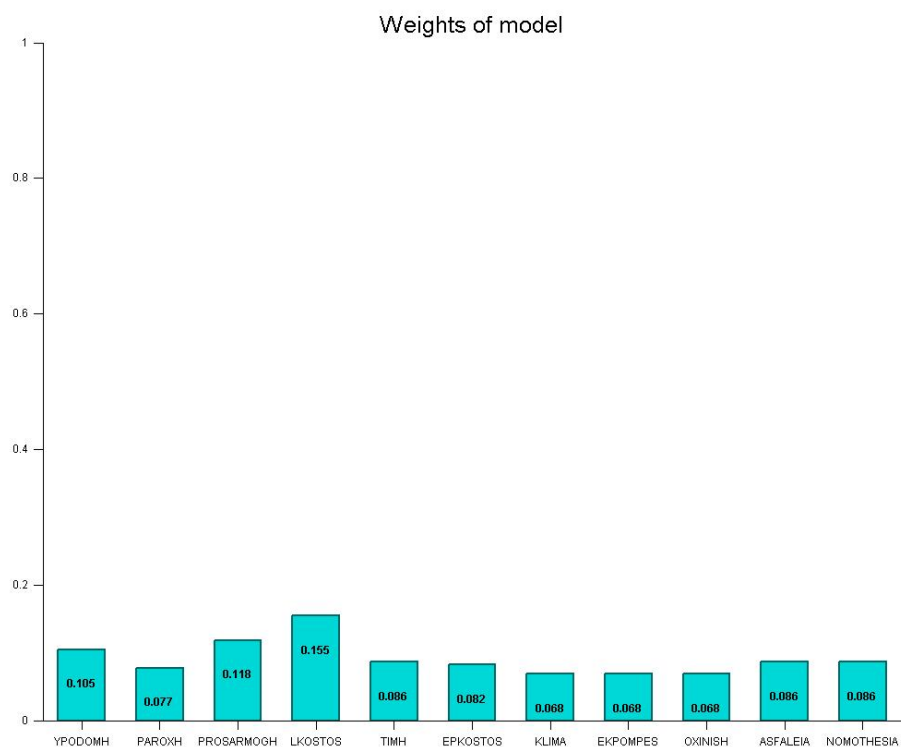
Ακολουθούν αποτελέσματα με Kendall's Tau = 1 και παραμέτρους επίλυσης $\delta = 0.05$, $\epsilon = 0.0001$

Α. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΞΙΑΣ 5^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

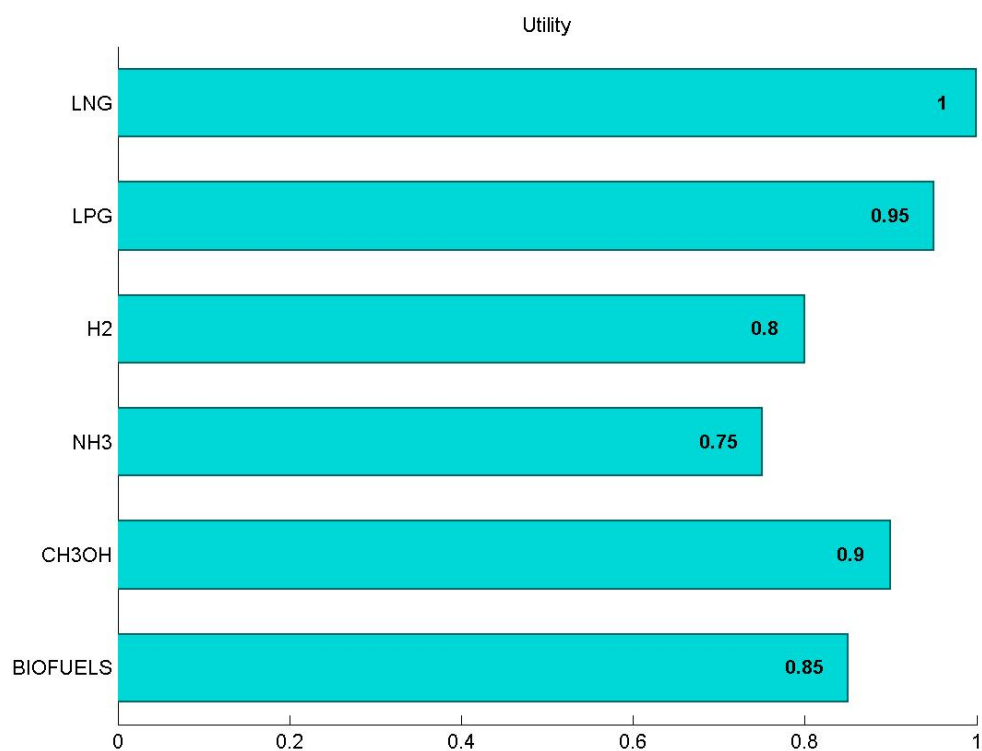




Β. ΒΑΡΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ 5^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ



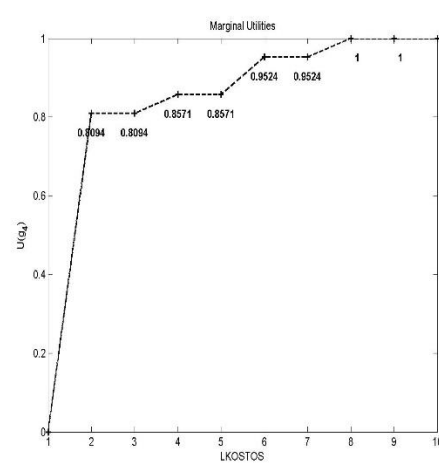
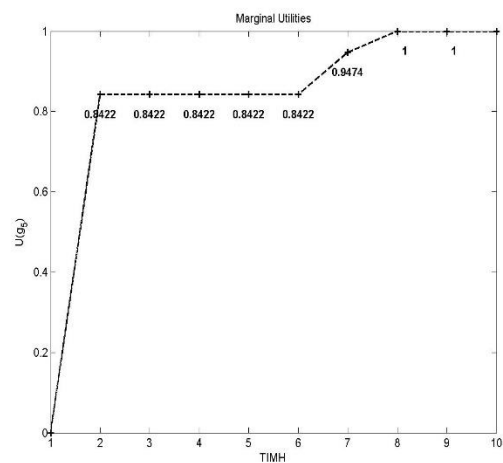
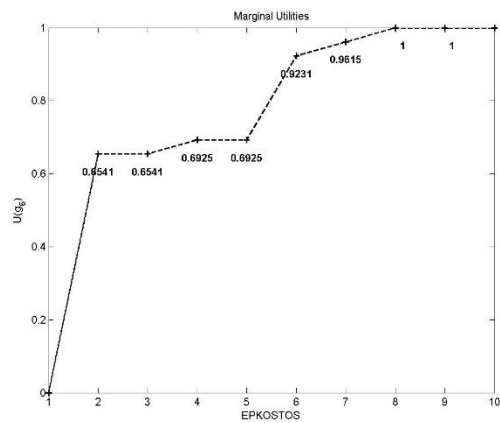
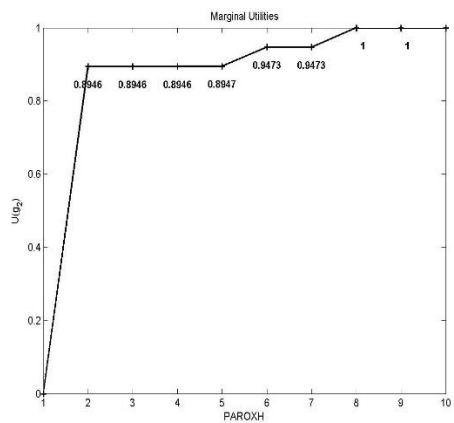
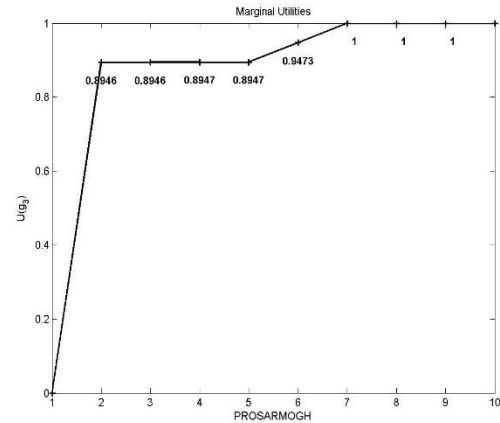
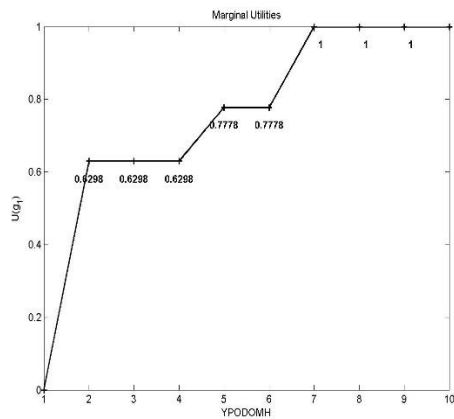
Γ. ΟΛΙΚΗ ΑΞΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ 5^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ

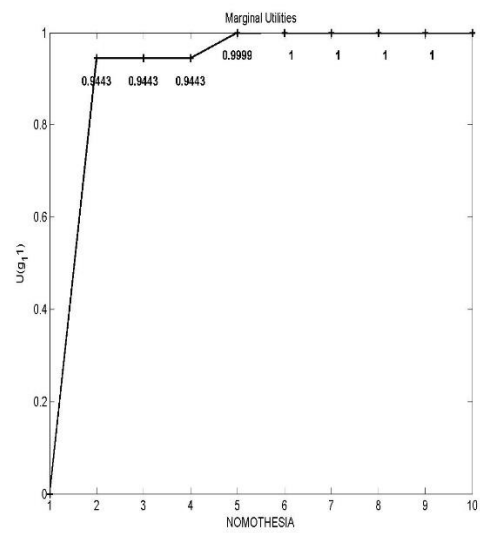
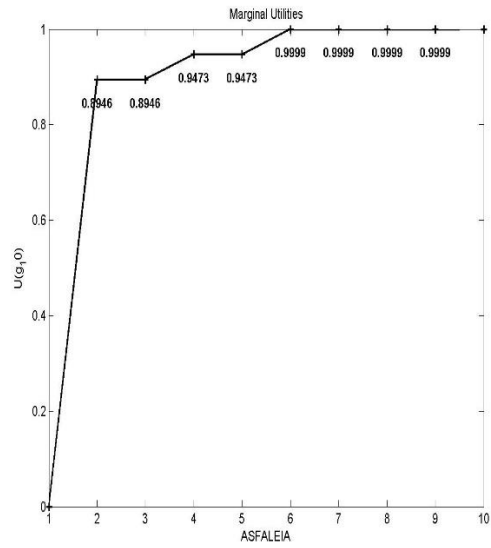
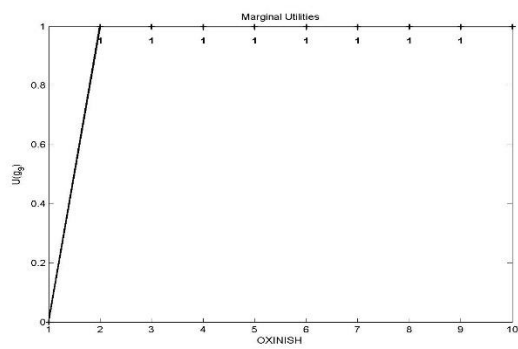
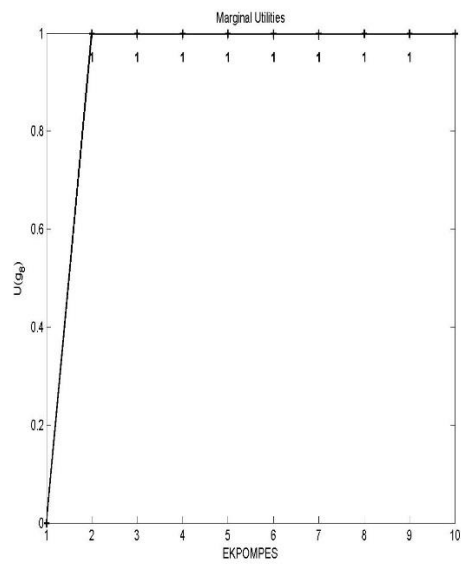
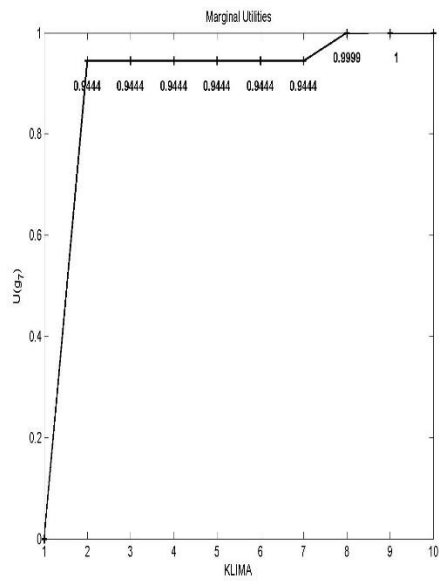


DECISION MAKER 6

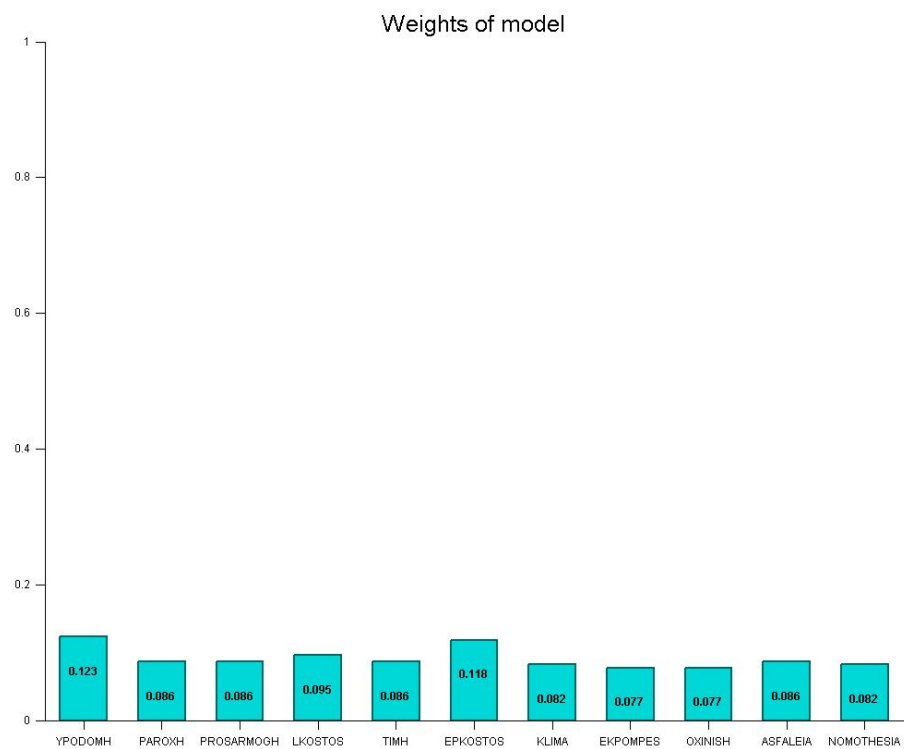
Ακολουθούν αποτελέσματα με Kendall's Tau = 1 και παραμέτρους επίλυσης $\delta = 0.05$, $\epsilon = 0.0001$

Α. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΞΙΑΣ 6^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

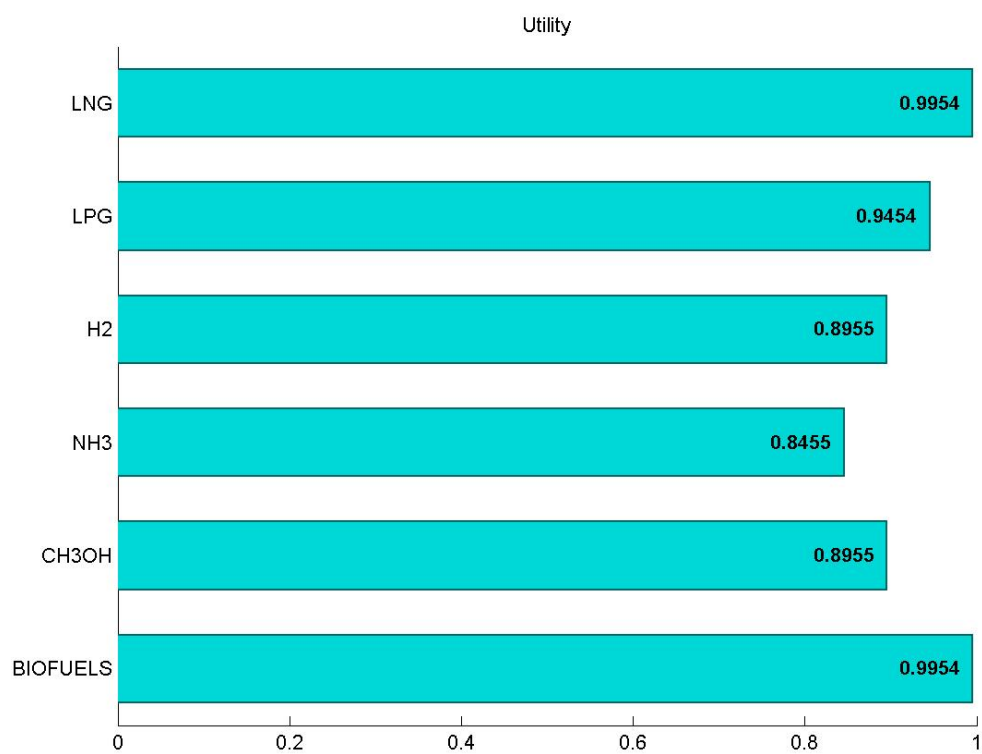




Β. ΒΑΡΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ 6^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ



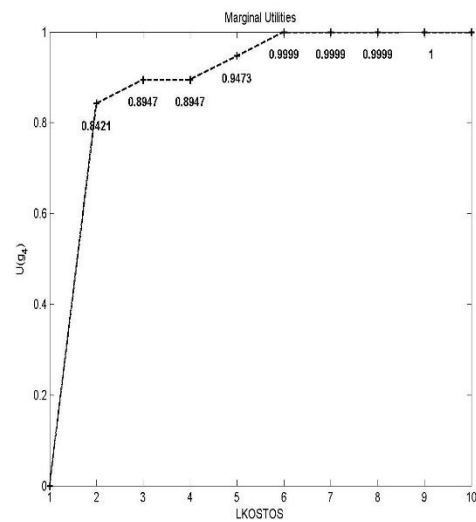
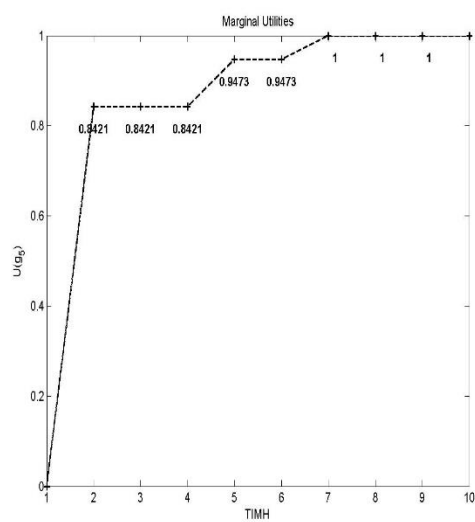
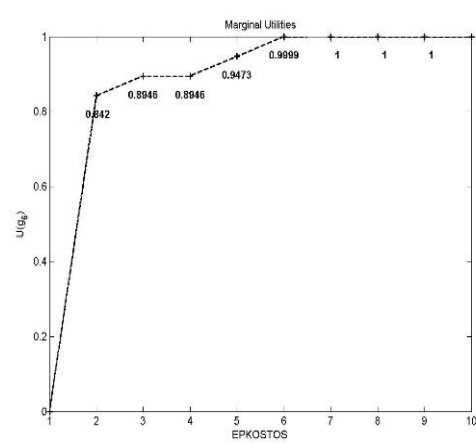
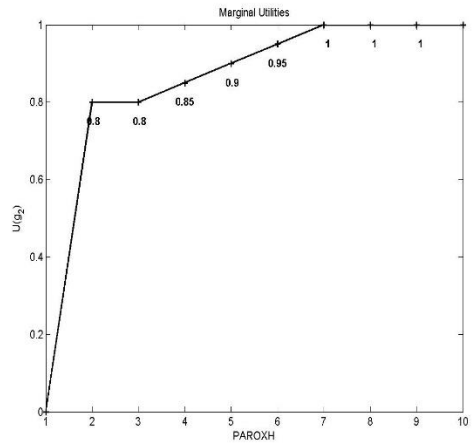
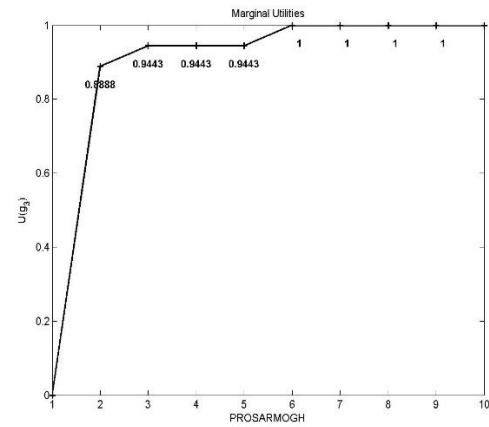
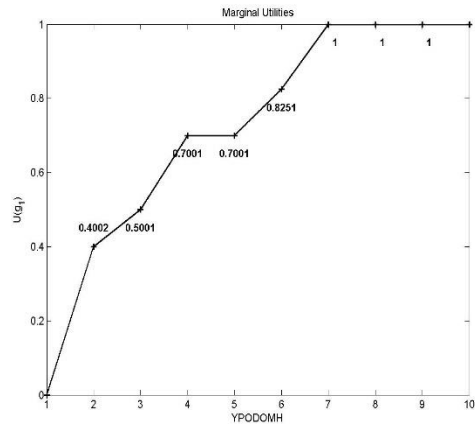
Γ. ΟΛΙΚΗ ΑΞΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ 6^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ

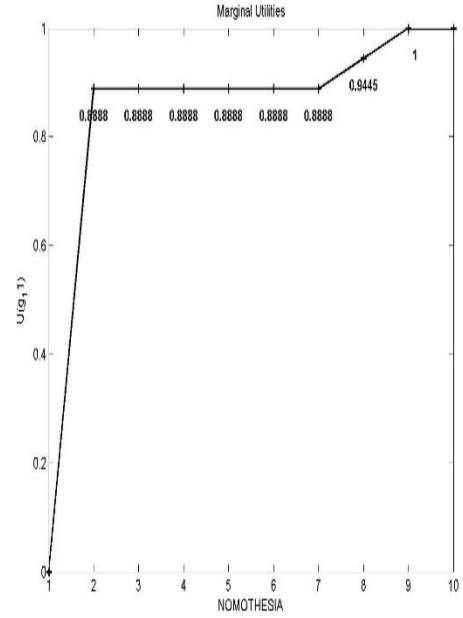
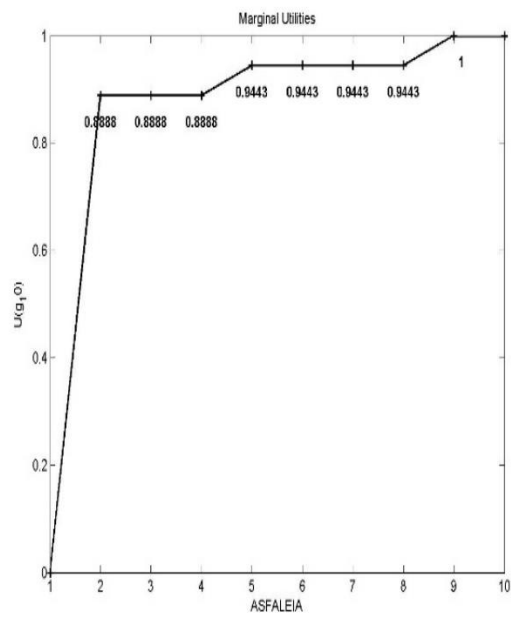
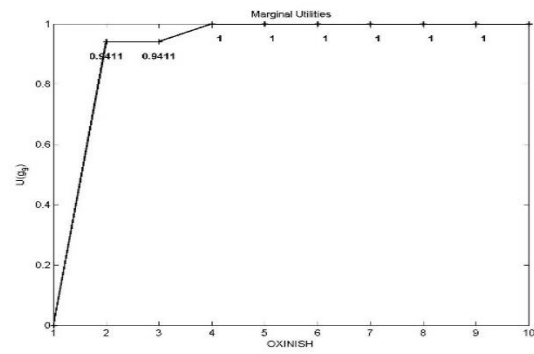
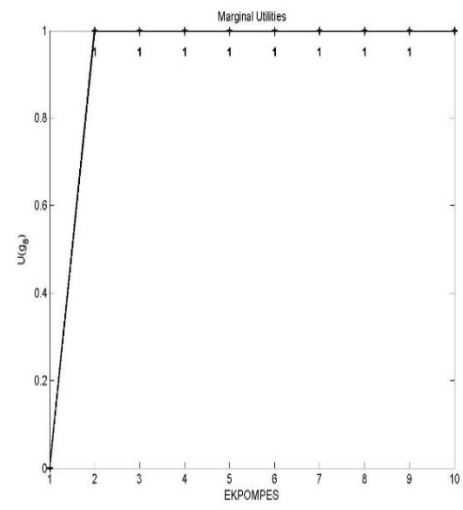
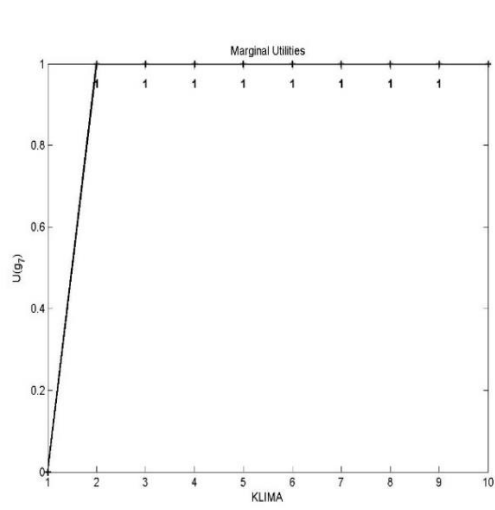


DECISION MAKER 7

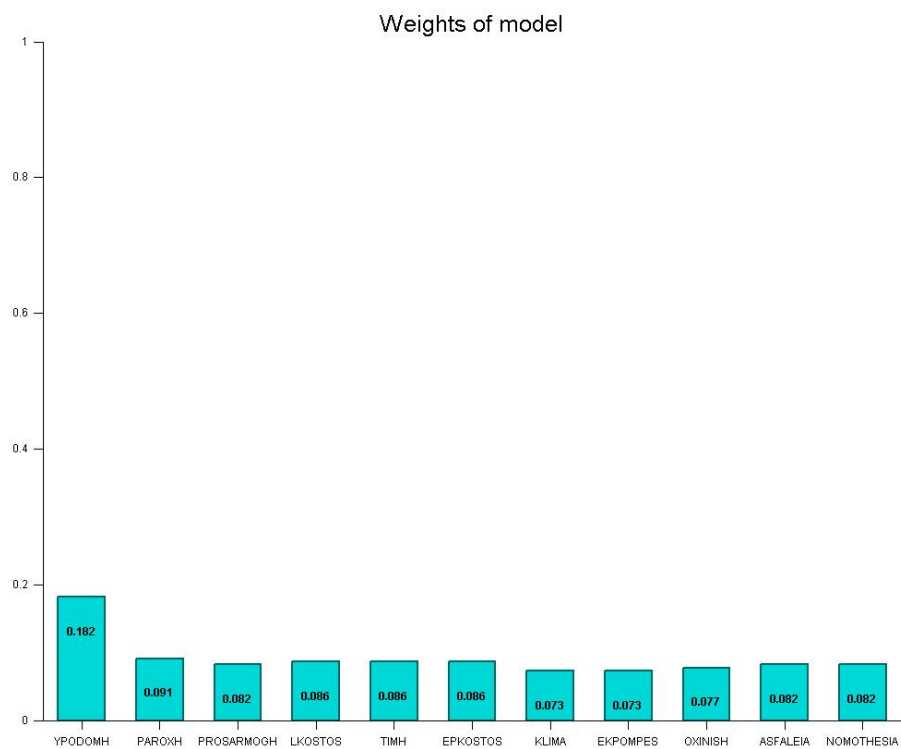
Ακολουθούν αποτελέσματα με Kendall's Tau = 1 και παραμέτρους επίλυσης $\delta = 0.05$, $\epsilon = 0.0001$

Α. ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΞΙΑΣ 7^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

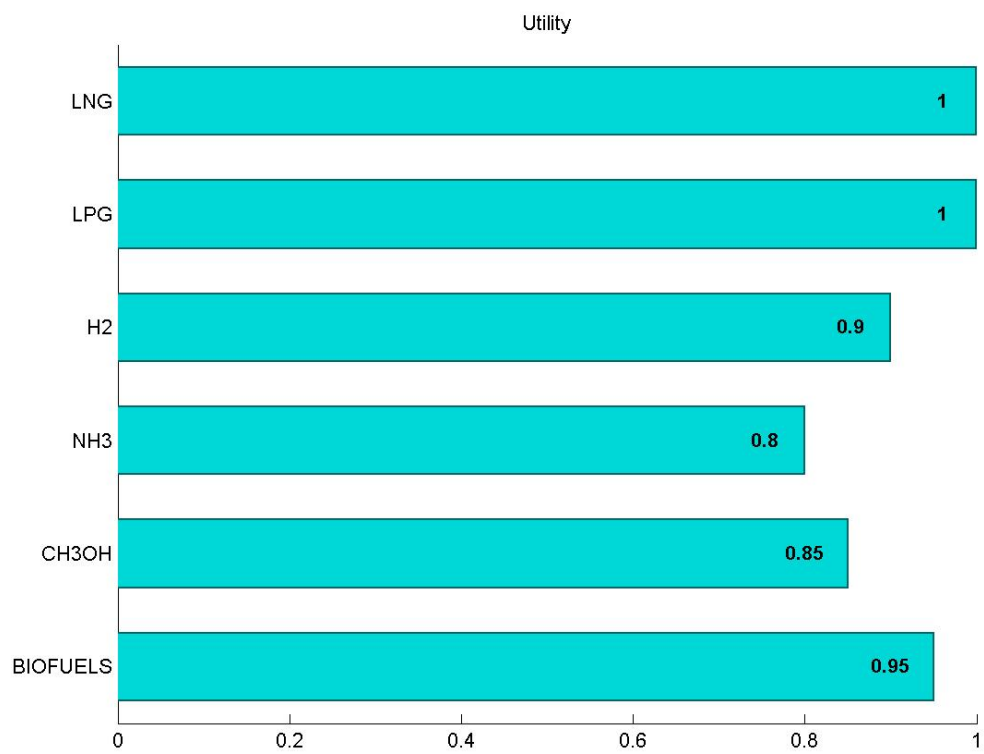




Β. ΒΑΡΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ 7^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ



Γ. ΟΛΙΚΗ ΑΞΙΑ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ 7^{ου} ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΑ



Παράρτημα VI



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΑΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



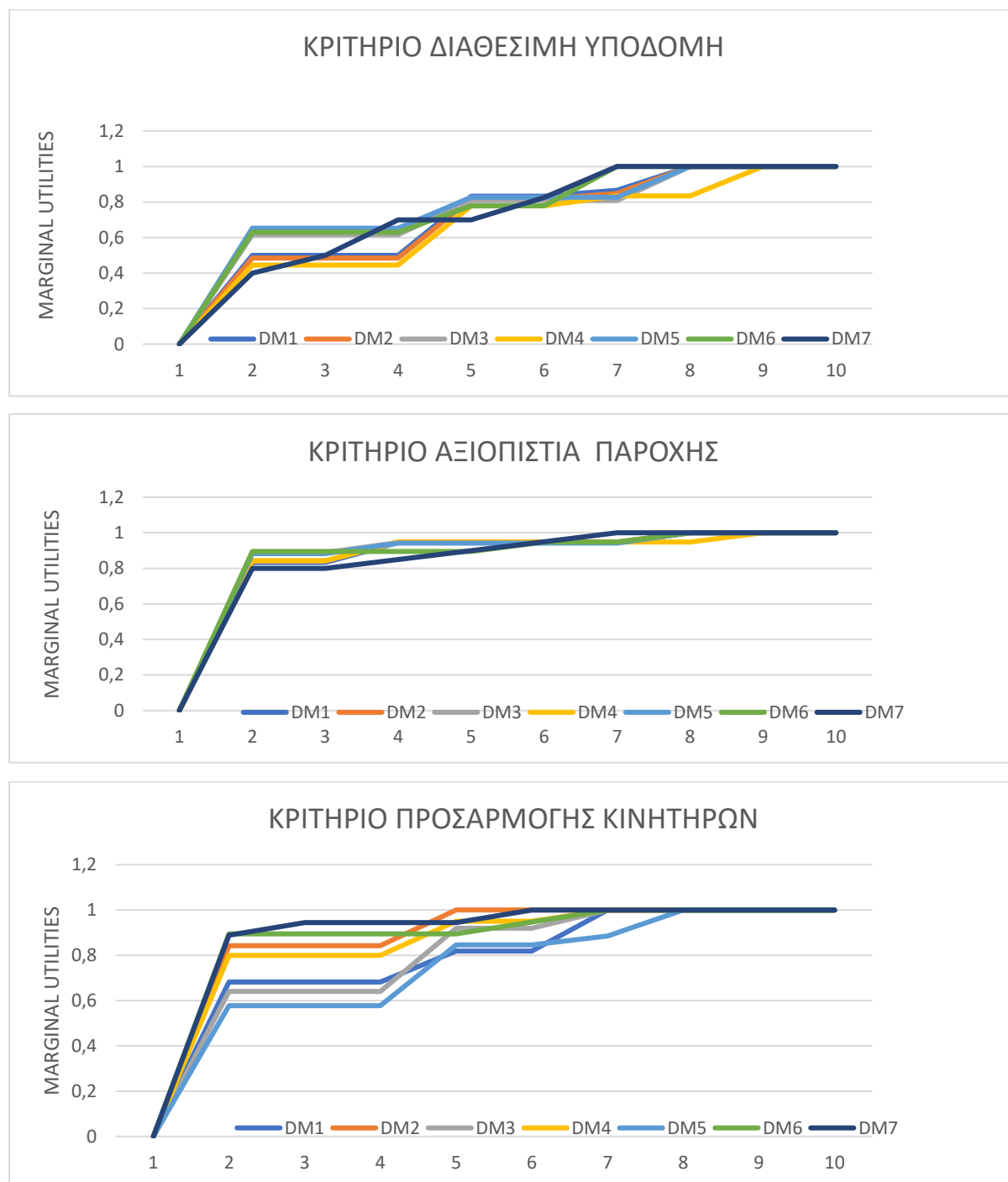
ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

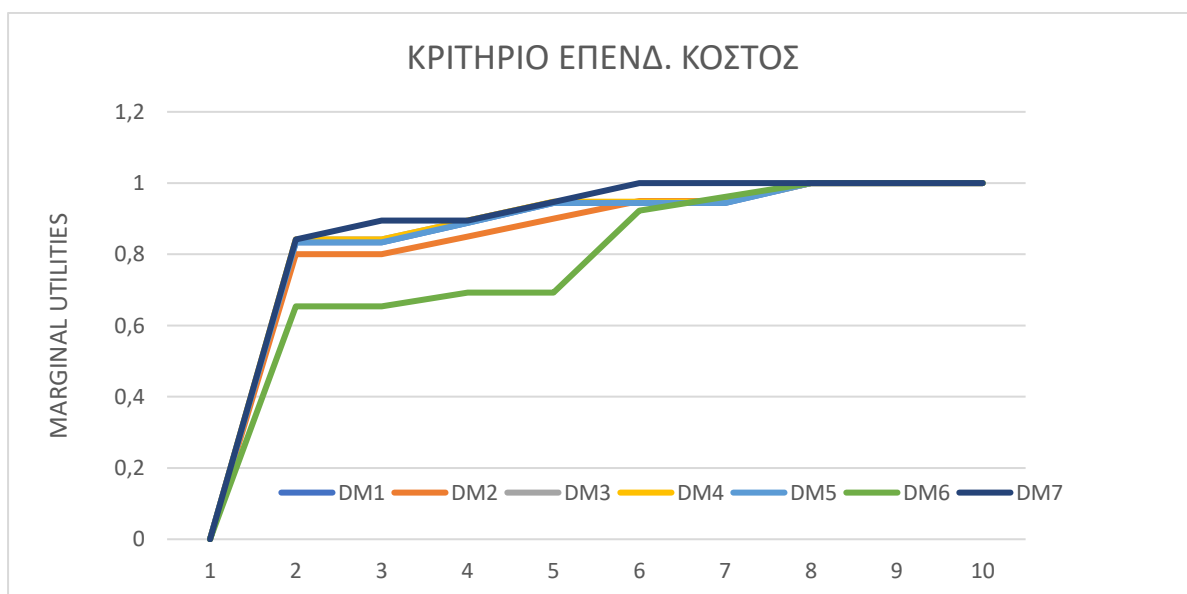
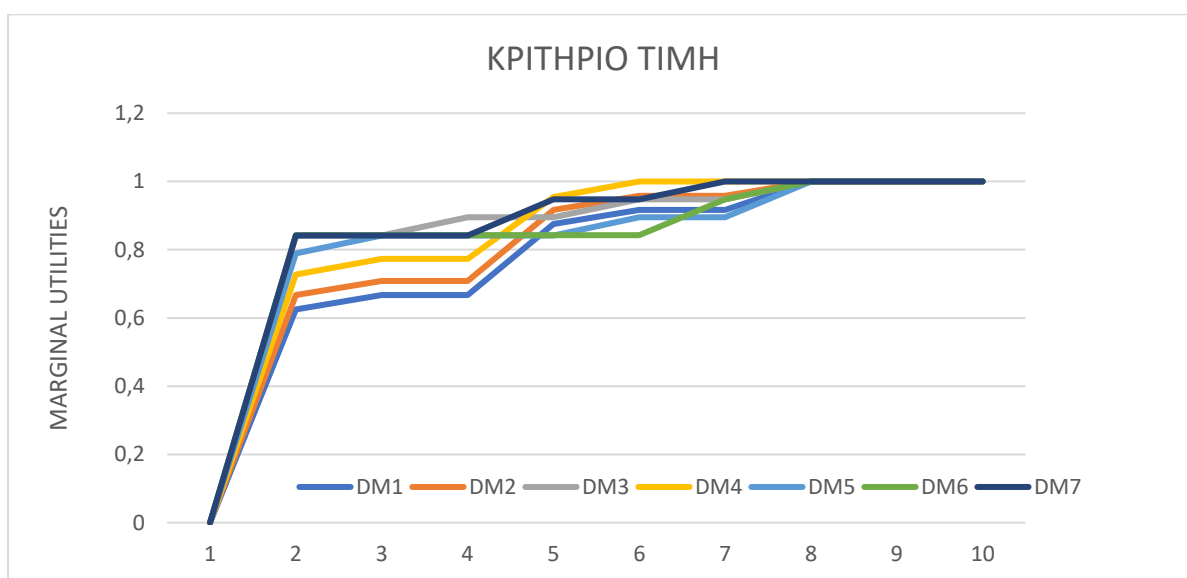
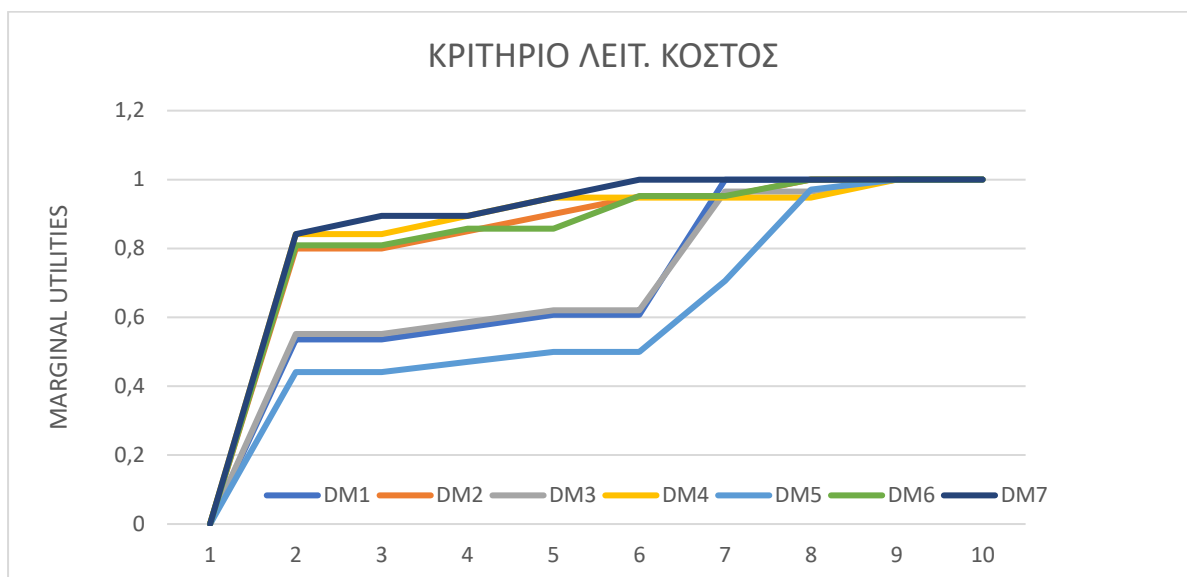
“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ”

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

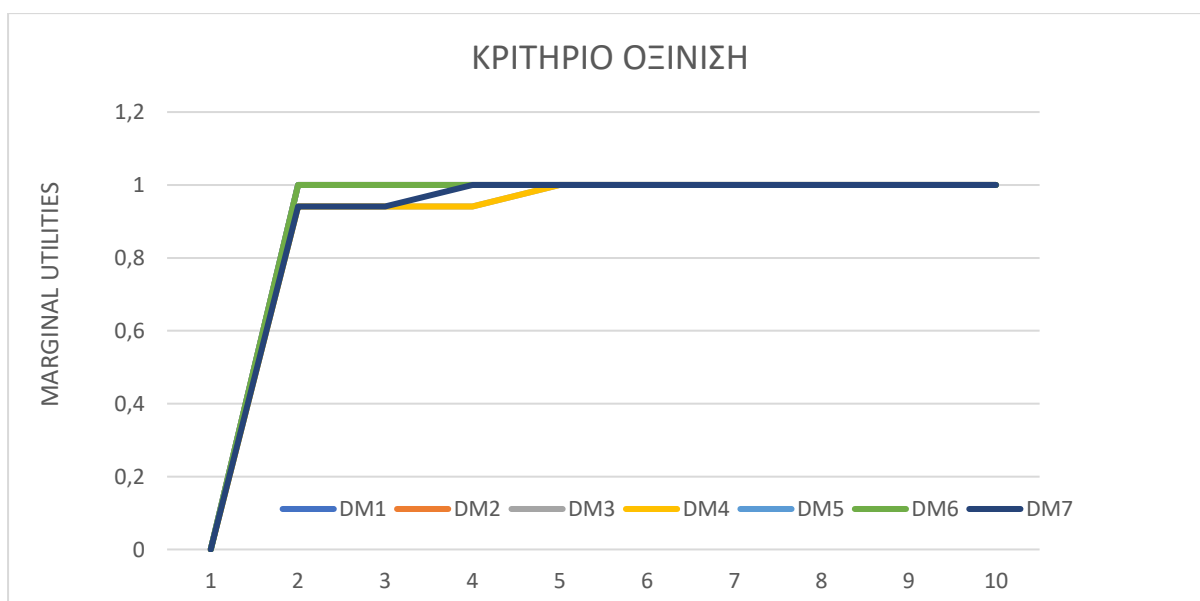
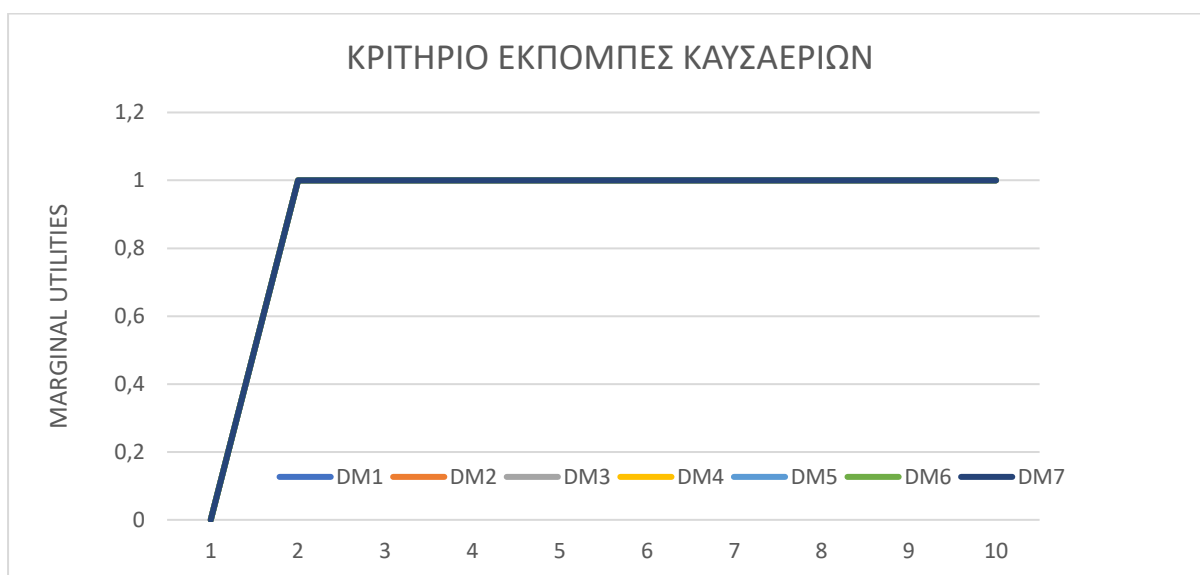
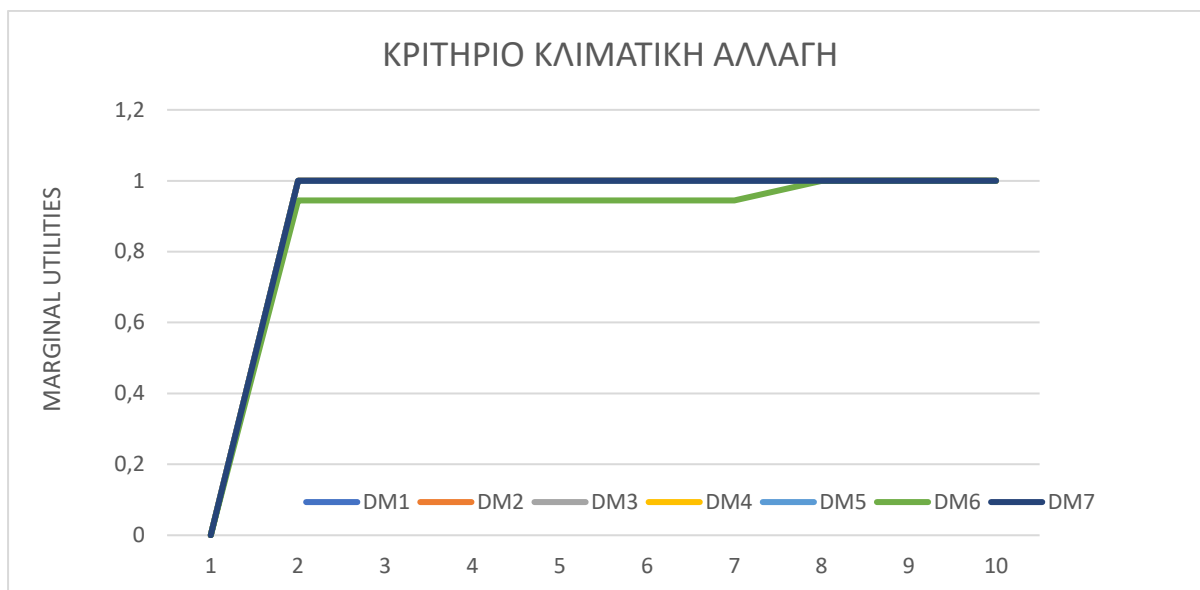
ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΑΞΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ ΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΙΖΟΝΤΩΝ ΑΝΑ ΚΡΙΤΗΡΙΟ

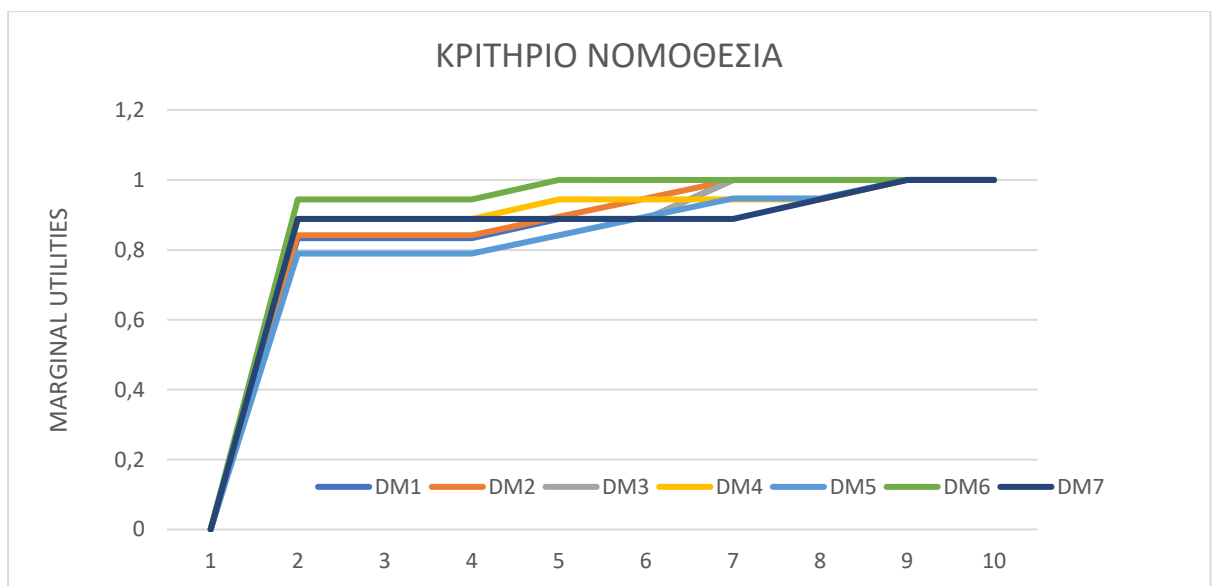
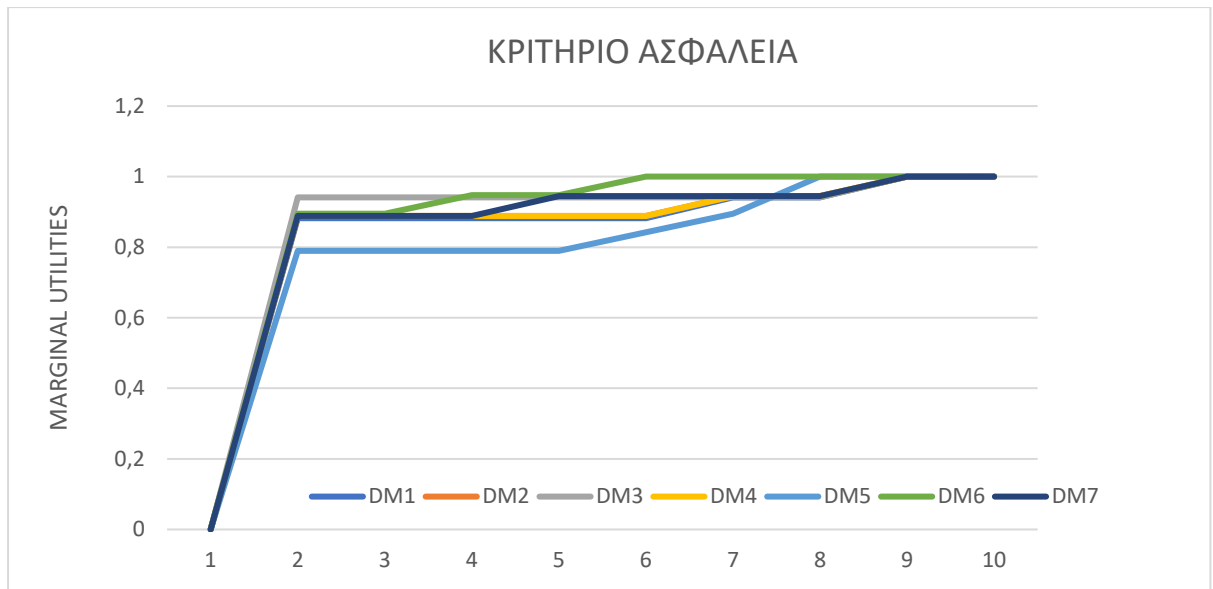
➤ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ





➤ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ





- ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΗ ΚΕΝΗ -



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΑΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

“ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ”
(MSC IN OPERATIONS RESEARCH AND DECISION
MAKING) (ΠΔ 59 /2021, ΦΕΚ 145Α'/17.08.2021)

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

