



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΙΙ: ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Ανάλυση αειφορίας και ολοκληρωμένων λύσεων
για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων ναυτιλίας***

Νεφέλη Ρουφογάλη

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Αντώνης Κοκόσης

Καθηγητής ΕΜΠ

**ΑΘΗΝΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024**

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2023-2024 στον Τομέα ΙΙ: Ανάλυσης, Σχεδιασμού & Ανάπτυξης Διεργασιών και Συστημάτων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Αντώνη Κοκόση. Με αφορμή την ολοκλήρωση της συγγραφής θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όσους βοήθησαν στην υλοποίηση του εν λόγω ερευνητικού έργου.

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον κ.Κοκόση, για την ευκαιρία να ενταχθώ στην ερευνητική του ομάδα, τις εμπειρίες που απέκτησα μέσω αυτής, τις συμβουλές του και την καθοδήγηση του σε όλα τα στάδια πραγματοποίησης αυτής της ιδέας. Οι πολύτιμες γνώσεις και δεξιότητες που απέκτησα, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της πορείας που θέλω να ακολουθήσω ως χημικός μηχανικός.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τον κ.Καραογλάνογλου, για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε σε διάφορα μέρη αυτής της μελέτης. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μιχαλόπουλο και όλα τα άλλα μέλη του έργου ALTFUELS@SHIPTYPES και ειδικότερα τον κ.Πυργάκη για την εξαιρετική του δουλειά. Το ενδιαφέρον και η προθυμία τους ήταν καθοριστικής σημασίας στην ομαλή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστίες απευθύνω συνολικά σε όλους τους συναδέλφους από το εργαστήριο μηχανικής συστημάτων βιομηχανικών διεργασιών (IPSEN) για την υποστήριξη, τη βοήθεια και την καλή τους διάθεση.

Τέλος, οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στους σημαντικότερους υποστηρικτές μου, στην οικογένεια και στους φίλους μου, που σε όλη τη διάρκεια της ακαδημαϊκής μου πορείας ήταν δίπλα μου. Δεν θα είχα τη δυνατότητα να είμαι σε αυτή τη θέση χωρίς την ανιδιοτελή αγάπη, υποστήριξη και ελευθερία που μου προσφέρουν. Είμαι ευγνώμων και τυχερή που είναι κομμάτι της ζωής μου.

Νεφέλη Ρουφογάλη

Αθήνα, 2024

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	i
Περιεχόμενα.....	ii
Κατάλογος Πινάκων	iv
Κατάλογος Διαγραμμάτων	vi
Κατάλογος Σχημάτων & Εικόνων	viii
Περίληψη	ix
Abstract	x
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1. Ατμοσφαιρικοί ρύποι στην ναυτιλία	2
1.1.1. Υφιστάμενες εκτιμήσεις εκπομπών & νομοθετικό υπόβαθρο.....	2
1.1.2. Μελλοντικοί στόχοι και δυνατότητα μείωσης εκπομπών στην ναυτιλία.....	3
1.1.3. Πεδία πιθανής βελτίωσης χρήσης ενέργειας στη ναυτιλία.....	4
1.2. Βιβλιογραφική επισκόπηση εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων.....	6
1.2.1. Φυσικό αέριο.....	6
1.2.2. Βιοκαύσιμα	8
1.2.3. Μεθανόλη	8
1.2.4. Αμμωνία	9
1.2.5. Υδρογόνο	10
1.3. Δέσμευση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα εν πλω.....	11
1.4. Σκοπός	14
Κεφάλαιο 2: Προσδιορισμός προβλήματος.....	15
2.1. Επιλογή καυσίμων προς μελέτη.....	15
2.2. Επιλογή δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα	15
2.3. Επιλογή πλαισίου μελέτης περίπτωσης	16
2.4. Ανάγκη μελέτης περιβαλλοντικού αντίκτυπου.....	16
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία.....	17
3.1. Ενεργειακή ανάλυση.....	17
3.1.1. Δυναμικό & ενεργειακές ανάγκες του Blue Star Patmos.....	17
3.1.2. Υπολογισμός διάρκειας διαδρομής.....	20
3.1.3. Επιλογή κινητήρων	21
3.1.4. Προσομοίωση ενεργειακού συστήματος σε περιβάλλον ASPEN.....	22

3.1.5. Εκτίμηση αναγκών συστήματος δέσμευσης & αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα	24
3.2. Ενεργειακή ολοκλήρωση προτεινόμενων συστημάτων	26
3.3. Εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης κύκλου ζωής σε περιβάλλον SimaPro ...	27
3.3.1. Καθορισμός στόχου ανάλυσης & πεδίου εφαρμογής.....	27
3.3.2. Απογραφική ανάλυση.....	30
3.3.3. Εκτίμηση επιπτώσεων	32
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα	35
4.1. Ενεργειακές Καταναλώσεις.....	35
4.1.1. Θερμικές ροές	35
4.1.2. Ενεργειακή ολοκλήρωση	37
4.1.3. Συνολικές ενεργειακές ανάγκες πλοίου	43
4.1.4. Συνολικές καταναλώσεις ενέργειας για την επιλεγμένη διαδρομή ..	46
4.2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής - Περιβαλλοντικά Αποτυπώματα	50
4.2.1. Σύνοψη αποτελεσμάτων ανάλυσης κύκλου ζωής ανά καύσιμο	50
4.2.2. Σύγκριση αποτυπωμάτων καλύτερων περιπτώσεων.....	54
4.2.3. Περιβαλλοντικά επιδραστικότερες διεργασίες.....	57
4.3. Αξιολόγηση χρήσης δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα	59
4.3.1. Πρόσθετες βελτιώσεις συστημάτων δέσμευσης.....	59
4.3.2. Αποτελεσματικότητα μείωσης εκπομπών μέσω δέσμευσης.....	59
4.3.3. Απαιτήσεις αποθήκευσης υγροποιημένου CO ₂ εν πλω	61
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα & μελλοντική έρευνα	62
5.1. Συμπεράσματα.....	62
5.2. Προτάσεις για μελλοντικές μελέτες.....	64
Βιβλιογραφία.....	65
Παραρτήματα.....	72
I. Προσομοιώσεις συστημάτων.....	72
II. Απογραφές εκπομπών για την ανάλυση κύκλου ζωής.....	74
III. Αποτελέσματα ενεργειακής ολοκλήρωσης & ανάλυσης	78
IV. Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής	91

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Σύνοψη ηλεκτρικών αναγκών Blue Star Patmos ανά κατηγορία.....	18
Πίνακας 2. Σύνοψη θερμικών αναγκών Blue Star Patmos σε συνθήκες ISO	19
Πίνακας 3. Μεταβλητές σχέσης ισχύς κινητήρα με ταχύτητα.....	21
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά κινητήρων & καυσίμων	21
Πίνακας 5. Σύνοψη βιβλιογραφικών ενεργειακών αναγκών για 90% δέσμευση CO ₂	24
Πίνακας 6. Συντελεστές σχέσης ενεργειακών αναγκών δέσμευσης.....	25
Πίνακας 7. Συνθήκες αποθήκευσης υγροποιημένου CO ₂ μετά από δέσμευση [42]	25
Πίνακας 8. Κατάλογος εξεταζόμενων συνδυασμών συνθηκών.....	29
Πίνακας 9. Απογραφή εκπομπών αντίστοιχη στη καύση ποσότητας καυσίμου για παραγωγή 1kWh.....	31
Πίνακας 10. Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής καυσίμων ανά περίπτωση.....	32
Πίνακας 11. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεως του ποσοστού μέγιστης ισχύς κινητήρα για την χρήση ντίζελ ναυτιλίας.....	35
Πίνακας 12. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεως του ποσοστού μέγιστης ισχύς κινητήρα για την χρήση φυσικού αερίου.....	36
Πίνακας 13. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεως του ποσοστού μέγιστης ισχύς κινητήρα για την χρήση μεθανόλης.....	36
Πίνακας 14. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεως του ποσοστού μέγιστης ισχύς κινητήρα για την χρήση αμμωνίας.....	37
Πίνακας 15. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεως του ποσοστού μέγιστης ισχύς κινητήρα για την χρήση υδρογόνου.....	37
Πίνακας 16. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση.....	38
Πίνακας 17. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση φυσικού αερίου, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση.....	39
Πίνακας 18. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση μεθανόλης, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση.....	40
Πίνακας 19. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση αμμωνίας, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση.....	41
Πίνακας 20. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση υδρογόνου, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση.....	42
Πίνακας 21. Σύνοψη ενεργειακών αναγκών για την δέσμευση και αποθήκευση CO ₂ με εφαρμογή ενεργειακής ολοκλήρωσης	44
Πίνακας 22. Σύνοψη κατανάλωσης και εξοικονόμησης ενέργειας για κάθε καύσιμο πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση (EO).....	45
Πίνακας 23. Αποστάσεις σε ναυτικά μίλια ανά διαδοχικά λιμάνια της διαδρομής.....	46
Πίνακας 24. Ταχύτητα πλεύσης και συνολική διάρκεια εκτέλεσης διαδρομής.....	46
Πίνακας 25. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 75% MCR ανά κατηγορία για το ντίζελ ναυτιλίας, το φυσικό αέριο και τη μεθανόλη	47
Πίνακας 26. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 75% MCR ανά κατηγορία για την αμμωνία και το υδρογόνο	48
Πίνακας 27. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την χρήση ντίζελ ναυτιλίας.....	50
Πίνακας 28. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την χρήση φυσικού αερίου.....	51

Πίνακας 29. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την χρήση μεθανόλης	52
Πίνακας 30. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την χρήση αμμωνίας	53
Πίνακας 31. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για τη χρήση υδρογόνου	53
Πίνακας 32. Σύνοψη αποδόσεων χρήσης δέσμευσης CO ₂	60
Πίνακας 33. Απαιτήσεις αποθήκευσης για μεταφορά του δεσμευμένου CO ₂ , για την διαδρομή Πειραιάς-Ρόδος μετ' επιστροφής	61
Πίνακας 34. Απογραφή εκπομπών παραγωγής ντίζελ ναυτιλίας	74
Πίνακας 35. Απογραφή εκπομπών παραγωγής φυσικού αερίου	75
Πίνακας 36. Απογραφή εκπομπών παραγωγής μεθανόλης	76
Πίνακας 37. Απογραφή εκπομπών παραγωγής αμμωνίας	77
Πίνακας 38. Απογραφή εκπομπών παραγωγής υδρογόνου	77
Πίνακας 39. Αναλυτικές ενεργειακές ανάγκες πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση	85
Πίνακας 40. Ενεργειακές και μαζικές ροές συστήματος αποθήκευσης δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα	86
Πίνακας 41. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 60% MCR ανά κατηγορία για το ντίζελ ναυτιλίας, το φυσικό αέριο και τη μεθανόλη	86
Πίνακας 42. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 60% MCR ανά κατηγορία για την αμμωνία και το υδρογόνο	86
Πίνακας 43. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 90% MCR ανά κατηγορία για το ντίζελ ναυτιλίας, το φυσικό αέριο και τη μεθανόλη	87
Πίνακας 44. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 90% MCR ανά κατηγορία για την αμμωνία και το υδρογόνο	87
Πίνακας 45. Σύγκριση αποτυπωμάτων καλύτερων περιπτώσεων ανά κατηγορία επιπτώσεων μέσου επιπέδου	91
Πίνακας 46. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων ντίζελ ναυτιλίας ανά διεργασία	91
Πίνακας 47. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων φυσικού αερίου ανά διεργασία.....	91
Πίνακας 48. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων μεθανόλης ανά διεργασία.....	92
Πίνακας 49. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων αμμωνίας και υδρογόνου ανά διεργασία	92

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Σύγκριση ηλεκτρικών αναγκών ανάμεσα στην πλεύση και την εκτέλεση ελιγμών.....	18
Διάγραμμα 2. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, δέσμησης CO ₂ και 75% μέγιστης ισχύος	38
Διάγραμμα 3. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου, δέσμησης CO ₂ και 75% μέγιστης ισχύος	40
Διάγραμμα 4. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση μεθανόλης, δέσμησης CO ₂ και 75% μέγιστης ισχύος.....	41
Διάγραμμα 5. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση αμμωνίας και 75% μέγιστης ισχύος.....	42
Διάγραμμα 6. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση υδρογόνου και 75% μέγιστης ισχύος	43
Διάγραμμα 7. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το ντίζελ ναυτιλίας με 75% MCR και δέσμηση CO ₂	49
Διάγραμμα 8. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το ντίζελ ναυτιλίας με 75% MCR.....	49
Διάγραμμα 9. Περιβαλλοντικό αντίκτυπο καλύτερων περιπτώσεων και συγκριτική εκτίμηση επιδράσεων στην υπερθέρμανση του πλανήτη	55
Διάγραμμα 10. Περιβαλλοντικό αντίκτυπο καλύτερων περιπτώσεων και συγκριτική εκτίμηση επιδράσεων τοξικότητας	56
Διάγραμμα 11. Περιβαλλοντικό αντίκτυπο καλύτερων περιπτώσεων και συγκριτική εκτίμηση επιδράσεων στον ευτροφισμό και τον σχηματισμό σωματιδίων	57
Διάγραμμα 12. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων που χρησιμοποιούν δέσμηση CO ₂ ανά διεργασία	57
Διάγραμμα 13. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων που δεν χρησιμοποιούν δέσμηση CO ₂ ανά διεργασία.....	58
Διάγραμμα 14. Σύγκριση εκπομπών ανάμεσα στις δύο βαθμίδες ενεργειακής ολοκλήρωσης.....	59
Διάγραμμα 15. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος ανάμεσα στις δύο βαθμίδες ενεργειακής ολοκλήρωσης.....	59
Διάγραμμα 16. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, δέσμησης CO ₂ και 60% μέγιστης ισχύος	78
Διάγραμμα 17. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, δέσμησης CO ₂ και 90% μέγιστης ισχύος	78
Διάγραμμα 18. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, και 75% μέγιστης ισχύος	79
Διάγραμμα 19. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου, δέσμησης CO ₂ και 60% μέγιστης ισχύος	79
Διάγραμμα 20. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου, δέσμησης CO ₂ και 90% μέγιστης ισχύος	80
Διάγραμμα 21. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου, και 75% μέγιστης ισχύος.....	80
Διάγραμμα 22. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση μεθανόλης, δέσμησης CO ₂ και 60% μέγιστης ισχύος.....	81

Διάγραμμα 23. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση μεθανόλης, δέσμευσης CO ₂ και 90% μέγιστης ισχύος.....	81
Διάγραμμα 24. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση μεθανόλης, και 75% μέγιστης ισχύος	82
Διάγραμμα 25. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση αμμωνίας, και 60% μέγιστης ισχύος.....	82
Διάγραμμα 26. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση αμμωνίας, και 75% μέγιστης ισχύος.....	83
Διάγραμμα 27. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση αμμωνίας, και 90% μέγιστης ισχύος.....	83
Διάγραμμα 28. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση υδρογόνου, και 60% μέγιστης ισχύος	84
Διάγραμμα 29. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση υδρογόνου, και 75% μέγιστης ισχύος	84
Διάγραμμα 30. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση υδρογόνου, και 90% μέγιστης ισχύος	85
Διάγραμμα 31. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το φυσικό αέριο με 75% MCR και δέσμευση CO ₂	88
Διάγραμμα 32. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για τη μεθανόλη με 75% MCR και δέσμευση CO ₂	88
Διάγραμμα 33. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το φυσικό αέριο με 75% MCR	89
Διάγραμμα 34. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για τη μεθανόλη με 75% MCR	89
Διάγραμμα 35. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για τη αμμωνία με 75% MCR.....	89
Διάγραμμα 36. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το υδρογόνο με 75% MCR.....	90

Κατάλογος Σχημάτων & Εικόνων

Σχήμα 1. Γραφική αναπαράσταση ενσωμάτωσης συστήματος δέσμευσης CO ₂ μέσω απορρόφησης στο σύστημα πλοίου LNG [42]	12
Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας	23
Σχήμα 3. Τυπικό πλαίσιο ανάλυσης κύκλου ζωής [66]	27
Σχήμα 4. Περιγραφή συστήματος προς ανάλυση κύκλου ζωής.....	28
Σχήμα 5. Αναπαράσταση επιπτώσεων ανάμεσα σε κατηγορίες μεσαίου και τελικού επιπέδου για τη μέθοδο ReCiPe 2016 [72].....	34
Σχήμα 6. Σύστημα υγροποίησης δεσμευμένου CO ₂ υπό δύο εναλλακτικές συνθήκες	44
Σχήμα 7. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση φυσικού αερίου	72
Σχήμα 8. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση μεθανόλης.....	72
Σχήμα 9. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση αμμωνίας	73
Σχήμα 10. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση υδρογόνου.....	73
Σχήμα 11. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση ντίζελ ναυτιλίας με δέσμευση CO ₂ ...93	
Σχήμα 12. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση φυσικού αερίου με δέσμευση CO ₂ ...93	
Σχήμα 13. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση μεθανόλης με δέσμευση CO ₂94	
Σχήμα 14. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση αμμωνίας.....94	
Σχήμα 15. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση υδρογόνου	95
Εικόνα 1. Αναπαράσταση μεθόδων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με μεμβράνες[44].....	13
Εικόνα 2. Χάρτης λιμανιών διαδρομής μελέτης περίπτωσης	20

Περίληψη

Η μείωση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα είναι καθοριστική για να επιτευχθούν οι στόχοι για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής για κάθε χρονικό περιθώριο. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η ανάλυση και σύγκριση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου εναλλακτικών καυσίμων στον τομέα της ναυτιλίας. Τα καύσιμα που μελετώνται είναι ονομαστικά το ντίζελ ναυτιλίας, το υγροποιημένο φυσικό αέριο, η μεθανόλη, η αμμωνία και το υδρογόνο. Ως επιπλέον παράγοντες θεωρούνται η πιθανότητα χρήσης συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, η ολοκλήρωση του ενεργειακού συστήματος που μελετάται, η ταχύτητα πλεύσης και η προέλευση κάθε καυσίμου. Αντικείμενο της μελέτης περίπτωσης αποτελεί το επιβατικό πλοίο Blue Star Patmos τύπου ROPAX και η διαδρομή που πραγματοποιεί από τον Πειραιά με τελικό προορισμό την Ρόδο. Σε πρώτο στάδιο προσομοιώνεται το ενεργειακό σύστημα του πλοίου με αντικατάσταση των κινητήρων συμβατικού καυσίμου με κινητήρες εναλλακτικών καυσίμων αντίστοιχης ισχύς, ώστε να προσδιορισθούν σε αντίστοιχες συνθήκες οι ενεργειακές ανάγκες κάθε περίπτωσης και στη συνέχεια εφαρμόζεται μεθοδολογία ενεργειακής ολοκλήρωσης για περαιτέρω μείωση της απαιτούμενης ενέργειας. Μετά την ενεργειακή ανάλυση, πραγματοποιείται ανάλυση κύκλου ζωής από την παραγωγή των καυσίμων έως και τις εκπομπές καύσης τους (Well-to-Propeller). Η μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων που χρησιμοποιείται είναι η ReCiPe 2016 Endpoint Hierarchist. Τα κύρια ευρήματα της μελέτης είναι ότι με εφαρμογή ενεργειακής ολοκλήρωσης υπάρχουν περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας 10% με 20%, ότι με χρήση τεχνολογιών δέσμευσης CO₂ το ποσοστό αποφυγής εκπομπών από όλο τον κύκλο ζωής των καυσίμων κυμαίνεται από 35% έως 76% και η σύγκριση των δεικτών περιβαλλοντικού αντίκτυπου σε διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων όλων των καυσίμων. Συνολικά το πιο περιβαλλοντικά φιλικό καύσιμο αναδείχθηκε το υδρογόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως ήταν αναμενόμενο, αλλά αξιοσημείωτη είναι η ραγδαία μείωση των συνολικών επιπτώσεων στο περιβάλλον που επιφέρει η χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου και καυσίμων τα οποία προέρχονται από επεξεργασία βιομάζας. Τέλος, εκτιμάται η δυνατότητα εφαρμογής δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα εν πλω, βάση των περιοριστικών παραγόντων του διαθέσιμου φορτίου και αποθηκευτικού χώρου, με τη χρήση του φυσικού αερίου να είναι η πιο ρεαλιστική με έντονη διαφοροποίηση από το ντίζελ ναυτιλίας και τη μεθανόλη.

Λέξεις Κλειδιά: ανάλυση κύκλου ζωής, εναλλακτικά καύσιμα ναυτιλίας, ενεργειακή ολοκλήρωση, δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, ROPAX, μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Abstract

Reducing carbon dioxide emissions is crucial to meet short- and long-term climate change mitigation targets. The purpose of this study is to analyze and compare the environmental impact of alternative fuels used in the shipping industry. The fuels considered are marine diesel oil, liquefied natural gas, methanol, ammonia and hydrogen. Additional factors considered are the possibility of using carbon capture, the integration of the ship's energy system, the cruising speed and the origin of each fuel. The subject of the case study is the ROPAX type passenger ship Blue Star Patmos and the route from Piraeus to Rhodes. Initially, the energy system of the ship is simulated by replacing the conventional fuel engines with alternative fuel engines of corresponding power, in order to determine the energy needs of each case under corresponding conditions and then an energy integration methodology is applied to further reduce the energy requirements. Following the energy analysis, a life cycle analysis from fuel production to combustion emissions (well-to-propeller) is performed. The impact assessment method used is the ReCiPe 2016 Endpoint Hierarchist. The main findings of the study are that with energy integration there is potential for energy savings of 10% up to 20%, that with the use of CO₂ capture the rate of avoidance of emissions from the whole fuel life cycle ranges from 35% to 76% and the comparison of environmental impact indicators in different impact categories of all fuels. Overall, the most environmentally friendly fuel was found to be renewable hydrogen as expected, but the rapid reduction in overall environmental impact from the use of LNG and fuels derived from biomass processing is noteworthy. Finally, the feasibility of implementing carbon capture on board is assessed, based on the constraints of available cargo and storage space, with the use of natural gas being the most realistic, with a strong differentiation from marine diesel and methanol.

Keywords: life cycle analysis, alternative shipping fuels, energy integration, carbon capture, ROPAX, greenhouse gas emission reduction

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η συστηματική απελευθέρωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων που εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου τους τελευταίους αιώνες, έχει προκαλέσει την παρατηρούμενη κλιματική αλλαγή. Αυτή η ανθρωπογενής κλιματική αλλαγή, ήδη μέσω ακραίων φαινομένων, έχει προκαλέσει εκτεταμένες δυσμενείς επιπτώσεις και συναφείς ζημίες στη φύση και στην ανθρωπότητα. Η αύξηση των ακραίων καιρικών και κλιματικών φαινομένων έχει οδηγήσει σε ορισμένες μη αναστρέψιμες επιπτώσεις, καθώς τα φυσικά συστήματα πιέζονται πέρα από την ικανότητά τους να προσαρμοστούν λόγω ακραίων θερμοκρασιών στη στεριά και στον ωκεανό, των έντονων βροχοπτώσεων, της ξηρασίας και των πυρκαγιών. Σε παγκόσμιο επίπεδο παρατηρείται ότι οι πιο ευάλωτοι άνθρωποι και κοινότητες τους πλήττονται δυσανάλογα και συνολικά η ένταση των παραπάνω φαινομένων προβλέπεται να αυξηθεί [1].

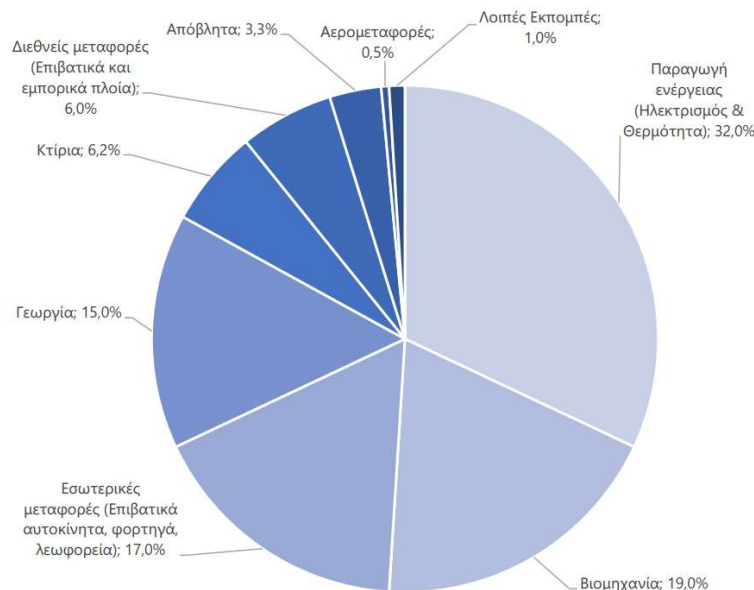
Στην περίπτωση που η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη αγγίξει τους $1,5^{\circ}\text{C}$ στο εγγύς μέλλον, θα προκαλέσει αναπόφευκτη αύξηση των πολλαπλών κλιματικών κινδύνων. Το επίπεδο κινδύνου θα εξαρτηθεί από τα τωρινά βραχυπρόθεσμα μέτρα σχετικά με την ευπάθεια, την έκθεση, το επίπεδο κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης και την δυνατότητα προσαρμογής αναγκαίων συστημάτων για την ανθρώπινη ζωή και για τις εφοδιαστικές αλυσίδες. Εάν και δεν είναι δυνατό να εξαλειφθούν πλήρως, οι προβλεπόμενες απώλειες και ζημίες που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή μπορούν να περιοριστούν με μέτρα σε κοντινό χρονικό ορίζοντα τα οποία θα περιορίζουν την υπερθέρμανση κοντά στους $1,5^{\circ}\text{C}$. Πέρα από το 2040, το παρατηρούμενο επίπεδο υπερθέρμανσης θα είναι καθοριστικό για την ένταση των ζημιών σε οικοσυστήματα αλλά και στον άνθρωπο [1,2].

Με την πάροδο του χρόνου οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής γίνονται όλο και πιο πολύπλοκες και ταυτόχρονα πιο δύσκολα διαχειρίσιμες. Η αλληλεπίδραση διαρκώς μεταβαλλόμενων συστημάτων επιδεινώνει τον συνολικό κίνδυνο σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Προβλέπεται ότι εάν η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη υπερβεί τον στόχο των $1,5^{\circ}\text{C}$, ανάλογα με το μέγεθος και τη διάρκεια της υπέρβασης, ορισμένες επιπτώσεις θα προκαλέσουν την απελευθέρωση πρόσθετων αερίων του θερμοκηπίου και κάποιες θα είναι μη αναστρέψιμες, ακόμη και αν μειωθεί μελλοντικά η μέση θερμοκρασία [1].

Συχνά οι πολιτικές προσεγγίσεις δίνουν προτεραιότητα στην βραχυπρόθεσμη μείωση των εκπομπών, που είναι μια αξιόλογη προσέγγιση ωστόσο αυτή η προσέγγιση αποπροσανατολίζει από μια ολική μετασχηματιστική ανάπτυξη η οποία είναι απαραίτητη για την επίτευξη πραγματικής αειφορίας. Σε αυτά τα πλαίσια η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δεσμευτεί να είναι η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος ως το 2050, δηλαδή ως σύνολο η οικονομία της να έχει μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [3].

1.1. Ατμοσφαιρικοί ρύποι στην ναυτιλία

Η διεθνής ναυτιλία θεωρείται ένας από τους μεγαλύτερους τομείς παραγωγής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της παγκόσμιας οικονομίας και αναμένεται επίσης να γίνει ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς όσον αφορά τα αέρια του θερμοκηπίου. Οι θαλάσσιες μεταφορές εκπέμπουν λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα ανά τόνο που μεταφέρεται ανά χιλιόμετρο σε σύγκριση με άλλες μορφές μεταφορών και περισσότερο από το 80% του όγκου όλων αγαθών της παγκόσμιας αγοράς μεταφέρονται δια θαλάσσης [4].



Διάγραμμα 1. Κατανομή των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα [5]

1.1.1. Υφιστάμενες εκτιμήσεις εκπομπών & νομοθετικό υπόβαθρο

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ναυσιπλοΐας (IMO) οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου -συμπεριλαμβανομένων του διοξειδίου του άνθρακα, του μεθανίου και του υποξειδίου του αζώτου, εκφρασμένες σε ισοδύναμα CO₂-όλων των ειδών ναυτιλίας αυξήθηκαν κατά περίπου 10% από 977 εκατομμύρια τόνους το 2012 σε 1.076 εκατομμύρια τόνους το 2018 [6]. Ωστόσο στην ίδια χρονική περίοδο η ένταση άνθρακα, η οποία ορίζεται ως οι εκπομπές ενός ταξιδιού ανά τόνο φορτίου ανά την απόσταση που μεταφέρεται, βελτιώθηκαν συνολικά κατά 21% για τους περισσότερους τύπους πλοίων. Αυτή η εντατικοποίηση των μεταφορών δυστυχώς έχει περιορισμούς, όπως φαίνεται από το γεγονός ότι από τις βελτιώσεις που παρατηρούνται, η πλειοψηφία επιτεύχθηκε πριν το 2013 και ο ρυθμός βελτίωσης της έντασης άνθρακα έχει επιβραδύνει από το 2015. Τα τελευταία χρόνια συγκεκριμένα παρατηρείται ένα πλατό στην βελτίωση με ετήσιες ποσοστιαίες μεταβολές που κυμαίνονται από 1 έως 2% [6].

Παρά των συνεχών βελτιώσεων στην αποτελεσματικότητα των θαλάσσιων μεταφορών, σε ένα «business-as-usual» σενάριο όπου ο όγκος των αγαθών που μεταφέρονται παγκοσμίως τριπλασιάζεται και χωρίς τη λήψη μέτρων περιορισμού των εκπομπών, οι μελλοντικές εκπομπές το 2050 εκτιμάται να είναι 170-250% παραπάνω από αυτές που σημειώθηκαν για το έτος 2019 [4,7].

Όσον αφορά τις εκπομπές θείου, από το 2020, το ανώτατο επιτρεπτό όριο περιεκτικότητας των ναυτιλιακών καυσίμων έχει μειωθεί στο 0,5% από το προγενέστερο 3,5%. Αυτό το μέτρο, γνωστό και ως «IMO 2020», εφαρμόζεται σε όλα τα πλοία παγκοσμίως με εξαίρεση ορισμένων καθορισμένων περιοχών ελέγχου όπου το όριο είναι ήδη στο 0,1%. Η απόφαση αυτή πάρθηκε δεδομένου ότι οι εκπομπές οξειδίων του θείου συνδέονται με σοβαρά προβλήματα υγείας στους ανθρώπους, με όξινη βροχή και οξίνιση των ωκεανών [8].

1.1.2. Μελλοντικοί στόχοι και δυνατότητα μείωσης εκπομπών στην ναυτιλία

Η στρατηγική του IMO για τα επόμενα χρόνια έχει ως κύριο σκοπό τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία, ενώ παράλληλα σχεδιάζεται η εξάλειψη τους το συντομότερο δυνατό κατά τη διάρκεια του αιώνα. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται η μείωση του όγκου των συνολικών ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050, σε σύγκριση με το 2008. Για την ενδιάμεση διορία του 2030 τίθενται οι στόχοι μείωσης της έντασης άνθρακα της παγκόσμιας ναυτιλίας κατά 40% συγκριτικά με το 2008, μείωση των εκπομπών κατά τουλάχιστον 20%, και διεθνή υιοθέτηση καυσίμων μηδενικών ή χαμηλών εκπομπών άνθρακα τουλάχιστον σε ποσοστό 5%[9].

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, έχει θεσμοθετηθεί ο νέος κανονισμός της ΕΕ, «FuelEU Maritime» ο οποίος διασφαλίζει ότι η ένταση εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου των καυσίμων που χρησιμοποιούνται από τον τομέα της ναυτιλίας θα μειωθεί σταδιακά με την πάροδο του χρόνου, κατά 2% το 2025 έως και 80% έως το 2050. Σκοπός είναι η συμβολή στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα της ναυτιλίας, προωθώντας τη χρήση καθαρότερων καυσίμων και ενέργειας και μακροπρόθεσμα ανεξαρτητοποίηση του τομέα των θαλάσσιων μεταφορών από τα ορυκτά καύσιμα. Οι στόχοι αυτοί προβλέπεται να γίνουν πιο φιλόδοξοι με την πάροδο του χρόνου, ώστε να ενθαρρυνθούν και να αντανakλούν τις αναμενόμενες εξελίξεις στην τεχνολογία και την αυξημένη παραγωγή ανανεώσιμων καυσίμων και καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Συνολικά, αυτοί οι δείκτες δεν αναφέρονται μόνο στις άμεσες εκπομπών των πλοίων, αλλά σε όλες τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής των καυσίμων [3].

Για την επίτευξη αυτών των στόχων σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο, κανένα μεμονωμένο μέτρο δεν είναι επαρκές από μόνο του. Αν και υπάρχουν μεμονωμένα μέτρα για τα οποία αναφέρονται υψηλές δυνατότητες μείωσης

όπως η χρήση βιοκαυσίμων, αυτές δεν είναι αρκετές για τις προβλεπόμενες ανάγκες μείωσης εκπομπών. Ωστόσο υπάρχουν ενδείξεις ότι μια σημαντική μείωση των εκπομπών άνω του 75% είναι εφικτή με την ταχεία υιοθέτηση και το συνδυασμό μεγάλου αριθμού μεμονωμένων εξαρτημένων και ανεξάρτητων μέτρων. Με άλλα λόγια, είναι δυνατόν να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 4-6 φορές ανά όγκο φορτίου με τις τρέχουσες τεχνολογίες εντός του 2050 [4,10].

Η στρατηγική που περιγράφεται από τις αποφάσεις του IMO διακρίνεται στα εξής στάδια. Σε αρχικά χρονικά στάδια έμφαση θα δοθεί στην βελτίωση της έντασης άνθρακα σε ήδη υπάρχουσα πλοία αλλά και σε περαιτέρω βελτιώσεις για νεόδμητα πλοία. Ταυτόχρονα, προβλέπεται η αναγνώριση των κατάλληλων λειτουργικών δεικτών ενεργειακής απόδοσης, για την βελτίωση των οποίων θα δοθούν κίνητρα σε συνεργασία με μηχανισμούς βελτιστοποίησης των χρησιμοποιούμενων ταχυτήτων. Στη συνέχεια, σχεδιάζεται σύλληψη νέων μέτρων για την μείωση των ακούσιων εκπομπών μεθανίου (methane slip) και των εκπομπών οργανικών πτητικών ενώσεων, σε συνδυασμό με ενθάρρυνση κατασκευής λιμανιών και εγκαταστάσεων υποστήριξης των μέτρων μείωσης εκπομπών. Τέλος, δίνεται έμφαση στην ανάπτυξη κατευθυντήριων γραμμών για την ένταση εκπομπών του κύκλου ζωής των καυσίμων και δημιουργία προγραμμάτων για την αποτελεσματική υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων χαμηλών και μηδενικών εκπομπών άνθρακα [7,9].

Για να επιτευχθούν οι στόχοι του IMO για τα αέρια του θερμοκηπίου, τα νέα καύσιμα, παράλληλα με την βελτίωση των ενεργειακών αποδόσεων, θα έχουν καθοριστικό ρόλο. Οι τεχνολογίες γεφύρωσης και η ευελιξία κάποιων τεχνολογιών καυσίμων μπορούν να διευκολύνουν τη μετάβαση από τα παραδοσιακά καύσιμα και τα πλοία που σχεδιάζονται και κατασκευάζονται αυτή τη στιγμή θα πρέπει να εξετάζουν λύσεις για εναλλακτικά καύσιμα [4].

1.1.3. Πεδία πιθανής βελτίωσης χρήσης ενέργειας στη ναυτιλία

Με χρήση τωρινών τεχνολογιών υπάρχει μεγάλο δυναμικό βελτίωσης των καταναλώσεων ενέργειας στην ναυτιλία. Ακόμη και με χρήση συμβατικών καυσίμων, διάφορα μέτρα για την ενεργειακή απόδοση μπορούν να προσφέρουν σημαντικό δυναμικό μείωσης των εκπομπών διοξειδίου. Ο περιορισμός της ταχύτητας μειώνει την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές CO₂ κατά 20-30%, ωστόσο ο μεγαλύτερος χρόνος ταξιδιού μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος εκτέλεσης της διαδρομής λόγω πάγιων εξόδων, αλλά μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία του προγραμματισμού. Ταυτόχρονα, εκτιμάται ότι η ανάκτηση της απορριπτόμενης θερμότητας από τα συστήματα κίνησης των πλοίων χωρίς αλλαγή καυσίμου μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης του 4-16% [11].

Το σημείο εκκίνησης για καλύτερη αξιοποίηση της ενέργειας είναι η μείωση των απωλειών μέσω ανάκτησης της θερμότητας που περιέχεται στα καυσαέρια των χρησιμοποιούμενων κινητήριων μηχανών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας καυσαερίων, η οποία χαρακτηρίζεται κυρίως από μια ατμογεννήτρια ανάκτησης θερμότητας και συνήθως περιλαμβάνει έναν ατμοστρόβιλο, σε ορισμένες περιπτώσεις έναν αεριοστρόβιλο ισχύος, εναλλάκτες θερμότητας, καθώς και ηλεκτρικά συστήματα [12].

Μια άλλη πτυχή είναι το επίπεδο χρήσης τεχνολογιών. Τα κορυφαία πλοία του κλάδου είναι περίπου δύο φορές πιο αποδοτικά από τα υστερούντα σε εξοπλισμό σε όλους τους κύριους τύπους πλοίων. Εάν υιοθετηθούν πλήρως οι διαθέσιμες τεχνικές και πρακτικές χρήσης των σημερινών ηγετών της βιομηχανίας, θα υπήρχε η δυνατότητα να μειωθεί το διοξείδιο του άνθρακα σε απόλυτους όρους κατά περισσότερους από 300 εκατομμύρια τόνους έως το 2040, ακόμη και αν διπλασιαζόταν η συνήθης μετακίνηση εμπορευμάτων [13].

Αν και η προσέγγιση των τωρινών διατάξεων που επικεντρώνονται στη μείωση των εκπομπών είναι λογική, δεδομένων των σημερινών περιβαλλοντικών ανησυχιών, έχει επίσης οδηγήσει σε ορισμένες επιπλοκές. Για παράδειγμα, η έμφαση στην βελτίωση της απόδοσης έντασης άνθρακα έχει δημιουργήσει μια κατάσταση στην οποία τα πλοία δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στην ελαχιστοποίηση των επιπέδων του δείκτη τους παρά στη συνολική μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και ενέργειας. Αυτό δεν είναι μειονέκτημα από άποψη αποδοτικότητας, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η αύξηση της αποδοτικότητας ενός πλοίου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά για να είναι αποδοτική, κάτι που απαιτεί χρόνο, και έχει δυνατότητα ραγδαίας εξέλιξης τις επόμενες δεκαετίες. Ωστόσο, η μείωση του δείκτη έντασης άνθρακα είναι μόνο μια προσωρινή λύση έως να ληφθούν πιο μόνιμα μέτρα και αυτό το σύστημα παρουσιάζει ορισμένα τυφλά σημεία, όπως η παράβλεψη των πλοίων που δραστηριοποιούνται εντός χωρικών υδάτων και η εσφαλμένη αξιολόγηση των πλοίων Ro-Ro και γενικότερων των επιβατηγών πλοίων, που λόγω του τρόπου εκτίμησης έχουν πλασματικά μειωμένη αποτελεσματικότητα [4,13,14].

Συνολικά, είναι σημαντικό η πορεία προς την απαλλαγή από τα ορυκτά καύσιμα να περιλαμβάνει συνδυασμό καυσίμων, τεχνολογιών και πολιτικής και οι διάφοροι συνδυασμοί του καθενός να καλύπτουν τόσο βραχυπρόθεσμες όσο και μακροπρόθεσμες προσεγγίσεις. Για παράδειγμα η χρήση υγροποιημένη φυσικού αερίου φαίνεται να είναι οικονομικά εφικτή, τεχνολογικά ασφαλής και να εγγυάται περιβαλλοντικά οφέλη βραχυπρόθεσμα. Ένας συνδυασμός επιδοτήσεων και λιμενικών τελών μπορεί να επιταχύνει αποτελεσματικά την εφαρμογή της. Σε κάθε περίπτωση προσπάθειας βελτίωσης των εκπομπών είναι ζωτικής σημασίας να εισαχθεί μια συνολική πολιτική για όλους του κλάδους που

εξαρτούνται και αλληλοεπιδρούν με την ναυτιλία για να προωθηθεί η ταχεία απαλλαγή από τα ορυκτά καύσιμα [11].

1.2. Βιβλιογραφική επισκόπηση εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων

Όπως εξετάστηκε παραπάνω η χρήση εναλλακτικών καυσίμων είναι μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία. Για τα εναλλακτικά καύσιμα και τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας, η εφαρμοσιμότητα και η εμπορική βιωσιμότητα διαφέρουν σημαντικά για τους διάφορους τύπους πλοίων, όπου τα πλοία που εκτελούν δρομολόγια μεγάλων αποστάσεων έχουν λιγότερες επιλογές σε σύγκριση με αυτά των μικρών. Αυτή τη στιγμή, τα μόνο εναλλακτικά καύσιμα τα οποία είναι σε αρκετά ανεπτυγμένο επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας είναι το υδροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) και τα βιοκαύσιμα [4,10].

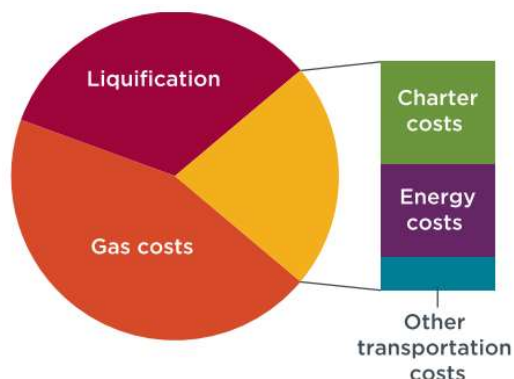
Η ευρεία υιοθέτηση καυσίμων με χαμηλές εκπομπές ενδεχομένως έχει την προοπτική να μην ολοκληρωθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, συνυπολογίζοντας το χρόνο που απαιτείται για την κατάλληλη ανάπτυξη κινητήρων καυσίμων χαμηλών εκπομπών άνθρακα, της παραγωγικής ικανότητας των ίδιων των καυσίμων, καθώς και των απαραίτητων υποδομών στην απαιτούμενη κλίμακα. Για αυτό το λόγο επισημαίνεται η σημασία της ευελιξίας ως προς το είδος καυσίμου των κινητήρων, των δεξαμενών αποθήκευσης και γενικά των συστημάτων εν πλω, καθώς και των υποδομών καυσίμων εκτός του πλοίου [10,15].

1.2.1. Φυσικό αέριο

Το υδροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) έχει ιδιαίτερη σημασία ως εναλλακτικό καύσιμο για τον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών, με ήδη λειτουργικά πλοία να το χρησιμοποιούν σε συνδυασμό με συμβατικό καύσιμο [16]. Το άμεσο πλεονέκτημα που προσφέρει είναι ότι απελευθερώνει λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα ανά μονάδα ενέργειας από ότι απελευθερώνει οποιοδήποτε άλλο ορυκτό καύσιμο. Ωστόσο, η απελευθέρωση ποσοτήτων μεθανίου κατά τη λειτουργία των κινητήρων (methane slip) μειώνει σε ένα βαθμό αυτό το πλεονέκτημα, επειδή το μεθάνιο (CH_4) έχει πολλαπλάσια εντονότερη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε σύγκριση με το CO_2 . Συνολικά, όμως οι εκπομπές των κινητήρων LNG εκτιμώνται να είναι 10 έως 20% χαμηλότερες από τις εκπομπές αυτών που λειτουργούν με ντίζελ ναυτιλίας [17,18].

Όσον αφορά την ανταγωνιστικότητα του LNG σε σχέση με το συμβατικό καύσιμο, εάν οι τιμές του πετρελαίου παραμείνουν σε χαμηλά επίπεδα, ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά το ενδιαφέρον για την χρήση φυσικού αερίου. Επιπρόσθετα, το ενεργειακό και χρηματικό κόστος που σχετίζεται με την υδροποίηση του φυσικού αερίου μπορεί να επηρεάσει έντονα το τελικό κόστος

χρήσης. Το μεγαλύτερο εμπόδιο, ωστόσο, στην υιοθέτηση του σε παγκόσμιο επίπεδο είναι η έλλειψη υποδομών και εγκαταστάσεων δεξαμενισμού. Ωστόσο, αυτό το πρόβλημα μπορεί να περιοριστεί εν μέρη με χρήση κινητήρων διπλού καυσίμου που μπορούν να λειτουργούν τόσο με LNG όσο και με συμβατικά καύσιμα αλλά και βιοκαύσιμα [17,19].



Διάγραμμα 2. Αναλογικά κόστη για την προμήθεια υγροποιημένου φυσικού αερίου[20]

Οι περιορισμοί στην περιεκτικότητα θείου στο ανώτατο όριο στο 0,5%, παρέχουν ένα πρόσθετο κίνητρο για την υιοθέτηση κινητήρων LNG, προκειμένου να επιτύχουν συμμόρφωση με τη σχετική νομοθεσία. Από την περιβαλλοντική σκοπιά η χρήση πλοίων με καύσιμο LNG αποτελεί επίσης ισχυρό επιχείρημα, καθώς εκτιμάται ότι είναι συνολικά λιγότερο ρυπογόνο ιδιαίτερα για δραστηριοποίηση σε παράκτια και ευαίσθητα οικοσυστήματα [4,19].

Εκτός από τον συμβατικό τρόπο παραγωγής του φυσικού αερίου υπάρχει η δυνατότητα σύνθεσης του από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα που ταυτόχρονα λύνει το πρόβλημα μακροπρόθεσμης αποθήκευση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας και το πρόβλημα της προσωρινή αποθήκευση προηγούμενως δεσμευμένου CO₂. Το συνθετικό φυσικό αέριο εκτιμάται να μειώνει τις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για την παραγωγή του κατά 76 με 80% σε σύγκριση με τη συμβατική παραγωγή φυσικού αερίου. Παρ' όλα αυτά, σε κατηγορίες άλλων επιπτώσεων όπως της εδαφικής οξίνισης και του ευτροφισμού το συνθετικό φυσικό αέριο εκτιμάται να έχει υψηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση η σύνθεση αποτελεί μία ενδιαφέρουσα λύση που μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα [21,22].

Τέλος, ένας ακόμη εναλλακτικός τρόπος παραγωγής φυσικού αερίου είναι από βιομάζα, δηλαδή η παραγωγή βιοαερίου. Αυτή η διαδικασία υπολογίζεται επανειλημμένα ότι έχει χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ωστόσο ο τύπος της πρώτης ύλης, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε κατηγορίες όπως χρήση πόρων και διασφάλιση οικοσυστημάτων [19,23].

1.2.2. Βιοκαύσιμα

Τα καύσιμα που προέρχονται από επεξεργασία βιομάζας μπορούν να έχουν ουσιαστικό ρόλο στη μετάβαση του ναυτιλιακού τομέα προς την βιωσιμότητα. Ακόμη και να μην υιοθετηθούν αμέσως στο μέγιστο δυνατό ποσοστό μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη όταν αναμειγνύονται με συμβατικά καύσιμα. Αυτή η δυνατότητα τους μπορεί να προσφέρει εξομάλυνση στη μετάβαση προς πιο βιώσιμα καύσιμα, μειώνοντας το κόστος υιοθέτησης των εναλλακτικών καυσίμων και περιορίζοντας αναλογικά με την χρήση τους τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Με εγγενή περιεκτικότητα σε μηδενικό ή χαμηλό ποσοστό θείου, τα βιοκαύσιμα συμβάλουν στον μετριασμό των εκπομπών θείου και ήδη χρησιμοποιούνται. Τα βιοκαύσιμα έχουν ευνοϊκές επιδόσεις στις περισσότερες κατηγορίες εκπομπών, παρουσιάζοντας βελτιωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τον κύκλο ζωής σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ ναυτιλίας με μειώσεις που κυμαίνονται από 40% έως 93%, και μετριασμό των εκπομπών οξειδίων του θείου και σωματιδιακής ύλης [19,24,25].

Ωστόσο, λόγω της πρόσφατης στροφής του τομέα προς τα βιοκαύσιμα υπάρχουν κενά γνώσης της συμβατότητας της ανάμειξης βιοκαυσίμων με τα συμβατικά καύσιμα πλοίων, η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με την πρώτη ύλη βιομάζας και φυσικά της επάρκειας εφοδιασμού και του κόστους. Για να έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερη εφαρμογή προϋποτίθεται ότι ο όγκος παραγωγής βιοκαυσίμων είναι αρκετά υψηλός ώστε να καλύπτει τη ζήτηση και σε ανταγωνιστική τιμή. Αυτοί οι δύο παράγοντες είναι καθοριστικοί για την εφαρμογή τους στα εν λειτουργία πλοία [26,27].

1.2.3. Μεθανόλη

Η μεθανόλη θεωρείται ένα από τα πιο ευνοϊκά εναλλακτικά καύσιμα καθώς έχει υψηλότερο βαθμό οκτανίου και μεγαλύτερες τιμές θερμότητας εξάτμισης σε σύγκριση με τη βενζίνη, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για κινητήρες υψηλής συμπίεσης με μεγαλύτερη ισχύ. Παρά την συγκριτικά με τα άλλα εναλλακτικά καύσιμα που αναλύονται, χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη, η ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα της είναι ικανοποιητική για χρήση σε εφαρμογές ναυτιλίας [28].

Η μεθανόλη ως εναλλακτικό καύσιμο μπορεί να παραχθεί με πολλούς τρόπους, για παράδειγμα με πρώτη ύλη το φυσικό αέριο ή τη βιομάζα αλλά η σύνθεση της από διοξείδιο του άνθρακα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε συνδυασμό με συστήματα δέσμευσης CO₂ μετά την καύση της. Αυτός ο συνδυασμός καθιστά τη μεθανόλη συμβατή με το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας, καθώς το δεσμευμένο διοξείδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σύνθεση της [29]. Ωστόσο, η σύνθεση μεθανόλης αποτελεί μια κοστοβόρα διεργασία και παρά τις προσπάθειες βελτιστοποίησης της, η τιμή της μεθανόλης πρέπει να μειωθεί περαιτέρω για να συμφέρει οικονομικά όταν ισοσταθμίζεται με την αποφυγή τελών εκπομπών CO₂ [30].

Η μεθανόλη μπορεί να παραχθεί από όλα σχεδόν τα οργανικά υλικά. Η επεξεργασία βιομάζας είναι ποσοστιαία η πιο αποδοτική από τις διεργασίες που έχουν αναπτυχθεί αυτή τη στιγμή για την παραγωγή μεθανόλης από ανανεώσιμες πηγές. Η διαδικασία για την παραγωγή μεθανόλης από βιομάζα έχει τα ίδια στάδια με αυτά των διαδικασιών που βασίζονται στο φυσικό αέριο και σε ορυκτές μορφές άνθρακα, δηλαδή ένα στάδιο αεριοποιητή βιομάζας για τη μετατροπή της πρώτης ύλης σε αέριο σύνθεσης, όπου ακολουθεί μια μονάδα σύνθεσης μεθανόλης [19].

Ένα μειονέκτημα της μεθανόλης είναι ότι χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη χημική βιομηχανία και η ζήτηση της έχει αυξηθεί κατά περίπου δύομισή φορές κατά τη διάρκεια των τελευταίων δέκα ετών. Η ταυτόχρονη χρήση της ως καύσιμο, μπορεί να επηρεαστεί και ως προς της ζήτηση της μεθανόλης αλλά και ως προς την τιμή της. Επιπρόσθετα, η μεθανόλη είναι τοξική για τον άνθρωπο και αφομοιώνεται εύκολα με την κατάποση και την εισπνοή και πιο αργά με την έκθεση στο δέρμα. Ως αποτέλεσμα στη διαχείριση της προτεραιότητα είναι η ασφάλεια μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού των δοχείων και των συστημάτων ανεφοδιασμού μεθανόλης [28,31].

1.2.4. Αμμωνία

Η αμμωνία θεωρείται μια ισορροπημένη επιλογή καυσίμου όσον αφορά την ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα της και το κόστος παραγωγής της σε ανανεώσιμη μορφή σε σύγκριση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα. Με τη χρήση αμμωνίας μπορεί να μεταφερθεί μεγαλύτερη ποσότητα ενεργειακού φορτίου και έχει πιο πρακτικές συνθήκες αποθήκευσης, λαμβάνοντας υπόψη την πίεση και τη θερμοκρασία, σε σύγκριση με το υδροποιημένο υδρογόνο [29].

Η μέθοδος Haber είναι η πιο συνηθισμένη τεχνική για την παραγωγή αμμωνίας, η οποία πρόκειται για μια εξώθερμη διεργασία που συνδυάζει υδρογόνο και άζωτο στην κατάλληλη αναλογία. Η αντίδραση για τη σύνθεση αμμωνίας απαιτεί χρήση καταλύτη και το βέλτιστο εύρος θερμοκρασίας πραγματοποίησης της είναι αρκετά υψηλό και κυμαίνεται από τους 500 °C έως τους 600 °C. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα και ο αντίκτυπος της παραγωγής αμμωνίας εξαρτάται από το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται και φυσικά από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των πρώτων υλών υδρογόνου και αζώτου [32]. Το άζωτο παράγεται με διάφορες μεθόδους από κρυογονική κλασματική απόσταξη του αέρα σε προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης καθώς και με διαχωρισμό του αέρα με χρήση μεμβρανών [33]. Οι πιθανοί μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου μπορούν να βρεθούν στο υποκεφάλαιο 1.2.5.

Ο κύριος κίνδυνος της αμμωνίας είναι η τοξικότητα της και οι επακόλουθες περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτής. Επομένως, κατά την αποθήκευση και το χειρισμό της αμμωνίας απαιτούνται κατάλληλα μέσα για τον περιορισμό της

πιθανότητας και των επιπτώσεων έκθεσης της σε ανθρώπους και οικοσυστήματα. Η αμμωνία είναι επίσης εύφλεκτο αέριο, ωστόσο είναι σχετικά δύσκολο να αναφλεγεί σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα έτσι αιτιολογείται και η ανάγκη προσθήκης πρόσθετων καυσίμων για την χρήση της σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Σε κάθε περίπτωση το ζήτημα της αποθήκευσης καυσίμου αμμωνίας αντιμετωπίζεται σε ικανοποιητικό επίπεδο, καθώς υπάρχουν υφιστάμενοι κανονισμοί και εμπειρία του προσωπικού που την διαχειρίζεται λόγω της ήδη εκτεταμένης μεταφοράς αμμωνίας ως φορτίο [34,35].

Οι υψηλές συγκεντρώσεις αμμωνίας τόσο στον αέρα όσο και στο νερό μπορούν να αποτελέσουν σοβαρή απειλή για όλους τους ζωντανούς οργανισμούς. Η αμμωνία αποτελεί μέρος του κύκλου του αζώτου, τόσο στον αέρα όσο και στο νερό, οπότε το περιβάλλον μπορεί να επανέλθει στη φυσική του κατάσταση με χαμηλά επίπεδα αμμωνίας. Παρ' όλα αυτά, η διαρροή αμμωνίας μπορεί να έχει μακροχρόνιες επιπτώσεις, καθώς η αποκατάσταση απαιτεί σημαντικό χρονικό διάστημα ανάλογα με την έκταση της διαρροής [35].

1.2.5. Υδρογόνο

Το υδρογόνο είναι ένα άχρωμο, άοσμο και μηδενικών εκπομπών καύσιμο εκτός από τον σχηματισμό μορίων νερού. Η αντίδραση αυτή μπορεί να λάβει χώρα είτε με τη μορφή χημικής αντίδρασης με τη βοήθεια της ανόδου μιας κυψέλης καυσίμου, είτε με την καύση σε κινητήρα εσωτερικής καύσης σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας [36]. Στην παρούσα μελέτη το υδρογόνο θεωρείται και αναλύεται με βάση την χρήση του ως καύσιμο εσωτερικής καύσης.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του καυσίμου υδρογόνου είναι το μεγάλο ενεργειακό του περιεχόμενο. Η ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου είναι μία από τις υψηλότερες μεταξύ των καυσίμων που χρησιμοποιούνται συνήθως για κινητήρες εσωτερικής καύσης. Για παράδειγμα, μια ποσότητα υδρογόνου μπορεί να παρέχει σχεδόν τρεις φορές περισσότερη ενέργεια από την αντίστοιχη ποσότητα ντίζελ και βενζίνης. Ωστόσο, η σημαντικά χαμηλή πυκνότητα του αερίου αλλά και του υγροποιημένου υδρογόνου παρουσιάζει σημαντικά ζητήματα σχετικά με τον αποθηκευτικό χώρο που απαιτείται για την τροφοδοσία για επαρκή εμβέλεια μεταφορών [29,37].

Ανάλογα με τις πρώτες ύλες και τη διαδικασία παραγωγής, το υδρογόνο ταξινομείται κυρίως σε γκρι, μπλε και πράσινο. Το γκρίζο υδρογόνο λαμβάνεται μέσω της αναμόρφωσης ορυκτών καυσίμων και πάνω από το 95% του παγκόσμιου υδρογόνου αυτή τη στιγμή παράγεται μέσω αναμόρφωσης, με περίπου το ήμισυ αυτής της ποσότητας να προέρχεται από την αναμόρφωση φυσικού ή σχιστολιθικού αερίου. Όταν οι αντίστοιχες εκπομπές CO₂ της παραγωγικής διαδικασίας δεσμεύονται και αποθηκεύονται, το υδρογόνο χαρακτηρίζεται ως μπλε. Τέλος, το πράσινο υδρογόνο αντιστοιχεί στη χρήση ανανεώσιμης πρώτης ύλης και ανανεώσιμης πηγής ενέργειας για τη μετατροπή

των πρώτων υλών και τη λειτουργία της εγκατάστασης επεξεργασίας. Μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών που εξετάζονται για την παραγωγή υδρογόνου, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιούνται συχνότερα για την παραγωγή υδρογόνου[38].

Παρόλο που το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να μειώσει τις επιβλαβείς εκπομπές του τομέα της ναυτιλίας, πρέπει να αντιμετωπιστούν ορισμένες κρίσιμες προκλήσεις πριν την ευρεία υιοθέτηση του για την τροφοδοσία κινητήρων εσωτερικής καύσης. Αυτές είναι η ανάπτυξη καθαρών και αποτελεσματικών μεθόδων παραγωγής σε επαρκείς ποσότητες, η διαθεσιμότητα σημείων ανεφοδιασμού και η αποθήκευση εν πλω, καθώς το υδρογόνο ως καύσιμο ελαφριάς πυκνότητας πρέπει να συμπιέζεται σε δεξαμενές υψηλής πίεσης για να επιτρέπει επαρκή εμβέλεια πλεύσης [29,37].

1.3. Δέσμευση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα εν πλω

Η δέσμευση, αξιοποίηση και αποθήκευση άνθρακα (CCUS) αποτελεί μια αποτελεσματική λύση που μπορεί να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, χωρίς να αναιρεί την χρήση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων. Δηλαδή έχει τη δυναμική να γεφυρώσει τη σημερινή παγκόσμια οικονομία ορυκτών καυσίμων και το μέλλον των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η δέσμευση CO₂ αναφέρεται στο διαχωρισμό του CO₂ και άλλων συστατικών από μείγματα αερίων συμπεριλαμβανομένων διαφόρων βιομηχανικών υπολειμματικών αερίων και καυσαερίων, μέσω διαφόρων τεχνικών. Η τεχνολογία δέσμευσης CO₂ μπορεί να χωριστεί συγκεκριμένα σε δέσμευση μετά την καύση, δέσμευση πριν από την καύση και τεχνολογία καύσης υπερεμπλουτισμένη με οξυγόνο [39].

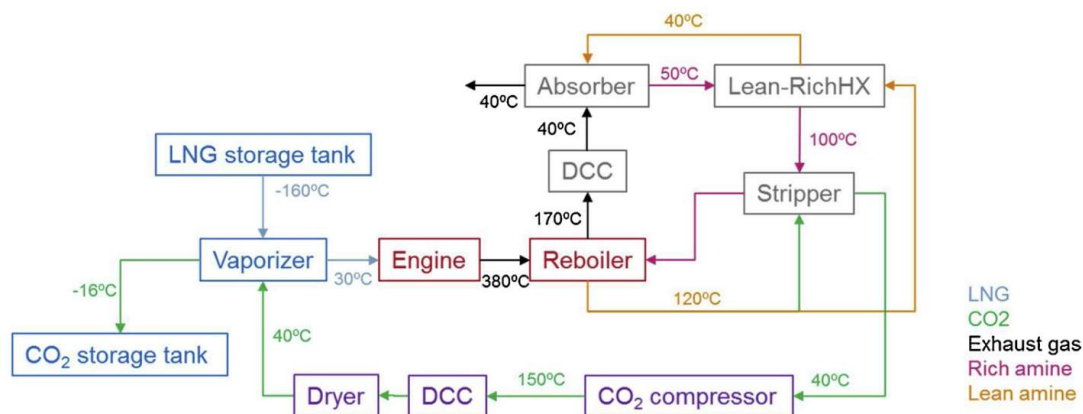
Η δέσμευση πριν από την καύση αναφέρεται στην αποανθρακοποίηση των ορυκτών καυσίμων και χρησιμοποιείται κυρίως στο ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου αεριοποίησης άνθρακα για τη μετατροπή των ορυκτών καυσίμων σε αέριο σύνθεσης, του οποίου τα κύρια συστατικά είναι το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο. Η τεχνολογία καύσης εμπλουτισμένης με οξυγόνο χρησιμοποιεί οξυγόνο υψηλής καθαρότητας για να αντικαταστήσει τον αέρα ως καύσιμο, ώστε η καύση πραγματοποιείται στον υψηλότερο δυνατό βαθμό. Ωστόσο, στην περίπτωση της ναυτιλίας πρωτεύοντος ενδιαφέροντος είναι η δέσμευση CO₂ μετά την καύση.

Η τεχνολογία δέσμευσης μετά την καύση είναι μια σχετικά ώριμη τεχνολογία, η οποία αφορά κυρίως τη δέσμευση του CO₂ στα καυσαέρια σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, βιομηχανικών μονάδων και άλλων συστημάτων. Η υιοθέτηση της δέσμευσης μετά την καύση θεωρείται από τις πιο εφαρμόσιμες τεχνικές, επειδή μπορεί να ενσωματωθεί άμεσα στο υπάρχον σύστημα εξοπλισμού χωρίς εκτεταμένες τροποποιήσεις [40]. Οι βασικές μέθοδοι είναι η

χημική απορρόφηση, ο διαχωρισμός μέσω τεχνολογιών μεμβρανών, ο κρουγενικός διαχωρισμός, και τέλος η κυκλική απορρόφηση μέσω αλάτων.

Η χημική απορρόφηση αφορά τη χρήση χημικών διαλυτών για την απορρόφηση του CO₂. Οι διαλύτες σχηματίζουν έναν ασθενή δεσμό με το CO₂ και αυτός ο δεσμός διασπάται με έντονη θέρμανση και απελευθερώνεται το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα. Η διαδικασία απορρόφησης έχει συχνά υψηλή εκλεκτικότητα διοξειδίου και μεγάλη ικανότητα απορρόφησης και είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη και ώριμη τεχνολογία δέσμευσης CO₂ αυτή τη στιγμή. Ωστόσο, ορισμένα μειονεκτήματα, όπως η απαίτηση υψηλής ενέργειας για την αναγέννηση των διαλυτών, η έντονη διάβρωση, η υψηλή τοξικότητα, η υψηλή απώλεια των διαλυτών λόγω χαμηλής σταθερότητας και το υψηλό κόστος, αποτελούν τα σημαντικότερα εμπόδια για την ευρεία ανάπτυξη αυτής της τεχνικής [41].

Η χρήση δέσμευσης σε πλοία που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υγροποιημένο φυσικό αέριο παρουσιάζουν την επιπλέον δυνατότητα ολοκλήρωσης του συστήματος προθέρμανσης του φυσικού αερίου για την κάλυψη αναγκών αποθήκευσης. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται παράδειγμα αυτής της ενσωμάτωσης χρησιμοποιώντας τεχνολογία χημικής απορρόφησης. Για την αντίστοιχη χρήση ντίζελ ναυτιλίας ή κάποιο άλλου καυσίμου, πρέπει να εγκατασταθεί ένα πρόσθετος κύκλος ψύξης έτσι ώστε να μειωθεί η θερμοκρασία του συμπιεσμένου CO₂ και να υγροποιηθεί πριν μεταφερθεί στις δεξαμενές αποθήκευσης [42].



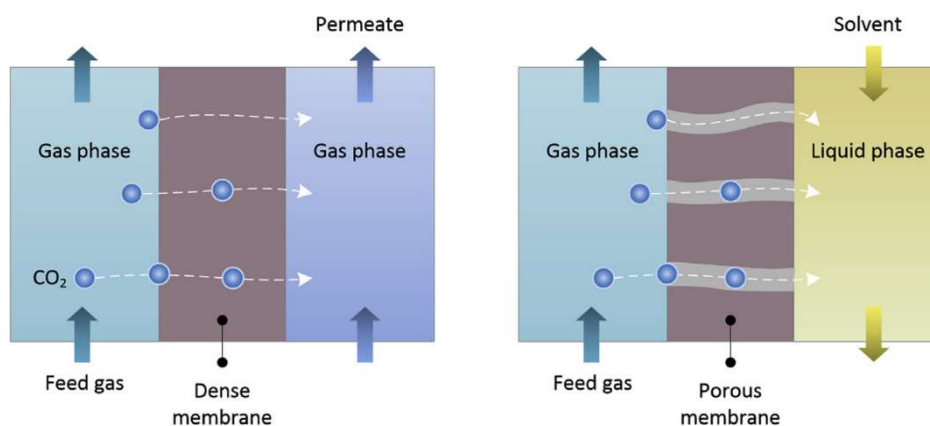
Σχήμα 1. Γραφική αναπαράσταση ενσωμάτωσης συστήματος δέσμευσης CO₂ μέσω απορρόφησης στο σύστημα πλοίου LNG [42]

Όσον αφορά το διαλύτη, η χρήση μονοαιθανολαμίνης (MEA) φαίνεται να είναι η καταλληλότερη για εφαρμογές στη ναυτιλία, καθώς παρά την υπαρκτή τοξικότητά της, είναι λιγότερο τοξική από άλλους διαλύτες που προσδίδουν την ίδια αποτελεσματικότητα [43].

Ο διαχωρισμός με μεμβράνες είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος, καθώς συχνά αυτά τα συστήματα έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, χαμηλό

λειτουργικό κόστος, μικρό αποτύπωμα και εύκολη κλιμάκωση. Η τεχνολογία μεμβρανών έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε διάφορες εφαρμογές, όπως για την αντίστροφη ώσμωση αντί της απόσταξης και για τον καθαρισμό φυσικού αερίου αντί των συστημάτων απορρόφησης αμίνης.

Εντός αυτής της κατηγορίας μεθόδων υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με τον μηχανισμό διαχωρισμού. Στην περίπτωση μεμβρανών διαχωρισμού αερίων (membrane gas separation) τα μόρια CO_2 απορροφώνται από την πλευρά της τροφοδοσίας, στη συνέχεια διαπερνούν την μεμβράνη και εκροφώνται σε αέριο διαλύτη. Υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης πορώδων μεμβρανών σε συνδυασμό με υγρό διαλύτη στην άλλη πλευρά της μεμβράνης (membrane contactor method). Οι δύο τεχνικές μπορούν να φανούν στην Εικόνα 1, όπου στα αριστερά παρίσταται η μέθοδος membrane gas separation και στα δεξιά η membrane contactor [44].



Εικόνα 1. Αναπαράσταση μεθόδων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με μεμβράνες[44]

Η διεργασία κυκλική απορρόφηση μέσω ανθρακικών αλάτων ασβεστίου (calcium looping) βασίζεται στην αντιστρεπτή αντίδραση αερίου-στερεού μεταξύ οξειδίου του ασβεστίου και διοξειδίου του άνθρακα προς σχηματισμό ανθρακικού ασβεστίου. Η τυπική συγκέντρωση CO_2 στην τροφοδοσία κυμαίνεται μεταξύ 5-30% ανάλογα με την εφαρμογή και η εξώθερμη αντίδραση λαμβάνει χώρα σε ανθρακοποιητή σε εύρος θερμοκρασιών από 600 έως 700 °C, στον οποίο η μερική πίεση του CO_2 είναι πάρα πολύ μικρή. Ο λόγος που αναφέρεται αυτή η μέθοδος είναι γιατί οι τεχνοοικονομικές πτυχές της έχουν εξεταστεί από διάφορους ερευνητές και φαίνεται να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές διεργασίες με βάση τις αμίνες όσον αφορά το κόστος ανά τόνο CO_2 που δεσμεύεται. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα πολλά εμπόδια για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας σε μεγάλη κλίμακα και προβλέπεται να απαιτεί χρόνια ανάπτυξης πριν την εμπορική της εφαρμογή [45,46].

Η βασική αρχή της κρυογονικής δέσμευσης CO₂ είναι η ψύξη του μικτού αερίου και η χρήση της διαφοράς στο σημείο δρόσου μεταξύ του CO₂ και άλλων συστατικών για την επίτευξη αλλαγής φάσης και άρα του διαχωρισμού του διοξειδίου. Ωστόσο αυτή η μέθοδος απαιτεί πολύ υψηλή κατανάλωση ενέργειας ειδικά όταν η τροφοδοσία έχει χαμηλή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα. Δύο κύριοι λόγοι εξηγούν τη μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση του διαχωρισμού. Πρώτον, η συγκέντρωση του CO₂ στα καυσαέρια αραιώνεται από το άζωτο στον αέρα, το οποίο απαιτεί περισσότερη ενέργεια κατά το διαχωρισμό. Δεύτερον, η συμπίεση και η υγροποίηση του διαχωρισμένου CO₂ καταναλώνουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Σε εφαρμογές εν πλω με χρήση LNG, η εκμετάλλευση της ψυχρής ενέργειας της προθέρμανσης του υγροποιημένου φυσικού αερίου πριν την καύση του, για το διαχωρισμό του CO₂ έχει τη δυνατότητα να είναι κομβική για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του διαχωρισμού. Το πλεονέκτημά του κρυογονικού διαχωρισμού είναι ότι το υγροποιημένο διοξείδιο του άνθρακα μπορούν να ληφθεί σε χαμηλότερη πίεση, αλλά αυτή τη στιγμή η χρήση της περιορίζεται σε εφαρμογές όπου η τροφοδοσία έχει υψηλή συγκέντρωση διοξειδίου [39,47].

1.4. Σκοπός

Κύριος σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η ενημέρωση και η καθοδήγηση ενδιαφερόμενων φορέων, αναφορικά με την κατεύθυνση που πρέπει να ακολουθηθεί, ώστε ο εκσυγχρονισμός των ναυτιλιακών συστημάτων να έχει άμεσα αποτελέσματα στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου άνθρακα και του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Η έμμεση και άμεση επιρροή του τομέα μεταφορών αγαθών και επιβατών στη κλιματική κρίση είναι αναμφισβήτητη, οπότε υπάρχει επιτακτική ανάγκη για αναμόρφωση του.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια πληθώρα προτάσεων με στόχο ο ναυτιλιακός τομέας να πλησιάσει την αιεφορία, η καθεμία με διαφορετικές ελκυστικές ιδιότητες γεγονός το οποίο καθιστά την σύγκριση τους προβληματική. Επιπρόσθετη δυσκολία, προσδίδει η διαφοροποίηση των σεναρίων ως προς το τεχνολογικό επίπεδο ωριμότητας τους και το χρονικό ορίζοντα υλοποίησης τους. Εφόσον υπάρχει γενικό ενδιαφέρον για μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες εφαρμογές, έχουν ληφθεί υπόψη τεχνολογίες των οποίων η ανάπτυξη βρίσκεται σε εξέλιξη καθώς και αυτών που έχουν φτάσει σε ώριμο τεχνολογικό επίπεδο αλλά η αλυσίδα εφοδιασμού ή το δίκτυό τους είναι ανεπαρκές για τις ανάγκες της αγοράς.

Όλες αυτές οι επιλογές αναλύονται υπό αντίστοιχες συνθήκες και παραδοχές εργασίας, ώστε η σύγκριση μεταξύ τους να είναι έγκυρη και να οδηγήσει σε ένα ρεαλιστικό σχέδιο δράσης για τους παραγωγούς και προμηθευτές καυσίμων, τους κατασκευαστές ναυτικών μηχανών, τα ναυπηγεία, τους ναυλωτές, τα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα, τα λιμάνια και τους νομοθέτες.

Κεφάλαιο 2: Προσδιορισμός προβλήματος

Στο παρακάτω κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι παράμετροι ενδιαφέροντος της μελέτης περίπτωσης και ορίζονται οι βασικές συνθήκες και το πλαίσιο που ακολουθήθηκε.

2.1. Επιλογή καυσίμων προς μελέτη

Πρωτεύουσας σημασίας είναι ο προσδιορισμός ενός καυσίμου που υπάγεται στους πρακτικούς περιορισμούς τους οποίους επιβάλλει ο ναυτιλιακός τομέας και ταυτόχρονα μπορεί να εκπληρώσει τους φιλόδοξους στόχους για μείωση εκπομπών. Με την επιλογή χρήσης καυσίμου από μία χώρα ή σε μικρότερη κλίμακα μία ναυτιλιακή εταιρεία, ακολουθούν δεσμεύσεις και επενδύσεις μεγάλης έκτασης, οι οποίες φυσικά παρουσιάζουν έναν βαθμό επικινδυνότητας. Για να είναι επιτυχής η μετάβαση προς πιο βιώσιμα καύσιμα, πρέπει να υπάρξει συνολική αλλαγή γιατί η παγκόσμια φύση των διαδρομών των εμπορικών και επιβατικών πλοίων προϋποθέτει τη δυνατότητα ανεφοδιασμού και εκφόρτωσης λιμάντων, όπως διοξειδίου του άνθρακα σε διάφορα λιμάνια.

Για αυτούς τους λόγους σε αυτή τη μελέτη δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις προοπτικές χρήσης ντίζελ ναυτιλίας και υγροποιημένου φυσικού αερίου, καθώς είναι ήδη διαδεδομένα καύσιμα. Σε συνδυασμό είτε με δέσμευση διοξειδίου, είτε με περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο παραγωγής παρουσιάζουν δυνατότητα να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Ωστόσο, προοπτικές για μείωση των εκπομπών ειδικά σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα, έχουν και πολλά εναλλακτικά καύσιμα. Από αυτά επιλέγονται, πρώτον η μεθανόλη, με δυνατότητα ενσωμάτωσης με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι μέρος ενός κυκλικού προτύπου οικονομίας. Επιπλέον, επιλέγεται η αμμωνία και το υδρογόνο, τα οποία δεν έχουν άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, και υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής τους από πλήρως ανανεώσιμη η ενέργεια.

Όλα τα παραπάνω καύσιμα είναι στο προσκήνιο των εξελίξεων του τομέα μεταφορών γενικότερα, και η σύγκριση τους καθώς και των τρόπων παραγωγής τους είναι μείζονος σημασίας και έχει την δυνατότητα να δείξει τάσεις για άμεση μετάβαση σε ένα αειφορικό μοντέλο μεταφορών.

2.2. Επιλογή δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα

Η δέσμευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έχει την δυνατότητα να μειώσει δραστικά τις εκπομπές της ναυτιλίας και αποτελεί ελκυστική λύση, επειδή η εφαρμογή της μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε είδους σύστημα, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χώρος. Δηλαδή, η υιοθέτηση της δέσμευσης μπορεί να γίνει άμεσα, χωρίς αλλαγή καυσίμου, με κύριο περιορισμό το κόστος.

Καθώς η εφαρμογή και το αντίστοιχο κόστος διαφόρων τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα είναι πέραν του αντικειμένου της παρούσας μελέτης, επιλέγεται η μέθοδος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μέσω απορρόφησης με μονοεθανολαμίνη (MEA), ως αντιπροσωπευτική προς μελέτη των διάφορων συστημάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλέγεται για το υψηλό ποσοστό απόδοσης δέσμευσης που παρουσιάζει (~90%), την ευκολία χρήσης των συστημάτων με δυνατότητες αυτοματοποίησης και τέλος το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας [43]. Ωστόσο, για χάρη πλήρους σύγκρισης, ακόμα και για τα καύσιμα που παράγουν ρίπους διοξειδίου του άνθρακα θα μελετηθούν και περιπτώσεις με απουσία συστήματος δέσμευσης.

2.3. Επιλογή πλαισίου μελέτης περίπτωσης

Οι παραπάνω παράμετροι σε συνδυασμό με την εφαρμογή αρχών ενεργειακής ολοκλήρωσης, μελετώνται σε ένα ενιαίο σύστημα έτσι ώστε να υπάρχει κοινή βάση σύγκρισης και να μπορούν να συναχθούν ασφαλώς συμπεράσματα για τη συγκριτική αποτελεσματικότητα και βιωσιμότητα των διάφορων περιπτώσεων. Το πλαίσιο μελέτης ορίζεται ως ένα ταξίδι από το λιμάνι του Πειραιά έως το λιμάνι της Ρόδου, με χρήση του επιβατικού ROPAX Blue Star Patmos, διεξάγοντας τις ενδιάμεσες στάσεις που κάνει το συγκεκριμένο δρομολόγιο στην παρούσα χρονική περίοδο σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες.

Το συγκεκριμένο πλοίο επιλέγεται καθώς αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα των πλοίων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα για ταυτόχρονη μεταφορά επιβατών και φορτίου, και η λειτουργία τους είναι απαραίτητη για την πράσινη μετάβαση, ειδικά εάν ληφθούν υπόψιν οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες του τουριστικού τομέα.

2.4. Ανάγκη μελέτης περιβαλλοντικού αντίκτυπου

Για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου γίνεται υπολογισμός των συνολικών εκπομπών καθ' όλη τη διάρκεια κύκλου ζωής των καυσίμων και της χρήσης τους εντός του συστήματος μέσω του λογισμικού SimaPro V9.5.

Εκτός από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, μελετάτε και η επίδραση άλλων ειδών εκπομπών παραδείγματος χάρη των οξειδίων του αζώτου και των βαρέων μετάλλων, εκ των οποίων το δεύτερο απελευθερώνεται κατά την εξόρυξη και διύλιση ορυκτών καυσίμων. Η επιρροή τέτοιων εκπομπών είναι ορατή ιδιαίτερα σε εκτίμηση κατηγοριών όπως ζημία σε οικοσυστήματα και ζημία στην ανθρώπινη υγεία. Επιπρόσθετα, κομβικός είναι ο προσδιορισμός των πιο επιδραστικών ως προς τις συνολικές εκπομπές υποσταδίων, καθώς και η ποσοτικοποίηση της δυνητικής τους βελτίωσης χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες εναλλακτικές ή καινοτόμες μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας.

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

Στην παρούσα μελέτη, η μεθοδολογία που εφαρμόζεται περιλαμβάνει αρχικά την ενεργειακή ανάλυση του συστήματος για κάθε περίπτωση που μελετάται με αρχικά δεδομένα παρμένα από εταιρίες του κλάδου. Ακολουθείτε από την ενεργειακή ολοκλήρωση για πλήρης αξιοποίηση των θερμικών ρευμάτων που χρησιμοποιούνται και τέλος πραγματοποιείται ανάλυση κύκλου ζωής ώστε να προσδιορισθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κάθε περίπτωσης. Αυτή η ανάλυση γίνεται σε συστήματα όπου εφαρμόζεται ολοκλήρωση ώστε τα αποτελέσματα να αποτελούν καλύτερη αναπαράσταση της δυναμικής βελτίωσης τους για περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας.

3.1. Ενεργειακή ανάλυση

3.1.1. Δυναμικό & ενεργειακές ανάγκες του Blue Star Patmos

Το Blue Star Patmos είναι επιβατηγό-οχηματαγωγό πλοίο (Passenger/RO-RO Cargo Ship) της εταιρείας Blue Star Ferries, κατασκευασμένο από την Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering το 2012 με μήκος 145,9 m και πλάτος 23,2 m. Η μέγιστη ταχύτητα του είναι 25,5 κόμβοι και έχει ικανότητα μεταφοράς 2000 επιβατών και συνολικό νεκρό φορτίο 2637 ton. Τα δρομολόγια που εκτελεί από το λιμάνι του Πειραιά έχουν προορισμούς στην περιοχή των Δωδεκανήσων. Όλα τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο 3.1.1. αποκτήθηκαν από την εταιρεία Hydrus Engineering στα πλαίσια συνεργασίας με το Ενεργειακό Κέντρο Ικανοτήτων [48].

Το σύστημα πρόωσης αποτελείται από τέσσερις κινητήρες τύπου MAN B&W 16V3240 που χρησιμοποιούν βαρύ πετρέλαιο κίνησης (HFO) ή ντίζελ ναυτιλίας (MDO), με μέγιστη ισχύ 8000 kW σε 750 rpm, άρα συνολικά υπολογίζεται ότι για χρήση 100% των κινητήρων η ισχύς αναγκαία για πρόωση ισούται με 32000 kW. Όλοι οι κινητήρες διαθέτουν δύο συμπιεστές υπερπλήρωσης (turbocharger) και δύο από τους τέσσερις κινητήρες κάνουν χρήση συστημάτων μερικής ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων (exhaust gas economizer).

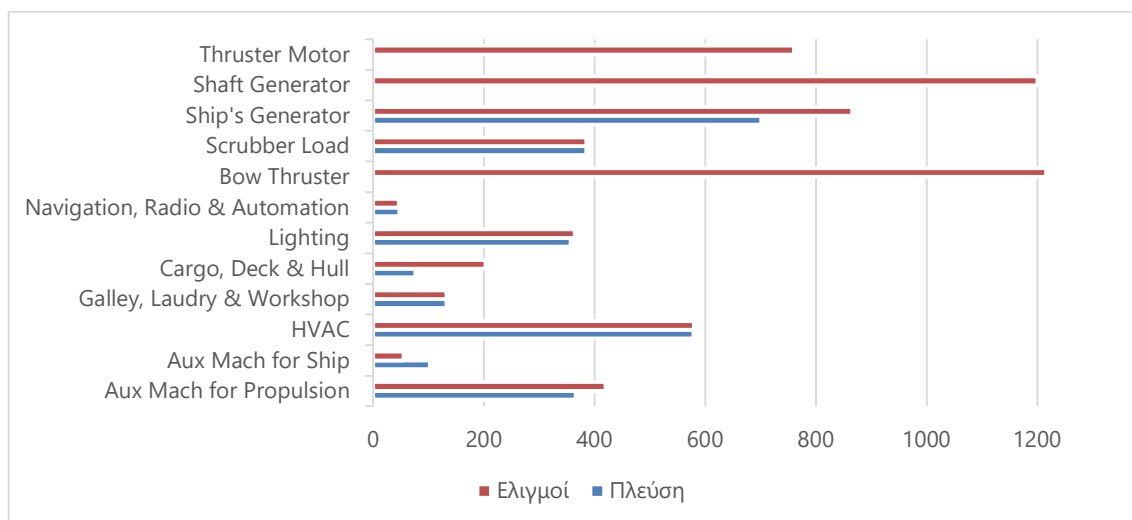
Οι ηλεκτρικές ανάγκες του πλοίου διαφοροποιούνται ανάλογα με την συνθήκη χρήσης, δηλαδή εάν είναι σε πλεύση, εκτελεί ελιγμούς, είναι στη διαδικασία φόρτωσης ή σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Σε αυτή την ανάλυση λαμβάνονται υπόψη μόνο οι δύο καταστάσεις όπου θεωρείται ότι το πλοίο εκτελεί διαδρομή με άλλα λόγια η κατάσταση πλεύσης και η κατάσταση εκτέλεσης ελιγμών.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ανάλυση των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας ανά κατηγορία και ακολούθως απεικονίζεται η διαφορά των αναγκών ανάμεσα στις δύο καταστάσεις που μελετώνται.

Πίνακας 1. Σύνοψη ηλεκτρικών αναγκών Blue Star Patmos ανά κατηγορία

Κατηγορία χρήσης	Πλεύση	Ελιγμοί
	(kW)	(kW)
Aux Mach for Propulsion	365,9	419,64
Aux Mach for Ship	102,4	54,84
HVAC	578,24	578,73
Galley, Laundry & Workshop	132,31	132,21
Cargo, Deck & Hull	76,14	202,84
Lighting	356,76	364,34
Navigation, Radio & Automation	47,66	46,22
Bow Thruster	0	1216
Scrubber Load	385	385
Ship's Generator	700,99	865,26
Shaft Generator	0	1200
Thruster Motor	0	760
Σύνολο	2745,4	6225,08

Είναι προφανές ότι η εκτέλεση ελιγμών αποτελεί μια ιδιαίτερα ενεργοβόρα λειτουργία, λόγω των αναγκών για βοηθητική πρόωση για τον ακριβή έλεγχο της κατεύθυνσης του πλοίου όπως φαίνεται από τις ανάγκες των κατηγοριών Bow Thruster και Shaft Generator.

**Διάγραμμα 3. Σύγκριση ηλεκτρικών αναγκών ανάμεσα στην πλεύση και την εκτέλεση ελιγμών**

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τρεις ηλεκτροκινητήρες τύπου STX 6L21/31, που χρησιμοποιούν επίσης βαρύ πετρέλαιο κίνησης ή ντίζελ ναυτιλίας, ωστόσο δεν διαθέτουν κάποιο πρόσθετο σύστημα ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων.

Αντίστοιχα, για την κάλυψη των αναγκών θερμικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται δύο θερμαντήρες θερμικού ελαίου με κατασκευαστή την

εταιρεία AALBORG και δυνατότητα θέρμανσης 1400 kW/set που καταναλώνουν τα ίδια καύσιμα με τους άλλους κινητήρες. Οι καταναλώσεις που καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα αντιστοιχούν σε συνθήκες ISO, δηλαδή θεωρείται ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 25° C, και επιλέχθηκαν ως πιο αντιπροσωπευτικές της λειτουργίας των πλοίων στην Ελλάδα, καθώς τα δεδομένα δίνονται σε δύο κατηγορίες συνθηκών αυτή του χειμώνα με θερμοκρασία περιβάλλοντος -5° C και σε συνθήκες ISO.

Ακόμη, οι παρακάτω θερμικές ανάγκες υπολογίζονται για χρήση ποσοστού ισχύς κινητήρων 85% με χρήση και των τεσσάρων κινητήρων, και θεωρείται ότι παραμένουν σταθερές με αλλαγή του ποσοστού ισχύς καθώς δεν ήταν διαθέσιμα περαιτέρω δεδομένα για τον ασφαλή υπολογισμό των μεταβολών. Τέλος, οι υπολογισμοί έχουν εκτελεστεί υποθέτοντας 5% περιθώριο απωλειών κατά τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης.

Πίνακας 2. Σύνοψη θερμικών αναγκών Blue Star Patmos σε συνθήκες ISO

Κατηγορία κατανάλωσης	Συνθήκες		Πλεύση	Ελιγμοί
	Tin (C)	Tout (C)	ΔH (kW)	ΔH (kW)
M/E MDO HEATER	100	140	313,2	78
A/E MDO HEATER	100	140	13,7	13,7
FO PURIFIER HEATER	60	98	175,4	87,7
M/E LO PURIFIER HTR	45	95	122,1	61
A/E LO PURIFIER HTR	45	95	10,2	10,2
HOT WATER CALORIFIER	25	60	1610	1610
NO.3 MDO STORAGE TK, P	25	45	67,9	67,9
NO.3 MDO STORAGE TK, S	25	45	67,9	67,9
MDO SETTLING TANK, P	45	60	20,4	25,5
MDO OVFL TANK	25	45	40,6	40,6
NO.1 SLUDGE TANK	25	40	0	10,6
NO.1 SLUDGE TANK K	25	40	10,6	0
NO.2 SLUDGE TANK	25	40	0	17,6
NO.2 SLUDGE TANK K	25	40	17,6	0
B.WATER TANK(DIRTY)	25	40	0	5,2
B.WATER TANK(DIRTY) K	25	40	5,2	0
B.WATER TANK(CLEAN)	25	40	0	5,2
B.WATER TANK(CLEAN) K	25	40	24,7	0
B.WATER DRAIN TANK	5	40	0	24,7
B.WATER DRAIN TANK K	5	40	15,1	0
DIRTY LO TANK	5	40	0	13,6
DIRTY LO TANK K	5	40	13,6	0
LO RENOVATING TANK	5	40	0	2,7
LO RENOVATING TANK K	5	40	2,7	0
LO RENOVATED TANK	5	40	0	2,5
LO RENOVATED TANK K	5	40	2,5	2,5
F.O DRAIN TANK(DIRTY)	25	40	3,1	3,1
F.O DRAIN TANK(CLEAN)	25	40	3,1	3,1
Σύνολο			2539,6	2153,3

Οι γραμμές που έχουν υπογραμμιστεί στον Πίνακα 2, αντιστοιχούν σε λειτουργίες που αφορούν συγκεκριμένα την χρήση συμβατικού καυσίμου. Όλα τα υπόλοιπα ψυχρά ρεύματα θεωρούνται ότι είναι μέρος των ενεργειακών αναγκών του πλοίου ανεξαρτήτως της χρήσης καυσίμου, και τα υπογραμμισμένα αντικαθίστανται με διαφορετικά ρεύματα για κάθε

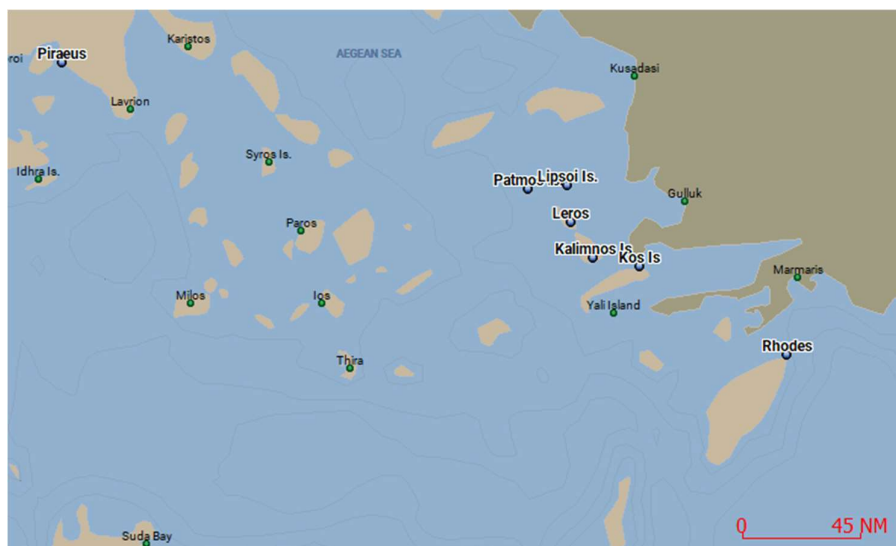
εναλλακτικό καύσιμο και αναφέρονται στα αποτελέσματα υπό την κατηγορία προθέρμανση καυσίμου.

Επιπρόσθετα, παρά τη δυνατότητα υπολογισμού της θερμότητας που ανακτάται από το ήδη υπάρχων σύστημα ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων, αυτή η ποσότητα δεν θα προσμετρηθεί στην κάλυψη των αναγκών που αναγράφονται στον Πίνακα 2, καθώς γίνεται η υπόθεση ότι έχουν ήδη ληφθεί υπόψη επειδή αυτές οι ενεργειακές ανάγκες αναγράφονται σαν φορτίο των θερμαντήρων θερμικού ελαίου. Σε όποιο σημείο παρακάτω αναφερθούν συστήματα ανάκτησης θερμότητας εννοείται ότι αντιστοιχούν σε πρόσθετα.

3.1.2. Υπολογισμός διάρκειας διαδρομής

Η διαδρομή που επιλέχθηκε προς μελέτη ξεκινά από το λιμάνι του Πειραιά με τελικό προορισμό τη Ρόδο, με ενδιάμεσα λιμάνια στα νησιά Πάτμος, Λειψοί, Λέρος, Κάλυμνος, και Κως. Αυτή η διαδρομή επιλέχθηκε καθώς είναι από τα μεγαλύτερα δρομολόγια που εκτελούνται από το Blue Star Patmos, άρα και δυνητικά έχει το μεγαλύτερο περιθώριο για εξοικονόμηση ενέργειας και για μείωση εκπομπών.

Στην ανάλυση μελετάται μόνο η μετάβαση στη Ρόδο, εκτός από την περίπτωση των υπολογισμών για το διοξείδιο του άνθρακα που αποθηκεύεται όπου λαμβάνεται υπόψη η διαδρομή μετ' επιστροφής. Οι ακριβείς αποστάσεις υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού Net Pas Distance V4.1 για μεγαλύτερη ακρίβεια καθώς παρέχει ρεαλιστικά μονοπάτια δρομολόγησης. Η Εικόνα 2 πάρθηκε από το συγκεκριμένο λογισμικό και απεικονίζει τα λιμάνια της διαδρομής που μελετάται. Οι αποστάσεις που υπολογίζονται μπορούν να βρεθούν στον Πίνακα 23.



Εικόνα 2. Χάρτης λιμανιών διαδρομής μελέτης περίπτωσης

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων που αντιστοιχούν στις τρεις περιπτώσεις χρήσης ποσοστού ισχύς κινητήρα (60%, 75%, 90%) χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση 1.

Εξίσωση 1. Απλοποιημένο μοντέλο σχέσης ισχύς κινητήρα με την ταχύτητα του πλοίου

$$P = x_1 \cdot V^{x_2} \text{ [49]}$$

Η άγνωστη μεταβλητή x_2 δίνεται βιβλιογραφικά για τη συγκεκριμένη κατηγορία σκαφών (T039-06) η οποία βασίζεται στις προδιαγραφές μεγέθους και ισχύς [49]. Γνωρίζοντας την μέγιστη ταχύτητα και ισχύ του Blue Star Patmos μπορεί να υπολογιστεί η μεταβλητή x_1 . Οι τιμές των δύο μεταβλητών δίνονται παρακάτω.

Πίνακας 3. Μεταβλητές σχέσης ισχύς κινητήρα με ταχύτητα

Σταθερές μοντέλου	
x_1	0,0275
x_2	2,18

Θεωρώντας ότι το πλοίο διατηρεί σταθερή ταχύτητα κατά τη διάρκεια της πλεύσης μπορεί να υπολογιστεί η διάρκεια κάλυψης των αποστάσεων ανάμεσα στα λιμάνια. Για την εκτίμηση της διάρκειας των ελιγμών σε κάθε λιμάνι χρησιμοποιήθηκε η ιστοσελίδα Marine Traffic, με παρακολούθηση της οποίας κατά την εκτέλεση αυτού του δρομολογίου από το Blue Star Patmos, εκτιμάται ότι ο συνολικό χρόνος πραγματοποίησης ελιγμών είναι 2,2 h [50].

3.1.3. Επιλογή κινητήρων

Για καθένα από τα εναλλακτικά καύσιμα, επιλέγονται αντίστοιχοι κινητήρες που υπάρχουν ήδη στην αγορά ναυτιλιακών κινητήρων με την εξαίρεση της αμμωνίας, όπου επιλέγεται ένας κινητήρας που έχει σχεδιαστεί με προοπτική την χρήση της αμμωνίας σε λειτουργία διπλού καυσίμου[51]. Σε αυτή τη περίπτωση, η αμμωνία χρησιμοποιείται σε μικρότερη από στοιχειομετρική αναλογία, ωστόσο θεωρείται για χάρη της μελέτης ότι ο κινητήρας έχει αντίστοιχες αποδώσεις με ολική χρήση αμμωνίας.

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά κινητήρων & καυσίμων

Είδος καυσίμου	MDO	LNG	MET	AMM	HYD
Μοντέλο κινητήρα	MAN B&W 16V3240	Wärtsilä 7L46TS-DF [52]	Wärtsilä 9L32 [51]	Wärtsilä 9L25DF [53]	BeHydro 16DZ-H2 [54]
Μέγιστη ισχύ (kW)	8000	9100	5220	2800	2670
Αριθμός κινητήρων	4	4	6	11	12
ΚΘΔ (kWh/kg) [55]	11,89	13,9	5,54	5,22	33,3
Κατανάλωση καυσίμου (g/kWh)	200	150	510	651,7	81,3
Αναλογία αέρα καυσίμου	14,5	10 [56]	6,5 [57]	6,04 [58]	34 [59]

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι κινητήρες που επιλέχθηκαν για κάθε περίπτωση, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους και αυτά των καυσίμων. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την μεθανόλη, την αμμωνία και το υδρογόνο επιλέχθηκαν οι διαθέσιμοι κινητήρες με την μεγαλύτερη μέγιστη ισχύ, με σκοπό να έχουν αντίστοιχο αποτέλεσμα όσον αφορά το χώρο που καταλαμβάνουν αλλά και την απόδοση τους. Όπως φαίνεται στον πίνακα από τον αριθμό των αναγκαίων κινητήρων για την κάλυψη των ίδιων αναγκών ισχύς, στις περιπτώσεις της αμμωνίας και του υδρογόνου, δεν είναι ρεαλιστική η χρήση αυτού του αριθμού κινητήρων. Στην ανάλυση θεωρείται ότι είναι δυνατή αυτή η εφαρμογή έτσι ώστε να μελετηθούν αυτά τα καύσιμα σε αυτή την κλίμακα, υποθέτοντας ότι μελλοντικά θα υπάρχουν διαθέσιμοι κινητήρες μεγαλύτερης ισχύς.

Η κατανάλωση των καυσίμων σε κάθε περίπτωση, υπολογίζεται από την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του κάθε καυσίμου και τις αποδόσεις των κινητήρων σε κάθε περίπτωση. Για τους βοηθητικούς κινητήρες του συστήματος θεωρείται ότι έχουν αντίστοιχες αποδόσεις με αυτές των κύριων κινητήρων με μία πρόσθετη αύξηση 5% στην κατανάλωση καυσίμου. Αυτή η υπόθεση, πάρθηκε με βάση δεδομένα για τους διαθέσιμους βοηθητικούς κινητήρες ντίζελ, μεθανίου και αμμωνίας, τα οποία γενικεύτηκαν θεωρώντας ότι θα ισχύει μια αντίστοιχη σχέση για όλα τα καύσιμα.

Οι αναλογίες αέρα καυσίμου βρέθηκαν βιβλιογραφικά, εκτός από το ντίζελ ναυτιλίας, καθώς δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα στον οδηγό προϊόντος κάθε μοντέλου κινητήρα.

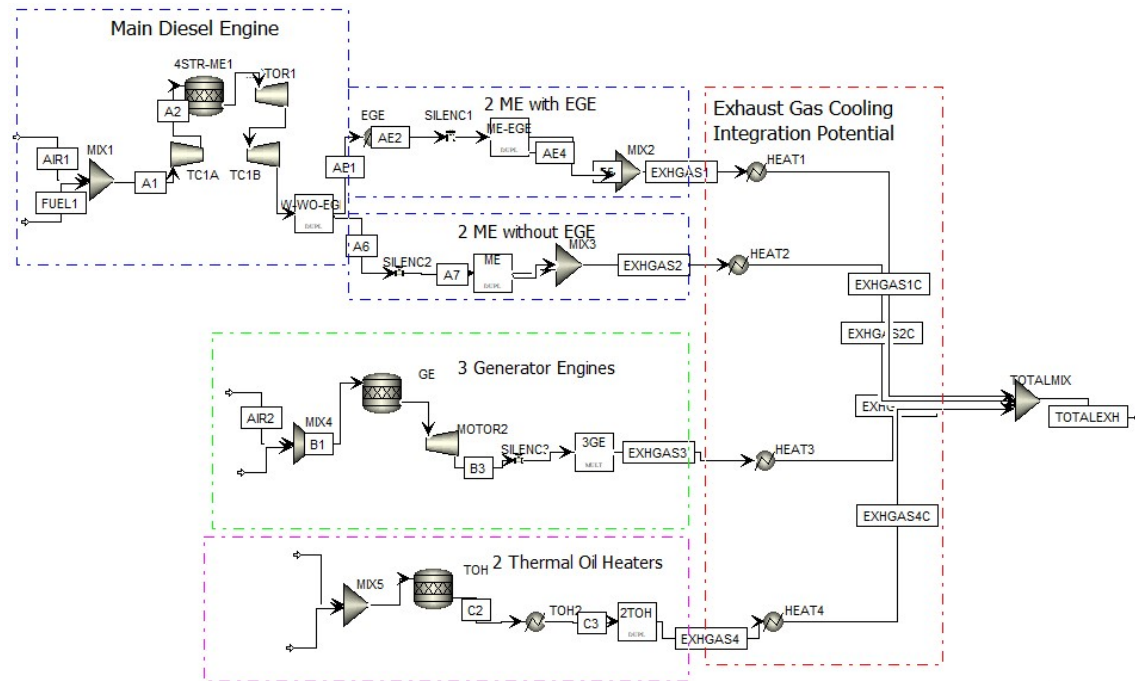
3.1.4. Προσομοίωση ενεργειακού συστήματος σε περιβάλλον ASPEN

Για την ακριβέστερη εκτίμηση των θερμικών αναγκών και των δυνατοτήτων εξοικονόμησης ενέργειας, πραγματοποιείται προσομοίωση των συστημάτων της προθέρμανσης καυσίμων, του κινητήρα και της ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων σε περιβάλλον ASPEN Plus V11. Τα αποτελέσματα που προσλαμβάνονται από την παρακάτω προσομοίωση, περιλαμβάνουν τις αναγκαίες ροές θερμότητας και τα ισοζύγια μάζας από τα οποία εκλαμβάνονται οι προδιαγραφές για τα συστήματα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα.

Για τους υπερπληρωτές (turbocharger), είναι διαθέσιμα τα δεδομένα ότι στην έξοδό τους η παροχή είναι $13,4 \text{ m}^3/\text{s}$ με ταχύτητα $34,8 \text{ m/s}$ σε διατομή 700 mm και θερμοκρασία 354°C . Η μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση πίεσης στο σύστημα απαγωγής καυσαερίων είναι 300 mmAq , άρα η πίεση αμέσως μετά τους υπερπληρωτές πρέπει να είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη από $1,0425 \text{ bar}$. Γίνεται η ασφαλής υπόθεση ότι η απόλυτη πίεση πριν και μετά τον κάθε υπερπληρωτή είναι $2,5$ και $1,5 \text{ bar}$ αντίστοιχα, εντός των ορίων λειτουργίας του συστήματος. Επίσης, θεωρείται ότι η πτώση πίεσης καυσαερίων στον υπερπληρωτή ιδανικά ισοδυναμεί με αντίστοιχη αύξηση πίεσης στο μίγμα αέρα καυσίμου.

Οι κινητήρες προσομοιώνονται με χρήση των αντιδραστήρων τύπου RStoic, όπου γίνεται η υπόθεση ότι λαμβάνει χώρα στοιχειομετρική τέλεια καύση με συντελεστή μετατροπής βάση του διαθέσιμου οξυγόνου παρμένο από βιβλιογραφικά δεδομένα [60], σε αντίστοιχες θερμοκρασίες για κάθε καύσιμο [61]. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα συστήματα ψύξης των κινητήρων δεν περιλαμβάνονται στην προσομοίωση και δεν θα συμπεριληφθούν στην ενεργειακή ολοκλήρωση, λόγω δυσκολιών υπολογισμού και εφαρμογής συστημάτων εναλλακτών στο κλειστό σύστημα των κινητήρων.

Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός των κινητήρων είναι διαφορετικός από τους τέσσερις, οι μισοί κινητήρες θα έχουν σύστημα μερικής ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων και οι άλλοι μισοί όχι, όπως αντιστοιχεί και στην αρχική περίπτωση χρήσης ντίζελ ναυτιλίας. Γίνεται αυτή η παραδοχή, καθώς διαφορετικά θα υπήρχε υπερεκτίμηση της ποσότητας των καυσαερίων που απορρίπτονται σε υψηλή θερμοκρασία, άρα και των δυνατοτήτων εξοικονόμηση ενέργειας.



Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας

Στο Σχήμα 2 το διάγραμμα ροής του συστήματος για τη χρήση ντίζελ. Πρέπει να σημειωθεί η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων ανάλογα εάν έχουν περάσει από μερική ανάκτηση. Στο κόκκινο πλαίσιο φαίνονται εναλλάκτες θερμότητας οι οποίοι αναπαριστούν την επιπλέον ανάκτηση θερμότητας που είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί με κατώτατο όριο πτώσης της θερμοκρασίας, το όξινο σημείο δρόσου των καυσαερίων, που διαφοροποιείται ανάλογα το χημικό είδος των εκπομπών και άρα ανάλογα το καύσιμο [43,62]. Τα

διαγράμματα ροής για τα υπόλοιπα καύσιμα που μελετώνται μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Ι (Σχήμα 7-Σχήμα 10). Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω του μικρού συγκριτικά μεγέθους, η μικρή συνεισφορά των καυσαερίων των θερμαντήρων θερμικού ελαίου στην επιπλέον ανάκτηση θερμότητας δεν λαμβάνεται υπόψη, και για αυτό το λόγο θεωρείται αμελητέα και δεν συμπεριλαμβάνεται στις προσομοιώσεις των άλλων καυσίμων και ούτε τα αποτελέσματα για τον εναλλάκτη «HEAT4» στις θερμικές ροές.

3.1.5. Εκτίμηση αναγκών συστήματος δέσμησης & αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα

Έχοντας επιλέξει την περίπτωση της χρήσης συστήματος δέσμησης διοξειδίου του άνθρακα με απορρόφηση με ΜΕΑ, συλλέχθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένων αντίστοιχων συστημάτων δέσμησης εν πλω. Η επιλογή των συστημάτων έχει ως προτεραιότητα το ποσοστό δέσμησης να είναι το μέγιστο δυνατό, δηλαδή 90% και δεύτερον η κλίμακα των μεγεθών να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στην τάξη μεγέθους του συστήματος που μελετάται. Τα χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων μπορούν να βρεθούν στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Σύνοψη βιβλιογραφικών ενεργειακών αναγκών για 90% δέσμηση CO₂

	Cargo ship LNG 3MW [42]	Cargo ship MDO 17MW [63]
Ροή καυσαερίων (kg/s)	4,60	32,84
Ροή διοξειδίου (kg/s)	0,23	1,87
Ποσοστό δέσμησης	90,00%	90,00%
Ανάγκες θέρμανσης (kW _{th} at 80°C)	389,00	2600,00
Ανάγκες Ψύξης (kW _c at -36°C)	4,72	30,50

Για αναχθούν τα αντίστοιχα μεγέθη για το σύστημα θεωρείται ότι η ροή του διοξειδίου που εισέρχεται στο σύστημα απορρόφησης, εφόσον είναι σταθερό το ποσοστό δέσμησης, έχει απλή εκθετική σχέση με την ενέργεια κάθε είδους που απαιτείται. Δηλαδή, ισχύει η εξής εξίσωση και η αντίστοιχη για την απαραίτητη ενέργεια ψύξης:

Εξίσωση 2. Σχέση αναγκαίας ενέργειας δέσμησης με ποσότητα CO₂

$$E_{th} = a_{th} \cdot \dot{m}^{b_{th}}$$

Όπου $E_{th/c}$: ανάγκες θέρμανσης/ψύξης (kW)

\dot{m} : ροή διοξειδίου του άνθρακα (kg/s)

Οι σταθερές $a_{th/c}$ και $b_{th/c}$ υπολογίζονται αντικαθιστώντας τις αντίστοιχες τιμές που εμφανίζονται στον Πίνακα 5 στην Εξίσωση 2 για τις δύο περιπτώσεις. Στην εξίσωση χρησιμοποιούνται οι τιμές της ροής διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια και όχι η συνολική ροή των καυσαερίων, γιατί πρώτον τα διαφορετικά καύσιμα έχουν διαφορετική στοιχειομετρική αναλογία CO₂ και δεύτερον γιατί στα συστήματα από τη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται ελαφρώς

διαφορετικοί λόγοι αέρα/καυσίμου. Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6, υπολογίζονται οι ενεργειακές απαιτήσεις της δέσμησης διοξειδίου για όλες τις περιπτώσεις. Επίσης, οι ανάγκες για ανανέωση του αντιδραστηρίου MEA που χρησιμοποιείται είναι περίπου 1,5 kg/ton δεσμευμένου CO₂ [64].

Πίνακας 6. Συντελεστές σχέσης ενεργειακών αναγκών δέσμησης

Συντελεστές	Θέρμανσης	Ψύξης
a	~1479,6	~17,4
b	~0,903	~0,89

Οι παραπάνω ενεργειακές ανάγκες αναφέρονται στην διεργασία διαχωρισμού του διοξειδίου του άνθρακα από τα αέρια καυσαερίων. Ωστόσο, για την πλήρη εκτίμηση του ενεργειακού φορτίου της δέσμησης πρέπει να συνυπολογιστούν οι ενεργειακές ανάγκες για ψύξη και αποθήκευση του υγροποιημένου διοξειδίου αφού έχει ολοκληρωθεί ο διαχωρισμός. Οι τρεις περιπτώσεις συνθηκών που προτείνονται είναι οι εξής:

Πίνακας 7. Συνθήκες αποθήκευσης υγροποιημένου CO₂ μετά από δέσμηση [42]

Θερμοκρασία (°C)	Πίεση (bar)
-16	22
-36	11
-50	7

Στις περιπτώσεις όπου υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια ψύξης σε χαμηλές θερμοκρασίες -ήτοι στην περίπτωση του φυσικού αερίου- θα γίνει χρήση της περίπτωσης με αποθήκευση στους -50°C, και για όλες τις υπόλοιπες στους -16°C, για δύο λόγους. Πρώτον, γιατί η ψύξη σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα όποτε όπου είναι δυνατό αποφεύγεται και δεύτερον, γιατί η πυκνότητα του υγροποιημένου CO₂ δεν διαφέρει αρκετά στα τρία σενάρια συνθηκών ώστε να υπάρχει σημαντική μείωση του χώρου που καταλαμβάνεται στο πλοίο.

Το σύστημα ψύξης προσομοιώνεται επίσης με τη βοήθεια του λογισμικού ASPEN Plus V11, χρησιμοποιώντας δύο στάδια ψύξης. Η εισερχόμενη μαζική ροή του διοξειδίου του άνθρακα ορίζεται ως το 90% της αντίστοιχης τελικής ροής για κάθε περίπτωση και στη συνέχεια περνάει από τα δύο στάδια που αποτελούνται από διαδοχική συμπίεση και ψύξη.

Οι συμπιεστές ρυθμίζονται έτσι ώστε η θερμοκρασία εξόδου του ρεύματος διοξειδίου να μην ξεπερνάει τους 180°C, και στη συνέχεια η ψύξη γίνεται στο πρώτο στάδιο μέχρι τους 25°C και στο δεύτερο στάδιο μέχρι την απαιτούμενη θερμοκρασία για υγροποίηση. Η ενέργεια που απαιτείται για την συμπίεση συνυπολογίζεται στις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου και αυτή για την ψύξη φυσικά στις ανάγκες ψύξης στην αντίστοιχη θερμοκρασία.

3.2. Ενεργειακή ολοκλήρωση προτεινόμενων συστημάτων

Για την εξέταση ενός πιο ενεργειακά αποτελεσματικού συστήματος, πραγματοποιήθηκε ενεργειακή ολοκλήρωση του συνολικού συστήματος του πλοίου Blue Star Patmos, το οποίο απαρτίζεται από τις τυπικές ανάγκες του πλοίου, την προθέρμανση των καυσίμων, το σύστημα ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων, τον διαχωρισμό, την υγροποίηση και την αποθήκευση μέρους του διοξειδίου του άνθρακα των καυσαερίων.

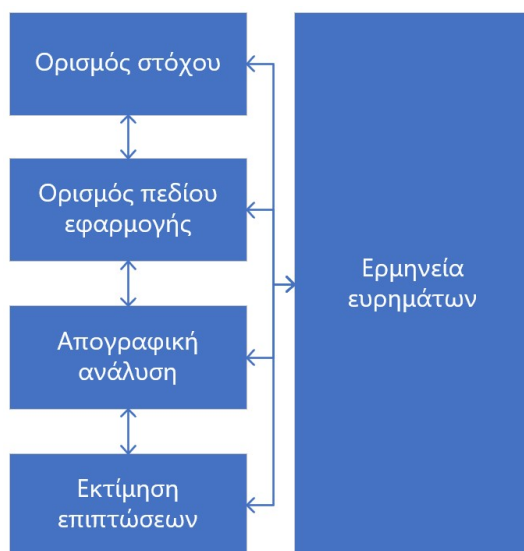
Ειδικότερα, για την ενεργειακή ολοκλήρωση χρησιμοποιείται η μεθοδολογία κρίσιμου σημείου, η οποία στηρίζεται στον σχεδιασμό των καμπυλών που αναπαριστούν τα διαθέσιμα ψυχρά και θερμά ρεύματα, με στόχο τον προσδιορισμό του μέγιστου ποσού θερμότητας που μπορεί να μεταβιβαστεί από τα δεύτερα στα πρώτα. Οι συνθήκες υπό τις οποίες είναι δυνατή αυτή η εναλλαγή θερμότητας, καθορίζονται από τους νόμους τις θερμοδυναμικές και προστίθεται ο περιορισμός ότι η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα σε δύο ρεύματα που εναλλάσσονται πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή οριακά ίση με 10°C . Το κρίσιμο σημείο ή σημείο κόμβου ανασχεσης χωρίζει τα ρεύματα σε δύο κατηγορίες αυτά που είναι σε ισορροπία με τις θερμές και ψυχρές βοηθητικές παροχές αντίστοιχα και βρίσκεται με την κατασκευή των διαγραμμάτων σύνθετων καμπυλών των ρευμάτων. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται η ελάχιστη απαραίτητη θερμή και ψυχρή ενέργεια, καθώς επίσης και οι θερμοκρασίες στις οποίες πρέπει να παρέχονται, και αυτές καταγράφονται στις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος ανά περίπτωση εξέτασης.

Επιπρόσθετα αυτής της διαδικασίας, μελετάται συντόμως η δυνητική επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας μέσω εφαρμογής συστημάτων συμπαραγωγής. Η βασική ιδέα της συμπαραγωγής, είναι η αξιοποίηση των μεγάλων θερμοκρασιακών διαφορών που υπάρχουν σε ένα σύστημα προς την θέρμανση ατμού, ο οποίος εκτονώνεται σε στροβίλους για παραγωγή πρόσθετης ισχύος. Συνήθως, η συμπαραγωγή συνδυάζεται με κάποιον κινητήρα που έχει χαμηλή απόδοση, πράγμα που σημαίνει όταν ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας του καυσίμου μετατρέπεται σε απορριπτόμενη θερμότητα και όχι σε χρήσιμη ισχύ [65].

Στα πλαίσια του έργου ALTFUELS@ROPAX από το ΕΚΙ, μελετάται και η ενσωμάτωση συμπαραγωγής όπου προσδιορίζονται πρόσθετα ενεργειακά δυναμικά [48]. Η ενσωμάτωση γίνεται στις περιπτώσεις χρήσης δέσμευσης CO_2 για τα τρία καύσιμα που παράγουν CO_2 ως προϊόν καύσης τους και επιτρέπει την περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας, αρά και την μείωση επιπλέον κατανάλωσης καυσίμου για την δέσμευση. Για χάρη συντομίας γίνεται υπολογισμός της ποσοστιαίας εξοικονόμησης του συστήματος, και εφαρμόζεται αντίστοιχα ανά περίπτωση. Η συμπερίληψη της συμπαραγωγής, αναφέρεται παρακάτω ως η περίπτωση μέγιστης δυνατής ενεργειακής ολοκλήρωσης, καθώς αξιοποιούνται όλα τα θερμοδυναμικά διαθέσιμα ενεργειακά δυναμικά.

3.3. Εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης κύκλου ζωής σε περιβάλλον SimaPro

Έχοντας ολοκληρώσει την ενεργειακή ανάλυση, εφαρμόζεται ανάλυση κύκλου ζωής έτσι ώστε οι λύσεις που προτείνονται να αξιολογηθούν συνολικά, και να προσδιορισθούν οι παράπλευρες προκλήσεις και επιπτώσεις που προκύπτουν με την μετάβαση προς πιο βιώσιμα ναυτιλιακά καύσιμα. Η μεθοδολογία που ακολουθείτε παρίσταται γραφικά στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Τυπικό πλαίσιο ανάλυσης κύκλου ζωής [66]

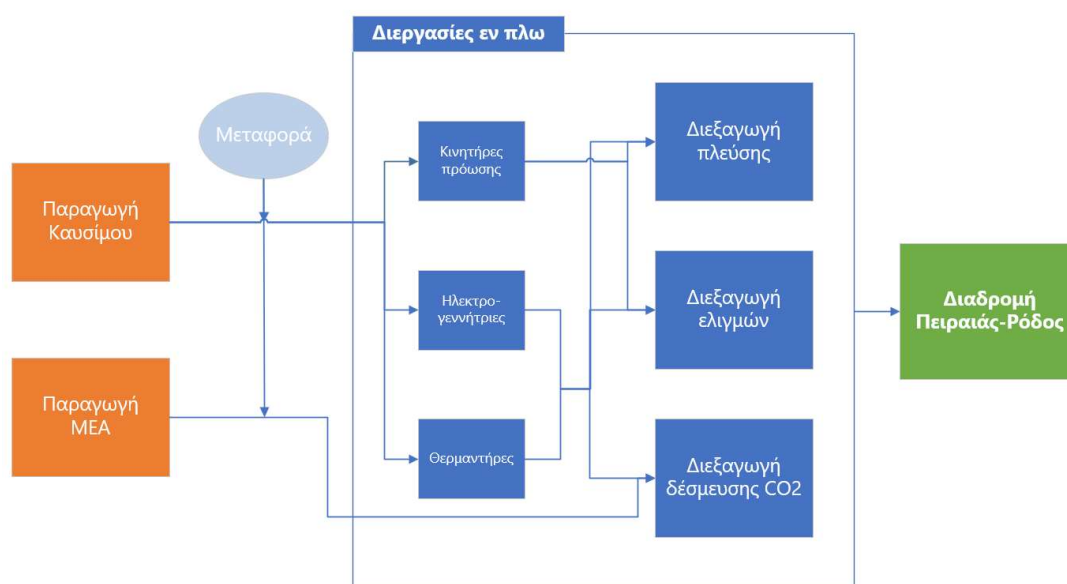
Η ανάλυση κύκλου ζωής αποτελεί μια δομημένη και τυποποιημένη μέθοδο σε διεθνές και ευρωπαϊκό επίπεδο, οπότε ως εκ τούτου η παρούσα ανάλυση έγινε ακολουθώντας όσο το δυνατό τα πρότυπα ISO 14040 και 14044 [67].

3.3.1. Καθορισμός στόχου ανάλυσης & πεδίου εφαρμογής

Συνοπτικά, σκοπός είναι η συγκριτική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων μίας διαδρομής του πλοίου Blue Star Patmos (Πειραιάς-Ρόδος) με διαφοροποίηση ως προς τη χρήση διαφορετικών καυσίμων και μεθόδων δέσμευσης CO₂, σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες. Οι προβλεπόμενες εφαρμογές της μελέτης είναι η ενημέρωση και η καθοδήγηση ενδιαφερόμενων φορέων ως προς τον εντοπισμό ομάδων λύσεων με τις μεγαλύτερες δυνατότητες περιβαλλοντικής βελτίωσης αναφορικά με τα πιθανά μελλοντικά καύσιμα στον τομέα της ναυτιλίας.

Ο κύριος σκοπός δεν περιλαμβάνει μόνο την απόδοση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλά και συγκρίσεις μεταξύ των περιπτώσεων βάση των κατηγοριών κατανομής επιπτώσεων και συνολικών δεικτών εκτίμησης. Ως αποτέλεσμα, η αλληλουχία αποφάσεων με κατάληξη την παρούσα μεθοδολογία έχει επίκεντρο την εύλογη και ακριβή σύγκριση μεταξύ ισοδύναμα σχεδιασμένων συστημάτων.

Τα όρια των συστημάτων που εξετάζονται περιλαμβάνουν την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών για παραγωγή των προϊόντων καυσίμου μέχρι την καύση τους και τις εκπομπές αυτής εν πλω ή όπως συνήθως περιγράφεται σε περιπτώσεις μελετών καυσίμων «Well-to-Propeller». Η παρούσα ανάλυση κύκλου ζωής δεν περιλαμβάνει τις επιπτώσεις κατασκευής του απαιτούμενου εξοπλισμού για κανένα από τα στάδια, ούτε το στάδιο της δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, καθώς θεωρείται πως προσεγγιστικά έχουν αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο, στη μελέτη συμπεριλαμβάνονται τα αποτυπώματα από την κατανάλωση ενέργειας και αντιδραστηρίων σε όλα τα στάδια και φυσικά τις εκπομπές όλων των σταδίων τα όποια μπορούν να βρεθούν στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Περιγραφή συστήματος προς ανάλυση κύκλου ζωής

Αναφορικά με τους σχετικούς γεωγραφικούς περιορισμούς, όπου είναι δυνατό θεωρείται παραγωγή αρχικών προϊόντων εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης με σκοπό να περιοριστεί το αποτύπωμα των διεργασιών που οφείλεται στις μεταφορές.

Επιπρόσθετα για κάθε μια από τις περιπτώσεις εναλλακτικών καυσίμων, θεωρείται αποκλειστική χρήση ενός καυσίμου για την κάλυψη του 100% των αναγκών, ακόμα και όταν αυτή η παραδοχή δεν είναι συμβατή με τωρινές τεχνολογίες (π.χ. για τους κινητήρες μεθανόλης, αμμωνίας και υδρογόνου). Επισημαίνεται ότι μια αντίστοιχη μελέτη για συνδυασμούς καυσίμων θα ήταν εύλογη και θεμιτή, ωστόσο καθίσταται πέραν του αντικειμένου της παρούσας μελέτης.

Ως βάση υπολογισμών θεωρείται, όπως ήδη αναφέρθηκε η εκτέλεση της διαδρομής ανάμεσα στα λιμάνια του Πειραιά και της Ρόδου. Για τις

υποδιεργασίες που εκτελούνται εν πλω, ως λειτουργική μονάδα ορίζεται η μία ώρα λειτουργίας (1 h) για την διεξαγωγή πλεύσης, ελιγμών και δέσμευσης, ενώ για τις διεργασίες που καταναλώνουν άμεσα καύσιμο -δηλαδή αυτές της λειτουργίας μηχανών πρόωσης, ηλεκτροπαραγωγής και θερμότητας- η λειτουργική τους μονάδα ορίζεται η μία κιλοβατώρα (1 kWh).

Πίνακας 8. Κατάλογος εξεταζόμενων συνδυασμών συνθηκών

A/A	Καύσιμο	Πηγή	Δέσμευση	%MCR	Ενεργειακή Ολοκλήρωση	A/A	Καύσιμο	Πηγή	Δέσμευση	%MCR	Ενεργειακή Ολοκλήρωση
Συνθήκες						Συνθήκες					
A1	MDO	fossil	CC	60%	min	Γ1	MET	fossil	CC	60%	min
A1'			CC	60%	max	Γ1'			CC	60%	max
A2			CC	75%	min	Γ2			CC	75%	min
A3			CC	90%	min	Γ3			CC	90%	min
A4		-	75%	min	Γ4	-		75%	min		
A5		bio	CC	60%	min	Γ5		bio	CC	60%	min
A6			CC	75%	min	Γ6			CC	75%	min
A7			CC	90%	min	Γ7			CC	90%	min
A8			-	75%	min	Γ8			-	75%	min
A9		renew	CC	60%	min	Γ9		renew	CC	60%	min
A10			CC	75%	min	Γ9'			CC	60%	max
A11			CC	90%	min	Γ10			CC	75%	min
A12	-		75%	min	Γ11	CC	90%		min		
B1	LNG	fossil	CC	60%	min	Γ12	AMM	fossil	-	75%	min
B1'			CC	60%	max	Δ1			-	60%	min
B2			CC	75%	min	Δ2			-	75%	min
B3			CC	90%	min	Δ3			-	90%	min
B4		-	75%	min	Δ5	-		60%	min		
B5		bio	CC	60%	min	Δ6		bio	-	75%	min
B6			CC	75%	min	Δ7			-	90%	min
B7			CC	90%	min	Δ9			-	60%	min
B8			-	75%	min	Δ10			-	75%	min
B9		renew	CC	60%	min	Δ11		renew	-	90%	min
B9'			CC	60%	max	E1			-	60%	min
B10			CC	75%	min	E2			fossil	-	75%
B11	CC		90%	min	E3	-	90%		min		
B12	-	75%	min	E5	HYD	bio	-	60%	min		
E6	-	75%	min	E6			-	75%	min		
E7	-	90%	min	E7		-	90%	min			
E9	-	60%	min	E9		renew	-	60%	min		
E10	-	75%	min	E10			-	75%	min		
E11	-	90%	min	E11			-	90%	min		

Ο Πίνακας 8 εμπεριέχει όλους τους συνδυασμούς συνθηκών που μελετήθηκαν καθώς και την αρίθμηση των περιπτώσεων που ακολουθείτε παρακάτω και στα Παραρτήματα. Με τον όρο «fossil» διακρίνονται τα καύσιμα με προέλευση ορυκτούς πόρους, με τον όρο «bio» διακρίνονται τα καύσιμα με προέλευση επεξεργασία βιομάζας και τέλος τον όρο «renew» διακρίνονται τα καύσιμα με κάποια εναλλακτική ανανεώσιμη προέλευση εκτός της επεξεργασίας βιομάζας. Οι παράμετροι προμήθειας των καυσίμων μπορούν να βρεθούν αναλυτικά στον Πίνακας 10.

3.3.2. Απογραφική ανάλυση

Ακολουθώντας του ορισμού στόχου και πεδίου εφαρμογής, πραγματοποιείται η απογραφή όλων των εισερχόμενων και εξερχόμενων ρευμάτων του συστήματος, με δεδομένα από προσομοιώσεις διεργασιών, από βάσεις δεδομένων και άμεσα από εταιρείες του κλάδου.

Αρχικά οι διεργασίες της πλεύσης, της εκτέλεσης ελιγμών και της δέσμευσης CO₂, εισάγονται στο λογισμικό SimaPro V9.5 με την εξής δομή. Το προϊόν τους ορίζεται σαν μία ώρα λειτουργίας της κάθε διεργασίας, με εισαγωγή των αντίστοιχων ενεργειακών αναγκών για κάθε ταχύτητα που μελετάται από τις τρεις κατηγορίες κινητήρων -που προσδιορίζονται όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 3.1- με απλή αλλαγή της μονάδας μέτρησης από ισχύ (kW) στην αντίστοιχη ενέργεια για μία ώρα λειτουργίας (kWh). Η συνολική διεργασία της εκτέλεσης της διαδρομής ορίζεται ως ένα προϊόν με αυθαίρετη μονάδα μέτρησης, που χρειάζεται την εκτέλεση των διεργασιών πλεύσης, ελιγμών και σε κάποιες περιπτώσεις και της δέσμευσης CO₂ για το αντίστοιχο για κάθε ταχύτητα πλεύσης χρονικό διάστημα. Η διάρκεια των ελιγμών θεωρείται η ίδια για όλες τις περιπτώσεις και στις περιπτώσεις όπου συμπεριλαμβάνεται η δέσμευση θεωρείται ότι η απαραίτητη διάρκεια λειτουργίας είναι το άθροισμα της διάρκειας πλεύσης και της διάρκειας ελιγμών. Αυτές οι τελικές διεργασίες εκτέλεσης της διαδρομής Πειραιάς-Ρόδος είναι τα συστήματα τα οποία θα συγκριθούν στην παρούσα μελέτη, και βάση των οποίων θα κριθεί η πιο περιβαλλοντικά φιλική επιλογή καυσίμου.

Όσον αφορά τις διεργασίες παραγωγής ενέργειας εν πλω, δηλαδή την λειτουργία των κύριων μηχανών για την πρόωση και των βοηθητικών μηχανών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, η λειτουργική μονάδα ορίζεται ως 1 kWh. Επισημαίνεται ξανά ότι στις βοηθητικές μηχανές η απόδοση τους υπολογίζεται να είναι χαμηλότερη κατά 5% και ως αποτέλεσμα το προϊόν αυτών των διεργασιών εισάγεται ως 0,95 kWh. Οι εισροές σε αυτές τις διεργασίες ορίζονται να είναι η ποσότητα καυσίμου αντίστοιχη στην παραγωγή 1 kWh - όπως υπολογίζεται στην Παράγραφο 3.1.3- και η αντίστοιχη απαραίτητη ποσότητα αέρα. Οι εκροές αυτών των διεργασιών είναι οι αντίστοιχες εκπομπές από την καύση του κάθε είδους καυσίμου, όπως λαμβάνονται από σχετικές βιβλιογραφικές πηγές που μπορούν να βρεθούν στον Πίνακας 9.

Πίνακας 9. Απογραφή εκπομπών αντίστοιχη στη καύση ποσότητας καυσίμου για παραγωγή 1kWh

Εκπομπές	1 kWh στους κύριους κινητήρες				
	200 g MDO [68]	150 g LNG [68]	510 g MET [69]	651,7 g AMM [58]	81,3 g HYD [36]
CO ₂ (kg)	0,49025	0,31910	0,57720	0,02885	-
NO _x (kg)	0,01231	0,00165	0,00234	0,01185	8,097E-05
CO (kg)	4,41E-04	9,86E-04	-	-	2,31E-04
HC (kg)	9,51E-06	1,08E-04	-	-	3,239E-05
PM (kg)	1,41E-04	2,15E-06	3,60E-05	-	-
SO ₂ (kg)	5,00E-04	2,15E-06	-	-	-
CH ₄ (kg)	9,51E-06	0,00376	-	5,00E-08	-

Πρέπει να σημειωθεί ότι η καύση της αμμωνίας δεν παράγει άμεσα εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ωστόσο στην καύση της προσμετρούνται οι εκπομπές που αναλογούν στο καύσιμο έγχυσης το οποίο απαιτείται για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης αυτού του είδους. Στην παρούσα μελέτη αυτό είναι το μόνο στάδιο στο οποίο λαμβάνεται υπόψη αυτή η προσθήκη.

Για τις διεργασίες προμήθειας των καυσίμων, λειτουργική μονάδα ορίζεται το 1 kg καυσίμου και η καταγραφή για τις εκπομπές για κάθε περίπτωση γίνεται από συνδυασμό πηγών. Αρχικά, για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιείται η αναφορά «JEC Well-to-Tank report V5» [70]. Οι διαδικασίες παραγωγής και μεταφοράς των καυσίμων μπορούν να βρεθούν αναλυτικά στον Πίνακας 10, μαζί με τις βιβλιογραφικές αναφορές που αντιστοιχούν σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο, στην παραπάνω αναφορά δεν υπάρχει εκτίμηση των εκπομπών εκτός του CO₂ σε όλα τα στάδια της προμήθειας καυσίμων και υπάρχει παράλειψη της αμμωνίας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται δεδομένα από την βάση δεδομένων Ecolnvent V3, όπου γίνεται αντιστοιχία των ποσοτήτων των άλλων εκπομπών βάση της αναλογίας που έχουν με τις εκπομπές CO₂, ενώ η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα παραμένει αυτή από το «JEC Well-to-Tank report V5» όταν είναι διαθέσιμη. Αυτή η προσέγγιση ακολουθείτε έτσι ώστε να υπάρχει όσο το δυνατό ομοιογένεια στις προ υπάρχουσες παραδοχές για την εκτίμηση των εκπομπών που αναλογούν στην παραγωγή και μεταφορά των καυσίμων. Στις περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση αμμωνίας χρησιμοποιήθηκαν επίσης δεδομένα από δημοσιευμένες αναλύσεις κύκλου ζωής για τους διάφορους τρόπους παραγωγής της, λόγω των ελλιπών στοιχείων με τις μεθόδους που προαναφέρθηκαν [32].

Τέλος, για την παραγωγή και μεταφορά MEA χρησιμοποιήθηκε επίσης η βάση δεδομένων Ecolnvent V3 και η αναλυτική απογραφή των εκπομπών της παραγωγής καυσίμων ανά περίπτωση μπορεί να βρεθεί στο Παράρτημα II (Πίνακας 34-Πίνακας 38).

Πίνακας 10. Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής καυσίμων ανά περίπτωση

Καύσιμο	Πηγή	Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής
MDO	fossil [70,71]	Αργό πετρέλαιο από τυπική προμήθεια στην ΕΕ, θαλάσσια μεταφορά, διύλιση στην ΕΕ, τυπική διανομή και λιανική πώληση στην ΕΕ.
	bio [70,71]	Απόβλητα ξύλου σε μονάδα αεριοποίησης/σύνθεσης
	renew [70,71]	Απόβλητα μαγειρικών ελαίων προς βιοντίζελ
LNG	fossil [70,71]	Απομακρυσμένο φυσικό αέριο υγροποιημένο στην πηγή, θαλάσσια μεταφορά LNG, οδική διανομή ως LNG
	bio [70,71]	Συνθετικό μεθάνιο (ως LNG) μέσω αεριοποίησης απορριμμάτων ξύλου και μεθανοποίησης
	renew [70,71]	Συνθετικό μεθάνιο (ως LNG) από ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια, CO ₂ από καυσαέρια
MET	fossil [70,71]	Απομακρυσμένο φυσικό αέριο προς μεθανόλη, μονάδα σύνθεσης κοντά στο πεδίο φυσικού αερίου
	bio [70]	Απόβλητα ξύλου προς μεθανόλη, μονάδα αεριοποίησης/σύνθεσης
	Renew [70]	Ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια προς μεθανόλη (CO ₂ από καυσαέρια)
AMM	fossil [32,71]	Αμμωνία από υδρογόνο από αναμόρφωση ατμού, μετατροπή μέσω διεργασίας Haber
	bio [32]	Αμμωνία από υδρογόνο από αεριοποίηση βιομάζας, μετατροπή μέσω διεργασίας Haber
	Renew [32]	Αμμωνία από υδρογόνο από ηλεκτρόλυση με αιολική ενέργεια, μετατροπή μέσω διεργασίας Haber
HYD	fossil [70,71]	Προμήθεια φυσικού αερίου EU-mix, μεταφορά στην ΕΕ με αγωγό (1900 χλμ.), μεταφορά εντός της ΕΕ (500 χλμ.), διανομή μέσω κεντρικών γραμμών υψηλής πίεσης και δικτύου χαμηλής πίεσης, αναμόρφωση με ατμό σε σταθμό λιανικής πώλησης, συμπίεση στα 88 MPa.
	bio [70]	Καλλιεργούμενη ξυλεία, αεριοποιητής μεγάλης κλίμακας και υγροποίηση υδρογόνου, οδική μεταφορά υγρού υδρογόνου σε χώρο λιανικής πώλησης, κρυσσυμπύεση υδρογόνου σε δεξαμενή οχήματος (35 MPa).
	renew [70]	Ηλεκτρική ενέργεια από αιολική ενέργεια, κεντρική ηλεκτρόλυση, υγροποίηση υδρογόνου, οδική μεταφορά υγρού υδρογόνου στο χώρο λιανικής πώλησης, κρυσσυμπύεση υδρογόνου στη δεξαμενή του οχήματος (35 MPa).

3.3.3. Εκτίμηση επιπτώσεων

Η μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων που επιλέχθηκε είναι η «ReCiPe 2016» από τις διαθέσιμες στο λογισμικό SimaPro [72].

Η συγκεκριμένη μέθοδος περιλαμβάνει κατηγορίες επιπτώσεων τόσο σε μεσαίο επίπεδο (midpoint) με προσανατολισμό το πρόβλημα που μελετάται, όσο και σε τελικό επίπεδο (endpoint) με προσανατολισμό τις συνολικές ζημιές, διαθέσιμες για τρεις διαφορετικές προοπτικές (ατομικιστική (individualist), ιεραρχική (hierarchist) και εξισωτική (egalitarian)). Η επιλογή της μεθόδου «ReCiPe 2016» έγινε με βάση την ευρεία χρήση της σε παγκόσμιο επίπεδο, την ποικιλία των

κατηγοριών επιπτώσεων που διαθέτει και τον εναρμονισμένο χαρακτηρισμό αυτών σε μέσο και τελικό επίπεδο [73].

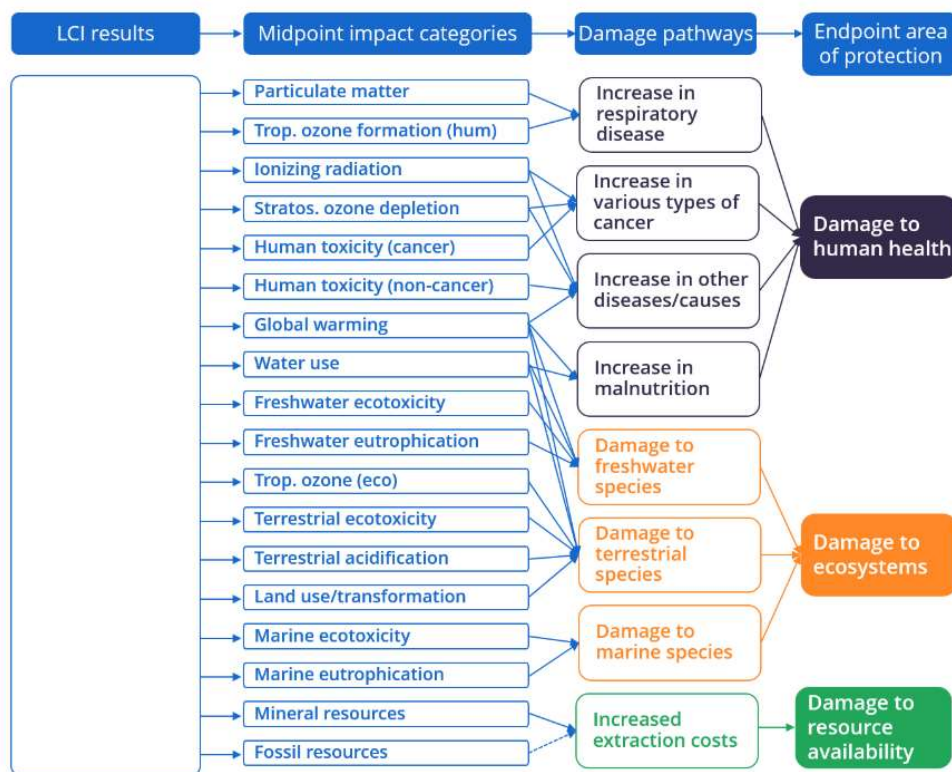
Από τις τρεις προοπτικές που είναι διαθέσιμες, επιλέγεται η ιεραρχική προοπτική, η οποία βασίζεται στις κοινές αρχές που χρησιμοποιούνται σε Ευρωπαϊκά και διεθνή νομοθετικά πλαίσια όσον αφορά το χρονοδιάγραμμα και άλλες παραμέτρους απόδοσης επιπτώσεων. Αναφορικά με τη κλιματική αλλαγή, το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη με βάση της έκθεση «IPCC report 2013» δίνεται ως ο κύριος παράγοντας χαρακτηρισμού και στην ιεραρχική προοπτική το δυναμικό λαμβάνεται υπόψη σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών και συμπεριλαμβάνει εκπομπές του θερμοκηπίου εκτός του διοξειδίου του άνθρακα και αναδράσεις αυτών [73].

Η μέθοδος «ReCiPe 2016» εξετάζει 18 κατηγορίες επιπτώσεων σε μέσο επίπεδο και στη συνέχεια οι περισσότερες από αυτές τις κατηγορίες επιπτώσεων πολλαπλασιάζονται με παράγοντες ζημίας και συνοψίζονται σε τρεις κατηγορίες. Το Σχήμα 5 απεικονίζει τις σχέσεις μεταξύ των 18 κατηγοριών επιπτώσεων μεσαίου και των τριών κατηγοριών τελικού επιπέδου.

Πρωταρχική σημασία για την παρούσα ανάλυση έχει ο δείκτης ενιαίας εκτίμησης που συνοψίζει τις τρεις κατηγορίες τελικού επιπέδου και διευκολύνει την σύγκριση μεταξύ διαφόρων περιπτώσεων. Κατόπιν, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις τρεις κατηγορίες τελικού επιπέδου, οι οποίες είναι ονομαστικά η ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα, και τέλος η σπανιότητα πόρων. Η ανθρώπινη υγεία ποσοτικοποιείται μέσω του αριθμού χαμένων ετών ζωής και αριθμός ετών ζωής με αναπηρία (Προσαρμοσμένα με Αναπηρία Έτη Ζωής DALYs), ο οποίος δείκτης διαδόθηκε από την Παγκόσμια Τράπεζα και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας. Οι επιπτώσεις στα οικοσυστήματα εκφράζονται ως η απώλεια ειδών σε μια ορισμένη περιοχή, κατά τη διάρκεια ενός ορισμένου χρόνου (Είδη ανά χρόνο species.yr). Τέλος η σπανιότητα πόρων εκφρασμένη ως το πλεονάζον κόστος της μελλοντικής παραγωγής πόρων σε ένα άπειρο χρονικό διάστημα (υποθέτοντας σταθερή ετήσια παραγωγή), λαμβάνοντας υπόψη ένα προεξοφλητικό επιτόκιο 3% (USD2013) [73].

Λόγω των διαφορών στην απογραφή των διαδικασιών προμήθειας καυσίμων, κάποιες περιπτώσεις εμφανίζουν εσφαλμένα μηδενικές επιπτώσεις στην κατηγορία σπανιότητας πόρων και ως αποτέλεσμα επιλέχθηκε η παράληψη αυτής της κατηγορίας προς αποφυγή λανθασμένων συμπερασμάτων.

Από τις κατηγορίες μέσου επιπέδου ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανάλυση των κατηγοριών «Υπερθέρμανση του πλανήτη», «Τοξικότητα προς τον άνθρωπο», «Τοξικότητα προς οικοσυστήματα», «Σχηματισμός σωματιδίων» και «Ευτροφισμός» και των διαφορών τους ανά εξεταζόμενη περίπτωση λόγω της ιδιαίτερης σημασίας τους σε περιβαλλοντικό πλαίσιο.



Σχήμα 5. Αναπαράσταση επιπτώσεων ανάμεσα σε κατηγορίες μεσαίου και τελικού επιπέδου για τη μέθοδο ReCiPe 2016 [72]

Εν κατακλείδι, πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι δεν εφαρμόστηκαν διαδικασίες ανάλυσης ευαισθησίας και αβεβαιότητας, οι οποίες συνηθίζονται και προτείνονται να διεξάγονται ως μέρος της ερμηνείας για να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των συμπερασμάτων και να προσδιορισθούν τα σημεία εστίασης επόμενων επαναληπτικών αναλύσεων κύκλου ζωής. Αυτή η παράλειψη έγινε λόγω έλλειψης στατιστικών μέτρων για τις εισαγόμενες παραμέτρους του συστήματος σε κάθε περίπτωση.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

Με την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας, υπολογίζονται μέσω του λογισμικού προσομοίωσης Aspen Plus V11, τα συναφή ισοζύγια μάζας και ενέργειας για το σύστημα του Blue Star Patmos σε κάθε περίπτωση και στη συνέχεια διεξάχθηκε η ανάλυση κύκλου ζωής μέσω του λογισμικού SimaPro V9.5. Ακολουθεί η σύγκριση και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μελέτης περίπτωσης και στη συνέχεια εξάγονται συμπεράσματα για τη βιωσιμότητα της κάθε περίπτωσης.

4.1. Ενεργειακές Καταναλώσεις

4.1.1. Θερμικές ροές

Από τις προσομοιώσεις των μηχανών των καυσίμων (κύριες, γεννήτριας και θέρμανσης), συλλέγονται τα δεδομένα που παρουσιάζονται στους Πίνακες Πίνακας 11 με Πίνακας 15, για τα ρεύματα ενδιαφέροντος για την ενεργειακή ολοκλήρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα ρεύματα αντανακλούν τις επιπλέον ανάγκες ή δυνατότητες ανάκτησης θερμικής ενέργειας και όχι τις συνολικές ανάγκες του πλοίου.

Ειδικότερα για το ντίζελ ναυτιλίας, στον Πίνακα 11 δεν συμπεριλαμβάνεται η ποσότητα θερμότητας απαραίτητη για την προθέρμανση του καυσίμου πριν την εισαγωγή του στον κινητήρα, καθώς συμπεριλαμβάνεται στις άλλες θερμικές ανάγκες του πλοίου.

Πίνακας 11. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεως του ποσοστού μέγιστης ισχύος κινητήρα για την χρήση ντίζελ ναυτιλίας

ID	Περιγραφή	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Q(kW)	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Q(kW)	T _{in} (C)	T _{out} (C)	Q(kW)	
		% MCR			60%			75%			90%
MDOH1	Ανάκτηση	250,0	180,0	-671,3	250,0	180,0	-951,1	250,0	180,0	-1007,0	
MDOH2	θερμότητας	354,1	180,0	-1693,0	354,1	180,0	-2398,4	354,1	180,0	-2539,5	
MDOH3	καυσαερίων	333,7	180,0	-434,6	333,7	180,0	-434,6	333,7	180,0	-434,6	
CAPT1	Υγροποίηση	168,2	25,0	-407,7	168,2	25,0	-547,0	168,2	25,0	-574,9	
CAPT2	CO ₂	176,3	-16,0	-1446,2	176,3	-16,0	-1940,5	176,3	-16,0	-2039,4	
MEAH	Διαχωρισμός	50,0	80,0	5036,9	50,0	80,0	6758,5	50,0	80,0	7102,8	
MEAC	CO ₂	-36,0	-37,0	-59,2	-36,0	-37,0	-79,5	-36,0	-37,0	-83,5	

Στον Πίνακα 12, παρατηρείται σημαντική μείωση των αναγκών θέρμανσης και ψύξης για την υγροποίηση και τον διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα για το φυσικό αέριο σε σχέση με το ντίζελ, σε αντίστοιχες ταχύτητες. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας, το φυσικό αέριο έχει λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, λόγω της υψηλής του συγκριτικά θερμογόνου δύναμη και λόγω της παρουσίας ενός μορίου άνθρακα ανά μόριο μεθανίου.

Πίνακας 12. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεως του ποσοστού μέγιστης ισχύος κινητήρα για την χρήση φυσικού αερίου

ID	Περιγραφή	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)
		60%			75%			90%		
LNGH1	Ανάκτηση	250,0	135,0	-614,3	250,0	135,0	-767,9	250,0	135,0	-921,5
LNGH2	θερμότητας	365,5	135,0	-1255,8	365,5	135,0	-	365,5	135,0	-
LNGH3	καυσαερίων	341,9	135,0	-338,1	341,9	135,0	1569,8	341,9	135,0	1883,8
FCOLD1	Προθέρμανση	-164,0	140,0	952,5	-164,0	140,0	-338,1	-164,0	140,0	-338,1
FCOLD2	καυσίμου	-164,0	140,0	143,4	-164,0	140,0	1190,6	-164,0	140,0	1428,7
CAPT1	Υγροποίηση	168,2	25,0	-151,5	168,2	25,0	143,4	168,2	25,0	143,4
CAPT2	CO ₂	70,9	-50,0	-508,4	70,9	-50,0	-184,4	70,9	-50,0	-217,3
MEAH	Διαχωρισμός	50,0	80,0	1871,8	50,0	80,0	-618,9	50,0	-50,0	-729,4
MEAC	CO ₂	-36,0	-37,0	22,0	-36,0	-37,0	2278,5	50,0	80,0	2685,2
							26,8	-36,0	-37,0	31,6

Στην περίπτωση της μεθανόλης όπως φαίνεται στον Πίνακα 13, δεν ισχύει η ίδια μείωση στην ενέργεια για την διαχείριση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα, καθώς η μεθανόλη παρουσιάζει αξιοσημείωτα μικρότερη θερμογόνο δύναμη.

Πίνακας 13. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεως του ποσοστού μέγιστης ισχύος κινητήρα για την χρήση μεθανόλης

ID	Περιγραφή	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)
		60%			75%			90%		
METH1	Ανάκτηση	250,0	135,0	-1374,5	250,0	135,0	-1718,2	250,0	135,0	-2061,8
METH2	θερμότητας	356,7	135,0	-2689,1	356,7	135,0	-3361,3	356,7	135,0	-4033,6
METH3	καυσαερίων	334,2	135,0	-722,2	334,2	135,0	-722,2	334,2	135,0	-722,2
FCOLD1	Προθέρμανση	15,0	140,0	3982,0	15,0	140,0	4977,4	15,0	140,0	5972,9
FCOLD2	καυσίμου	15,0	140,0	597,2	15,0	140,0	597,2	15,0	140,0	597,2
CAPT1	Υγροποίηση	168,2	25,0	-446,2	168,2	25,0	-543,2	168,2	25,0	-640,2
CAPT2	CO ₂	176,3	-16,0	-1582,8	176,3	-16,0	-1926,9	176,3	-16,0	-2271,0
MEAH	Διαχωρισμός	50,0	80,0	5512,7	50,0	80,0	6711,1	50,0	80,0	7909,5
MEAC	CO ₂	-36,0	-37,0	64,8	-36,0	-37,0	78,9	-36,0	-37,0	93,0

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις όπου δεν εφαρμόζεται δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, οι δύο τελευταίες κατηγορίες ρευμάτων, δηλαδή υγροποίησης και διαχωρισμού δεν συμπεριλαμβάνονται.

Κατά τη χρήση κινητήρων αμμωνίας, σαφώς δεν είναι αναγκαία η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, όποτε παρουσιάζεται στον Πίνακα 14 ένα πλεόνασμα θερμικής ενέργειας από το δυναμικό ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων, ικανό να καλύψει πλήρως τις επιπλέον θερμικές ανάγκες του συστήματος και όπως φαίνεται στη συνέχεια, ικανό να καλύψει πλήρως τις θερμικές ανάγκες του πλοίου.

Πίνακας 14. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεων του ποσοστού μέγιστης ισχύς κινητήρα για την χρήση αμμωνίας

ID	Περιγραφή	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	
		% MCR			60%			75%			90%
AMMH1	Ανάκτηση	250,0	135,0	-1761,5	250,0	135,0	-2201,9	250,0	135,0	-2642,3	
AMMH2	θερμότητας	340,9	135,0	-3185,0	340,9	135,0	-3981,3	340,9	135,0	-4777,5	
AMMH3	καυσαερίων	319,6	135,0	-856,2	319,6	135,0	-856,2	319,6	135,0	-856,2	
FCOLD1	Προθέρμανση	-33,0	140,0	1298,0	-33,0	140,0	1622,5	-33,0	140,0	1946,9	
FCOLD2	καυσίμου	-33,0	140,0	195,0	-33,0	140,0	195,0	-33,0	140,0	195,0	

Καθώς επιλέχθηκε συμπιεσμένο υδρογόνο με αποθήκευση στους 20°C, το υδρογόνο έχει ακόμα μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις και από την αμμωνία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 15, ως αποτέλεσμα γίνεται κατανοητό πως όλες οι θερμικές ανάγκες μπορούν επαρκώς να καλυφθούν εφαρμόζοντας ανάκτηση θερμότητας καυσαερίων.

Πίνακας 15. Θερμά & ψυχρά ρεύματα προς ολοκλήρωση συναρτήσεων του ποσοστού μέγιστης ισχύς κινητήρα για την χρήση υδρογόνου

ID	Περιγραφή	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	Tin(C)	Tout(C)	Q(kW)	
		% MCR			60%			75%			90%
HYDH1	Ανάκτηση	250,0	150,0	-989,5	250,0	150,0	-1236,8	250,0	150,0	-1484,2	
HYDH2	θερμότητας	335,5	150,0	-1850,2	335,5	150,0	-2312,8	335,5	150,0	-2775,4	
HYDH3	καυσαερίων	314,8	150,0	-492,9	314,8	150,0	-492,9	314,8	150,0	-492,9	
FCOLD1	Προθέρμανση	20,0	140,0	714,3	20,0	140,0	892,8	20,0	140,0	1071,4	
FCOLD2	καυσίμου	20,0	140,0	107,1	20,0	140,0	107,1	20,0	140,0	107,1	

4.1.2. Ενεργειακή ολοκλήρωση

Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία κόμβου ανάλυσης και ενσωματώνοντας τα νέα θερμά και ψυχρά ρεύματα από τις προσομοιώσεις των κινητήρων, προκύπτουν οι προτεινόμενες εφαρμογές ενεργειακής ολοκλήρωσης για καθένα από τα μελετώμενα καύσιμα.

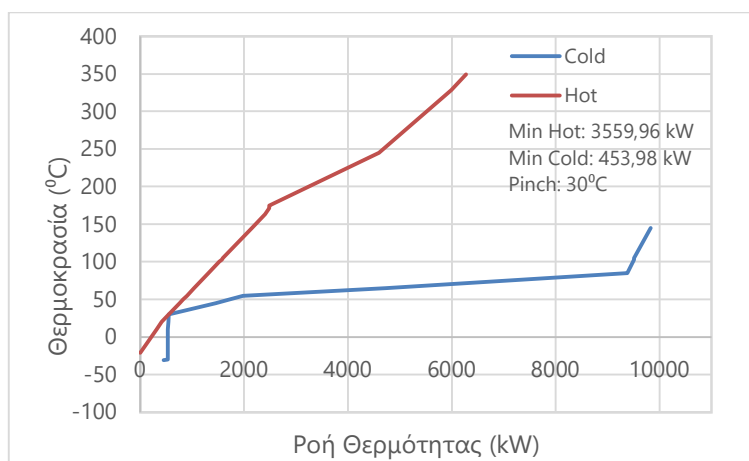
Αρχικά, στον Πίνακα 16 παρουσιάζονται οι θερμικές ανάγκες κατά την χρήση ντίζελ ναυτιλίας, και αντίστοιχα για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες που αναγράφονται ως ποσοστό της μέγιστης ισχύ των κύριων κινητήρων. Σε αυτές τις τρεις περιπτώσεις εξετάζεται και η χρήση δέσμησης διοξειδίου του άνθρακα, και τέλος για 75% της μέγιστης ισχύς εξετάζεται και η περίπτωση χωρίς δέσμηση. Στους παρακάτω πίνακες συνολικά με αρνητικό πρόσημο, αναγράφονται τα ψυχρά θερμικά φορτία. Το μέγιστο δυναμικό ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων βάσει των προϋποθέσεων, αναγράφεται επίσης σαν ρεύμα που απαιτεί θερμικό φορτίο, ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις η πλήρης εκμετάλλευση του οδηγεί σε περαιτέρω κατανάλωση ενέργειας, στις οποίες υπολογίζεται ότι η ανάκτηση θερμότητας καυσαερίων είναι αυτή που είναι οριακά επαρκής για την πλήρη κάλυψη των θερμικών αναγκών του συστήματος. Αυτό το ποσό αναγράφεται στην γραμμή «Πραγματική ανάκτηση».

Πίνακας 16. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση

Περιγραφή	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)
	60% CC		75% CC		90% CC		75%	
Τυπικές ανάγκες	2539,60	-	2539,60	-	2539,60	-	2539,60	-
Προθέρμανση καυσίμου	Περιλαμβάνεται στις τυπικές							
Μέγιστη Ανάκτηση Θερμότητας	-	-2798,89	-	-3784,02	-	-3981,05	-	-3784,02
Πραγματική ανάκτηση	-	-2798,89	-	-3784,02	-	-3981,05	-	-2539,60
Διαχωρισμός CO ₂	5036,95	-59,25	6758,47	-79,50	7102,77	-83,55	-	-
Υγροποίηση CO ₂	-	-1853,93	-	-2487,56	-	-2614,29	-	-
Σύνολο	7576,55	-4712,06	9298,07	-6351,08	9642,37	-6678,88	2539,60	-2539,60
	Μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση							
Σύνολο	3316,39	-333,41	3559,96	-453,98	3608,67	-478,09	150,00*	-

*Η ελάχιστη δυνατή ανάγκη θέρμανσης θεωρείται 150kW, έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η λειτουργία των θερμαντήρων θερμικού ελαίου.

Ενδεικτικά, παρατίθεται το διάγραμμα μετατοπισμένων σύνθετων καμπυλών θερμών και ψυχρών ρευμάτων στο Διάγραμμα 4, για ποσοστό 75% ισχύς με χρήση δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα. Τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις υπόλοιπες ταχύτητες για όλα τα καύσιμα μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα III (Διάγραμμα 18-Διάγραμμα 32).



Διάγραμμα 4. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, δέσμευσης CO₂ και 75% μέγιστης ισχύος

Όπως παρατηρείται στο διάγραμμα, υπάρχει έντονη ανάγκη για θέρμανση και ο κόμβος ανάσχεσης έχει αρκετά μικρή τιμή και ως αποτέλεσμα είναι πιθανό να

είναι συμφέρουσα μόνο η ανταλλαγή σε θερμοκρασίες άνω του κόμβου λόγω του κόστους εξοπλισμού και όχι για τις μικρές ποσοτικά ανάγκες που καλύπτονται στην εναλλαγή κάτω του κόμβου.

Αντίστοιχη διαδικασία υπολογισμών διεξάχθηκε για το υγροποιημένο φυσικό αέριο, τα αποτελέσματα της οποίας μπορούν να εξεταστούν στον Πίνακα 17.

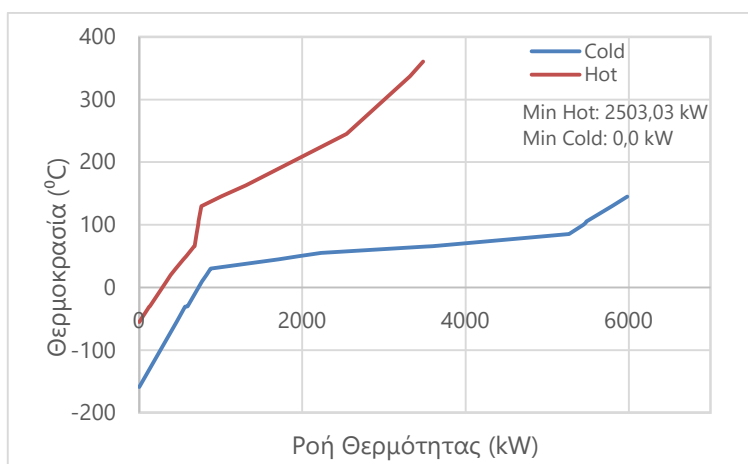
Πίνακας 17. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση φυσικού αερίου, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση

Περιγραφή	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)
	60% CC		75% CC		90% CC		75%	
Τυπικές ανάγκες	2342,80	-	2342,80	-	2342,80	-	2342,80	-
Προθέρμανση καυσίμου	1095,89	-	1334,00	-	1572,11	-	1334,00	-
Μέγιστη Ανάκτηση Θερμότητας	-	-2208,24	-	-2675,78	-	-3143,32	-	-2675,78
Πραγματική ανάκτηση	-	-2208,24	-	-2675,78	-	-3143,32	-	-2675,78
Διαχωρισμός CO ₂	1871,83	-22,02	2278,53	-26,80	2685,24	-31,59	-	-
Υγροποίηση CO ₂	-	-659,94	-	-803,34	-	-946,73	-	-
Σύνολο	5310,51	-2890,20	5955,34	-3505,92	6600,16	-4121,63	3676,80	-2675,78
	Μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση							
Σύνολο	2464,35	-	2503,03	-	2541,69	-	1001,02	-

Λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας αποθήκευσης του υγροποιημένου φυσικού αερίου, άρα και της μεγάλης ανάγκης για προθέρμανση του καυσίμου, οι ανάγκες ψύξης καλύπτονται πλήρως και στα τέσσερα διαφορετικά σενάρια.

Είναι αξιοσημείωτο ότι παρόλο τις μειωμένες συγκριτικά ανάγκες για διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα από τα υπόλοιπα συστατικά των καυσαερίων, λόγω των χαμηλότερων εκπομπών για την ίδια παραγωγή ενέργειας, οι ανάγκες θέρμανσης δεν μπορούν ικανοποιηθούν πλήρως από την ολοκλήρωση. Αυτό οφείλεται στην αντίστοιχη μειωμένη ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια και των επιπλέον αναγκών θέρμανσης για προθέρμανση του καυσίμου.

Στο Διάγραμμα 5. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου, δέσμευσης CO₂ και 75% μέγιστης ισχύος, παρίστανται γραφικά οι θερμικές ανάγκες για την περίπτωση του 75% ισχύς με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, όπου είναι εμφανές ότι καθ' όλο το εύρος θερμοκρασιών, μπορούν να πραγματοποιηθούν εναλλαγές.



Διάγραμμα 5. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου, δέσμευσης CO₂ και 75% μέγιστης ισχύος

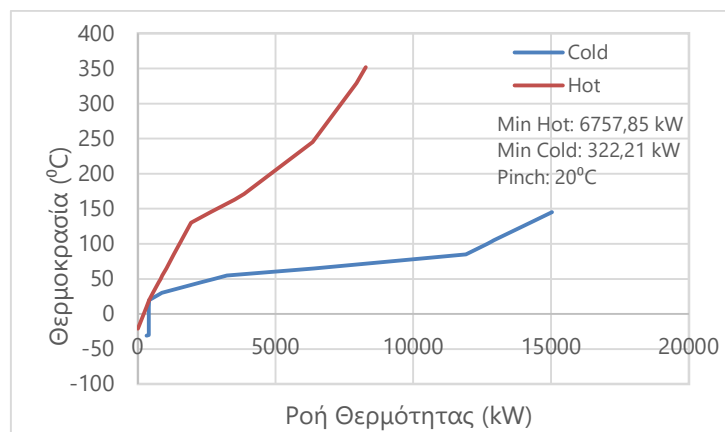
Για την περίπτωση χρήσης κινητήρων μεθανόλης μπορούν να παρατηρηθούν ανάλογα προβλήματα, τα οποία οξύνονται καθώς υπάρχουν και μικρές ανάγκες ψύξης που δεν μπορούν να καλυφθούν μέσω της προθέρμανσης του καυσίμου όπως στο φυσικό αέριο. Οι θερμικές ανάγκες για τη χρήση μεθανόλης μπορούν να βρεθούν στον Πίνακα 18.

Πίνακας 18. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση μεθανόλης, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση

Περιγραφή	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)	Θέρμανση (kW)	Ψύξη (kW)
	60% CC		75% CC		90% CC		75%	
Τυπικές ανάγκες	2342,80	-	2342,80	-	2342,80	-	2342,80	-
Προθέρμανση καυσίμου	4579,13	-	5574,62	-	6570,11	-	5574,62	-
Μέγιστη Ανάκτηση Θερμότητας	-	-4785,78	-	-5801,69	-	-6817,59	-	-5801,69
Πραγματική ανάκτηση	-	-4785,78	-	-5801,69	-	-6816,59	-	-5801,69
Διαχωρισμός CO ₂	5512,65	-64,84	6711,09	-78,94	7909,52	-93,04	-	-
Υγροποίηση CO ₂	-	-2029,02	-	-2470,12	-	-2911,22	-	-
Σύνολο	12434,58	-6879,64	14628,51	-8350,75	16822,43	-9821,85	7917,42	-5801,69
	Μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση							
Σύνολο	5947,57	-262,94	6757,85	-322,21	7568,14	-381,48	2115,73	-

Σε σύγκριση με τις θερμικές ανάγκες των συστημάτων των προηγούμενων δύο καυσίμων, στα οποία ομοίως μελετάται η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, οι ανάγκες για χρήση μεθανόλης είναι ιδιαίτερα αυξημένες, όπως παρατηρείται και στο Διάγραμμα 6, και αν δεν ήταν δυνατή η ολοκλήρωση θα μπορούσαν να

θεωρηθούν απαγορευτικές. Η περίπτωση χωρίς εφαρμογή δέσμευσης διοξειδίου φαίνεται να είναι πιο ρεαλιστική, ωστόσο το πόσο επωφελή είναι η εφαρμοσιμότητά της θα εξαρτηθεί από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα μελετηθούν παρακάτω.



Διάγραμμα 6. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση μεθανόλης, δέσμευσης CO₂ και 75% μέγιστης ισχύος

Αντιθέτως με τα αποτελέσματα της ενεργειακής ολοκλήρωσης των παραπάνω περιπτώσεων, οι θερμικές ανάγκες του συστήματος με χρήση κινητήρων αμμωνίας μπορούν να ικανοποιηθούν πλήρως με την εφαρμογή ενός δικτύου εναλλακτών βάσει της ενεργειακής ολοκλήρωσης.

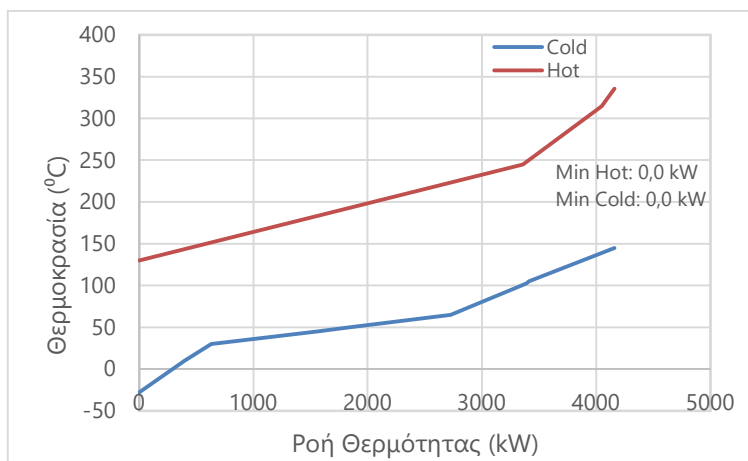
Πίνακας 19. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση αμμωνίας, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση

Περιγραφή	Θέρμανση	Ψύξη	Θέρμανση	Ψύξη	Θέρμανση	Ψύξη
	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
	60%		75%		90%	
Τυπικές ανάγκες	2342,80	-	2342,80	-	2342,80	-
Προθέρμανση καυσίμου	1493,00	-	1817,49	-	2141,98	-
Μέγιστη Ανάκτηση Θερμότητας	-	-5802,68	-	-7039,31	-	-8275,94
Πραγματική ανάκτηση	-	-3835,80	-	-4160,29	-	-4484,78
Σύνολο	3835,80	-3835,80	4160,29	-4160,29	4484,78	-4484,78
	Μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση					
Σύνολο	150,00*	-	150,00*	-	150,00*	-

*Η ελάχιστη δυνατή ανάγκη θέρμανσης θεωρείται 150kW, έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η λειτουργία των θερμαντήρων θερμικού ελαίου.

Όπως εντοπίζεται στον Πίνακα 19, η μέγιστη δυνατή ανάκτηση θερμότητας από τα παραγόμενα καυσαέρια είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την

απαιτούμενη θερμή παροχή. Ως αποτέλεσμα, θεωρείται ότι δεν θα πραγματοποιηθεί πλήρης ανάκτηση της θερμότητας καυσαερίων αλλά ότι η ανάκτηση θα λάβει χώρα έως την επάρκεια των θερμικών αναγκών. Αυτή η ισοροπημένη κάλυψη αναγκών αναπαρίσταται στο Διάγραμμα 7.



Διάγραμμα 7. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση αμμωνίας και 75% μέγιστης ισχύος

Σε πλήρη αντιστοιχία έχουν διαμορφωθεί και οι θερμικές ανάγκες για χρήση υδρογόνου, με την διαφορά της αναλογίας πραγματικής με μέγιστης ανάκτησης θερμότητας που εντοπίζεται στον Πίνακα 20. Συνολικά, ο βαθμός ολοκλήρωσης είναι ικανοποιητικός και οι ελάχιστες παροχές είναι μηδενικές.

Πίνακας 20. Συνολικές θερμικές ανάγκες ανά κατηγορία με χρήση υδρογόνου, πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση

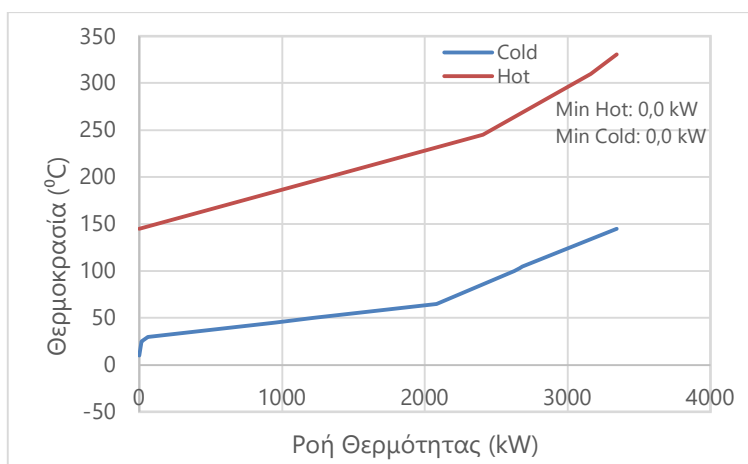
Περιγραφή	Θέρμανση	Ψύξη	Θέρμανση	Ψύξη	Θέρμανση	Ψύξη
	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)
	60%		75%		90%	
Τυπικές ανάγκες	2342,80	-	2342,80	-	2342,80	-
Προθέρμανση καυσίμου	821,34	-	999,90	-	1178,47	-
Μέγιστη Ανάκτηση Θερμότητας	-	-3332,55	-	-4042,47	-	-4752,39
Πραγματική ανάκτηση	-	-3164,14	-	-3342,70	-	-3521,27
Σύνολο	3164,14	-3164,14	3342,70	-3342,70	3521,27	-3521,27
	Μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση					
Σύνολο	150,00*	-	150,00*	-	150,00*	-

*Η ελάχιστη δυνατή ανάγκη θέρμανσης θεωρείται 150kW, έτσι ώστε να είναι εξασφαλισμένη η λειτουργία των θερμαντήρων θερμικού ελαίου.

Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο, ιδιαίτερα για την περίπτωση της χαμηλότερης ταχύτητας ότι η μέγιστη ανάκτηση θερμότητας υπερτερεί των θερμικών

αναγκών κατά 168,41 kW, γεγονός που δεν επιτρέπει να υπάρχει ευρύ περιθώριο σφάλματος λόγω των παραδοχών που έγιναν για τους παραπάνω υπολογισμούς. Αυτός είναι ένας επιπλέον λόγος γιατί η ελάχιστη δυνατή ανάγκη θέρμανσης θεωρείται 150kW, δηλαδή για να είναι η προσέγγιση όσο το δυνατό συντηρητική και να προσεγγίζει την πραγματικότητα.

Παρατηρείτε η επαναλαμβανόμενη αντιστοιχία μεταξύ της χρήσης κινητήρων αμμωνίας με την χρήση κινητήρων υδρογόνου, με το παρακάτω Διάγραμμα 8 όπου απεικονίζεται η πλήρης αλληλοεπικάλυψη των μετατοπισμένων σύνθετων καμπυλών, και η ευεργετική για την ενεργειακή ολοκλήρωση διαφορά των θερμοκρασιακών ευρών των ρευμάτων που απαιτούν θέρμανση και ψύξη.

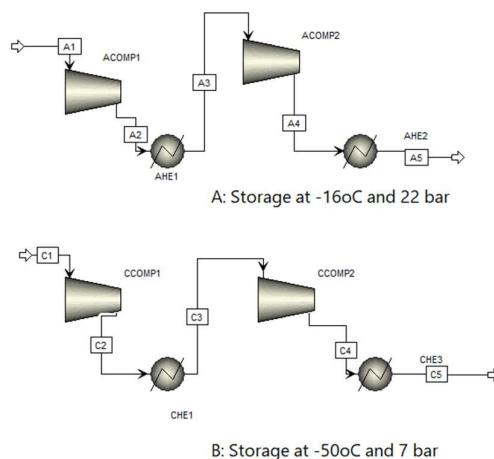


Διάγραμμα 8. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση υδρογόνου και 75% μέγιστης ισχύος

4.1.3. Συνολικές ενεργειακές ανάγκες πλοίου

Εκτός από την επιλογή καυσίμου, καθοριστικός παράγοντας αποτελεί η χρήση ή όχι των συστημάτων δέσμευσης και αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα για τις θερμικές ανάγκες του συστήματος και το ίδιο ισχύει για την καταναλωμένη ηλεκτρική ενέργεια.

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναφέρεται παραπάνω, προσομοιώνεται το σύστημα υγροποίησης και αποθήκευσης του δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα στο λογισμικό Aspen Plus V11, το σχεδιάγραμμα του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Τα ψυχρά ρεύματα της σταδιακής υγροποίησης περιλαμβάνονται στους συνολικούς πίνακες θερμικών ρευμάτων προς ενεργειακή ολοκλήρωση, ενώ οι ροές και οι ενεργειακές ανάγκες παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 21. Αναλυτικότερη παρουσίαση των ροών μάζας και ενέργειας σε κάθε στάδιο μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα III (Πίνακας 40).



Σχήμα 6. Σύστημα υγροποίησης δεσμευμένου CO₂ υπό δύο εναλλακτικές συνθήκες

Όπως παρατηρείται η χρήση φυσικού αερίου σε κάθε ταχύτητα παρουσιάζει τις μικρότερες ενεργειακές ανάγκες, λόγω της μειωμένης εκπομπής διοξειδίου και τις διαθέσιμης ψυχρής ενέργειας στην χαμηλή θερμοκρασία των -164°C , καθιστώντας λοιπόν την δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου πιο οικονομική εκ της ενεργειακής απόψεως, για την ίδια διάρκεια λειτουργίας. Αναμενόμενη είναι φυσικά η αύξηση των αναγκών με την αύξηση της ισχύος που επιλέγεται.

Πίνακας 21. Σύνοψη ενεργειακών αναγκών για την δέσμευση και αποθήκευση CO₂ με εφαρμογή ενεργειακής ολοκλήρωσης

Σενάριο	Δεσμευμένο CO ₂ (kg/h)	Αναπλήρωση MEA (kg/h)	Ηλεκτρικές ανάγκες για δέσμευση (kW)	Ηλεκτρικές ανάγκες για αποθήκευση (kW)	Ανάγκες ψύξης (kW)	Συνολικές ηλεκτρικές ανάγκες (kW)	Συνολικές ανάγκες θέρμανσης (kW)
Ντίζελ 60%	11010,01	16,52	184,00	752,86	-333,41	1282,93	3316,39
Ντίζελ 75%	14772,99	22,16	246,89	1010,17	-453,98	1728,28	3559,96
Ντίζελ 90%	15525,58	23,29	259,46	1061,63	-478,09	1817,35	3608,67
Φυσικό αέριο 60%	4091,53	6,14	68,38	172,48	0,00	240,85	2464,35
Φυσικό αέριο 75%	4980,53	7,47	83,23	209,95	0,00	293,19	2503,03
Φυσικό αέριο 90%	5869,54	8,80	98,09	247,43	0,00	345,52	2541,69
Μεθανόλη 60%	12049,83	18,07	201,38	823,96	-262,94	1298,27	5947,57
Μεθανόλη 75%	14669,43	22,00	245,16	1003,09	-322,21	1582,70	6757,85
Μεθανόλη 90%	17289,02	25,93	288,93	1182,21	-381,48	1867,12	7568,14

Συνδυάζοντας τα παραπάνω στοιχεία και εκτελώντας αντίστοιχους υπολογισμούς για την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται η ενεργειακή ολοκλήρωση, με τις αποδόσεις και συνθήκες των αντίστοιχων περιπτώσεων να μένουν σταθερές, προκύπτει ο Πίνακας 22 που συνοψίζει όλες τις καταναλώσεις ενέργειας.

Πίνακας 22. Σύνοψη κατανάλωσης και εξοικονόμησης ενέργειας για κάθε καύσιμο πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση (ΕΟ)

	Σύνολο χωρίς ΕΟ (MW)	Σύνολο με ΕΟ (MW)	Μείωση ενέργειας λόγω ΕΟ (MW)	% Εξοικονόμησης ενέργειας λόγω ΕΟ
MDO 60%+CCS	32,44	26,69	5,75	17,7%
MDO 75%+CCS	39,97	32,18	7,78	19,5%
MDO 90%+CCS	45,31	37,12	8,19	18,1%
MDO 75%	29,29	26,90	2,39	8,2%
LNG 60%+CCS	28,80	25,50	3,30	11,5%
LNG 75%+CCS	34,58	30,54	4,04	11,7%
LNG 90%+CCS	40,36	35,70	4,66	11,5%
LNG 75%	30,42	27,75	2,68	8,8%
MET 60%+CCS	37,58	30,96	6,62	17,6%
MET 75%+CCS	45,27	37,20	8,07	17,8%
MET 90%+CCS	52,96	43,40	9,55	18,0%
MET 75%	34,66	28,86	5,80	16,7%
AMM 60%	25,78	22,10	3,69	14,3%
AMM 75%	30,91	26,90	4,01	13,0%
AMM 90%	36,03	31,70	4,33	12,0%
HYD 60%	25,11	22,10	3,01	12,0%
HYD 75%	30,09	26,90	3,19	10,6%
HYD 90%	35,07	31,70	3,37	9,6%

Βάση της ποσοστιαίας μείωσης της χρησιμοποιούμενης ενέργειας ανά διάρκεια λειτουργίας, η εφαρμογή της ενεργειακής ολοκλήρωσης είναι πιο αποτελεσματική όταν γίνεται χρήση μεθανόλης και αμμωνίας ως καύσιμα του πλοίου.

Ειδικότερα για την μεθανόλη, η χρήση της σε υψηλές ταχύτητες με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση αποτελεί την πιο ενεργοβόρα περίπτωση με περίπου 80% παραπάνω συνολική κατανάλωση από την τωρινή, δηλαδή αυτή της χρήσης ντίζελ με 75% της ισχύος χωρίς δέσμευση και χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση. Από το ποσοστό εξοικονόμησης γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση μεθανόλης ευεργετείται έντονα από την ενεργειακή ολοκλήρωση, καθώς βάσει και των ροών δεσμευμένου διοξειδίου, οι περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείτε μεθανόλη έχουν υπέρμετρες ανάγκες θέρμανσης για την δέσμευση του.

Στις περιπτώσεις της αμμωνίας και του υδρογόνου, παρατηρείται σημαντικά μικρότερα ποσοστά εξοικονόμησης, καθώς οι ανάγκες θέρμανσης πρόσθετες του συστήματος του πλοίου είναι μικρές, και οι αντίστοιχες ανάγκες ψύξης μηδενικές. Επισημαίνεται και πάλι, ότι στους πίνακες θερμών και ψυχρών ρευμάτων, η ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια σημειώνεται ως ανάγκη ψύξη ωστόσο δεν είναι επιβεβλημένη. Για αντίστοιχους λόγους, στις περιπτώσεις

όπου δεν χρησιμοποιείται δέσμευση το ποσοστό μείωσης των αναγκών είναι περιορισμένο.

Αξιοσημείωτο επίσης είναι ότι στην περίπτωση της χρήσης φυσικού αερίου με δέσμευση, οι ανάγκες ψύξης έχουν μεγαλύτερη επιρροή στις ηλεκτρικές ανάγκες πριν την ενεργειακή ολοκλήρωση καθώς υπολογίζονται ότι απαιτούν ψυκτική ενέργεια στους -50°C , σε αντίθεση με τις άλλες περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται ψυκτική ενέργεια στους -25°C [74].

4.1.4. Συνολικές καταναλώσεις ενέργειας για την επιλεγμένη διαδρομή

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό NetPas Distance, για την διαδρομή που αναλύθηκε παραπάνω υπολογίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των λιμανιών, καθώς και η συνολική απόσταση του ταξιδιού, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 23, έτσι ώστε να υπολογιστεί με ακρίβεια η διάρκεια λειτουργίας των κινητήρων και των άλλων συστημάτων του πλοίου για κάθε ταχύτητα.

Πίνακας 23. Αποστάσεις σε ναυτικά μίλια ανά διαδοχικά λιμάνια της διαδρομής

Λιμάνι	Απόσταση (nm)
Πειραιάς	0
Πάτμος	164,5913
Λειψοί	19,5685
Λέρος	20,7199
Κάλυμνος	30,7258
Κως	17,8375
Ρόδος	71,1623
Σύνολο	324,6053

Μέσω της Εξίσωση 1, υπολογίζονται οι ταχύτητες αντίστοιχα με το ποσοστό της μέγιστης ισχύς κινητήρα που έχει επιλεχθεί να χρησιμοποιηθεί. Στον Πίνακα 24, παρουσιάζονται οι ταχύτητες και η αντίστοιχη συνολική διάρκεια για την ολοκλήρωση της διαδρομής της μελέτης περίπτωσης, η οποία συμπεριλαμβάνει και τον απαραίτητο χρόνο για ελιγμούς εντός των λιμανιών, χρόνος που είναι σταθερός για όλες τις ταχύτητες.

Πίνακας 24. Ταχύτητα πλεύσης και συνολική διάρκεια εκτέλεσης διαδρομής

%MCR	Ταχύτητα (kt)	Συνολική Διάρκεια (h)
100%	25,50	
90%	24,30	15,56
75%	22,35	16,73
60%	20,17	18,29

Στη συνέχεια στους Πίνακες Πίνακας 25 και Πίνακας 26, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για την συνολική ενεργειακή κατανάλωση ανά καύσιμο για την ταχύτητα των 22,35 κόμβων, την μεσαία που έχει επιλεχθεί, η

οποία είναι πλησιέστερη στην πραγματική. Οι συνολικές ενεργειακές καταναλώσεις για τις άλλες διαθέσιμες ταχύτητες παρατίθενται στο Παράρτημα III (Πίνακας 41-Πίνακας 44) για χάρη συντομίας.

Πίνακας 25. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 75% MCR ανά κατηγορία για το ντίζελ ναυτιλίας, το φυσικό αέριο και τη μεθανόλη

Ντίζελ ναυτιλίας			Φυσικό αέριο			Μεθανόλη		
Πλεύση (75% MCR)			Πλεύση (75% MCR)			Πλεύση (75% MCR)		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	348608,53	65,76%	Πρόωση	348608,53	70,18%	Πρόωση	348608,53	57,23%
Ηλεκτρική	39877,91	7,52%	Ηλεκτρική	39877,91	8,03%	Ηλεκτρική	39877,91	6,55%
Θερμική	2178,80	0,41%	Θερμική	14540,17	2,93%	Θερμική	30731,73	5,04%
Υποσύνολο	390665,25	73,70%	Υποσύνολο	403026,62	81,13%	Υποσύνολο	419218,18	68,82%
Ελιγμοί			Ελιγμοί			Ελιγμοί		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	29920,00	5,64%	Πρόωση	29920,00	6,02%	Πρόωση	29920,00	4,91%
Ηλεκτρική	13695,18	2,58%	Ηλεκτρική	13695,18	2,76%	Ηλεκτρική	13695,18	2,25%
Θερμική	330,00	0,06%	Θερμική	3359,40	0,68%	Θερμική	6850,80	1,12%
Υποσύνολο	43945,18	8,29%	Υποσύνολο	46974,58	9,46%	Υποσύνολο	50465,98	8,28%
Δέσμευση CO ₂ (75% MCR)			Δέσμευση CO ₂ (75% MCR)			Δέσμευση CO ₂ (75% MCR)		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Ηλεκτρική	28906,12	5,45%	Ηλεκτρική	4903,66	0,99%	Ηλεκτρική	26471,14	4,35%
Θερμική	66566,20	12,56%	Θερμική	41863,99	8,43%	Θερμική	113027,47	18,55%
Υποσύνολο	95472,32	18,01%	Υποσύνολο	46767,64	9,41%	Υποσύνολο	139498,62	22,90%
Σύνολο	530082,74		Σύνολο	496768,84		Σύνολο	609182,77	

Γίνεται αντιληπτό ότι σε όλα τα καύσιμα το μεγαλύτερο ποσοστό της κατανάλωσης οφείλεται στην πρόωση κατά την πλεύση, όπως είναι αναμενόμενο, καθώς η πλεύση αποτελεί την λειτουργία με την μεγαλύτερη διάρκεια και φυσικά η πρόωση του βάρους του πλοίου είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα. Ανάλογη είναι η κατανομή και για τις άλλες ταχύτητες, με την πρόωση να ευθύνεται για μεγαλύτερο ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης στην μεγαλύτερη ταχύτητα.

Αξιοσημείωτη αποτελεί η κατανομή της κατανάλωσης για την μεθανόλη, καθώς γίνεται ακόμα πιο εμφανές ότι παρά την εφαρμογή της ενεργειακής ολοκλήρωσης οι ανάγκες θέρμανσης για την χρήση δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂, είναι σημαντικές και το μεγαλύτερο μέρος της «ενεργειακής ποινής» της δέσμευσης. Επιπρόσθετα στην ανάλυση για τη δέσμευση του φυσικού αερίου παρατηρείται ότι η ηλεκτρική ενέργεια έχει μικρό (0,99%) συγκριτικά με τα άλλα ποσοστά κατανάλωσης. Αυτό οφείλεται στην επιλογή της χαμηλότερης θερμοκρασίας αποθήκευσης του υγροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα, άρα το έργο συμπίεσης είναι μικρότερο και ανάλογα είναι μικρότερες οι ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η επιλογή δεν θα είχε θετικά αποτελέσματα στα άλλα καύσιμα, καθώς θα ήταν απαραίτητη η ενέργεια προς ψύξη να δοθεί στους -

50°C, για την οποία χρειάζεται σχεδόν διπλάσια (1,84:1) ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τους -25°C [74].

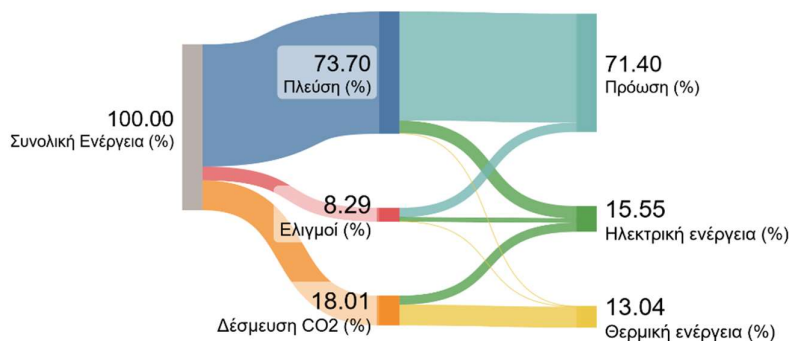
Πίνακας 26. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 75% MCR ανά κατηγορία για την αμμωνία και το υδρογόνο

Αμμωνία			Υδρογόνο		
Πλεύση (75% MCR)			Πλεύση (75% MCR)		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	348608,53	80,21%	Πρόωση	348608,53	80,21%
Ηλεκτρική	39877,91	9,18%	Ηλεκτρική	39877,91	9,18%
Θερμική	2178,80	0,50%	Θερμική	2178,80	0,50%
Υποσύνολο	390665,25	89,89%	Υποσύνολο	390665,25	89,89%
Ελιγμοί			Ελιγμοί		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	29920,00	6,88%	Πρόωση	29920,00	6,88%
Ηλεκτρική	13695,18	3,15%	Ηλεκτρική	13695,18	3,15%
Θερμική	330,00	0,08%	Θερμική	330,00	0,08%
Υποσύνολο	43945,18	10,11%	Υποσύνολο	43945,18	10,11%
Σύνολο	434610,42		Σύνολο	434610,42	

Όσον αφορά τα δύο καύσιμα που μελετώνται τα οποία δεν έχουν εκπομπές διοξειδίου, οι κατανομή αλλάζει σε μεγάλο βαθμό με την πρόωση να καταλαμβάνει ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται.

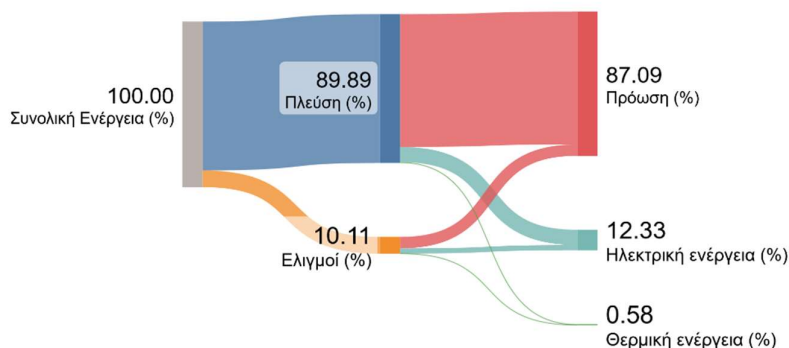
Πρέπει να σημειωθεί ότι η αμμωνία, το υδρογόνο και το ντίζελ ναυτιλίας, χωρίς δέσμευση διοξειδίου, παρουσιάζουν τις ίδιες ενεργειακές ανάγκες. Αυτό είναι το αποτέλεσμα της ανάκτησης θερμότητας από τα καυσαέρια, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις, η ανάκτηση είναι υπεραρκετή για να καλύψει τις θερμικές ανάγκες των συστημάτων, οπότε χρησιμοποιείται η ελάχιστη δυνατή ενέργεια ώστε να είναι ενεργοί οι θερμοαντήρες θερμικού ελαίου. Εάν η βάση των αποτελεσμάτων για την ενέργεια γίνει η ισοδύναμη ενέργεια καυσίμου, οι καταναλώσεις θα ήταν φαινομενικά διαφορετικές, λόγω των διαφορετικών αποδόσεων των κινητήρων, ωστόσο θα αναπαριστούσαν το ίδιο ποσό ενέργειας.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά διαγράμματα Sankey, για το ντίζελ ναυτιλίας σε ταχύτητα 22,35 κόμβων. Τα διαγράμματα για τα υπόλοιπα καύσιμα μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα III (Διάγραμμα 33-Διάγραμμα 38). Οι ροές αποτυπώνονται ως ποσοστά, αντί για ποσά ενέργειας για ευκολότερη κατανόηση και διαπίστωση των κυριότερων παραγόντων κατανάλωσης.



Διάγραμμα 9. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το ντίζελ ναυτιλίας με 75% MCR και δέσμευση CO₂

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι ενεργειακές ανάγκες της πρόωσης και η θερμική ενέργεια για την δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα είναι δύο στάδια στα οποία θα πρέπει να δοθεί έμφαση προς μείωση τους. Οι ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια είναι πιο δύσκολο να μειωθούν, καθώς αφορούν μικρά κομμάτια πολλών διεργασιών, αντιθέτως με τις ανάγκες για θερμική. Εφαρμόζοντας ενεργειακή ολοκλήρωση σε μεγαλύτερο βαθμό ή βελτιστοποιώντας την διεργασία της δέσμευσης, θα μπορούσε να μειωθεί δραστικά η ανάγκη για θέρμανση, κάνοντας έτσι πιο βιώσιμη και ρεαλιστική την εφαρμογή συστημάτων δέσμευσης άνθρακα. Επιπλέον, γίνεται κατανοητό ότι υπάρχουν πρόσθετες δυνατότητες για μείωση της «ενεργειακής ποινής» με τη χρήση εναλλακτικών μεθόδων δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα.



Διάγραμμα 10. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το ντίζελ ναυτιλίας με 75% MCR

Όταν δεν συμπεριλαμβάνεται η χρήση δέσμευσης, είτε επειδή επιλέγεται, είτε επειδή δεν υπάρχουν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η πρόωση είναι το κύριο μέρος της χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Εφόσον, δεν είναι δυνατή η μείωση του βάρους που μεταφέρεται, καθώς αυτός είναι ο παράγοντας κερδοφορίας του ναυτιλιακού τομέα, είναι ιδιαίτερα κύρια η βελτίωση των κινητήρων των διάφορων καυσίμων προς τις μέγιστες δυνατές αποδόσεις, καθώς και μια μικρή ποσοστιαία βελτίωση θα έχει έντονο αποτέλεσμα.

4.2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής - Περιβαλλοντικά Αποτυπώματα

Στο παρών μέρος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής που διεξάχθηκε με την βοήθεια του λογισμικού SimaPro V9.5, με έμφαση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα ως κύρια κριτήρια αειφορίας, μέσω της μεθόδου ReCiPe 2016 Endpoint Hierarchist.

4.2.1. Σύνοψη αποτελεσμάτων ανάλυσης κύκλου ζωής ανά καύσιμο

Στους παρακάτω πίνακες, συνοψίζονται τα αποτελέσματα για την περιβαλλοντική επιβάρυνση που φέρει η διεξαγωγή της διαδρομής Πειραιάς-Ρόδος του Blue Star Patmos, για τα πέντε καύσιμα που μελετώνται, σε διαφορετικές ταχύτητες, και με διαφορετικών ειδών προέλευση για κάθε καύσιμο. Το κύριο μέτρο σύγκρισης αποτελεί ο δείκτης της ενιαίας εκτίμησης, ο οποίος συνδυάζει όλες τις μελετημένες πτυχές με κατάλληλη στάθμιση.

Πίνακας 27. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την χρήση ντίζελ ναυτιλίας

Πηγή		Δέσμευση CO ₂	%MCR	Εκπομπές (tons CO ₂)	Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	Οικοσυστήματα (species.yr)	Ενιαία εκτίμηση (kPt)
Συνθήκες				Αποτελέσματα			
MDO	fossil	CC	60%	120	1,11	0,00471	19,8
		CC	75%	122	1,2	0,0051	21,5
		CC	90%	125	1,25	0,00532	22,3
		-	75%	286	1,15	0,00469	20,5
	bio	CC	60%	218	1,15	0,0048	20,5
		CC	75%	237	1,26	0,00523	22,4
		CC	90%	248	1,31	0,00547	23,4
		-	75%	193	1,03	0,00427	18,3
	renew	CC	60%	36	0,923	0,00419	16,6
		CC	75%	39,3	1,01	0,00457	18,1
		CC	90%	41	1,05	0,00477	18,9
		-	75%	31,3	0,823	0,00373	14,7

Στον Πίνακα 27, αρχικά παρατηρείται ότι η πιο περιβαλλοντικά φιλική επιλογή είναι, όπως ήταν αναμενόμενο, η χρήση καύσιμου από επεξεργασία αποβλήτων μαγειρικών ελαίων χωρίς δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα. Όταν οι αρχικοί πόροι απαιτούμενοι για την παραγωγή του ντίζελ δεν αποτελούν ορυκτά καύσιμα, η δέσμευση διοξειδίου δεν επιφέρει μείωση εκπομπών, καθώς η καύση του καυσίμου, έχει εκπομπές CO₂ βιογενικής προέλευσης, οι οποίες δεν επιφέρουν επιπλέον ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου, ως μέρος του φυσικού βραχυπρόθεσμου κύκλου του άνθρακα. Για αυτό το λόγο, δεν προτείνεται η ταυτόχρονη χρήση δέσμευσης και ανανεώσιμων καυσίμων.

Ακόμη, συγκρίνοντας τις καλύτερες περιπτώσεις από τις κατηγορίες των προελεύσεων από ορυκτά και βιομάζα, φαίνεται ότι η χρήση βιοντίζελ είναι πιο

επωφελής περιβαλλοντικά, από την χρήση ορυκτών με δέσμευση CO₂ και πλεύση με τη μικρότερη ταχύτητα.

Εντούτοις, σε μικρό χρονικό διάστημα εάν δεν είναι δυνατή η αποκλειστική χρήση βιοντίζελ, η εφαρμογή δέσμευσης διοξειδίου παρουσιάζει συγκρίσιμη βελτίωση -0,7 kPt (Pt = Eco-indicator point) με αυτή του βιοντίζελ που ισούται με -2,2 kPt, και συνολική μείωση των εκπομπών διοξειδίου κατά 166 τόνους ανά διαδρομή. Η μείωση θεωρείται συγκριτικά με την περίπτωση χρήσης ορυκτού καυσίμου χωρίς δέσμευση διοξειδίου αλλά με εφαρμογή της ενεργειακής ολοκλήρωσης.

Μακροπρόθεσμα, υπό την προϋπόθεση συνέχειας της χρήσης ντίζελ, η καλύτερη επιλογή θα ήταν αυτή της επεξεργασία αποβλήτων μαγειρικών ελαίων, η οποία δυστυχώς γίνεται σε πολύ μικρές ποσότητες για να καλύψει τις ανάγκες του ναυτιλιακού τομέα.

Πίνακας 28. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την χρήση φυσικού αερίου

Πηγή		Δέσμευση CO ₂	%MCR	Εκπομπές (tons CO ₂)	Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	Οικοσυστήματα (species.yr)	Ενιαία εκτίμηση (kPt)
Συνθήκες				Αποτελέσματα			
LNG	fossil	CC	60%	137	0,325	0,00117	5,74
		CC	75%	143	0,346	0,00124	6,1
		CC	90%	151	0,366	0,00132	6,46
		-	75%	204	0,381	0,00133	6,71
	bio	CC	60%	87,8	0,36	0,00107	6,29
		CC	75%	94,1	0,385	0,00114	6,74
		CC	90%	100	0,411	0,00122	7,19
		-	75%	84,6	0,347	0,00103	6,07
	renew	CC	60%	98,5	0,208	0,000816	3,7
		CC	75%	102	0,22	0,000863	3,9
		CC	90%	107	0,231	0,000911	4,1
		-	75%	167	0,263	0,000974	4,64

Για το φυσικό αέριο, όπως φαίνεται στον Πίνακας 28, η βέλτιστη ως προς τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο είναι η χρήση συνθετικού φυσικού αερίου στην μικρότερη ταχύτητα με ταυτόχρονη δέσμευση των εκπομπών κατά την καύση του. Η διαφορά που παρατηρείται στην τιμή της ενιαίας εκτίμησης για την συμπερίληψη ή μη της δέσμευσης διοξειδίου, οφείλεται στην αρχική πηγή των πρώτων υλών του συνθετικού φυσικού αερίου που καθιστούν τις εκπομπές του διοξειδίου που παράγει με την καύση του, ορυκτές. Αυτό γιατί το φυσικό αέριο θεωρείται ότι συντίθεται με πρώτη ύλη CO₂ το οποίο είχε δεσμευθεί σε άλλη διεργασία αλλά είχε αρχική ορυκτή πηγή.

Ταυτόχρονα, είναι ξεκάθαρη η βελτίωση που θα υπήρχε με την υιοθέτηση βιο-φυσικού αερίου χωρίς κάποια άλλη προσθήκη σε σύγκριση με το αντίστοιχο συμβατικό. Ωστόσο ακόμα μεγαλύτερη μείωση επίδρασης στο περιβάλλον παρατηρείται με την χρήση δέσμευσης διοξειδίου για το ορυκτό καύσιμο, παρά

το γεγονός ότι η αυτή η περίπτωση έχει 61% παραπάνω εκπομπές διοξειδίου από το βιο-φυσικό αέριο.

Συνολικά κάθε περίπτωση χρήσης φυσικού αερίου παρουσιάζει μικρότερο αντίκτυπο από οποιαδήποτε με χρήση ντίζελ, ένα αποτέλεσμα που επιβεβαιώνει την ανάγκη για απομάκρυνση από τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή στην ναυτιλία.

Πίνακας 29. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την χρήση μεθανόλης

Πηγή		Δέσμευση CO ₂	%MCR	Εκπομπές (tons CO ₂)	Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	Οικοσυστήματα (species.yr)	Ενιαία εκτίμηση (kPt)
Συνθήκες				Αποτελέσματα			
MET	fossil	CC	60%	255	1,12	0,00276	19,5
		CC	75%	268	1,21	0,00296	20,9
		CC	90%	292	1,31	0,00321	22,8
		-	75%	401	1,12	0,00283	19,4
	bio	CC	60%	88,7	0,277	0,00116	4,94
		CC	75%	91	0,285	0,00119	5,07
		CC	90%	102	0,32	0,00134	5,69
		-	75%	67,7	0,212	0,00894	3,78
	renew	CC	60%	124	0,306	0,00125	5,44
		CC	75%	126	0,322	0,00132	5,74
		CC	90%	127	0,338	0,00139	6,01
		-	75%	283	0,418	0,00153	7,39

Πρώτο αξιοσημείωτο αποτέλεσμα για την χρήση μεθανόλης, είναι ότι στην περίπτωση της μεθανόλης από ορυκτές πηγές, ο δείκτης ενιαίας εκτίμησης έχει παρόμοιες τιμές για την περίπτωση με δέσμευση CO₂ και 60% MCR και για την περίπτωση χωρίς και 75% MCR. Αυτό πιθανότατα οφείλεται πρώτον στην μεγάλη αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας που είναι απαραίτητη για τη δέσμευση των εκπομπών της μεθανόλης και αντίστοιχα στην αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας μεθανόλης. Οι επιπλέον ρίποι που εκπέμπονται για την παραγωγή της επιπλέον μεθανόλης δεν αντισταθμίζονται από αυτούς που αποφεύγονται λόγω της δέσμευσης διοξειδίου. Δεύτερος λόγος είναι η αυξημένη ποσότητα αναπλήρωσης αντιδραστηρίου MEA που απαιτείται για την δέσμευση των μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται με την καύση της μεθανόλης, η οποία συμβάλει σημαντικά σε κατηγορίες σχετικές με την τοξικότητα.

Όπως φαίνεται από την ενιαία εκτίμηση των 3,78 kPt και τις χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου των 67,7 τόνων, η πιο περιβαλλοντικά φιλική εκδοχή για την μεθανόλη είναι αυτή της βιομεθανόλης, χωρίς δέσμευση καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί οι εκπομπές καύσης της ως βιοκαύσιμο είναι βιογενής. Σημαντικό, ωστόσο, είναι και το θετικό αποτέλεσμα της συνθετικής μεθανόλης με δείκτη ενιαίας εκτίμησης 5,44 kPt, γιατί ο συνδυασμός της με δέσμευσης CO₂ είναι η βάση για ένα κυκλικό δίκτυο παραγωγής μεθανόλης από το προηγούμενως δεσμευμένο CO₂, που με την καύση της δημιουργεί την πρώτη

ύλη για σύνθεση της. Ιδανικά με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τη σύνθεση μεθανόλης, αυτό το κυκλικό μοντέλο μπορεί να επαναληφθεί επ' άπειρον με μικρές εκπομπές διοξειδίου ορυκτής προέλευσης.

Πίνακας 30. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για την χρήση αμμωνίας

Πηγή		%MCR	Εκπομπές (tons CO ₂)	Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	Οικοσυστήματα (species.yr)	Ενιαία εκτίμηση (kPt)
Συνθήκες			Αποτελέσματα			
AMM	fossil	60%	807	1,59	0,00572	28,1
		75%	877	1,73	0,00622	30,6
		90%	943	1,86	0,00668	32,8
	bio	60%	99,3	0,851	0,00361	15,2
		75%	108	0,925	0,00392	16,5
		90%	116	0,994	0,00421	17,7
	renew	60%	130	0,902	0,00373	16,1
		75%	141	0,98	0,00406	17,4
		90%	152	1,05	0,00436	18,7

Παρά τις μειωμένες καταναλώσεις ενέργειας των συστημάτων αμμωνίας, το περιβαλλοντικό αντίκτυπο τους δεν είναι ενθαρρυντικό. Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι η περίπτωση χρήσης αμμωνίας με συμβατικούς τρόπους παραγωγής, ήταν η χειρίστη από αυτές που εξετάστηκαν, ειδικά στον τομέα των συνολικών εκπομπών διοξειδίου και της ανθρώπινης υγείας και έχει σημειωθεί με κόκκινο στον Πίνακας 30.

Καλύτερη περίπτωση για την αμμωνία αποτελεί αυτή της βιοαμμωνίας η οποία όμως έχει αυξημένο δείκτη κινδύνου προς την ανθρώπινη υγεία. Αντίστοιχα, και για την αμμωνία που παράγεται από ανανεώσιμο υδρογόνο. Οι αυξημένες τιμές κινδύνου προς την ανθρώπινη υγεία έχουν σαν κύριο παράγοντα την τοξικότητα της ίδιας της αμμωνίας που υπολογίζεται ότι θα έχει μικρές εκπομπές στην παραγωγή και μεταφορά της και την τοξικότητα των οξειδίων του αζώτου που ακόμη και με τις απαραίτητες μεθόδους μείωσης τους, θα εκπέμπονται αναπόφευκτα σε έναν μικρό βαθμό. Συνολικά, ωστόσο, οι ανανεώσιμες μορφές αμμωνίας έχουν μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από τις περισσότερες περιπτώσεις χρήσης ντίζελ, οπότε δεν θα πρέπει να απορριφθούν σαν εναλλακτικά καύσιμα.

Πίνακας 31. Σύνοψη δεικτών περιβαλλοντικού αποτυπώματος για τη χρήση υδρογόνου

Πηγή		%MCR	Εκπομπές (tons CO ₂)	Ανθρώπινη Υγεία (DALY)	Οικοσυστήματα (species.yr)	Ενιαία εκτίμηση (kPt)
Συνθήκες			Αποτελέσματα			
HYD	fossil	60%	430	0,404	0,00123	7,08
		75%	467	0,439	0,00133	7,69
		90%	502	0,472	0,00143	8,26
	bio	60%	71,2	0,0708	0,000222	1,24
		75%	77,2	0,0767	0,00024	1,34
		90%	82,8	0,0822	0,000257	1,44
	renew	60%	14,1	0,0177	0,0000613	0,312
		75%	15,4	0,0192	0,0000666	0,339
		90%	16,5	0,0207	0,0000716	0,364

Για το υδρογόνου φαίνεται να υπάρχει συνολικά μειωμένο αντίκτυπο στο περιβάλλον, εκτός από τις περιπτώσεις με χρήση υδρογόνου από αναμόρφωση, που συνολικά εκπέμπουν περίπου υπερδιπλάσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από το συμβατικό καύσιμο. Ειδικότερα, η χρήση υδρογόνου από ηλεκτρόλυση νερού από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, φαίνεται να έχει τις μικρότερες επιπτώσεις σε όλες τις κατηγορίες που εξετάζονται. Η ύπαρξη μειωμένων εκπομπών διοξειδίου, παρά το ότι είναι ιδιαίτερα μειωμένες, οφείλονται σε στάδια της παραγωγής, μεταφοράς και συμπίεσης του υδρογόνου όπου θεωρείται ότι ένα ποσοστό της ενέργειας προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Υποθέτοντας ότι και αυτές οι πηγές εκπομπών αντικατασταθούν με ανανεώσιμες, το ανανεώσιμο υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να είναι ένα καύσιμο μηδενικών εκπομπών. Δυναμικό μείωσης του περιβαλλοντικού αντίκτυπου έχει επίσης και η περίπτωση του υδρογόνου με παραγωγή από βιομάζα με ενιαία εκτίμηση των 1,24 kPt.

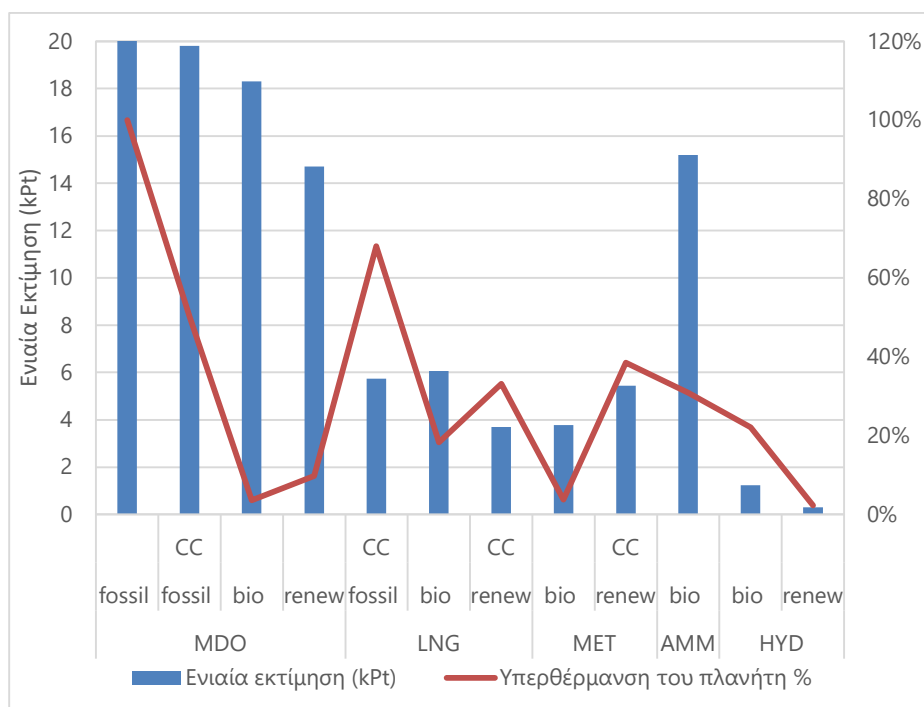
4.2.2. Σύγκριση αποτυπωμάτων καλύτερων περιπτώσεων

Επιλέγοντας τις συνθήκες με τα χαμηλότερα περιβαλλοντικά αποτυπώματα από κάθε κατηγορία, θα ήταν αποδοτική η σύγκριση τους σε εκφάνσεις πιο συγκεκριμένες από αυτές που μελετήθηκαν παραπάνω.

Αρχικά ο πρωταρχικός λόγος που μελετώνται εναλλακτικά καύσιμα, είναι η προσπάθεια περιορισμού του φαινομένου του θερμοκηπίου και της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η εκτίμηση της ζημίας από την υπερθέρμανση του πλανήτη γίνεται σε τρεις υποκατηγορίες, συγκεκριμένα ως προς την ανθρώπινη υγεία, ως προς τα χερσαία και τέλος τα υδάτινα οικοσυστήματα. Με σκοπό η σύγκριση να είναι πιο εύκολη, υπολογίστηκε το ποσοστό ζημίας κάθε κατηγορίας και πάρθηκε ο μέσος όρος τους για να αντικατοπτρίσει τη συνολική επιρροή. Πρέπει να σημειωθεί ότι ως επίδραση με ποσοστό 100% σε αυτή τη συγκριτική κλίμακα ορίστηκε η περίπτωση χρήσης ντίζελ ναυτιλίας από ορυκτές πρώτες ύλες χωρίς δέσμευση διοξειδίου για χάρη σύγκρισης.

Στο Διάγραμμα 11 με κόκκινη γραμμή απεικονίζεται η σχετική ζημία στην υπερθέρμανση του πλανήτη που προκαλεί μία συνολική διαδρομή χρησιμοποιώντας το καύσιμο που αναγράφεται στο οριζόντιο άξονα από διαφορετικές ύλες και με την εφαρμογή ή όχι δέσμευσης CO₂ που συμβολίζεται με τα αρχικά CC. Με μπλε μπάρες στο Διάγραμμα 11 και στα επόμενα διαγράμματα δίνεται ο δείκτης ενιαίας εκτίμησης περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Το καύσιμο με χαμηλότερο αντίκτυπο είναι, αναμενόμενα το ανανεώσιμο υδρογόνο. Στα καύσιμα όπου υπάρχει παραγωγή διοξειδίου κατά την καύση, υπερτερούν οι επιλογές βιοκαυσίμων εντός κάθε είδους. Ακόμη, παρατηρείται ότι για την συνθετική μεθανόλη με δέσμευση, η επίδραση της στην υπερθέρμανση του πλανήτη είναι εντονότερη από την αντίστοιχη περίπτωση φυσικού αερίου.



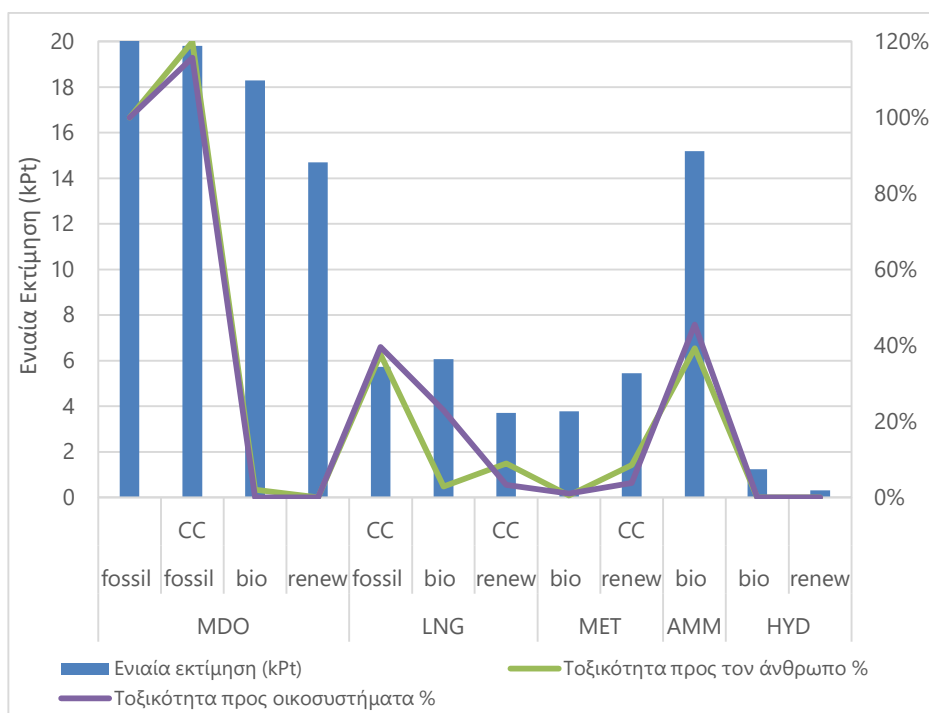
Διάγραμμα 11. Περιβαλλοντικό αντίκτυπο καλύτερων περιπτώσεων και συγκριτική εκτίμηση επιδράσεων στην υπερθέρμανση του πλανήτη

Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι το φυσικό αέριο έχει σχετικά υψηλή επίδραση στην υπερθέρμανση του πλανήτη παρά τον συνολικά μειωμένο δείκτη ενιαίας εκτίμησης. Αυτό πιθανό οφείλεται στις μικρές αλλά σημαντικές εκπομπές μεθανίου, καθώς κατά τη μεταφορά, αποθήκευση και γενικά τον χειρισμό του φυσικού αερίου, υπάρχει ένα ποσοστό αερίου μεθανίου που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα (methane slip).

Για την εκτίμηση της τοξικότητας προς τον άνθρωπο και της τοξικότητας προς τα οικοσυστήματα, αντίστοιχη μεθοδολογία έλαβε χώρα. Για το πρώτο είδος, συμπύχθηκαν σε ένα μέγεθος ο δείκτης καρκινογενής και ο δείκτης μη καρκινογενής τοξικότητας προς τον άνθρωπο, ενώ για το δεύτερο λήφθηκαν υπόψη οι επιπτώσεις τοξικότητας σε χερσαία, υδάτινα γλυκά και υδάτινα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Παρατηρείται στο Διάγραμμα 12, ότι η χρήση δέσμησης για ντίζελ ναυτιλίας έχει πάνω από 100% επίδραση, καθώς απαιτείται μέσο απορρόφησης MEA για αναπλήρωση κατά την λειτουργία του συστήματος δέσμησης και ως αποτέλεσμα αυτή η περίπτωση έχει πρόσθετες επιδράσεις από την περίπτωση χωρίς δέσμηση.

Οι μόνες δύο άλλες περιπτώσεις που προκαλούν σημαντική ζημία όσον αφορά την τοξικότητα, είναι πρώτον το ορυκτό φυσικό αέριο λόγω των βαρέων μετάλλων που απελευθερώνονται κατά την παραγωγή του και η αμμωνία λόγω των διαρροών αμμωνίας αλλά και των οξειδίων του αζώτου που εκπέμπονται.



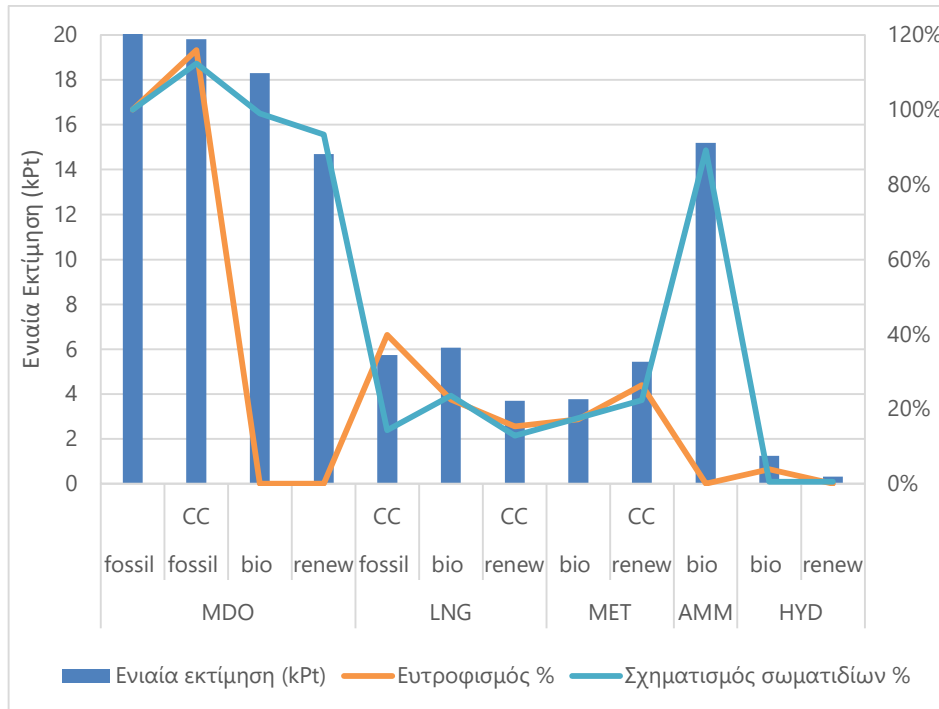
Διάγραμμα 12. Περιβαλλοντικό αντίκτυπο καλύτερων περιπτώσεων και συγκριτική εκτίμηση επιδράσεων τοξικότητας

Μέσω της μεθόδου ReCiPe 2016 είναι διαθέσιμοι δείκτες για πολλές άλλες υποκατηγορίες, οι οποίες συμπύσσονται για να διαμορφώσουν τον δείκτη ενιαίας εκτίμησης. Από αυτές που δεν έχουν παρουσιαστεί ήδη, επιλέγονται ο ευτροφισμός και ο σχηματισμός λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων προς μελέτη, καθώς σε αυτές παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση ανάμεσα στις κατηγορίες.

Στο Διάγραμμα 13, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής και για τα δύο μεγέθη με την περίπτωση χρήσης ντίζελ χωρίς δέσμευση ξανά ως μέτρο αναφοράς.

Όσον αφορά τον ευτροφισμό, φαίνεται η χρήση συστήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με ΜΕΑ να έχει έντονη επιρροή, η οποία εμφανίζεται ιδιαίτερα στις περιπτώσεις χρήσης ντίζελ και μεθανόλης.

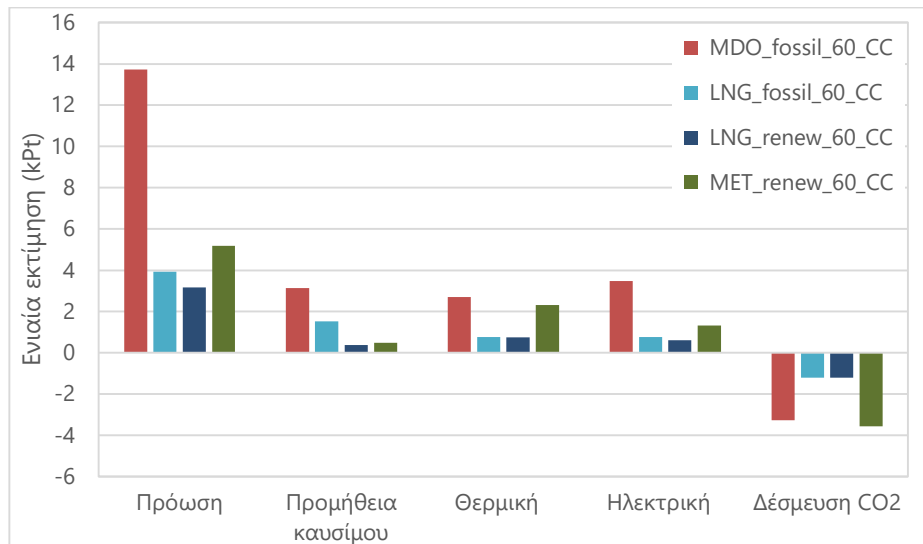
Τέλος, ο σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων φαίνεται να διαφοροποιείται κυρίως ανά καύσιμο με το ντίζελ και την αμμωνία να έχουν υψηλά ποσοστά, η μεθανόλη και το φυσικό αέριο σε περιορισμένα αλλά υπαρκτά επίπεδα και το υδρογόνο σε σχεδόν μηδενικά. Αυτό το φαινόμενο πιθανόν να μην οφείλεται στις διαφορετικές προελεύσεις αλλά στις εκπομπές κατά την καύση κάθε καυσίμου, οι οποίες είναι σχεδόν οι ίδιες ανά κατηγορία προέλευσης εάν δεν θεωρηθεί ότι χρησιμοποιείται επιπλέον σύστημα διαχείρισης των αιωρούμενων σωματιδίων.



Διάγραμμα 13. Περιβαλλοντικό αντίκτυπο καλύτερων περιπτώσεων και συγκριτική εκτίμηση επιδράσεων στον ευτροφισμό και τον σχηματισμό σωματιδίων

4.2.3. Περιβαλλοντικά επιδραστικότερες διεργασίες

Έχοντας μειώσει τον αριθμό περιπτώσεων υπό εξέταση, είναι πιο εφικτή η μελέτη των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων ανά υποδιεργασία.

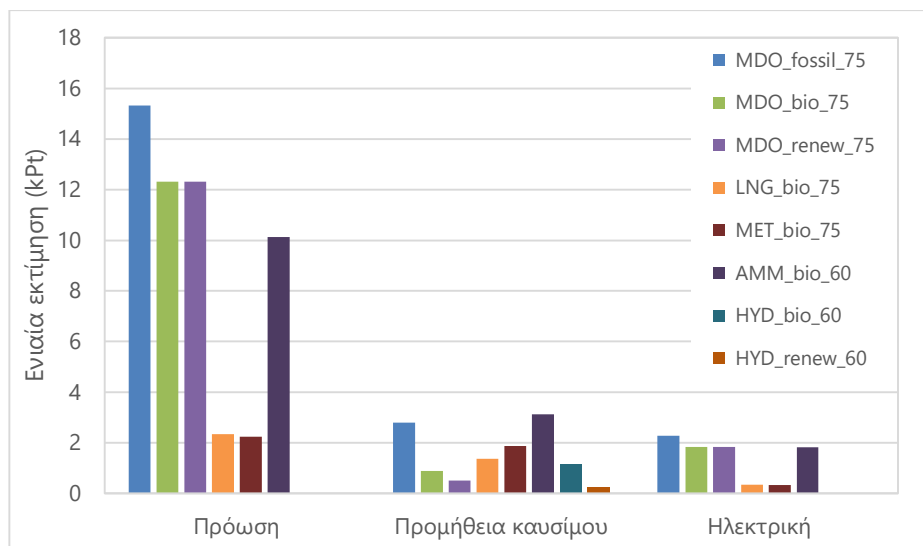


Διάγραμμα 14. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων που χρησιμοποιούν δέσμευση CO₂ ανά διεργασία

Στο Διάγραμμα 14, παρουσιάζονται οι δείκτες ενιαίας εκτίμησης για κάθε υποδιεργασία του κύκλου ζωής, με τα διαφορετικά χρώματα να αντιστοιχούν σε διαφορετικά καύσιμα ποικίλης προέλευσης.

Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα φαίνεται ότι παρά την σημαντική ποσοστιαία μείωση εκπομπών διοξειδίου κατά την πρόωση, η μείωση που επιφέρει η διεργασία δεν ανταποκρίνεται σε αυτό το ποσοστό. Συνεπώς, σημαντικό ρόλο κατέχουν, πρώτον η περιβαλλοντική επιβάρυνση για την παραγωγή του απαιτούμενου καυσίμου για την πρόωση και δεύτερον οι άλλοι ρύποι που εκπέμπονται κατά την καύση.

Όταν η σύγκριση γίνεται μεταξύ των περιπτώσεων χωρίς δέσμευση, λόγω της ενεργειακής ολοκλήρωσης, το αποτύπωμα των διεργασιών για παραγωγή θερμικής ενέργειας είναι αρκετά μικρό ώστε να μην είναι ευδιάκριτο με την κλίμακα που χρησιμοποιείται στο Διάγραμμα 15 και επομένως δεν παρατίθεται. Ο πλήρης πίνακας με τους δείκτες των υποδιεργασιών ανά περίπτωση μπορεί να βρεθεί στο Παράρτημα IV (Πίνακας 46-Πίνακας 49).



Διάγραμμα 15. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων που δεν χρησιμοποιούν δέσμευση CO₂ ανά διεργασία

Το υδρογόνο και από τα δύο είδη προέλευσης του που παρουσιάζονται, φαίνεται να οφείλει όλο το περιβαλλοντικό αντίκτυπο χρήσης του, στην προμήθεια και μεταφορά σε συμπιεσμένη μορφή.

Παρά τη σημαντική μείωση που προσφέρουν τα εναλλακτικά είδη ντίζελ, πολύ πιο έντονη βελτίωση παρουσιάζουν άλλα καύσιμα από μη ορυκτές πηγές.

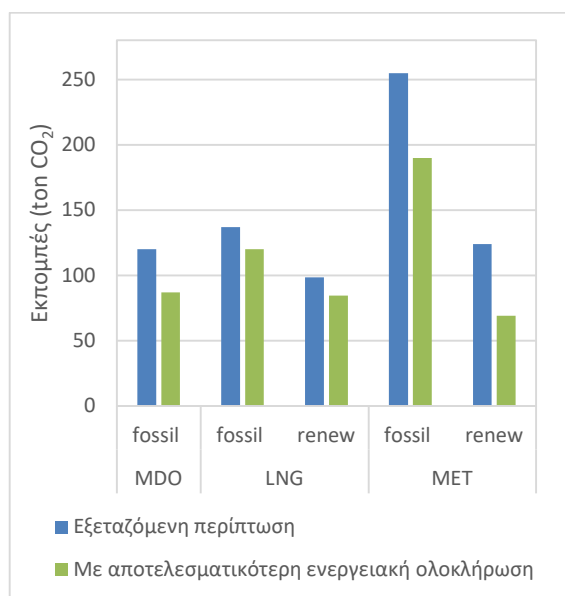
Επιπρόσθετα, πρέπει να σημειωθεί παρά τη αξιόλογη μείωση από το συμβατικό ντίζελ που προσφέρει η αμμωνία συνολικά, εφόσον προϋποτίθεται αλλαγή καυσίμου, υπάρχουν πιο περιβαλλοντικά φιλικές επιλογές.

Συνολικά, μετά την επιλογή του υδρογόνου, το φυσικό αέριο και η μεθανόλη με προέλευση βιομάζα, αποτελούν την πιο ευεργετική εναλλακτική ακόμα και όταν τα συγκρίνουμε με τα συνθετικά ανάλογα τους.

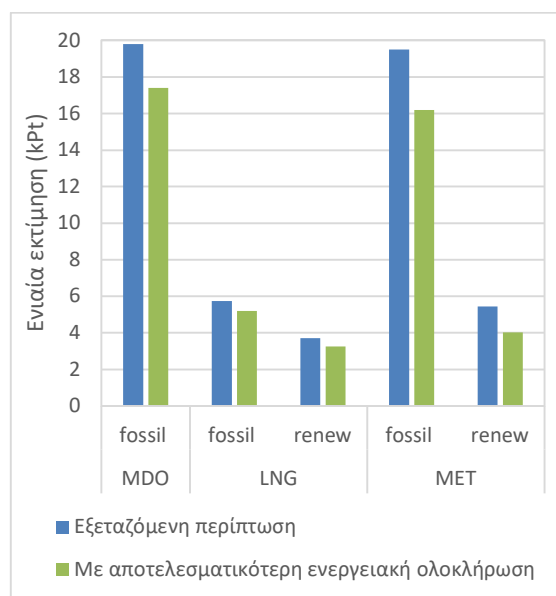
4.3. Αξιολόγηση χρήσης δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα

4.3.1. Πρόσθετες βελτιώσεις συστημάτων δέσμευσης

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ανάλυσης κύκλου ζωής για την περίπτωση της μέγιστης θεωρητικής ενεργειακής ολοκλήρωσης σε συνδυασμό με συμπαραγωγή για τα συστήματα όπου χρησιμοποιείται δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα.



Διάγραμμα 16. Σύγκριση εκπομπών ανάμεσα στις δύο βαθμίδες ενεργειακής ολοκλήρωσης



Διάγραμμα 17. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος ανάμεσα στις δύο βαθμίδες ενεργειακής ολοκλήρωσης

Προκύπτει, όπως είναι αναμενόμενο, ότι με βέλτιστη ενεργειακή ολοκλήρωση και μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι μειωμένες σε όλες τις κατηγορίες, όπως απεικονίζεται στα Διάγραμμα 16 και Διάγραμμα 17. Αξιοσημείωτη είναι η αναλογικά έντονη μείωση των εκπομπών στην περίπτωση χρήσης μεθανόλης ανεξαρτήτως της προέλευσης της, λόγω των μεγάλων ενεργειακών αναγκών για την δέσμευση των εκπομπών που δημιουργούνται.

4.3.2. Αποτελεσματικότητα μείωσης εκπομπών μέσω δέσμευσης

Για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα των συστημάτων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, υπολογίζονται η επιπλέον κατανάλωση ενέργειας, η μείωση εκπομπών για όλων τον κύκλο ζωής των καυσίμων, και τέλος το ποσοστό αποφυγής εκπομπών. Αυτό το μέγεθος ισούται με την ποσότητα CO₂ που αποθηκεύεται προς την ποσότητα που θα εκπέμπονταν εάν χρησιμοποιούνταν η ίδια ποσότητα ενέργειας και πρώτων υλών.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μεγέθη της μεταβολής κατανάλωσης ενέργειας, της μείωσης εκπομπών έχουν υπολογιστεί με βάση αναφοράς την περίπτωση χρήσης ντίζελ χωρίς δέσμευση, ενώ το ποσοστό αποφυγής εκπομπών είναι μέγεθος αυτοοριζόμενο σε κάθε σενάριο που μελετάται.

Πίνακας 32. Σύνοψη αποδόσεων χρήσης δέσμευσης CO₂

Καύσιμο	Είδος	Συνθήκη	Μεταβολή κατανάλωσης ενέργειας (%)	Μείωση εκπομπών CO ₂ (%)	Ποσοστό αποφυγής εκπομπών CO ₂ (%)
MDO	fossil	CC 60%	11%	-58%	63%
		CC* 60%	6%	-69%	70%
		75%	0%	0%	0%
LNG	fossil	CC 60%	7%	-52%	35%
		CC* 60%	5%	-58%	38%
		75%	4%	-29%	0%
	renew	CC 60%	7%	-66%	43%
		CC* 60%	5%	-70%	47%
		75%	4%	-42%	0%
MET	fossil	CC 60%	30%	-11%	46%
		CC* 60%	10%	-34%	54%
		75%	8%	40%	0%
	renew	CC 60%	30%	-57%	64%
		CC* 60%	10%	-68%	76%
		75%	8%	-1%	0%

*Εφαρμόζεται η μέγιστη θεωρητική ενεργειακή ολοκλήρωση

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 32, οι καλύτερες περιπτώσεις ως προς τη μείωση συνολικών εκπομπών είναι πρώτον η χρήση συνθετικού φυσικού αερίου και δεύτερον η χρήση συνθετικής μεθανόλης και συμβατικού ντίζελ. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τις δύο βαθμίδες ενεργειακής ολοκλήρωσης, είναι εμφανές ότι αυτές οι περιπτώσεις επωφελούνται ιδιαίτερα από τις περαιτέρω εξοικονομήσεις.

Παρατηρείται, επίσης ότι η ενεργειακή ποιινή για χρήση δέσμευσης διοξειδίου είναι σημαντικά μικρότερη στις περιπτώσεις χρήσης φυσικού αερίου από ότι στα άλλα δύο καύσιμα. Επιπρόσθετα, η μεθανόλη παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αυξήσεις στην ενέργεια που καταναλώνονται ανά κατηγορία, πιθανόν λόγω της χαμηλότερης συγκριτικά θερμογόνου δύναμης της.

Παρά την απόδοση της διεργασίας δέσμευσης με MEA που φτάνει το 90%, τα ποσοστά των εκπομπών που αποφεύγονται είναι σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερα για δύο λόγους. Πρώτον, επειδή λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές σε όλο τον κύκλο ζωής άρα υπάρχουν πρόσθετες εκπομπές από την παραγωγή των καυσίμων και δεύτερον επειδή με την αύξηση των ενεργειακών αναγκών δέσμευσης αυξάνονται και οι εκπομπές από την αντίστοιχη αυξημένη καύση.

4.3.3. Απαιτήσεις αποθήκευσης υγροποιημένου CO₂ εν πλω

Μια παράμετρος που είναι εξίσου σημαντική για την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών στην ναυτιλία, είναι ο περιορισμός του χώρου και του βάρους φορτίου. Εκτός του ότι είναι περιοριστικός παράγοντας για την απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα πλοίο ενώ λειτουργεί σύστημα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, υπάρχει και επίσης ο περιορισμός ιδιαίτερα του βάρους, καθώς το βάρος είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με το κέρδος που παράγει το πλοίο.

Στον Πίνακα 33, υπολογίζονται το βάρος και ο όγκος που καταλαμβάνουν οι δεσμευμένες εκπομπές διοξειδίου, για το ταξίδι ανάμεσα στα λιμάνια του Πειραιά και της Ρόδου μετ' επιστροφής θεωρώντας ότι μόνο στο λιμάνι του Πειραιά θα υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης του υγροποιημένου CO₂ και αποστολής του για επεξεργασία.

Πίνακας 33. Απαιτήσεις αποθήκευσης για μεταφορά του δεσμευμένου CO₂, για την διαδρομή Πειραιάς-Ρόδος μετ' επιστροφής

Καύσιμο	%MCR	CO ₂ δεσμευμένο μετ' επιστροφής (ton)	Όγκος CO ₂ (m ³)	Ποσοστό νεκρού φορτίου (%)	Ποσοστό όγκου μηχανοστασίου (%)
MDO	60%	402	397,82	15%	7%
	75%	456	451,26	17%	8%
	90%	484	478,97	18%	9%
LNG	60%	150	130,23	6%	2%
	75%	167	145,03	6%	3%
	90%	183	158,96	7%	3%
MET	60%	440	435,42	17%	8%
	75%	490	484,90	19%	9%
	90%	538	532,40	20%	10%

Όσον αφορά το βάρος, υπολογίζεται το ποσοστό που καταλαμβάνει το υγροποιημένο διοξείδιο, από το συνολικό νεκρό φορτίο που περιλαμβάνει το βάρος του φορτίου, των καυσίμων, του πόσιμου νερού, του έρματος, των προμηθειών, των επιβατών και του πληρώματος.

Για τις περιπτώσεις του ντίζελ και τη μεθανόλης για όλες τις διαθέσιμες ταχύτητες είναι ανησυχητικά υψηλό ποσοστό το 15% με 20% του νεκρού φορτίου. Φυσικά, δεν θα είναι κατειλημμένο από την αρχή της διαδρομής αλλά θα αυξάνεται σταδιακά, και για την σωστή εκτίμηση της σημασίας αυτού του μεγέθους, πρέπει να υπολογιστεί και ο ρυθμός αύξησης του βάρους του υγροποιημένου διοξειδίου και ο ρυθμός μείωσης του βάρους του καυσίμου.

Συνολικά ως προς τη απαίτηση χώρου και μεταφοράς φορτίου, το φυσικό αέριο είναι εμφανές ότι είναι η βέλτιστη επιλογή καυσίμου εκ των μελετώμενων περιπτώσεων, καθώς καταλαμβάνει 6% με 7% του νεκρού φορτίου και υποτριπλάσιο με υποτετραπλάσιο όγκο σε σχέση με τα άλλα δύο καύσιμα σε όλες τις ταχύτητες.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα & μελλοντική έρευνα

5.1. Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη, αναλύεται το ενεργειακό σύστημα ενός επιβατικού πλοίου τύπου ROPAX, με χρήση διαφορών καυσίμων καθώς και με ταυτόχρονη χρήση συστημάτων δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα με τεχνολογία απορρόφησης με ΜΕΑ. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από προσομοιώσεις, πραγματοποιείται ενεργειακή ολοκλήρωση με συνολική αποτελεσματικότητα εξοικονόμησης 10% με 20%, ανάλογα τα χαρακτηριστικά της περίπτωσης που εφαρμόζεται. Η πιο αποτελεσματική ποσοστιαία εξοικονόμηση λόγω της ολοκλήρωσης είναι στην χρήση μεθανόλης, καθώς σε συνδυασμό με δέσμευσης πρακτικά απαιτεί εφαρμογή μεθόδων ενεργειακής ολοκλήρωσης, καθώς παράγονται μεγάλες ποσότητες δεσμευμένου διοξειδίου και άρα αυξημένες ενεργειακές ανάγκες. Αντίθετα, συνολικά στις περιπτώσεις της αμμωνίας και του υδρογόνου, παρατηρούνται σημαντικά μικρότερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας άρα μικρότερη ανάγκη για ενεργειακή ολοκλήρωση. Ιδιαίτερα αποτελεσματική είναι η ολοκλήρωση των αναγκών θέρμανσης του φυσικού αερίου από υπόψυκτες θερμοκρασίες, με επιλογή της χαμηλότερης θερμοκρασίας αποθήκευσης του υγροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα, έτσι επιτυγχάνονται σημαντικά χαμηλότερες ανάγκες προς συμπίεση, θέρμανση και ψύξη.

Για όλες τις περιπτώσεις το μεγαλύτερο ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης οφείλεται στην πρόωση κατά την πλεύση, η οποία ευθύνεται για μεγαλύτερο ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης με την αύξηση ταχύτητας. Συνάγεται, λοιπόν το συμπέρασμα ότι είναι ιδιαίτερα σημαντική η βελτίωση των κινητήρων των διάφορων καυσίμων προς τις μέγιστες δυνατές αποδόσεις, καθώς και μια μικρή ποσοστιαία βελτίωση θα έχει έντονο αποτέλεσμα στην εξοικονόμηση, ειδικά αν οι απαιτήσεις μεταφορών παραμένουν ίδιες ή αυξάνονται.

Οι ενεργειακές ανάγκες του συστήματος διαφέρουν έντονα, με κάποιες περιπτώσεις να επισημαίνονται προς αποφυγή. Για παράδειγμα η χρήση μεθανόλης σε υψηλές ταχύτητες με δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και χωρίς ενεργειακή ολοκλήρωση αποτελεί την πιο ενεργοβόρα περίπτωση με περίπου 80% παραπάνω συνολική κατανάλωση από την περίπτωση αναφοράς. Συνολικά, η μείωση της ταχύτητας επιφέρει μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων και των αντίστοιχων εκπομπών, όμως υπάρχει ένα κατώτερο όριο μέχρι το οποίο αυτή η μείωση μπορεί να θεωρηθεί πρακτική λύση.

Ως προς το περιβαλλοντικό αντίκτυπο, για τη βιωσιμότητα της χρήσης ντίζελ ναυτιλίας, φαίνεται να ευνοείται η χρήση καύσιμου από επεξεργασία αποβλήτων μαγειρικών ελαίων χωρίς δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο, συγκρίνοντας τις αποδόσεις των περιπτώσεων χρήσης φυσικού αερίου, παρουσιάζουν μικρότερο αντίκτυπο από οποιαδήποτε με χρήση ντίζελ,

επιβεβαιώνοντας την ανάγκη για απομάκρυνση από τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή στην ναυτιλία.

Όσον αφορά τη χρήση μεθανόλης, η πιο περιβαλλοντικά φιλική εκδοχή για είναι αυτή της βιομεθανολης χωρίς δέσμευση, ενώ συνολικά δεν παρουσιάζει σημαντικές μειώσεις σε σχέση με το ντίζελ από εναλλακτικές πηγές ή έντονη θετική επιρροή με τη χρήση δέσμευσης. Η χρήση αμμωνίας με συμβατικούς τρόπους παραγωγής, επισημαίνεται προς αποφυγή ως η χειρίστη περιβαλλοντικά περίπτωση, δηλαδή συμπεραίνεται ότι η υιοθέτηση κινητήρων αμμωνίας πρέπει να προηγηθεί από πλήρη δημιουργία δικτύων παραγωγής ανανεώσιμης αμμωνίας για να έχει θετικά αποτελέσματα.

Για την περίπτωση του υδρογόνου, ενώ η αντικατάσταση με υδρογόνο από αναμόρφωση δεν προσφέρει ιδιαίτερη μείωση της συνολικής εκτίμησης περιβαλλοντικού αποτυπώματος σε σχέση με άλλα καύσιμα, το ανανεώσιμο υδρογόνο παρουσιάζει τη δυνατότητα μεταφορών με σχεδόν μηδενικές εκπομπές και με διαφορά την πιο περιβαλλοντικά βιώσιμη επιλογή. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις που έχει η εφαρμογή όλων των εναλλακτικών καυσίμων σε τομείς όπως η ανθρώπινη υγεία, η οικοτοξικότητα, ο ευτροφισμός, ο σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων και άλλων. Όλοι οι τομείς λαμβάνονται υπόψη στην συνολική εκτίμηση, όμως η βέλτιστη περίπτωση για τον καθένα μπορεί να διαφέρει.

Η εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, αυξάνει σημαντικά τη βιωσιμότητα των συμβατικών καυσίμων. Σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, η χρήση δέσμευσης με την μέγιστη δυνατή ενεργειακή ολοκλήρωση οδηγεί σε περίπου 70% μείωση εκπομπών διοξειδίου σε όλο τον κύκλο ζωής, χωρίς καμία αλλαγή ως προς την προμήθεια ντίζελ ναυτιλίας. Και άλλες περιπτώσεις παρουσίασαν εξίσου ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα, όπως αυτή του φυσικού αερίου και της μεθανόλης από συνθετική προέλευση. Σε καμία περίπτωση με εκπομπές CO₂ βιογενικής προέλευσης δεν είναι ευεργετική η χρήση δέσμευσης, καθώς θεωρείται ότι δεν επιφέρουν επιπλέον ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου, και θα αποτελούσε αποκλειστικά άσκοπη αύξηση των ενεργειακών αναγκών.

Σημαντικός περιοριστικός παράγοντας είναι η χρήση του διαθέσιμου φορτίου από το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα που αποθηκεύεται, με τις περιπτώσεις του ντίζελ και τη μεθανόλης να παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό κατάληψης 15% με 20% του νεκρού φορτίου. Το φυσικό αέριο, ως προς αυτόν τον παράγοντα είναι εμφανές ότι αποτελεί την βέλτιστη επιλογή καυσίμου εκ των μελετώμενων περιπτώσεων, καθώς καταλαμβάνει 6% με 7% του νεκρού φορτίου και υποτριπλάσιο με υποτετραπλάσιο όγκο σε σχέση με τα άλλα δύο καύσιμα σε όλες τις ταχύτητες.

Συμπερασματικά, η χρήση ανανεώσιμου υδρογόνου ως το κύριο καύσιμο στην ναυτιλία με περιορισμένη ταχύτητα αναδεικνύεται ως η πιο περιβαλλοντικά βιώσιμη. Αν δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα, το φυσικό αέριο και η μεθανόλη από πηγές βιομάζας αποτελούν την πιο ευεργετική εναλλακτική, ωστόσο σε μεσοπρόθεσμο διάστημα με την προϋπόθεση ότι προβλέπεται μειωμένη διαθεσιμότητα βιοκαυσίμων, τα συνθετικά ανάλογα τους σε συνδυασμό με δέσμευση είναι εξίσου βιώσιμα, με το φυσικό αέριο να μην επιβαρύνει σε εκτεταμένο βαθμό το πλοίο σε αντίθεση με την μεθανόλη. Τέλος, βραχυπρόθεσμα, η υιοθέτηση συστημάτων δέσμευσης σε επί του παρόντος χρησιμοποιούμενα πλοία ή χρήση βιοντίζελ χωρίς καμία άλλη αλλαγή εξοπλισμού, έχει σημαντική μείωση της επίδρασης της συνολικής διαδρομής στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

5.2. Προτάσεις για μελλοντικές μελέτες

Αναφορικά με τις μελλοντικές κατευθύνσεις μελετών του τομέα, είναι απαραίτητη η ανάλυση και βελτιστοποίηση διαφορών τεχνολογιών διαχωρισμού και δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα, αφενός προς την μείωση των αντίστοιχων ενεργειακών αναγκών και αφετέρου προς την αύξηση του συνολικού ποσοστού δέσμευσης. Καθίσταται αναγκαία η τεχνοοικονομική ανάλυση αυτών των τεχνολογιών, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η άμεση εφαρμογή τους.

Ακόμη, ενδιαφέρουσα και ιδιαίτερα χρήσιμη θα ήταν η μελέτη χρήσης μηχανών δύο ή περισσότερων καυσίμων και πώς αυτή η αλλαγή μπορεί να επηρεάσει τις συνολικές εκπομπές σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής. Επιπρόσθετα, συνδυασμός αυτών των προσεγγίσεων θα μπορούσε να εφαρμοστεί για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τα οποία έχουν άλλη εμβέλεια διαδρομών και ως αποτέλεσμα παρουσιάζουν προκλήσεις όπως περιορισμένο χώρο αποθήκευσης διοξειδίου και ανάγκη για δίκτυα διανομής καυσίμων σε όλη την εμφύλιο. Τέλος, πρόσθετες μελέτες στον τομέα παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων θα ήταν εξίσου πολύτιμες, καθώς μικρές βελτιώσεις στο περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο θα είχαν έντονο αποτέλεσμα, καθώς τα καύσιμα χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες, και καθώς υπάρχει μεγάλη ανάγκη για ακριβείς εκτιμήσεις κόστους υιοθέτησης αυτών των τεχνολογιών.

Βιβλιογραφία

- [1] Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability | Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, (n.d.). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (accessed February 14, 2024).
- [2] R. Dimitrov, J. Hovi, D.F. Sprinz, H. Sælen, A. Underdal, Institutional and environmental effectiveness: Will the Paris Agreement work?, *Wiley Interdiscip Rev Clim Change* 10 (2019) e583. <https://doi.org/10.1002/WCC.583>.
- [3] Μακροπρόθεσμη στρατηγική για το 2050 - Ευρωπαϊκή Επιτροπή, (n.d.). https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_el (accessed February 14, 2024).
- [4] DNV GL, MARITIME FORECAST TO 2050, (2019).
- [5] World | Total including LUCF | Greenhouse Gas (GHG) Emissions | Climate Watch, (n.d.). https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2020&start_year=1990 (accessed February 14, 2024).
- [6] Fourth Greenhouse Gas Study 2020, (n.d.). <https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx> (accessed February 14, 2024).
- [7] MEPC 80-17-Add.1 - Report Of The Marine Environment Protection Committee On Its Eightieth Session (Secretariat) | Enhanced Reader, (n.d.).
- [8] International Maritime Organization, IMO 2020: consistent implementation of MARPOL Annex VI., OMi (2020) 2019–2020. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx> (accessed February 14, 2024).
- [9] T.H. Joung, S.G. Kang, J.K. Lee, J. Ahn, The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas(GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050, *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 4 (2020) 1–7. <https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1707938>.
- [10] E.A. Bouman, E. Lindstad, A.I. Rialland, A.H. Strømman, State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review, *Transp Res D Transp Environ* 52 (2017) 408–421. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.03.022>.
- [11] P. Balcombe, J. Brierley, C. Lewis, L. Skatvedt, J. Speirs, A. Hawkes, I. Staffell, How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies, *Energy Convers Manag* 182 (2019) 72–88. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.12.080>.

- [12] M. Altosole, G. Benvenuto, U. Campora, M. Laviola, A. Trucco, Waste Heat Recovery from Marine Gas Turbines and Diesel Engines, *Energies* 2017, Vol. 10, Page 718 10 (2017) 718. <https://doi.org/10.3390/EN10050718>.
- [13] H. Wang, N. Lutsey, Long-Term Potential to Reduce Emissions from International Shipping by Adoption of Best Energy-Efficiency Practices, <https://doi.org/10.3141/2426-01> 2426 (2014) 1–10. <https://doi.org/10.3141/2426-01>.
- [14] J. Barreiro, S. Zaragoza, V. Diaz-Casas, Review of ship energy efficiency, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111594>.
- [15] D. Gibbs, P. Rigot-Muller, J. Mangan, C. Lalwani, The role of sea ports in end-to-end maritime transport chain emissions, *Energy Policy* 64 (2014) 337–348. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2013.09.024>.
- [16] SAIC’s new car carrier makes maiden voyage, aims to add 14 vessels in 3 years - CnEVPost, (n.d.). <https://cnevpost.com/2024/01/18/saic-new-car-carrier-makes-maiden-voyage/> (accessed February 15, 2024).
- [17] M.A. Fun-sang Cepeda, N.N. Pereira, S. Kahn, J.D. Caprace, A review of the use of LNG versus HFO in maritime industry, *Marine Systems and Ocean Technology* 14 (2019) 75–84. <https://doi.org/10.1007/S40868-019-00059-Y/FIGURES/6>.
- [18] T. Korakianitis, A.M. Namasivayam, R.J. Crookes, Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions, *Prog Energy Combust Sci* 37 (2011) 89–112. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2010.04.002>.
- [19] S. Brynolf, E. Fridell, K. Andersson, Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.052>.
- [20] H. Wang, D. Rutherford, C. Desai, Long-term energy efficiency improvement for LNG carriers, (2014). <http://www.ferc.gov/market-oversight/mkt-gas/> (accessed December 17, 2023).
- [21] E. Bargiacchi, N. Thonemann, J. Geldermann, M. Antonelli, U. Desideri, Life Cycle Assessment of Synthetic Natural Gas Production from Different CO₂ Sources: A Cradle-to-Gate Study, *Energies* 2020, Vol. 13, Page 4579 13 (2020) 4579. <https://doi.org/10.3390/EN13174579>.
- [22] R. Chauvy, L. Dubois, D. Thomas, G. De Weireld, Environmental impacts of the production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide, 30 (2022) 301–315. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.004>.

- [23] O. Hijazi, S. Munro, B. Zerhusen, M. Effenberger, Review of life cycle assessment for biogas production in Europe, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.013>.
- [24] Z. Sajid, F. Khan, Y. Zhang, Process simulation and life cycle analysis of biodiesel production, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.046>.
- [25] H. Hosseinzadeh-Bandbafha, A.-S. Nizami, S.A. Kalogirou, V. Kumar Gupta, Y.-K. Park, A. Fallahi, A. Sulaiman, M. Ranjbari, H. Rahnama, M. Aghbashlo, W. Peng, M. Tabatabaei, Environmental life cycle assessment of biodiesel production from waste cooking oil: A systematic review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161 (2022) 112411. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112411>.
- [26] C.W. Mohd Noor, M.M. Noor, R. Mamat, Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (2018) 127–142. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.05.031>.
- [27] E.C.D. Tan, K. Harris, S.M. Tiff, D. Steward, C. Kinchin, T.N. Thompson, Adoption of biofuels for marine shipping decarbonization: A long-term price and scalability assessment, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 16 (2022) 942–961. <https://doi.org/10.1002/BBB.2350>.
- [28] X. Zhen, Y. Wang, An overview of methanol as an internal combustion engine fuel, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.083>.
- [29] C.J. McKinlay, S.R. Turnock, D.A. Hudson, Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol?, *Int J Hydrogen Energy* 46 (2021) 28282–28297. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.06.066>.
- [30] G. Zang, P. Sun, A. Elgowainy, M. Wang, Technoeconomic and Life Cycle Analysis of Synthetic Methanol Production from Hydrogen and Industrial Byproduct CO₂, *Environ Sci Technol* 55 (2021) 5248–5257. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.0C08237/ASSET/IMAGES/LARGE/ES0C08237_0007.JPEG.
- [31] The State of Methanol as Marine Fuel 2023 — Sustainable Ships, (n.d.). <https://www.sustainable-ships.org/stories/2023/methanol-marine-fuel> (accessed December 17, 2023).
- [32] V. Singh, I. Dincer, M.A. Rosen, Life Cycle Assessment of Ammonia Production Methods, *Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions* (2018) 935–959. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00053-6>.

- [33] S. Ghavam, M. Vahdati, I.A.G. Wilson, P. Styring, Sustainable Ammonia Production Processes, *Front Energy Res* 9 (2021) 580808. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2021.580808/BIBTEX>.
- [34] I. Chalaris, B. Jeong, H. Jang, Application of parametric trend life cycle assessment for investigating the carbon footprint of ammonia as marine fuel, *International Journal of Life Cycle Assessment* 27 (2022) 1145–1163. <https://doi.org/10.1007/S11367-022-02091-4/FIGURES/9>.
- [35] N. de Vries, Safe and effective application of ammonia as a marine fuel, (2019). <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Abe8cbe0a-28ec-4bd9-8ad0-648de04649b8> (accessed March 28, 2023).
- [36] P. Dimitriou, T. Tsujimura, A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel, *Int J Hydrogen Energy* 42 (2017) 24470–24486. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2017.07.232>.
- [37] S. Atilhan, S. Park, M.M. El-Halwagi, M. Atilhan, M. Moore, R.B. Nielsen, Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry, *Curr Opin Chem Eng* 31 (2021) 100668. <https://doi.org/10.1016/J.COCHE.2020.100668>.
- [38] P. Nikolaidis, A. Poulikkas, A comparative overview of hydrogen production processes, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>.
- [39] C. Font-Palma, D. Cann, C. Udemu, O. García, Review of Cryogenic Carbon Capture Innovations and Their Potential Applications, *C* 2021, Vol. 7, Page 58 7 (2021) 58. <https://doi.org/10.3390/C7030058>.
- [40] M.M.F. Hasan, M.S. Zantye, M.K. Kazi, Challenges and opportunities in carbon capture, utilization and storage: A process systems engineering perspective, *Comput Chem Eng* 166 (2022) 107925. <https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2022.107925>.
- [41] S.Y.W. Chai, L.H. Ngu, B.S. How, Review of carbon capture absorbents for CO₂ utilization, *Greenhouse Gases: Science and Technology* 12 (2022) 394–427. <https://doi.org/10.1002/GHG.2151>.
- [42] M. Feenstra, J. Monteiro, J.T. van den Akker, M.R.M. Abu-Zahra, E. Gilling, E. Goetheer, Ship-based carbon capture onboard of diesel or LNG-fuelled ships, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 85 (2019) 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2019.03.008>.
- [43] J.A. Ros, E. Skylogianni, V. Doedée, J.T. van den Akker, A.W. Vredeveldt, M.J.G. Linders, E.L.V. Goetheer, J. G M-S Monteiro, Advancements in ship-based carbon capture technology on board of LNG-fuelled ships, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 114 (2022) 103575. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2021.103575>.

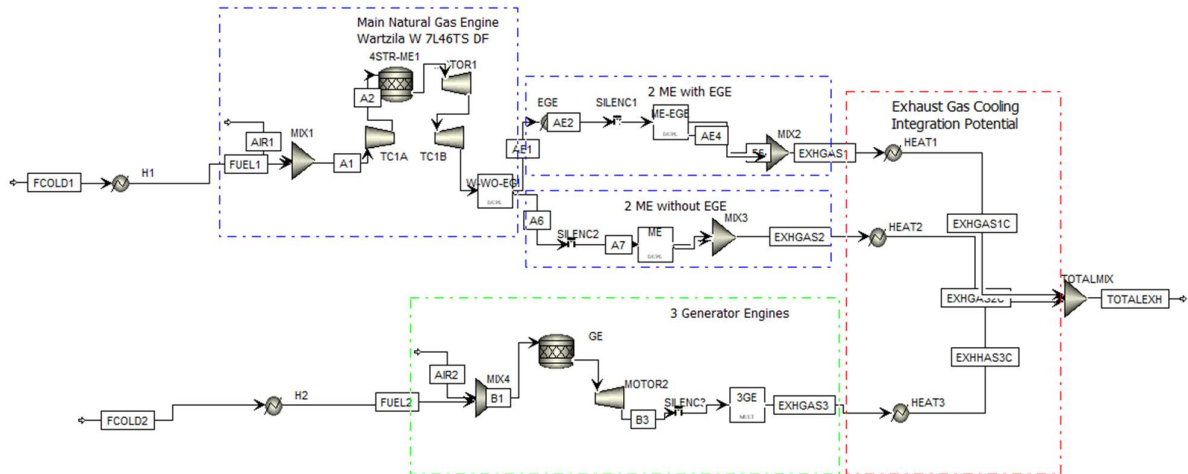
- [44] U.W.R. Siagian, A. Raksajati, N.F. Himma, K. Khoiruddin, I.G. Wenten, Membrane-based carbon capture technologies: Membrane gas separation vs. membrane contactor, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.008>.
- [45] S.M. Hashemi, M.H. Sedghkerdar, N. Mahinpey, Calcium looping carbon capture: Progress and prospects, Canadian Journal of Chemical Engineering 100 (2022) 2140–2171. <https://doi.org/10.1002/CJCE.24480>.
- [46] R.C. Toledo, G.L.A.F. Arce, J.A. Carvalho, I. Ávila, Experimental Development of Calcium Looping Carbon Capture Processes: An Overview of Opportunities and Challenges, Energies 2023, Vol. 16, Page 3623 16 (2023) 3623. <https://doi.org/10.3390/EN16093623>.
- [47] M. Shen, L. Tong, S. Yin, C. Liu, L. Wang, W. Feng, Y. Ding, Cryogenic technology progress for CO₂ capture under carbon neutrality goals: A review, Sep Purif Technol 299 (2022) 121734. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2022.121734>.
- [48] ALTFUEL@SHIPTYPES: A HECC Project – ALTFUEL@SHIPTYPES: A HECC Project, (n.d.). <https://altfuelsatshiptypes.hecc.gr/#> (accessed February 8, 2024).
- [49] F.H. Berthelsen, U.D. Nielsen, Prediction of ships' speed-power relationship at speed intervals below the design speed, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102996>.
- [50] Vessel Characteristics: Ship BLUE STAR PATMOS (Ro-Ro/Passenger Ship) Registered in Greece - Vessel details, Current position and Voyage information - IMO 9565041MMSI 9565041Call Sign SVBF8 | AIS Marine Traffic, (n.d.). https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:214617/mmsi:241159000/imo:9565041/vessel:BLUE_STAR_PATMOS (accessed February 8, 2024).
- [51] Wärtsilä 32 Methanol Engine, (n.d.). <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/wartsila-32-methanol-engine> (accessed February 10, 2024).
- [52] Wärtsilä 46TS-DF dual fuel marine engine, (n.d.). <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-46ts-df> (accessed February 10, 2024).
- [53] Wärtsilä 25 marine engine, (n.d.). <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-25> (accessed February 10, 2024).

- [54] 16 DZ(D) H2 | BeHydro, (n.d.). <https://www.behydro.com/engines/16-dzd-h2> (accessed February 10, 2024).
- [55] Fuels - Higher and Lower Calorific Values, (n.d.). https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html (accessed February 10, 2024).
- [56] G. Choquette, Analysis and Estimation of Stoichiometric Air-Fuel Ratio And Methane Number For Natural Gas, (n.d.).
- [57] Z. Chen, L. Wang, K. Zeng, Comparative study of combustion process and cycle-by-cycle variations of spark-ignition engine fueled with pure methanol, ethanol, and n-butanol at various air-fuel ratios, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115683>.
- [58] P. Dimitriou, R. Javaid, A review of ammonia as a compression ignition engine fuel, *Int J Hydrogen Energy* 45 (2020) 7098–7118. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.12.209>.
- [59] S. Oh, C. Kim, Y. Lee, S. Yoon, J. Lee, J. Kim, Experimental investigation of the hydrogen-rich offgas spark ignition engine under the various compression ratios, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112136>.
- [60] C. Bae, J. Kim, Alternative fuels for internal combustion engines, *Proceedings of the Combustion Institute* 36 (2017) 3389–3413. <https://doi.org/10.1016/J.PROCI.2016.09.009>.
- [61] Internal Combustion Engines - R.K. Rajput - Google Books, (n.d.). https://books.google.gr/books?hl=en&lr=&id=Utxl5gXM1yQC&oi=fnd&pg=PA2&dq=+internal+combustion+engines+temperatures&ots=vZNWazayLO&sig=deKoHQ1L0KVzDElnCXgCmvoQHAM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed February 10, 2024).
- [62] B. Xiang, B. Tang, Y. Wu, H. Yang, M. Zhang, J. Lu, Predicting acid dew point with a semi-empirical model, *Appl Therm Eng* 106 (2016) 992–1001. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.06.040>.
- [63] X. Luo, M. Wang, Study of solvent-based carbon capture for cargo ships through process modelling and simulation, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.027>.
- [64] S. Hasan, A.J. Abbas, G.G. Nasr, Improving the Carbon Capture Efficiency for Gas Power Plants through Amine-Based Absorbents, *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 72 13 (2020) 72. <https://doi.org/10.3390/SU13010072>.
- [65] M.P. Boyce, Handbook for cogeneration and combined cycle power plants, ASME Press, 2010.

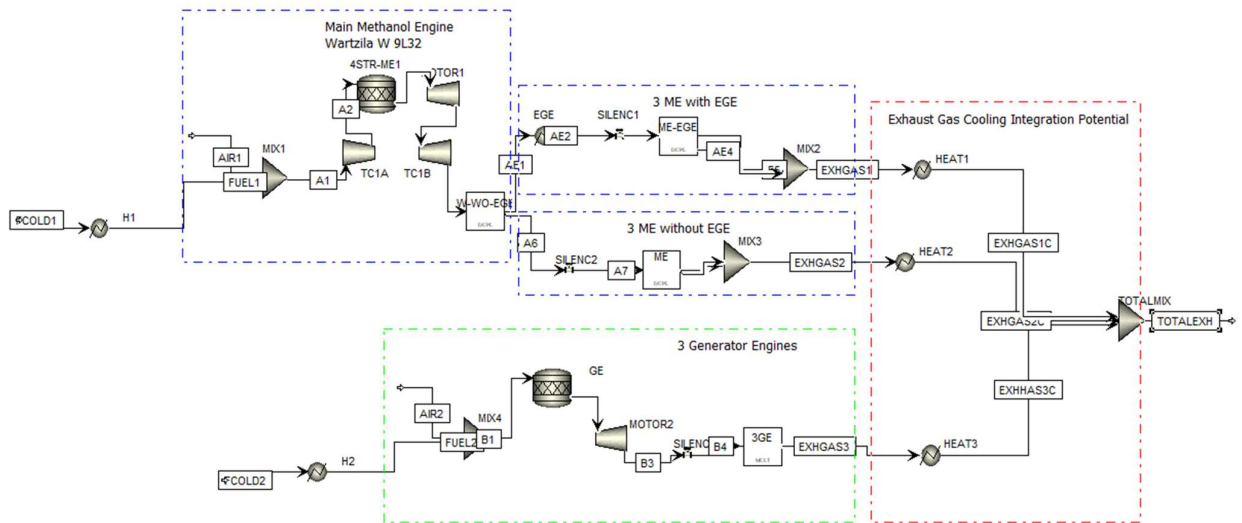
- [66] M.Z. Hauschild, R.K. Rosenbaum, S.I. Olsen, Life Cycle Assessment: Theory and Practice, 1st ed., Springer Cham, 2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>.
- [67] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook general guide for life cycle assessment: detailed guidance., Publications Office, 2010.
- [68] S. Livaniou, G. Chatzistelios, D. V. Lyridis, E. Bellos, LNG vs. MDO in Marine Fuel Emissions Tracking, Sustainability 2022, Vol. 14, Page 3860 14 (2022) 3860. <https://doi.org/10.3390/SU14073860>.
- [69] Z. Tian, Y. Wang, X. Zhen, D. Liu, Numerical comparative analysis on performance and emission characteristics of methanol/hydrogen, ethanol/hydrogen and butanol/hydrogen blends fuels under lean burn conditions in SI engine, Fuel 313 (2022) 123012. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.123012>.
- [70] M. PRUSSI, M. YUGO, P.L. DE, M. PADELLA, R. EDWARDS, L. LONZA, JEC Well-to-Tank report v5, (2020) 248. <https://doi.org/10.2760/959137>.
- [71] ecoinvent | High-quality LCI database integrated in SimaPro, (n.d.). <https://simapro.com/products/ecoinvent/> (accessed February 13, 2024).
- [72] SimaPro database manual, (2023).
- [73] ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization, (2017). www.rivm.nl/en (accessed January 11, 2024).
- [74] W.L. Luyben, Estimating refrigeration costs at cryogenic temperatures, Comput Chem Eng 103 (2017) 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.03.013>.

Παραρτήματα

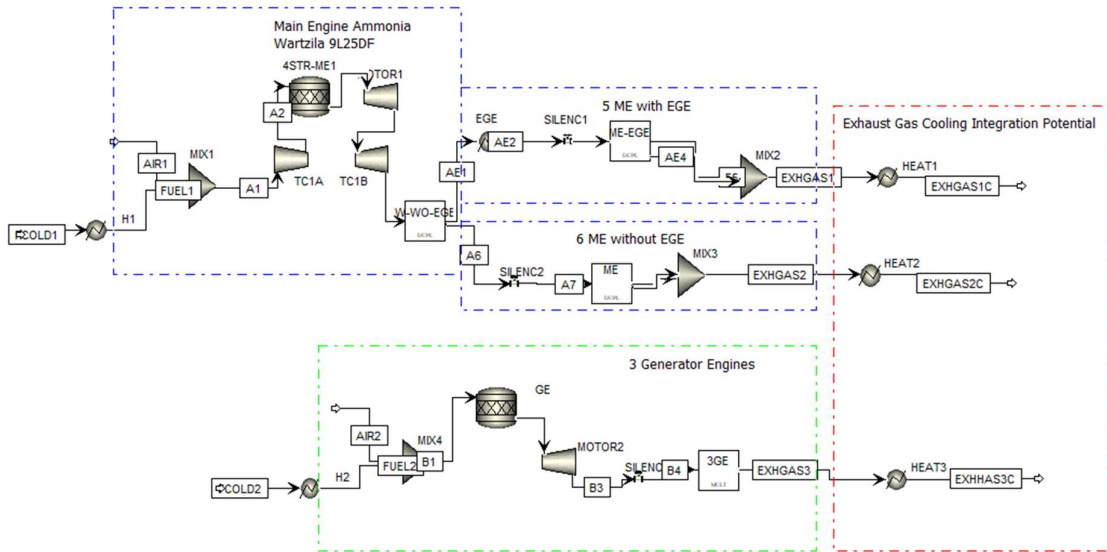
I. Προσομοιώσεις συστημάτων



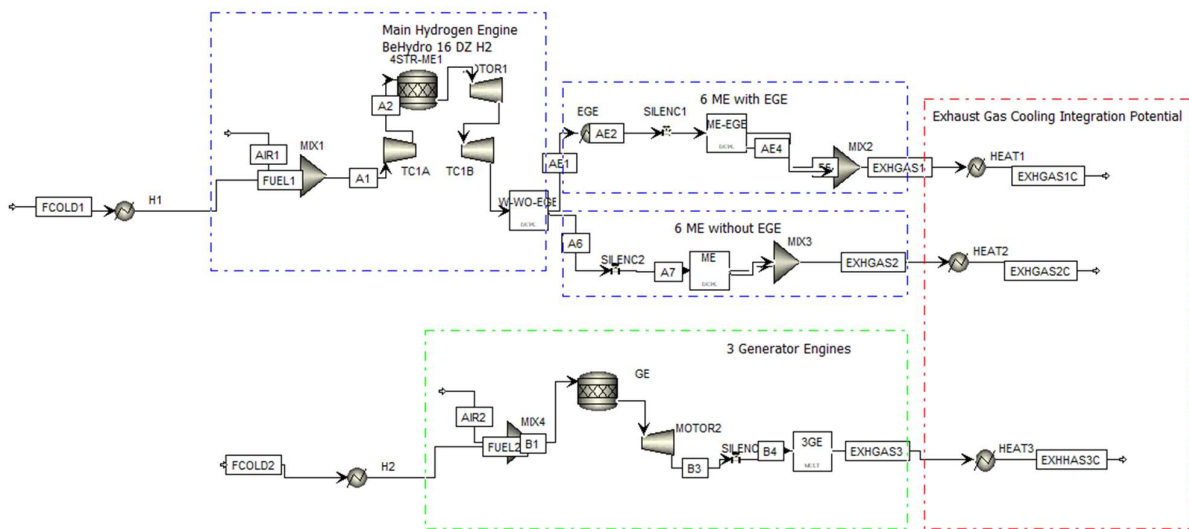
Σχήμα 7. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση φυσικού αερίου



Σχήμα 8. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση μεθανόλης



Σχήμα 9. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση αμμωνίας



Σχήμα 10. Διάγραμμα ροής προσομοίωσης ενεργειακού συστήματος με χρήση υδρογόνου

II. Απογραφές εκπομπών για την ανάλυση κύκλου ζωής

Πίνακας 34. Απογραφή εκπομπών παραγωγής ντιζελ ναυτιλίας

Fuel	MDO	fossil
ID	Amount	Unit
Sulfur dioxide	1,9516704	g
NM VOC, non-methane volatile organic compounds	5,6552097	g
Nitrogen oxides	1,4077806	g
Methane, fossil	11,545791	g
Carbon dioxide, biogenic	3,6537781	g
Xylene	4,380826	mg
Vanadium (V)	3,8769332	mg
Sulfur oxides	2,6470069	mg
Sulfate	2,0625454	mg
Propane	67,950122	mg
Pentane	105,54751	mg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	87,083582	mg
Particulates, > 10 um	359,14359	mg
Particulates, < 2.5 um	152,97186	mg
Nitrogen, atmospheric	7,8667171	mg
Nickel (II)	2,0837239	mg
Methane, biogenic	10,392242	mg
Iron, ion	1,2371801	mg
Ozone	517,15691	μg
CO ₂	814,59	g
TOC, Total Organic Carbon	4,3553136	g
Suspended solids, unspecified	3,3358979	g
Sulfate	3,6992648	g
Sodium	43,243199	g
Silicon	1,1727631	g
Potassium (I)	1,4504403	g
Magnesium	2,1113848	g
COD (Chemical Oxygen Demand)	2,0274152	g
Chloride	88,223701	g
Calcium	11,417736	g
BOD ₅ (Biological Oxygen Demand)	2,3371997	g
Zinc (II)	19,076022	mg
Xylene	5,9498491	mg
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	21,361902	mg
Vanadium (V)	5,2981345	mg
Toluene	7,1240149	mg
Titanium, ion	11,140506	mg
Sulfur	2,2335431	mg
Strontium (II)	428,54382	mg
Solids, inorganic	43,532723	mg
Phosphorus	1,0074989	mg
Phosphate	122,25357	mg
Phenol	4,9174028	mg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1,3368906	mg
Oxygen	4,746372	mg
Oils, unspecified	498,02457	mg
Sulfur	16,940713	mg
Sodium	54,02095	mg
Silicon	6,314799	mg
Potassium (I)	9,8884508	mg
Phosphorus	1,4478394	mg
Oils, unspecified	65,822743	mg
Manganese (II)	1,2031018	mg
Magnesium	21,863334	mg
Iron, ion	56,078788	mg
Fluoride	1,352356	mg
Chloride	94,304392	mg
Carbon dioxide, to soil or biomass stock	1,7909074	mg
Carbon	90,243871	mg
Calcium	110,2222	mg
Barium (II)	13,449396	mg
Aluminium (III)	28,579758	mg
Fuel	MDO	bio
ID	Amount	Unit
CO ₂	418,07	g
Sulfur dioxide	2,3082314	g
Nitrogen oxides	2,0150643	g
Methane	1,1616226	g
Carbon monoxide, biogenic	1,4816375	g
Xylene	4,4384044	mg

VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	138,73581	mg
Suspended solids, unspecified	16,730323	g
Sodium	3,6715162	g
Fatty acids as C	1,8382738	g
Chloride	13,081181	g
Calcium	1,1608966	g
Sulfate	46,803806	mg
Strontium (II)	19,964305	mg
Phosphorus compounds, unspecified	25,367618	mg
Fuel	MDO	renew
ID	Amount	Unit
CO2	357,73	g

Πίνακας 35. Απογραφή εκπομπών παραγωγής φυσικού αερίου

Fuel	LNG	fossil
ID	Amount	Unit
CO2	873,98	g
Butane	2,4138E-06	kg
Ethane	2,0864E-05	kg
Mercury (II)	3,8E-12	kg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds	1,738E-07	kg
Propane	6,1763E-06	kg
Methane	7,39	g
Carbon monoxide, fossil	745,12629	mg
Nitrogen oxides	618,18686	mg
Sulfur dioxide	214,12676	mg
Particulates, > 10 um	113,62225	mg
Particulates, < 2.5 um	80,104234	mg
Carbon dioxide, land transformation	79,295011	mg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	48,936461	mg
Sulfate	2,1213842	g
Chloride	1,1855316	g
Silicon	874,52878	mg
Sodium	822,20618	mg

Calcium	708,9762	mg
COD (Chemical Oxygen Demand)	565,57865	mg
Magnesium	256,48192	mg
TOC, Total Organic Carbon	241,00896	mg
DOC, Dissolved Organic Carbon	218,80626	mg
Potassium (I)	205,55416	mg
BOD5 (Biological Oxygen Demand)	180,85227	mg
Aluminium (III)	147,09882	mg
Iron, ion	135,49492	mg
Suspended solids, unspecified	93,429727	mg
Phosphate	89,546419	mg
Solids, inorganic	34,964724	mg
Nitrate	29,044034	mg
Manganese (II)	18,490337	mg
Fluoride	14,413869	mg
Strontium (II)	11,463588	mg
Titanium, ion	8,1362259	mg
Chlorides, unspecified	8,0795093	mg
Barite	7,1986907	mg
Copper, ion	6,3077824	mg
Sulfur	4,8694224	mg
Oils, unspecified	4,8452583	mg
Fuel	LNG	bio
ID	Amount	Unit
CO2	1242,23	g
Hydrogen sulfide	4,5386E-10	kg
Methane, biogenic	885,62072	mg
Methanol	5,5691886	mg
Nitrogen, atmospheric	126,45681	mg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds	987,79942	mg
Ozone	4,8074893	mg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1,4709668	mg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	336,92763	mg
Pentane	43,637891	mg
Potassium (I)	48,865377	mg
Propane	9,1349844	mg
Silicon	5,4430182	mg
Sodium	3,2146871	mg
Sulfate	26,306841	mg

Sulfur trioxide	1,7907005	mg
Toluene	27,597945	mg
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	1,450822	mg
Xylene	3,3919489	mg
Zinc (II)	1,9354063	mg
Nitrogen oxides	5,1749968	g
Particulates, < 2.5 um	1,0018012	g
Particulates, > 10 um	1,3653209	g
Sulfur dioxide	2,2167651	g
TOC, Total Organic Carbon	1,3040766	g
Sulfate	27,653281	g
Sodium	7,7017487	g
Silicon	9,6374131	g
Potassium (I)	3,4814585	g
Phosphate	1,1205839	g
Nitrate	2,709401	g
Magnesium	4,0738825	g
Iron, ion	1,8092234	g
COD (Chemical Oxygen Demand)	2,9085732	g
Chloride	10,766985	g
Calcium	24,938033	g
BOD5 (Biological Oxygen Demand)	1,4054466	g
Aluminium (III)	3,5506759	g
Zinc (II)	102,33384	mg
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	1,56539	mg
Vanadium (V)	12,836019	mg
Titanium, ion	198,1794	mg
Tin, ion	2,0441861	mg
Suspended solids, unspecified	921,30683	mg
Fuel	LNG	renew
ID	Amount	Unit
CO2	327,69	g

Πίνακας 36. Απογραφή εκπομπών παραγωγής μεθανόλης

Fuel	MET	fossil
ID	Amount	Unit
CO2	523,37	g
Hydrogen sulfide	0,003102133	kg

Methane, fossil	0,005297178	kg
Nitrogen oxides	0,007254012	kg
Particulates, > 10 um	0,000477769	kg
Sulfur dioxide	0,009640164	kg
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	0,001956834	kg
AOX, Adsorbable Organic Halogen	0,000001	kg
BOD5 (Biological Oxygen Demand)	0,00018	kg
Chloride	0,000002	kg
COD (Chemical Oxygen Demand)	0,00049	kg
DOC, Dissolved Organic Carbon	0,00024	kg
Formaldehyde	0,0001	kg
Methanol	0,00003	kg
Phenol	0,00001	kg
Phosphorus	0,00001	kg
Suspended solids, unspecified	0,00002	kg
TOC, Total Organic Carbon	0,00024	kg
Water, GLO	0,00567375	m3
Fuel	MET	bio
ID	Amount	Unit
CO2	298,5	g
Benzene	1,2403E-06	kg
Butane	2,1706E-06	kg
Methanol	0,00053	kg
Nitrogen oxides	0,00020551	kg
Pentane	3,7209E-06	kg
Sulfur dioxide	1,7054E-06	kg
BOD5 (Biological Oxygen Demand)	0,00018	kg
COD (Chemical Oxygen Demand)	0,00049	kg
DOC, Dissolved Organic Carbon	0,00024	kg
Formaldehyde	0,0001	kg
TOC, Total Organic Carbon	0,00024	kg
Fuel	MET	renew
ID	Amount	Unit
CO2	35,82	g
Methanol	0,00005	kg
Benzene	1,2403E-06	kg
Butane	2,1706E-06	kg
BOD5 (Biological Oxygen Demand)	0,00018	kg
COD (Chemical Oxygen Demand)	0,00049	kg
TOC, Total Organic Carbon	0,00024	kg

DOC, Dissolved Organic Carbon	0,00024	kg
-------------------------------	---------	----

Nitrogen oxides	0,0007	kg
-----------------	--------	----

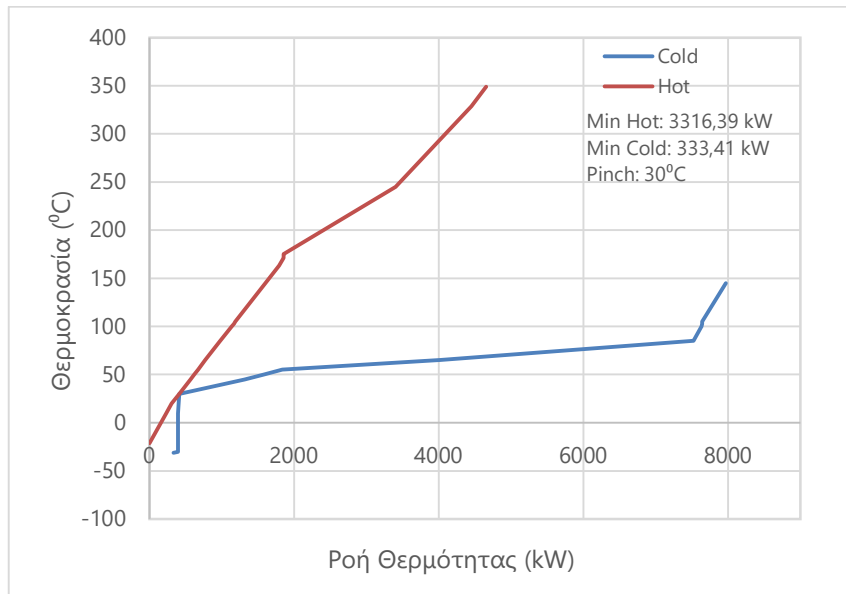
Πίνακας 37. Απογραφή εκπομπών παραγωγής αμμωνίας

Fuel	AMM	fossil
ID	Amount	Unit
Sb	0,02649	kg
SO2	0,00362	kg
PO4	0,00133	kg
CO2	3,03226	kg
1,4-dichlorobenzene	0,13893	kg
Nitrogen oxides	0,0007	kg
Fuel	AMM	bio
ID	Amount	Unit
Sb	0,0034	kg
SO2	0,0022	kg
PO4	0,00144	kg
CO2	0,49566	kg
1,4-dichlorobenzene	0,59822	kg
Nitrogen oxides	0,0007	kg
Fuel	AMM	renew
ID	Amount	Unit
Sb	0,00263	kg
SO2	0,0017	kg
PO4	0,00118	kg
CO2	0,37842	kg
1,4-dichlorobenzene	0,06318	kg

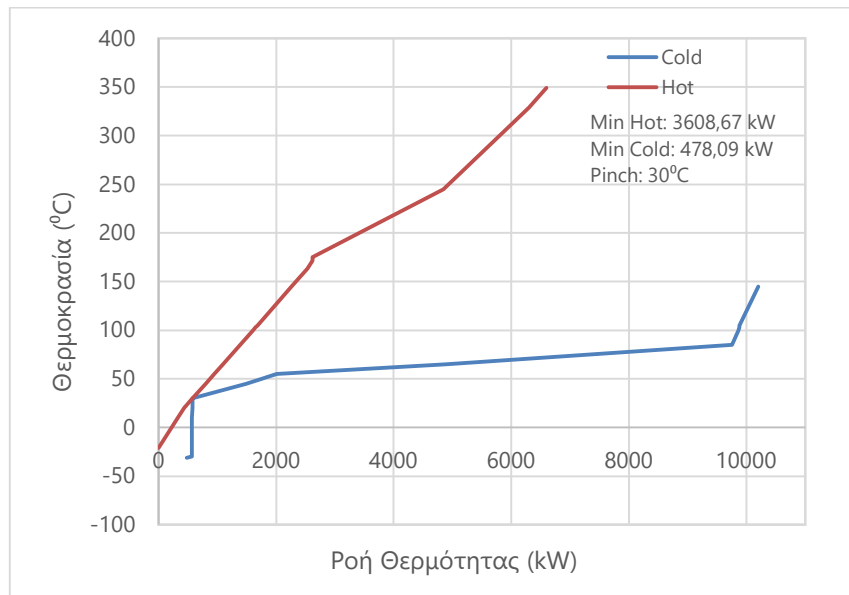
Πίνακας 38. Απογραφή εκπομπών παραγωγής υδρογόνου

Fuel	HYD	fossil
ID	Amount	Unit
CO2	13128	g
Acetaldehyde	2,092E-08	kg
Acetic acid	3,138E-06	kg
Benzene	8,368E-06	kg
Formaldehyde	2,092E-06	kg
Mercury (II)	6,276E-10	kg
Nitrogen oxides	0,0003745	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	2,092E-07	kg
Sulfur dioxide	1,151E-05	kg
Toluene	4,184E-06	kg
Particulates, < 2.5 um	4,184E-06	kg
Fuel	HYD	bio
ID	Amount	Unit
CO2	2136	g
BOD5 (Biological Oxygen Demand)	3,918E-07	kg
COD (Chemical Oxygen Demand)	3,918E-07	kg
TOC, Total Organic Carbon	1,36E-07	kg
Fuel	HYD	renew
ID	Amount	Unit
CO2	432	g

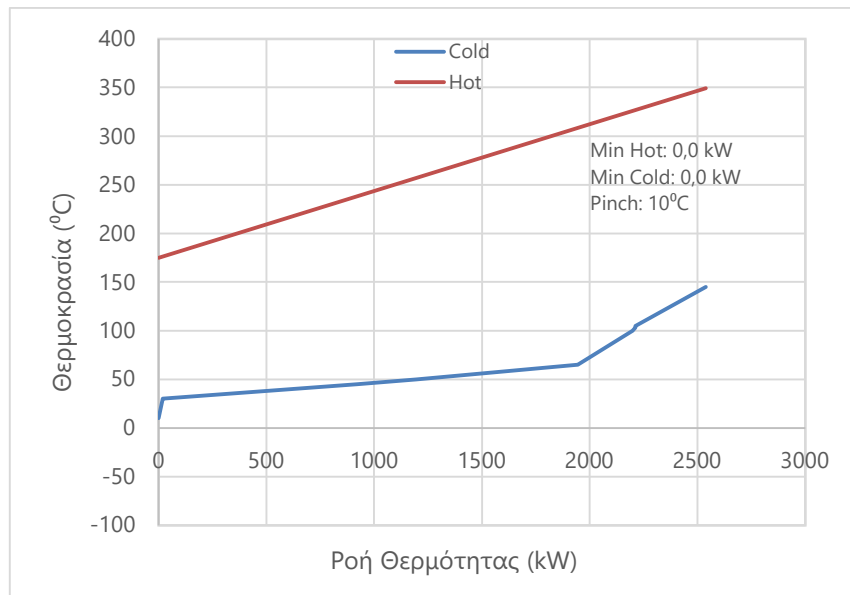
III. Αποτελέσματα ενεργειακής ολοκλήρωσης & ανάλυσης



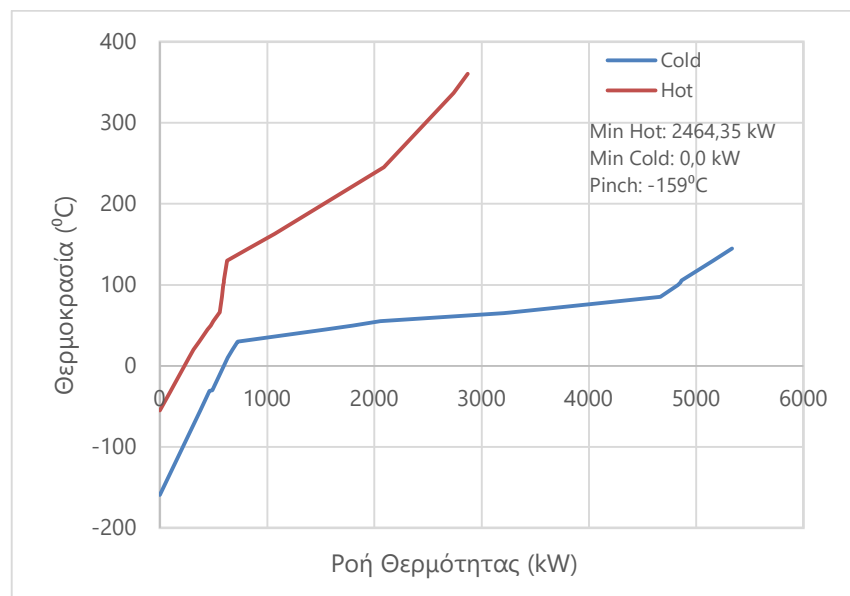
Διάγραμμα 18. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, δέσμευσης CO₂ και 60% μέγιστης ισχύος



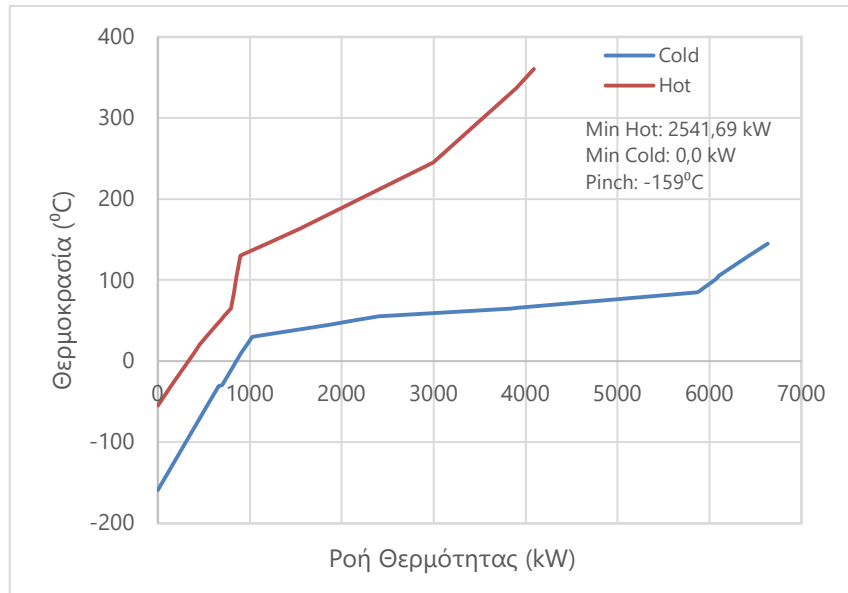
Διάγραμμα 19. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, δέσμευσης CO₂ και 90% μέγιστης ισχύος



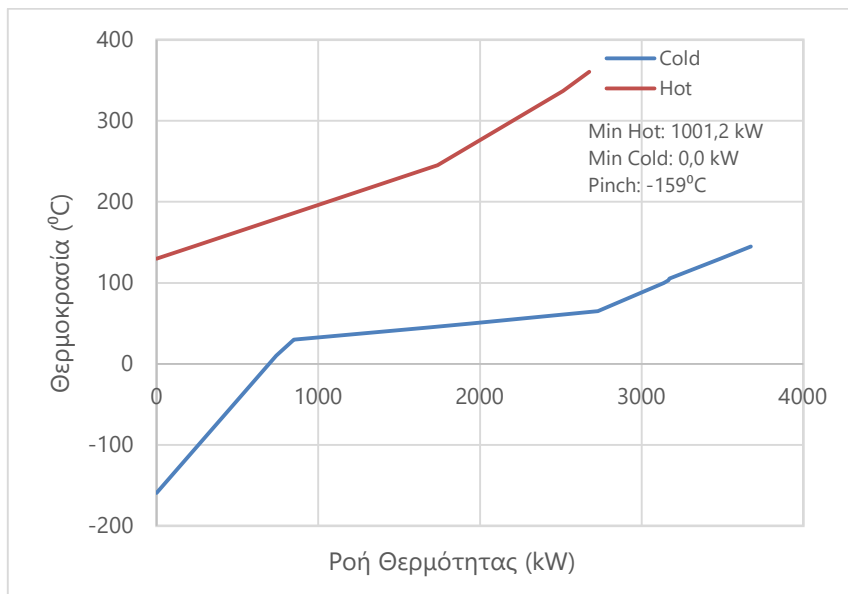
Διάγραμμα 20. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση ντίζελ ναυτιλίας, και 75% μέγιστης ισχύος



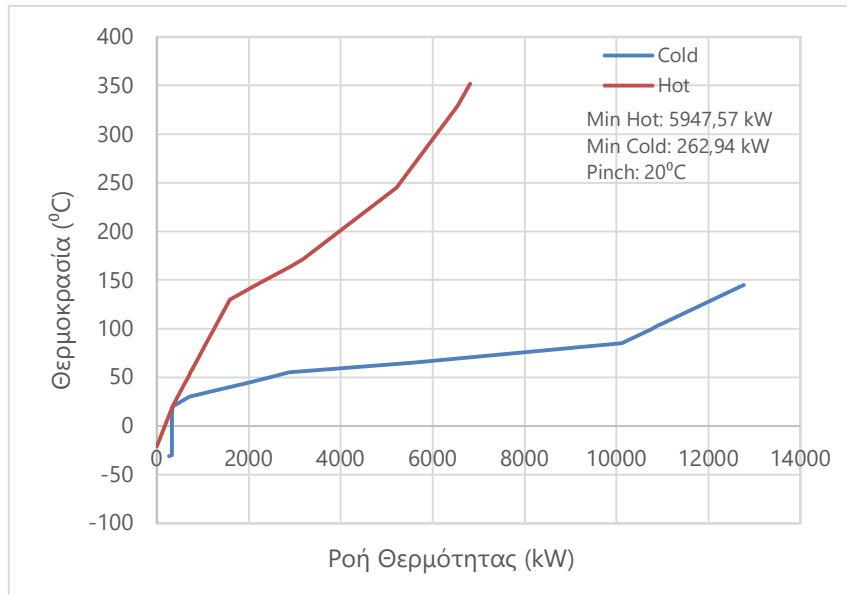
Διάγραμμα 21. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου, δέσμευσης CO₂ και 60% μέγιστης ισχύος



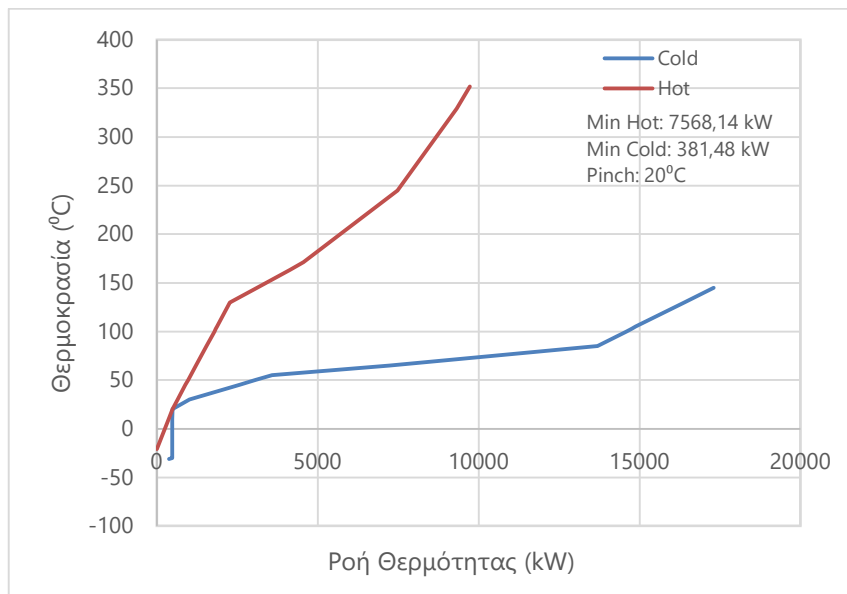
Διάγραμμα 22. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου, δέσμμευσης CO₂ και 90% μέγιστης ισχύος



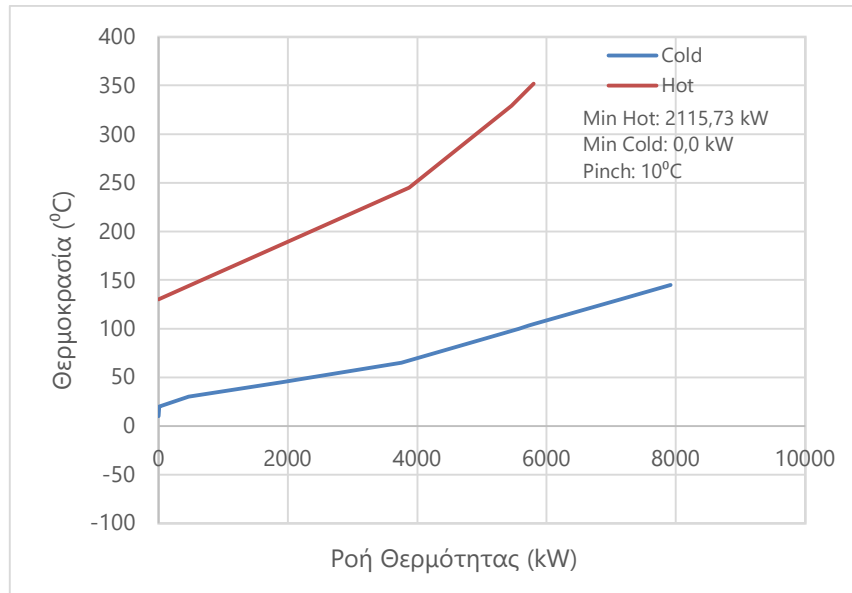
Διάγραμμα 23. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση φυσικού αερίου, και 75% μέγιστης ισχύος



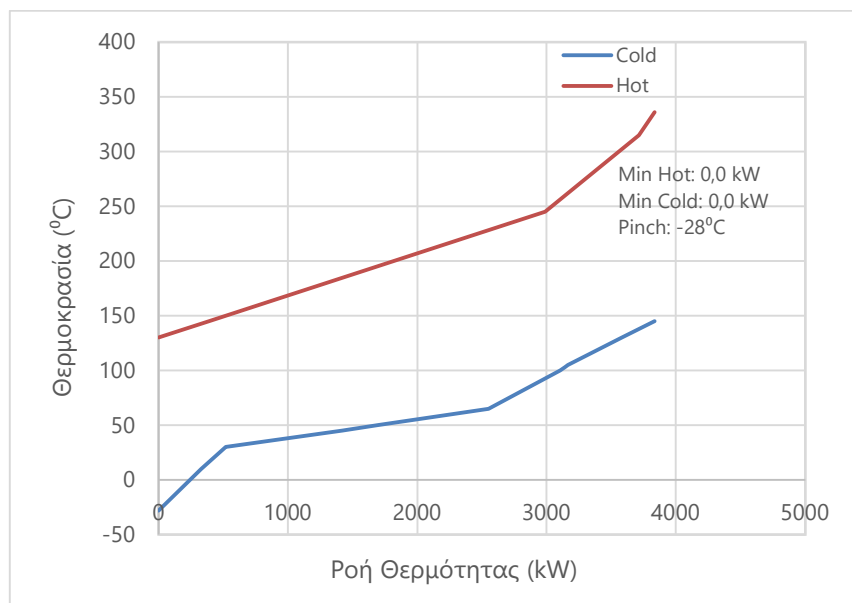
Διάγραμμα 24. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση μεθανόλης, δέσμευσης CO₂ και 60% μέγιστης ισχύος



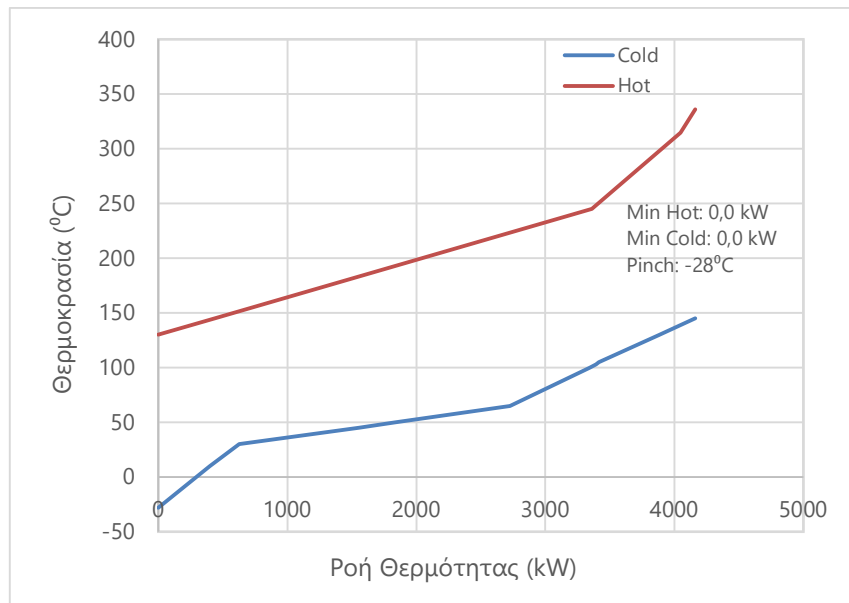
Διάγραμμα 25. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση μεθανόλης, δέσμευσης CO₂ και 90% μέγιστης ισχύος



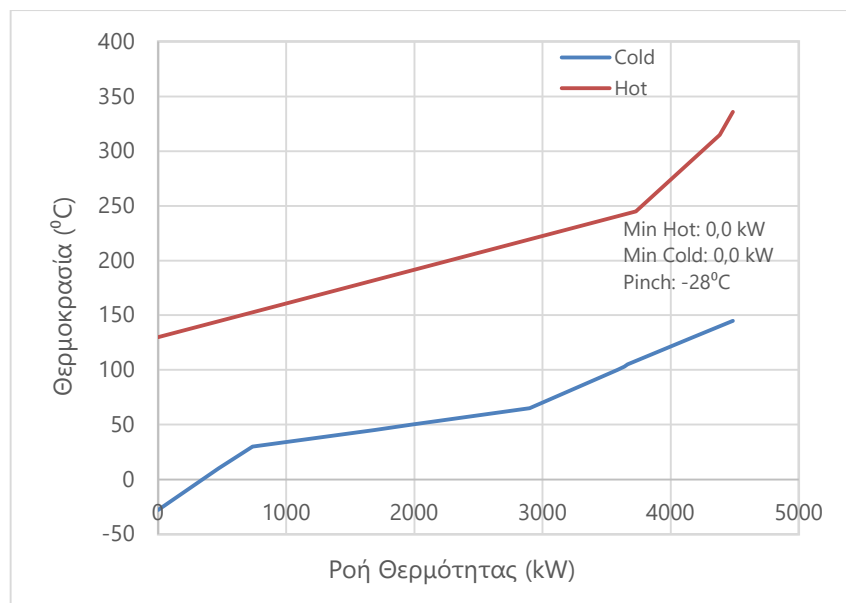
Διάγραμμα 26. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση μεθανόλης, και 75% μέγιστης ισχύος



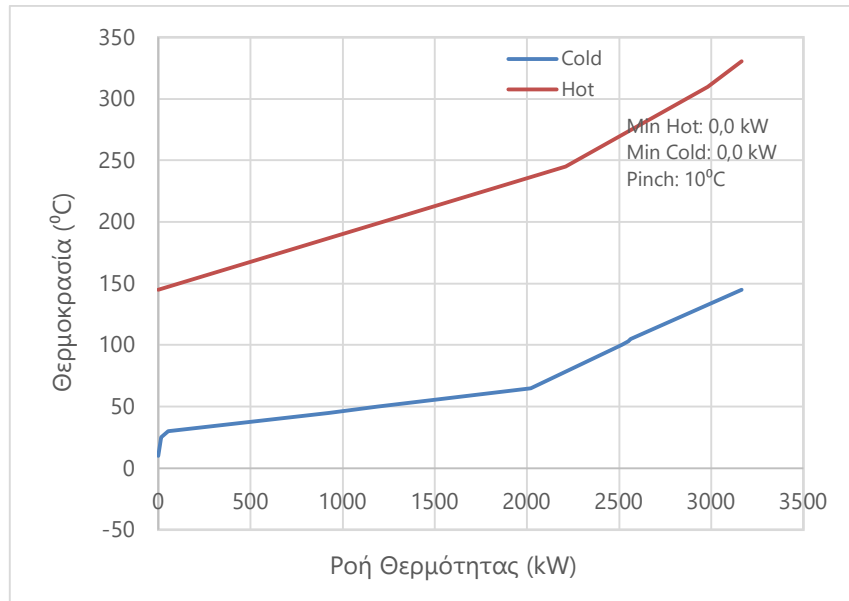
Διάγραμμα 27. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση αμμωνίας, και 60% μέγιστης ισχύος



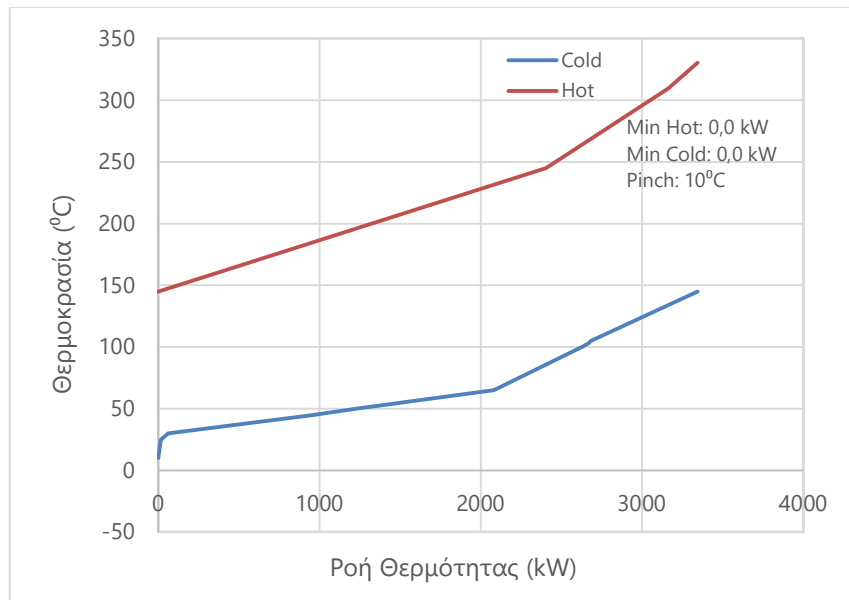
Διάγραμμα 28. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση αμμωνίας, και 75% μέγιστης ισχύος



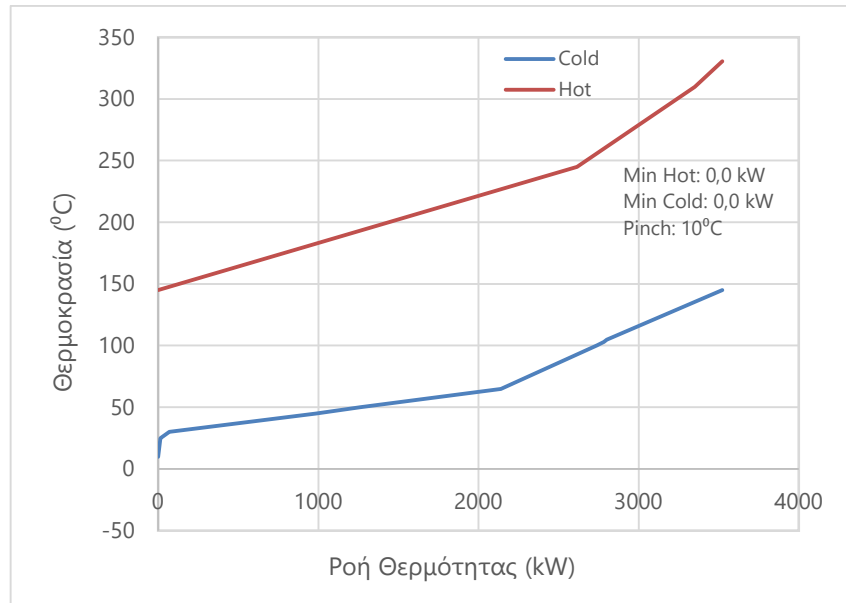
Διάγραμμα 29. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση αμμωνίας, και 90% μέγιστης ισχύος



Διάγραμμα 30. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση υδρογόνου, και 60% μέγιστης ισχύος



Διάγραμμα 31. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση υδρογόνου, και 75% μέγιστης ισχύος



Διάγραμμα 32. Μετατοπισμένες σύνθετες καμπύλες θερμών και ψυχρών ρευμάτων του συστήματος με χρήση υδρογόνου, και 90% μέγιστης ισχύος

Πίνακας 39. Αναλυτικές ενεργειακές ανάγκες πριν και μετά την ενεργειακή ολοκλήρωση

	Χωρίς Ενεργειακή Ολοκλήρωση				Μετά την Ενεργειακή Ολοκλήρωση			Μείωση ενέργειας λόγω ΕΟ (MW)	% Εξοικονόμησης ενέργειας λόγω ΕΟ
	Πρόωση (MW)	Ηλεκτρική Ενέργεια (MW)	Θερμή παροχή (MW)	Σύνολο (MW)	Ηλεκτρική Ενέργεια (MW)	Θερμή παροχή (MW)	Σύνολο (MW)		
MDO 60%+CCS	19,20	5,67	7,58	32,44	4,03	3,47	26,69	5,75	17,7%
MDO 75%+CCS	24,00	6,67	9,30	39,97	4,47	3,71	32,18	7,78	19,5%
MDO 90%+CCS	28,80	6,87	9,64	45,31	4,56	3,76	37,12	8,19	18,1%
MDO 75%	24,00	2,75	2,54	29,29	2,75	0,15	26,90	2,39	8,2%
LNG 60%+CCS	19,20	4,29	5,31	28,80	2,99	3,31	25,50	3,30	11,5%
LNG 75%+CCS	24,00	4,62	5,96	34,58	3,04	3,50	30,54	4,04	11,7%
LNG 90%+CCS	28,80	4,96	6,60	40,36	3,09	3,81	35,70	4,66	11,5%
LNG 75%	24,00	2,75	3,68	30,42	2,75	1,00	27,75	2,68	8,8%
MET 60%+CCS	19,20	5,94	12,43	37,58	4,04	7,72	30,96	6,62	17,6%
MET 75%+CCS	24,00	6,64	14,63	45,27	4,33	8,87	37,20	8,07	17,8%
MET 90%+CCS	28,80	7,33	16,82	52,96	4,61	9,99	43,40	9,55	18,0%
MET 75%	24,00	2,75	7,92	34,66	2,75	2,12	28,86	5,80	16,7%
AMM 60%	19,20	2,75	3,84	25,78	2,75	0,15	22,10	3,69	14,3%
AMM 75%	24,00	2,75	4,16	30,91	2,75	0,15	26,90	4,01	13,0%
AMM 90%	28,80	2,75	4,48	36,03	2,75	0,15	31,70	4,33	12,0%
HYD 60%	19,20	2,75	3,16	25,11	2,75	0,15	22,10	3,01	12,0%
HYD 75%	24,00	2,75	3,34	30,09	2,75	0,15	26,90	3,19	10,6%
HYD 90%	28,80	2,75	3,52	35,07	2,75	0,15	31,70	3,37	9,6%

Πίνακας 40. Ενεργειακές και μαζικές ροές συστήματος αποθήκευσης δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα

Ντίτζελ ναυτιλίας	Παραγόμενο CO2 (kg/h)	Δεσμευμένο CO2 (kg/h)	Tin1 (C)	Tout1 (C)	Qex1 (kW)	Comp1 (kW)	Tin2 (C)	Tout2 (C)	Qex2 (kW)	Comp2 (kW)
60%	12233,34	11010,01	168,21	25,00	-407,70	346,19	176,30	-16,00	-1446,23	406,67
75%	16414,43	14772,99	168,21	25,00	-547,04	464,50	176,30	-16,00	-1940,52	545,66
90%	17250,65	15525,58	168,21	25,00	-574,90	488,17	176,30	-16,00	-2039,38	573,46
Φυσικό αέριο										
60%	4546,14	4091,53	168,21	25,00	-151,51	128,65	70,91	-50,00	-508,44	43,83
75%	5533,93	4980,53	168,21	25,00	-184,43	156,60	70,91	-50,00	-618,91	53,35
90%	6521,71	5869,54	168,21	25,00	-217,35	184,55	70,91	-50,00	-729,38	62,87
Μεθανόλη										
60%	13388,70	12049,83	168,21	25,00	-446,20	378,88	176,30	-16,00	-1582,82	445,08
75%	16299,36	14669,43	168,21	25,00	-543,20	461,25	176,30	-16,00	-1926,92	541,84
90%	19210,03	17289,02	168,21	25,00	-640,20	543,62	176,30	-16,00	-2271,02	638,60

Πίνακας 41. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 60% MCR ανά κατηγορία για το ντίτζελ ναυτιλίας, το φυσικό αέριο και τη μεθανόλη

Ντίτζελ ναυτιλίας			Φυσικό αέριο			Μεθανόλη		
Πλεύση (60% MCR)			Πλεύση (60% MCR)			Πλεύση (60% MCR)		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	308945,69	66,91%	Πρόωση	308945,69	70,48%	Πρόωση	308945,69	57,62%
Ηλεκτρική	44176,02	9,57%	Ηλεκτρική	44176,02	10,08%	Ηλεκτρική	44176,02	8,24%
Θερμική	2413,64	0,52%	Θερμική	13620,52	3,11%	Θερμική	28442,74	5,30%
Υποσύνολο	355535,34	77,00%	Υποσύνολο	366742,22	83,67%	Υποσύνολο	381564,44	71,16%
Ελιγμοί			Ελιγμοί			Ελιγμοί		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	19200,00	4,16%	Πρόωση	19200,00	4,38%	Πρόωση	19200,00	3,58%
Ηλεκτρική	2745,40	0,59%	Ηλεκτρική	2745,40	0,63%	Ηλεκτρική	2745,40	0,51%
Θερμική	150,00	0,03%	Θερμική	150,00	0,03%	Θερμική	150,00	0,03%
Υποσύνολο	22095,40	4,79%	Υποσύνολο	22095,40	5,04%	Υποσύνολο	22095,40	4,12%
Δέσμευση CO2 (60% MCR)			Δέσμευση CO2 (60% MCR)			Δέσμευση CO2 (60% MCR)		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Ηλεκτρική	23465,99	5,08%	Ηλεκτρική	4405,45	1,01%	Ηλεκτρική	23746,55	4,43%
Θερμική	60659,77	13,14%	Θερμική	45075,21	10,28%	Θερμική	108786,51	20,29%
Υποσύνολο	84125,77	18,22%	Υποσύνολο	49480,66	11,29%	Υποσύνολο	132533,06	24,72%
Σύνολο	461756,51		Σύνολο	438318,28		Σύνολο	536192,89	

Πίνακας 42. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 60% MCR ανά κατηγορία για την αμμωνία και το υδρογόνο

Αμμωνία			Υδρογόνο		
Πλεύση (60% MCR)			Πλεύση (60% MCR)		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%

Πρόωση	308945,69	77,34%	Πρόωση	308945,69	77,34%
Ηλεκτρική	44176,02	11,06%	Ηλεκτρική	44176,02	11,06%
Θερμική	2413,64	0,60%	Θερμική	2413,64	0,60%
Υποσύνολο	355535,34	89,00%	Υποσύνολο	355535,34	89,00%
Ελιγμοί			Ελιγμοί		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	29920,00	7,49%	Πρόωση	29920,00	7,49%
Ηλεκτρική	13695,18	3,43%	Ηλεκτρική	13695,18	3,43%
Θερμική	330,00	0,08%	Θερμική	330,00	0,08%
Υποσύνολο	43945,18	11,00%	Υποσύνολο	43945,18	11,00%
Σύνολο	399480,52		Σύνολο	399480,5159	

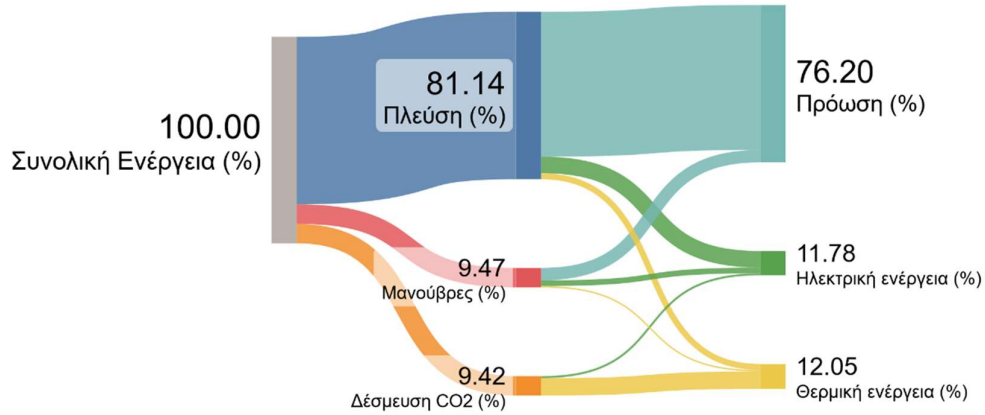
Πίνακας 43. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 90% MCR ανά κατηγορία για το ντιζελ ναυτιλίας, το φυσικό αέριο και τη μεθανόλη

Ντιζελ ναυτιλίας			Φυσικό αέριο			Μεθανόλη		
Πλεύση (90% MCR)			Πλεύση (90% MCR)			Πλεύση (90% MCR)		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	384766,80	69,73%	Πρόωση	384766,80	72,56%	Πρόωση	384766,80	59,09%
Ηλεκτρική	36678,43	6,65%	Ηλεκτρική	36678,43	6,92%	Ηλεκτρική	36678,43	5,63%
Θερμική	2003,99	0,36%	Θερμική	16922,77	3,19%	Θερμική	32378,74	4,97%
Υποσύνολο	423449,22	76,74%	Υποσύνολο	438368,00	82,67%	Υποσύνολο	453823,97	69,70%
Ελιγμοί			Ελιγμοί			Ελιγμοί		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	29920,00	5,42%	Πρόωση	29920,00	5,64%	Πρόωση	29920,00	4,60%
Ηλεκτρική	13695,18	2,48%	Ηλεκτρική	13695,18	2,58%	Ηλεκτρική	13695,18	2,10%
Θερμική	330,00	0,06%	Θερμική	3359,40	0,63%	Θερμική	6850,80	1,05%
Υποσύνολο	43945,18	7,96%	Υποσύνολο	46974,58	8,86%	Υποσύνολο	50465,98	7,75%
Δέσμευση CO2 (90% MCR)			Δέσμευση CO2 (90% MCR)			Δέσμευση CO2 (90% MCR)		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Ηλεκτρική	28277,91	5,12%	Ηλεκτρική	5376,27	1,01%	Ηλεκτρική	29052,33	4,46%
Θερμική	56150,77	10,18%	Θερμική	39548,66	7,46%	Θερμική	117759,86	18,09%
Υποσύνολο	84428,68	15,30%	Υποσύνολο	44924,93	8,47%	Υποσύνολο	146812,19	22,55%
Σύνολο	551823,08		Σύνολο	530267,51		Σύνολο	651102,1371	

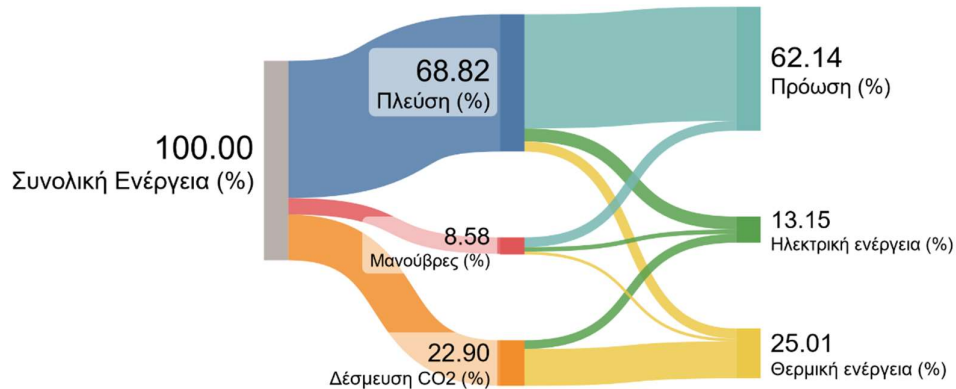
Πίνακας 44. Απόλυτες και ποσοστιαίες καταναλώσεις για 90% MCR ανά κατηγορία για την αμμωνία και το υδρογόνο

Αμμωνία			Υδρογόνο		
Πλεύση (90% MCR)			Πλεύση (90% MCR)		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	384766,80	82,32%	Πρόωση	384766,80	82,32%
Ηλεκτρική	36678,43	7,85%	Ηλεκτρική	36678,43	7,85%
Θερμική	2003,99	0,43%	Θερμική	2003,99	0,43%
Υποσύνολο	423449,22	90,60%	Υποσύνολο	423449,22	90,60%
Ελιγμοί			Ελιγμοί		
Είδος	Ενέργεια (kWh)	%	Είδος	Ενέργεια (kWh)	%
Πρόωση	29920,00	6,40%	Πρόωση	29920,00	6,40%

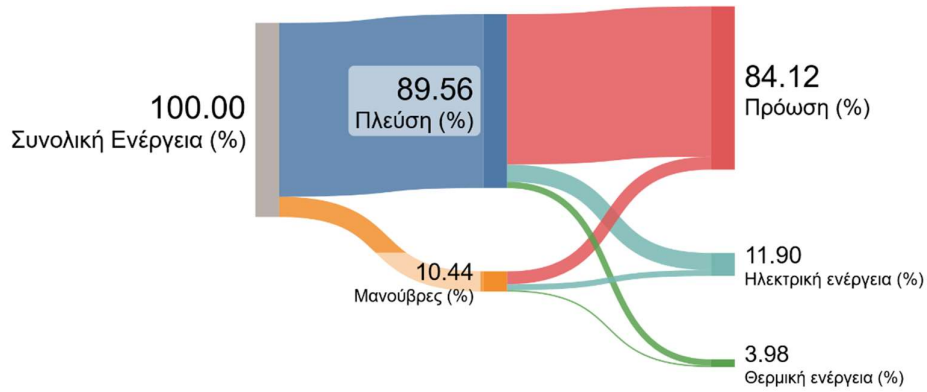
Ηλεκτρική	13695,18	2,93%	Ηλεκτρική	13695,18	2,93%
Θερμική	330,00	0,07%	Θερμική	330,00	0,07%
Υποσύνολο	43945,18	9,40%	Υποσύνολο	43945,18	9,40%
Σύνολο	467394,3964		Σύνολο	467394,3964	



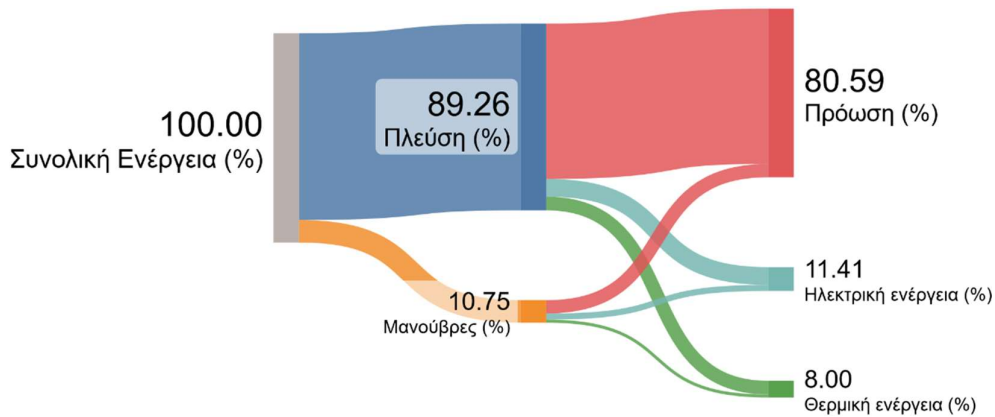
Διάγραμμα 33. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το φυσικό αέριο με 75% MCR και δέσμευση CO₂



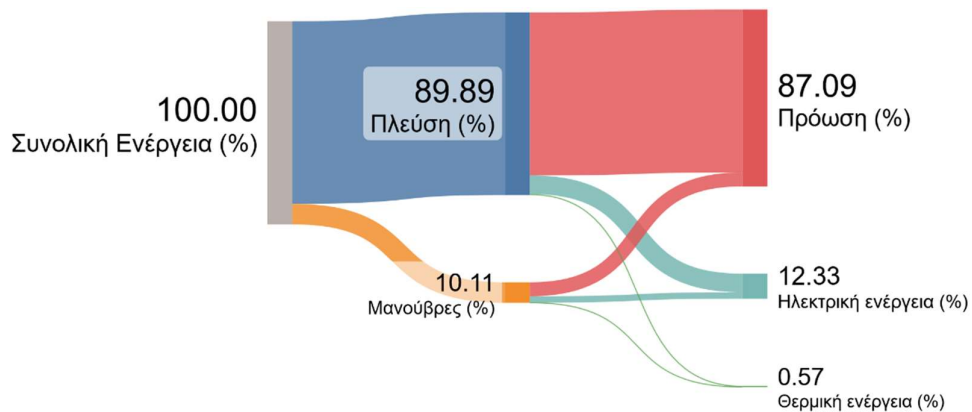
Διάγραμμα 34. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για τη μεθανόλη με 75% MCR και δέσμευση CO₂



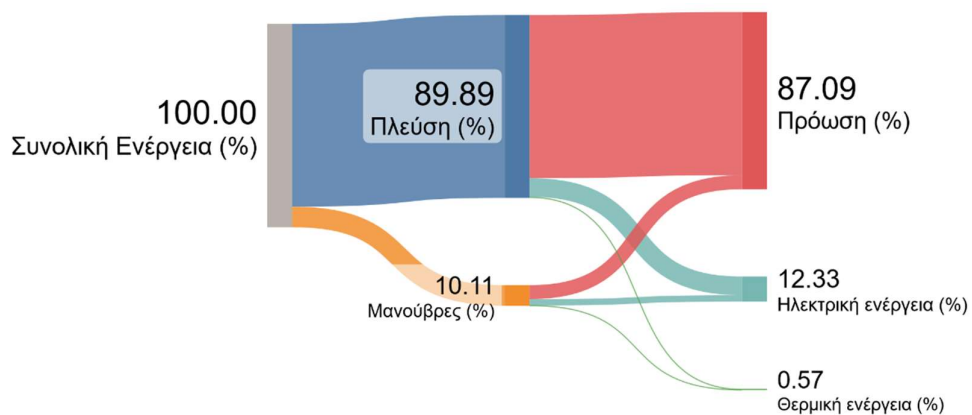
Διάγραμμα 35. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το φυσικό αέριο με 75% MCR



Διάγραμμα 36. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για τη μεθανόλη με 75% MCR



Διάγραμμα 37. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για τη αμμωνία με 75% MCR



Διάγραμμα 38. Sankey για την κατανομή ενέργειας ανά χρήση και κατηγορία ενέργειας, για το υδρογόνο με 75% MCR

IV. Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής

Πίνακας 45. Σύγκριση αποτυπωμάτων καλύτερων περιπτώσεων ανά κατηγορία επιπτώσεων μέσου επιπέδου

Συνθήκες		Ενιαία εκτίμηση (kPt)	Υπερθέρμανση του πλανήτη %	Τοξικότητα προς τον άνθρωπο %	Τοξικότητα προς οικοσυστήματα %	Σχηματισμός σωματιδίων %	Ευτροφισμός %
MDO	fossil	20,5	100,000%	100,000%	100,000%	100,000%	100,000%
	fossil CC	19,8	50,099%	119,985%	115,726%	112,341%	115,933%
	bio	18,3	3,575%	2,052%	0,000%	99,081%	0,000%
	renew	14,7	9,754%	0,000%	0,000%	93,304%	0,000%
LNG	fossil CC	5,74	68,068%	37,638%	39,513%	14,313%	39,818%
	bio	6,07	18,241%	2,877%	22,890%	23,557%	22,603%
	renew CC	3,7	33,096%	8,869%	3,287%	12,852%	15,364%
MET	bio	3,78	3,769%	0,508%	0,991%	17,570%	17,230%
	renew CC	5,44	38,445%	8,516%	3,791%	22,370%	26,364%
AMM	bio	15,2	30,808%	39,248%	45,482%	89,199%	0,000%
HYD	bio	1,24	22,097%	0,000%	0,013%	0,548%	3,943%
	renew	0,312	2,275%	0,000%	0,000%	0,538%	0,000%

Πίνακας 46. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων ντιζελ ναυτιλίας ανά διεργασία

	MDO_fossil_75	MDO_fossil_60_CC	MDO_bio_75	MDO_renew_75
Σύνολο (kPt)	20,51	19,79	15,12	14,74
Πρόωση (kPt)	15,32	13,72	12,31	12,31
Προμήθεια καυσίμου (kPt)	2,80	3,14	0,90	0,51
Θερμική (kPt)	0,11	2,70		
Ηλεκτρική (kPt)	2,28	3,47	1,83	1,83
Δέσμευση CO ₂ (kPt)		-3,27		
Άλλο (kPt)		0,03	0,09	0,09

Πίνακας 47. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων φυσικού αερίου ανά διεργασία

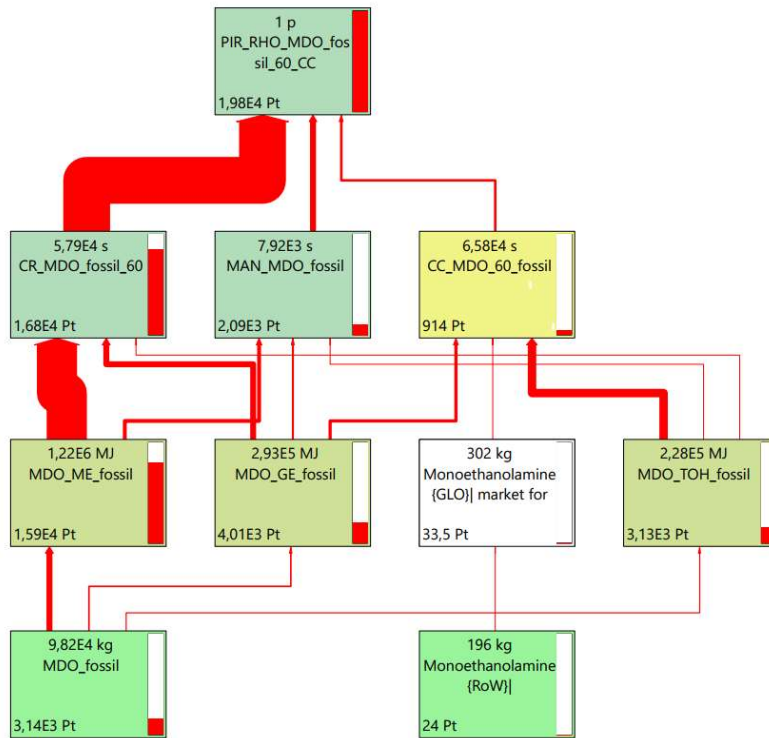
	LNG_fossil_60_CC	LNG_bio_75	LNG_renew_60_CC
Σύνολο (kPt)	5,74	4,69	3,70
Πρόωση (kPt)	3,91	2,35	3,17
Προμήθεια καυσίμου (kPt)	1,52	1,36	0,37
Θερμική (kPt)	0,75		0,74
Ηλεκτρική (kPt)	0,76	0,35	0,61
Δέσμευση CO ₂ (kPt)	-1,22		-1,22
Άλλο (kPt)	0,01	0,12	0,01

Πίνακας 48. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων μεθανόλης ανά διεργασία

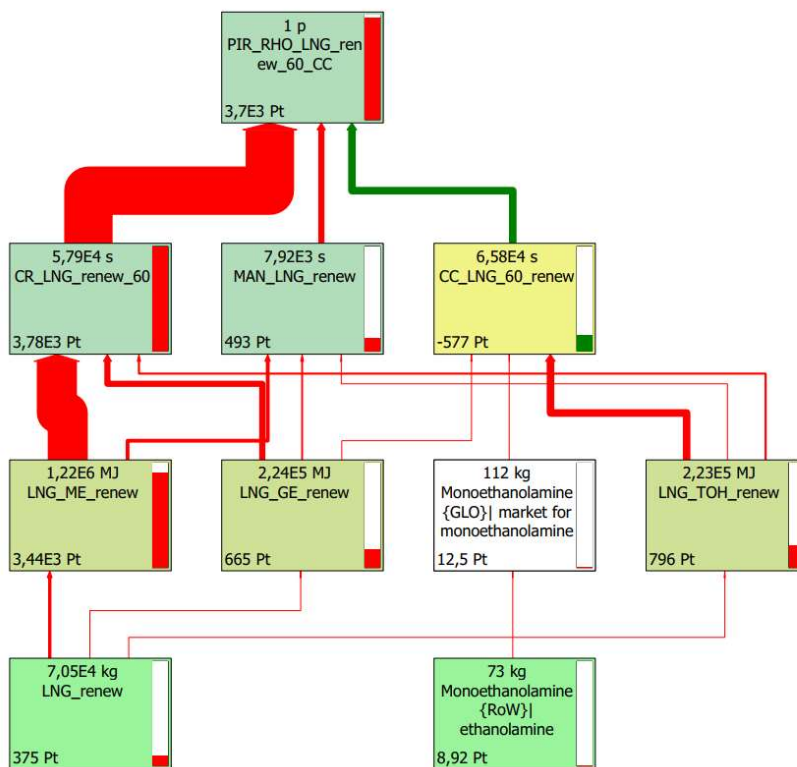
	MET_bio_75	MET_renew_60_CC
Σύνολο (kPt)	2,69	5,44
Πρόωση (kPt)	2,24	5,18
Προμήθεια καυσίμου (kPt)	1,88	0,48
Θερμική (kPt)		2,32
Ηλεκτρική (kPt)	0,33	1,31
Δέσμευση CO ₂ (kPt)		-3,58
Άλλο (kPt)	0,12	0,21

Πίνακας 49. Σύγκριση περιβαλλοντικού αποτυπώματος καλύτερων περιπτώσεων αμμωνίας και υδρογόνου ανά διεργασία

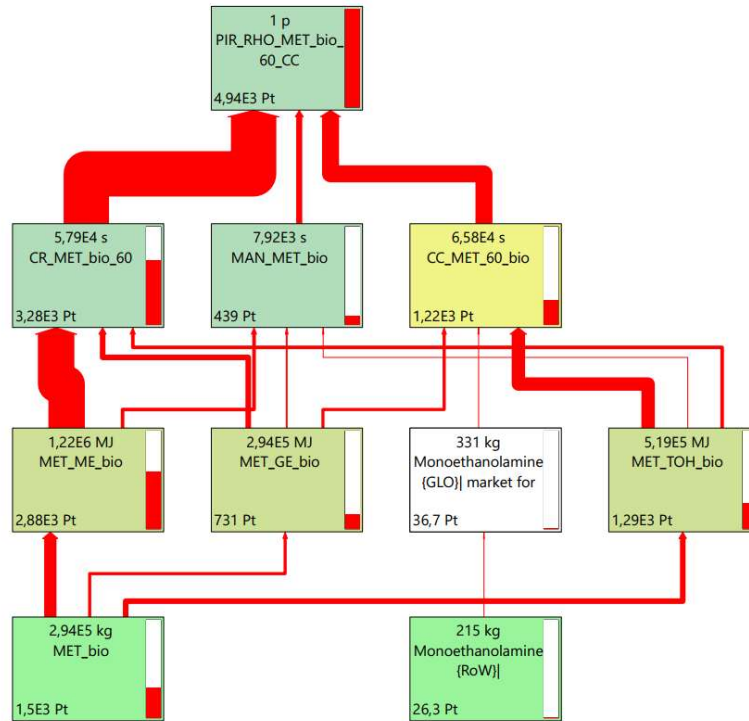
	AMM_bio_60	HYD_bio_60	HYD_renew_60
Σύνολο (kPt)	15,17	1,24	0,31
Πρόωση (kPt)	10,13		
Προμήθεια καυσίμου (kPt)	3,13	1,16	0,23
Θερμική (kPt)			
Ηλεκτρική (kPt)	1,82		
Δέσμευση CO ₂ (kPt)			
Άλλο (kPt)	0,09	0,08	0,08



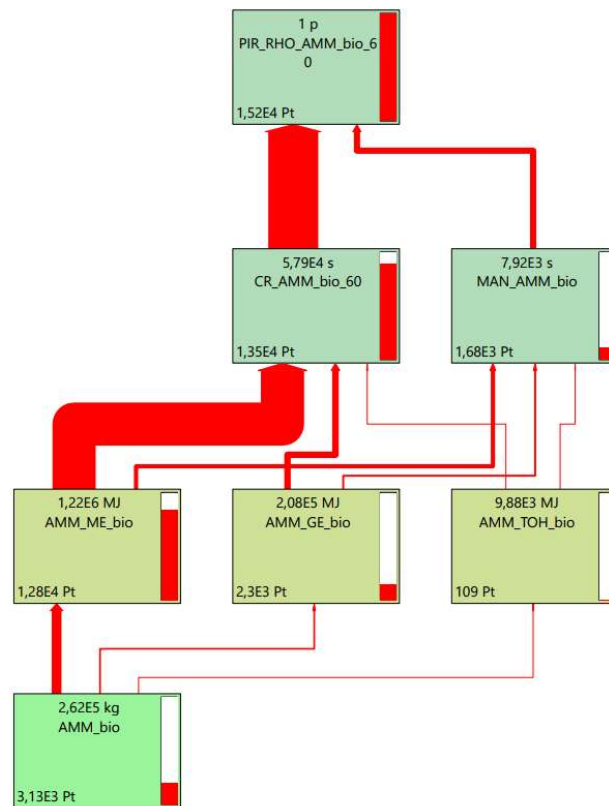
Σχήμα 11. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση ντίζελ ναυτιλίας με δέσμευση CO₂



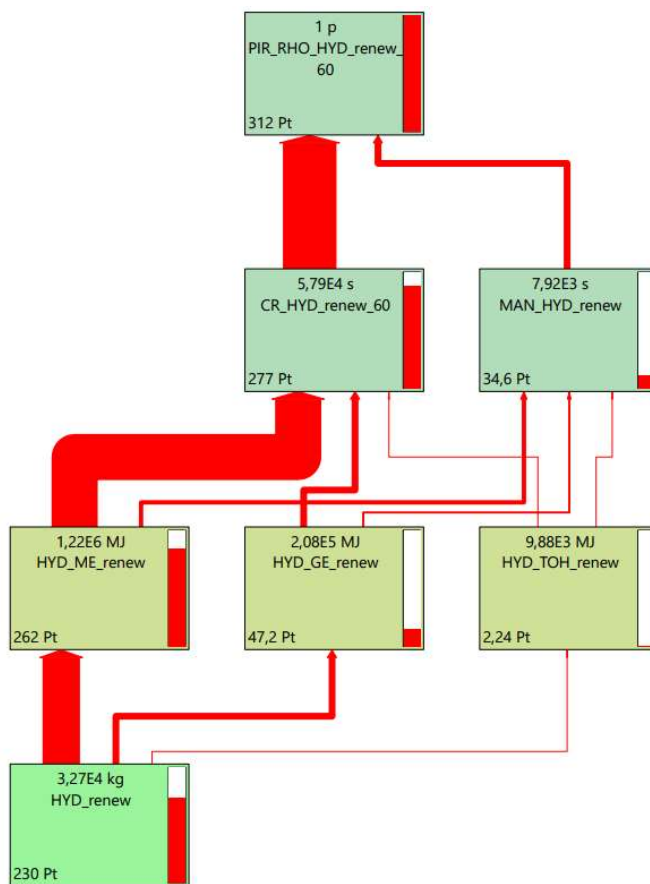
Σχήμα 12. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση φυσικού αερίου με δέσμευση CO₂



Σχήμα 13. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση μεθανόλης με δέσμευση CO₂



Σχήμα 14. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση αμμωνίας



Σχήμα 15. Δίκτυο κύκλου ζωής για χρήση υδρογόνου