

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**



**ΔΠΜΣ**

**Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ  
ΜΕ ΟΡΟΥΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ**

**Κωνσταντίνος Σταθάς**  
**ΜΝΣΝΔ21049**

**Επιβλέπων:**  
**Θεόδωρος Ζάννης**

**Πειραιάς**

**Μάρτιος 2023**



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

«Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού, που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος, που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου».



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΜΕΛΟΣ Α΄: κ. Θεόδωρος Ζάννης

ΜΕΛΟΣ Β΄: κ. Ιωάννης Κατσάνης

ΜΕΛΟΣ Γ΄: κ. Ευθύμιος Παριώτης



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Θεόδωρο Ζάννη, αναπληρωτή καθηγητή του τομέα Ναυπηγικής και Ναυτικής Μηχανολογίας της Σχολής Ναυτικών Δοκίμων, για τη συμπαράστασή, τη συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση που μου προσέφερε και το χρόνο που διέθεσε δίνοντάς μου χρήσιμες συμβουλές και οδηγίες για την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας.

Στο ίδιο πλαίσιο ευγνωμοσύνης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή, κύριο Παριώτη Ευθύμιο και τον αναπληρωτή καθηγητή, κύριο Κατσάνη Ιωάννη για την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, ως μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για τη συμπαράσταση και την υπομονή τους.



## Περίληψη

Η εργασία έχει θέμα τη μελέτη εναλλακτικών καυσίμων για χρήση στη ναυτιλία με σκοπό την ευθυγράμμιση της με τους στόχους που θέτει ο IMO για την απανθρακοποίηση του κλάδου. Η σταδιακή προσαρμογή του τομέα της ναυτιλίας είναι αναπόφευκτη και μπορεί να επιτευχθεί με τη μετάβαση σε ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Αυτή η εργασία εξετάζει 22 πιθανές εναλλακτικές λύσεις, συμπεριλαμβάνοντας το συμβατικό καύσιμο των πλοίων, μαζούτ (Heavy Fuel Oil (HFO)) ως περίπτωση αναφοράς, τα «μπλε» εναλλακτικά καύσιμα που παράγονται από φυσικό αέριο και τα «πράσινα» καύσιμα που παράγονται από βιομάζα και ηλιακή ενέργεια. Τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα (Carbon Capture and Storage, CCS) εγκαθίστανται για τις περιπτώσεις των ορυκτών καυσίμων (HFO και υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas, LNG)). Οι διαφορετικές επιλογές καυσίμου συγκρίνονται σε όρους μετρήσιμων παραμέτρων που περιλαμβάνουν: (i) μάζα καυσίμου, (ii) όγκο καυσίμου, (iii) ένταση ενέργειας κύκλου ζωής (Well-To-Wake, WTW), (iv) κόστος WTW, (v) εκπομπή αερίων θερμοκηπίου (Green House Gases, GHG) WTW και (vi) εκπομπή μη θερμοκηπιακών αερίων, που υπολογίζονται από τη βιβλιογραφία και τη χρήση μοντέλων ASPEN HYSYS. Από ενεργειακή προοπτική, η ηλεκτρική ενέργεια ανανεώσιμων πηγών με τεχνολογία μπαταριών είναι η πιο αποτελεσματική επιλογή, αν και ακόμα παραμένει μη πρακτική για υπερπόντιες διαδρομές λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας των σημερινών μπαταριών. Η αμέσως επόμενη καλύτερη λύση είναι τα ορυκτά καύσιμα με τεχνολογίες CCS (υποθέτοντας 90% απόδοση στη δέσμευση του άνθρακα), που τυχαίνει να έχουν και το χαμηλότερο κόστος, αν και η μακροχρόνια αποθήκευση και αξιοποίηση του CO<sub>2</sub> αποτελούν προβλήματα που δεν έχουν ακόμη επιλυθεί. Τα βιοκαύσιμα προσφέρουν έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ κόστους, διαθεσιμότητας και επιπέδου ετοιμότητας τεχνολογίας (Technology Readiness Level, TRL). Ωστόσο, οι εκπομπές μη-θερμοκηπιακών αερίων παραμένουν υπολογίσιμες. Το υδρογόνο και η αμμωνία είναι από τις χειρότερες επιλογές όσον αφορά το απαιτούμενο συνολικό ενεργειακό κόστος και μπορεί να χρειαστεί να ληφθούν μέτρα για τον καθαρισμό των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) που προκύπτουν. Η μεθανόλη από LNG απαιτεί χρήση τεχνολογιών CCS για την απανθρακοποίησή της, ενώ η μεθανόλη από βιομάζα όχι, και επίσης φαίνεται να είναι καλή εναλλακτική όσον αφορά το συνολικό ενεργειακό και οικονομικό κόστος καθώς και την TRL. Η παρούσα ανάλυση συγκρίνει με συνέπεια τις διάφορες περιπτώσεις και είναι χρήσιμη για τα ενδιαφερόμενα μέρη που εμπλέκονται στην απανθρακοποίηση της ναυτιλίας.



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

## **Abstract**

This paper’s subject is the study of alternative fuels for shipping in order to align it with the goals set by the IMO for the decarbonization of the sector. The progressive adaptation of the shipping industry is inevitable and can be made by transitioning into low- or zero-carbon marine fuels.

This paper reviews 22 potential pathways, including conventional Heavy Fuel Oil (HFO) marine fuel as a reference case, “blue” alternative fuel produced from natural gas, and “green” fuels produced from biomass and solar energy. Carbon capture technology (CCS) is installed for fossil fuels (HFO and liquefied natural gas (LNG)). The pathways are compared in terms of quantifiable parameters including (i) fuel mass, (ii) fuel volume, (iii) life cycle (Well-To-Wake—WTW) energy intensity, (iv) WTW cost, (v) WTW greenhouse gas (GHG) emission, and (vi) non-GHG emissions, estimated from the literature and ASPEN HYSYS modelling. From an energy perspective, renewable electricity with battery technology is the most efficient route, albeit still impractical for long-distance shipping due to the low energy density of today’s batteries. The next best is fossil fuels with CCS (assuming 90% removal efficiency), which also happens to be the lowest cost solution, although the long-term storage and utilization of CO<sub>2</sub> are still unresolved. Biofuels offer a good compromise in terms of cost, availability, and technology readiness level (TRL); however, the non-GHG emissions are not eliminated. Hydrogen and ammonia are among the worst in terms of overall energy and cost needed and may also need NO<sub>x</sub> clean-up measures. Methanol from LNG needs CCS for decarbonization, while methanol from biomass does not, and also seems to be a good candidate in terms of energy, financial cost, and TRL. The present analysis consistently compares the various options and is useful for stakeholders involved in shipping decarbonization.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΜΕΘΟΔΟΙ.....	5
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	15
3.1. ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ .....	15
3.1.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΟΓΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	15
3.1.5. ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ .....	16
3.1.5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ .....	19
3.1.5. ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΚΥΚΛΟ ΖΩΗΣ.....	21
3.1.5. ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΟΣΟΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ .....	23
3.2. ΈΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	28
4. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	31
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	34
Βιβλιογραφία .....	36
Παράρτημα Α.....	39
Παράρτημα Β.....	45
Παράρτημα Γ .....	49



Κωνσταντίνος Σταθάς

“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Πιθανές μέθοδοι παραγωγής ναυτιλιακών καυσίμων. ....	6
Πίνακας 2: Πηγές της βάσης δεδομένων για την αξιολόγηση των ναυτιλιακών καυσίμων (Ανατρέξτε στους πίνακες A1 και A2 στο Παράρτημα Β για λεπτομέρειες). ....	8
Πίνακας 3: Κριτήρια αξιολόγησης των ναυτιλιακών καυσίμων και οι αντίστοιχες βαρύτητες τους. ....	143
Πίνακας 4: Βαθμολογίες και ορισμοί ποιοτικών παραγόντων. ....	144
Πίνακας 5: (α) Σύνοψη της ποσοτικής αξιολόγησης σε ποσοστά σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς (Μαζούτ χωρίς τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα), (β) Σύνοψη της ποσοτικής αξιολόγησης σε κανονικοποιημένες βαθμολογίες μεταξύ 1 και 10. ....	27
Πίνακας A1: Συντελεστές ενέργειας και οι αντίστοιχες πηγές τους. ....	475
Πίνακας A2: Συντελεστές Κόστους και οι αντίστοιχες πηγές τους. ....	488





## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής ερευνητικής διαδικασίας.....	5
Σχήμα 2: Πιθανές μέθοδοι παραγωγής ναυτιλιακών καυσίμων. Με ακρωνύμια CCS: Δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα, EM: Ηλεκτρικός κινητήρας, FC: Κυψέλη καυσίμου, ICE: Κινητήρας εσωτερικής καύσης, LNG: Υγροποιημένο φυσικό αέριο, MeOH: Μεθανόλη.....	6
Σχήμα 3: Σχετικές μάζες και όγκοι διαφόρων ναυτιλιακών καυσίμων. ....	155
Σχήμα 4: Σχετική ενέργεια κύκλου ζωής, χωρισμένη στη συνεισφορά των τμημάτων α) εξόρυξης/παραγωγής έως την αποθήκευση (Well-to-tank) και β) αποθήκευσης έως και τη χρήση(Tank-to-wake).....	177
Σχήμα 5: Σχετική ενέργεια εξόρυξης/παραγωγής έως την αποθήκευση (Well-to-tank) εναλλακτικών καυσίμων. ....	177
Σχήμα 6: Σχετική ενέργεια αποθήκευσης έως και τη χρήση(Tank-to-wake) εναλλακτικών καυσίμων. ....	188
Σχήμα 7: Διάγραμμα ροής ενέργειας Sankey για αμμωνία που παράγεται μέσω αναμόρφωσης μεθανίου με υδρατμό.....	199
Σχήμα 8: Διάγραμμα ροής ενέργειας Sankey για αμμωνία που παράγεται μέσω ηλιακής ενέργειας και της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης. ....	199
Σχήμα 9: Σχετικό κόστος κύκλου ζωής, χωρισμένο στη συνεισφορά των τμημάτων α) εξόρυξης/παραγωγής έως την αποθήκευση (Well-to-tank) και β) αποθήκευσης έως και τη χρήση(Tank-to-wake).....	20
Σχήμα 10: Σχετικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τον κύκλο ζωής, χωρισμένες στη συνεισφορά των τμημάτων α)εξόρυξης/παραγωγής έως την αποθήκευση (Well-to-tank) και β) αποθήκευσης έως και τη χρήση(Tank-to-wake). ....	222
Σχήμα 11: Εκπομπές μη θερμοκηπιακών αερίων (NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM) των εναλλακτικών καυσίμων. ....	233
Σχήμα 12: Σύνοψη ποσοτικής αξιολόγησης. ....	255
Σχήμα 13: Σύνοψη της ποιοτικής αξιολόγησης με χρωματικό κώδικα που δηλώνει τη βαθμολογία. ....	299
Σχήμα 14: Βαθμολογίες εναλλακτικών καυσίμων.....	30
Σχήμα A1: Παράδειγμα ASPEN – « Μοντέλο Εγκατάστασης Φυσικού Αερίου».....	399
Σχήμα A2: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή και κατανάλωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) - ( Περιπτώσεις 3 και 4).....	399
Σχήμα A3: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή και κατανάλωση Υδρογόνου (H <sub>2</sub> ) προερχόμενου από Φυσικό Αέριο (NG) – ( Περιπτώσεις 5 και 6). ....	399
Σχήμα A4: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή και κατανάλωση Αμμωνίας (H <sub>2</sub> ) προερχόμενης από Φυσικό Αέριο (NG) – ( Περιπτώσεις 7 και 8).....	40
Σχήμα A5: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή και κατανάλωση Μεθανόλης (MeOH) προερχόμενης από Φυσικό Αέριο (NG) – ( Περιπτώσεις 9 και 10).....	40
Σχήμα A6: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας προερχόμενης από Φυσικό Αέριο (NG) – ( Περίπτωση 11).....	40
Σχήμα A7: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την τεχνολογία Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα (Carbon Capture and Storage – CCS).....	40
Σχήμα A8: Προσομοίωση ASPEN για την παραγωγή Βιοντίζελ μέσω μετεστεροποίησης. ....	44
Σχήμα A9: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση αναφοράς του Μαζούτ (Heavy Fuel Oil – HFO)..	499
Σχήμα A10: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση μαζούτ με τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, HFO (CCS). ....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b> 9



Σχήμα A11: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδροποιημένου Φυσικού Αερίου, LNG. ....	499
Σχήμα A12: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδροποιημένου Φυσικού Αερίου με τεχνολογία δέσμωσης και αποθήκευσης άνθρακα, LNG (CCS). ....	50
Σχήμα A13: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου από φυσικό αέριο με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης ως μετατροπέα ενέργειας, BLUE H2. ....	50
Σχήμα A14: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου από φυσικό αέριο με χρήση κυψέλης καυσίμου ως μετατροπέα ενέργειας, BLUE H2(FC). ....	50
Σχήμα A15: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Αμμωνίας παραγόμενης από φυσικό αέριο με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης ως μετατροπέα ενέργειας, BLUE NH3.....	50
Σχήμα A16: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Αμμωνίας παραγόμενης από φυσικό αέριο με χρήση κυψέλης καυσίμου ως μετατροπέα ενέργειας, BLUE NH3 (FC). ....	51
Σχήμα A17: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης από φυσικό αέριο με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης ως μετατροπέα ενέργειας, MEOH.....	51
Σχήμα A18: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης από φυσικό αέριο με τεχνολογία δέσμωσης και αποθήκευσης άνθρακα, BLUE MEOH (CCS). ....	51
Σχήμα A19: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Ηλεκτρικής Ενέργειας παραγόμενης από φυσικό αέριο, NG-E. ....	51
Σχήμα A20: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από φυσικό αέριο,NG-E-H2(FC). ....	52
Σχήμα A21: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Αμμωνίας παραγόμενης με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από φυσικό αέριο,NG-E-NH3(FC).....	52
Σχήμα A22: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από φυσικό αέριο, NG-E-MEOH.....	52
Σχήμα A23: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Βιοντίζελ παραγόμενου από βιομάζα, BIO-DIESEL. ....	<b>53Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
Σχήμα A24: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Βιομεθανόλης παραγόμενης από βιομάζα, BIO-MEOH. ....	53
Σχήμα A25: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Ηλεκτρικής Ενέργειας παραγόμενης από ηλιακή ενέργεια, SOLAR-E. ....	<b>53Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
Σχήμα A26: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ηλιακή ενέργεια, SOLAR-E-H2(FC) ....	53
Σχήμα A27: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Αμμωνίας παραγόμενης με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ηλιακή ενέργεια, SOLAR-E-NH3(FC).....	54
Σχήμα A28: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ηλιακή ενέργεια, SOLAR-E-MEOH.....	54
Σχήμα A29: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου με χρήση ηλιακής θερμικής ενέργειας, SOLAR-T-H2. ....	54
Σχήμα A30: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης με χρήση ηλιακής θερμικής ενέργειας, SOLAR-T-MEOH. ....	54



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απανθρακοποίηση του ναυτιλιακού τομέα έχει παραμεληθεί εδώ και καιρό από την παγκόσμια κοινότητα λόγω των συγκριτικά χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Ωστόσο, το 96% των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία πλοίων παράγονται από πετρέλαιο ντίζελ για χρήση στη ναυτιλία (Marine Diesel Oil, MDO), μαζούτ (HFO) ή πετρέλαιο εσωτερικής καύσης πλοίων (Marine Gasoil, MGO), που παράγουν έως και 3,114 kg διοξειδίου του άνθρακα ανά kg καυσίμου (HFO) που καταναλώνεται. Η ναυτιλία είναι υπεύθυνη για το 2,8% των ετήσιων παγκόσμιων εκπομπών ή για παραγωγή 1036 μετρικών τόνων (Mt) CO<sub>2</sub> ετησίως (Gray et al., 2021). Επιπρόσθετα, ο ναυτιλιακός τομέας εκπέμπει περίπου 1,4 Mt σωματιδίων (PM), σχεδόν το 15% των παγκόσμιων εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και περίπου το 13% των παγκόσμιων εκπομπών οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) ετησίως (Gray et al., 2021). Η σημερινή κατάσταση είναι μη βιώσιμη και ως εκ τούτου αναζητούνται λύσεις, με την έρευνα για εναλλακτικά καύσιμα να εντατικοποιείται.

Το 2018, ο IMO ανακοίνωσε έναν μακροπρόθεσμο στόχο για τη μείωση των εκπομπών GHG από τη βιομηχανία της ναυτιλίας κατά 50% έως το 2050 σε σύγκριση με τις εκπομπές του 2008. Επιπλέον, την 1η Ιανουαρίου του 2020, η περιεκτικότητα σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων περιορίστηκε στο 0,5% ή στο 0,1% στις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas, ECAs) που έχει επιβάλει ο IMO. Αυτά τα νέα όρια έγιναν υποχρεωτικά μετά από τροποποίηση του Παραρτήματος VI της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τα πλοία (MARPOL). Τώρα, η πλειοψηφία των πλοίων χρησιμοποιεί μαζούτ με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (Very Low Sulphur Fuel Oil, VLSFO) για να συμμορφωθεί με το νέο όριο και δεν έχουν αναφερθεί μέχρι σήμερα στον IMO ζητήματα ασφάλειας. Οι πλοιοκτήτες μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν καύσιμα χαμηλής ή μηδενικής περιεκτικότητας σε θείο, για παράδειγμα, LNG ή βιοκαύσιμα. Επιλογές εναλλακτικών καυσίμων πλοίων που συζητούνται παγκοσμίως περιλαμβάνουν το LNG, το υδρογόνο (H<sub>2</sub>), την αμμωνία (NH<sub>3</sub>), τη μεθανόλη (MEOH), τα βιοκαύσιμα και την ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, με δεδομένο ότι η επένδυση που πρόκειται να γίνει σήμερα είναι μακροπρόθεσμη καθώς τα πλοία σχεδιάζονται με μεγάλη διάρκεια ζωής, οι όποιοι επενδυτές βρίσκονται σε δίλημμα όσον αφορά το καύσιμο που θα επιλέξουν. Κάθε ένα από τα καύσιμα που συζητούνται έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και αδυναμίες. Μια κατάλληλη ποσοτική σύγκριση για κάθε νέο καύσιμο ή συνδυασμό καυσίμων είναι σημαντική για την προετοιμασία των μετόχων, των



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

πλοιοκτητών και των ατόμων που καθορίζουν την πολιτική στον τομέα της ναυτιλίας για τη μετάβαση.

Διάφορα καύσιμα μηδενικών και χαμηλών εκπομπών άνθρακα αναπτύσσονται σε εμπορική κλίμακα, για παράδειγμα, το πρώτο φορτηγό πλοίο στον κόσμο που κινείται με υδρογόνο που λειτουργεί από τις Heidelberg Cement και Felleskjøpet (Statkraft, 2021) και το πρώτο πράσινο δεξαμενόπλοιο στον κόσμο με αμμωνία ως καύσιμο, το οποίο προγραμματίζεται να παραδοθεί έως το 2024 με το όνομα MS Green Ammonia (Ship Technology, 2020). Εκτός από αυτές τις αναπτυσσόμενες τεχνολογίες, πλοία που βασίζονται σε LNG και μπαταρίες έχουν επίσης διατεθεί στο εμπόριο. Δεν υπάρχει μία λύση για όλα τα είδη πλοίων. Ως εκ τούτου, κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μια αντικειμενική σύγκριση μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών καυσίμων ως κατευθυντήρια γραμμή για τους πλοιοκτήτες και τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής ώστε να επιλέξουν την καλύτερη στρατηγική απαλλαγής από τον άνθρακα. Ο Hansson (Hansson et al., 2019) πραγματοποίησε αξιολόγηση ναυτιλιακών καυσίμων για επτά εναλλακτικά καύσιμα και κατέταξε το LNG ως το πιο πιθανό καύσιμο μετάβασης, το HFO δεύτερο, και μετά ακολούθησε η ορυκτή μεθανόλη από βιοκαύσιμα. Η κατάταξη βασίστηκε σε δέκα κριτήρια απόδοσης, συμπεριλαμβανομένων των οικονομικών, περιβαλλοντικών, τεχνικών και κοινωνικών πτυχών. Οι Deniz και Zincir (Deniz & Zincir, 2016) πραγματοποίησαν περιβαλλοντική και οικονομική αξιολόγηση για τέσσερα εναλλακτικά καύσιμα πλοίων, συμπεριλαμβανομένης της μεθανόλης, της αιθανόλης, του LNG και του υδρογόνου και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το LNG είναι το καταλληλότερο ναυτιλιακό καύσιμο μετάβασης, ακολουθούμενο από το υδρογόνο. Οι Ren και Liang (Ren & Liang, 2017) πρότειναν το υδρογόνο ως το πιο βιώσιμο καύσιμο, ακολουθούμενο από συνδυασμό ορυκτής μεθανόλης και υδρογόνου. Σε άλλη μελέτη που δημοσιεύτηκε από τους Ren and Lützen (Ren & Lützen, 2017), η πυρηνική ενέργεια προτάθηκε ως η πιο βιώσιμη εναλλακτική πηγή ενέργειας, ακολουθούμενη από το LNG και την αιολική ενέργεια. Ο Ren (Ren & Lützen, 2017) τονίζει ότι η στάθμιση των διαφόρων κριτηρίων απόδοσης έχει σημαντικό αντίκτυπο στην κατάταξη των εναλλακτικών καυσίμων. Ο Gray (Gray et al., 2021) χρησιμοποίησε το επιβατηγό Pride of Hull ως δείγμα για σύγκριση της απόδοσης καυσίμων και αναγνώρισε το βιομεθάνιο και τη βιομεθανόλη ως πολλά υποσχόμενα καύσιμα μετάβασης, ενώ το υδρογόνο και η αμμωνία αποτελούν μια πρόταση με μακροπρόθεσμη προοπτική. Ο Foretich (Foretich et al., 2021), μέσω εμπειρικής διερεύνησης, ποσοτικοποίησε τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες που παρουσιάζουν τα εναλλακτικά καύσιμα για ναυτιλιακές εφαρμογές και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι μελλοντικά τα βιοκαύσιμα έχουν εξαιρετικές προοπτικές. Επιπλέον, με βάση



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

μα έρευνα αιχμής που πραγματοποιήθηκε για την απανθρακοποίηση της ναυτιλιακής βιομηχανίας μέσω της ανάλυσης 294 εργασιών που δημοσιεύθηκαν από το 2000 έως το 2020, καταδεικνύεται ότι ο κυριότερος ερευνητικός όγκος θα πρέπει να επικεντρωθεί σε βιοκαύσιμα χαμηλού κόστους, τα οποία έχουν υψηλές δυνατότητες (Romano & Yang, 2021). Ωστόσο, ο Xing (Xing et al., 2021) πρότεινε τη μεθανόλη ως το πλέον υποσχόμενο εναλλακτικό καύσιμο, λαμβάνοντας υπόψη ότι το πράσινο υδρογόνο και η αμμωνία θα μπορούσαν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο σε ναυτιλιακές δραστηριότητες μικρότερης εμβέλειας. Πέραν αυτών, διάφοροι παράγοντες της ναυτιλιακής βιομηχανίας, όπως η DNV.GL (DNV.GL., 2019b) και η ABS, πραγματοποίησαν επίσης αξιολόγηση εναλλακτικών καυσίμων. Η ABS, με τη δημοσίευσή του «Low Carbon Shipping Outlook», προσδιόρισε την πράσινη αμμωνία και το υδρογόνο ως μελλοντικά καύσιμα μηδενικού άνθρακα (ABS, 2019). Γενικά, η κατάταξη των εναλλακτικών καυσίμων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο των καυσίμων που περιλαμβάνονται στην αξιολόγηση, τα κριτήρια απόδοσης που χρησιμοποιούνται και τη βαρύτητα που δίνεται σε κάθε κριτήριο.

Σε πρόσφατες μελέτες, έχει τονιστεί η σημασία της ανάλυσης και αξιολόγησης του κύκλου ζωής (WTW), καθώς αποδεικνύεται ότι είναι το καταλληλότερο μέτρο για την μέτρηση της απόδοσης ενός καυσίμου. Η επιλογή της πρώτης ύλης και των μεθόδων παραγωγής του καυσίμου αποδεδειγμένα έχουν μεγάλο αντίκτυπο στις συνολικές εκπομπές άνθρακα και στο κόστος του. Επικεντρώνοντας μόνο στη διαδικασία του μετασχηματισμού του καυσίμου στο τελικό στάδιο (Tank-To-Wake, TTW) μπορεί να σχηματίσουμε διαστρεβλωμένη εντύπωση. Για παράδειγμα, η καύση του υδρογόνου δεν απελευθερώνει CO<sub>2</sub>, αλλά εάν το υδρογόνο παράγεται από ορυκτά καύσιμα χωρίς να δεσμεύεται και να αποθηκεύεται ο άνθρακας, τότε η χρήση του ως καύσιμο δεν μπορεί να θεωρηθεί απανθρακοποιημένη. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται η αξιολόγηση WTW στην ανάλυση καυσίμου. Σήμερα το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας έχει επικεντρωθεί στην οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση του κύκλου ζωής του καυσίμου. Ωστόσο, η ενεργειακή αξιολόγηση (WTW) των καυσίμων πλοίων δεν έχει λάβει αρκετή προσοχή. Ο Winebrake (Winebrake et al., 2007) χρησιμοποίησε το μοντέλο συνολικής Ανάλυσης Ενέργειας & Εκπομπών Θαλάσσιων Συστημάτων (Total Energy & Emissions Analysis of Marine Systems, TEAMS) για την ανάλυση των εκπομπών του κύκλου ζωής των καυσίμων και της χρήσης ενέργειας για έξι περιπτώσεις μεθόδων παραγωγής, όπου περιλαμβάνονται πέντε με προέλευση από ορυκτά καύσιμα και μία από ανανεώσιμη πηγή βιοντίζελ (TEAMS, n.d.). Το μοντέλο TEAMS προκύπτει με βάση τα παραγόμενα αέρια του θερμοκηπίου, τις εκπομπές που υπάγονται σε



Κωνσταντίνος Σταθάς

“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”

ρυθμιστικά πλαίσια και την ενέργεια που χρησιμοποιείται στη μεταφορά, δηλαδή το μοντέλο (Greenhouse gases, Regulated Emissions and Energy use in Transportation, GREET). Υπολογίζει την ενέργεια που χρησιμοποιείται για τις διάφορες μεθόδους παραγωγής, μεταφοράς και εν τέλει χρήσης (συνολική διαδρομή) του καυσίμου για διαφορετικά θαλάσσια σκάφη. Ωστόσο, υπάρχει ακόμη περιορισμένη διαθέσιμη βιβλιογραφία σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας του κύκλου ζωής εναλλακτικών καυσίμων όπως το H<sub>2</sub>, η NH<sub>3</sub> και η MEOH. Η ανάπτυξη μιας τέτοιας μοντελοποίησης απαιτεί πολλές εισροές δεδομένων καθώς περιλαμβάνει πολλαπλές διαδικασίες από την επεξεργασία της πρώτης ύλης μέχρι τον καθορισμό διαδικασιών μεταφοράς και τη χρήση των καυσίμων επί του πλοίου. Ως εκ τούτου, η προσομοίωση ASPEN χρησιμοποιείται εδώ για την αξιολόγηση της ενέργειας κύκλου ζωής. Έχει διεξαχθεί μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα στάδια παραγωγής διαφόρων εναλλακτικών καυσίμων για τη λήψη επαρκών δεδομένων για τη μοντελοποίηση ASPEN. Η παρούσα εργασία στοχεύει να δώσει μια ενδελεχή αξιολόγηση ναυτιλιακών καυσίμων ενσωματώνοντας την ενεργειακή αξιολόγηση και συνδυάζοντάς τη με άλλες σημαντικές παραμέτρους για ακριβέστερη σύγκριση.

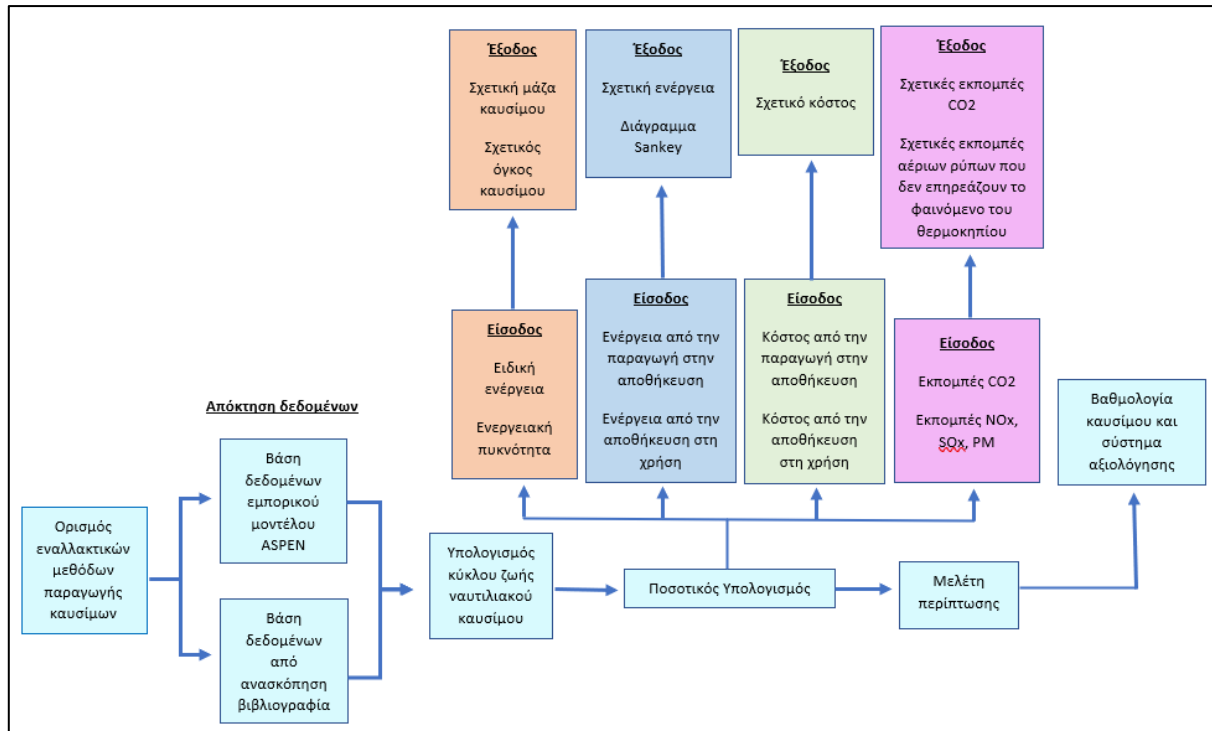
Σε αυτή την έρευνα, συμπεριλήφθηκαν συνολικά 22 εναλλακτικές μεθοδεύσεις, που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα επιλογών καυσίμων που διατίθενται στην αγορά. Στα κριτήρια απόδοσης συμπεριλήφθηκαν, η ενέργεια κύκλου ζωής και το επίπεδο ετοιμότητας της τεχνολογίας. Η εργασία ποσοτικοποίησε τις δυνατότητες διαφόρων εναλλακτικών καυσίμων συγκρίνοντας τις τιμές της μάζας, του όγκου, της ενέργειας, του κόστους, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και μη για τον κύκλο ζωής μεταξύ των περιπτώσεων. Η διαφορά μεταξύ των εναλλακτικών καυσίμων και του συμβατικού μαζούτ για μια σειρά παραμέτρων ποσοτικοποιήθηκε ως αναλογία προς την περίπτωση αναφοράς (HFO), δηλαδή προέκυψαν σχετικές τιμές, που επέτρεψαν μια οπτικοποίηση της απόκλισης μεταξύ των διαφόρων περιπτώσεων. Επιπλέον, συμπεριλήφθηκε ένα παράδειγμα που βασίζεται σε καθορισμένους συντελεστές στάθμισης για επιλεγμένα κριτήρια απόδοσης για να δείξει την εφαρμογή αυτών των αποτελεσμάτων στην ανάλυση καυσίμων πλοίων. Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τον τύπο, το μέγεθος ή τη μεταφορική ικανότητα του πλοίου και τη διαδρομή του ταξιδιού, ως μέρος της αξιολόγησης.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία της εργασίας. Η ενότητα 3 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα μιας ποσοτικής αξιολόγησης (Ενότητα 3.1) και ενός παραδείγματος αξιολόγησης (Ενότητα 3.2). Η ενότητα 4 περιλαμβάνει μια ανασκόπηση, ενώ η ενότητα 5 συνοψίζει τα συμπεράσματα.



## 2. ΜΕΘΟΔΟΙ

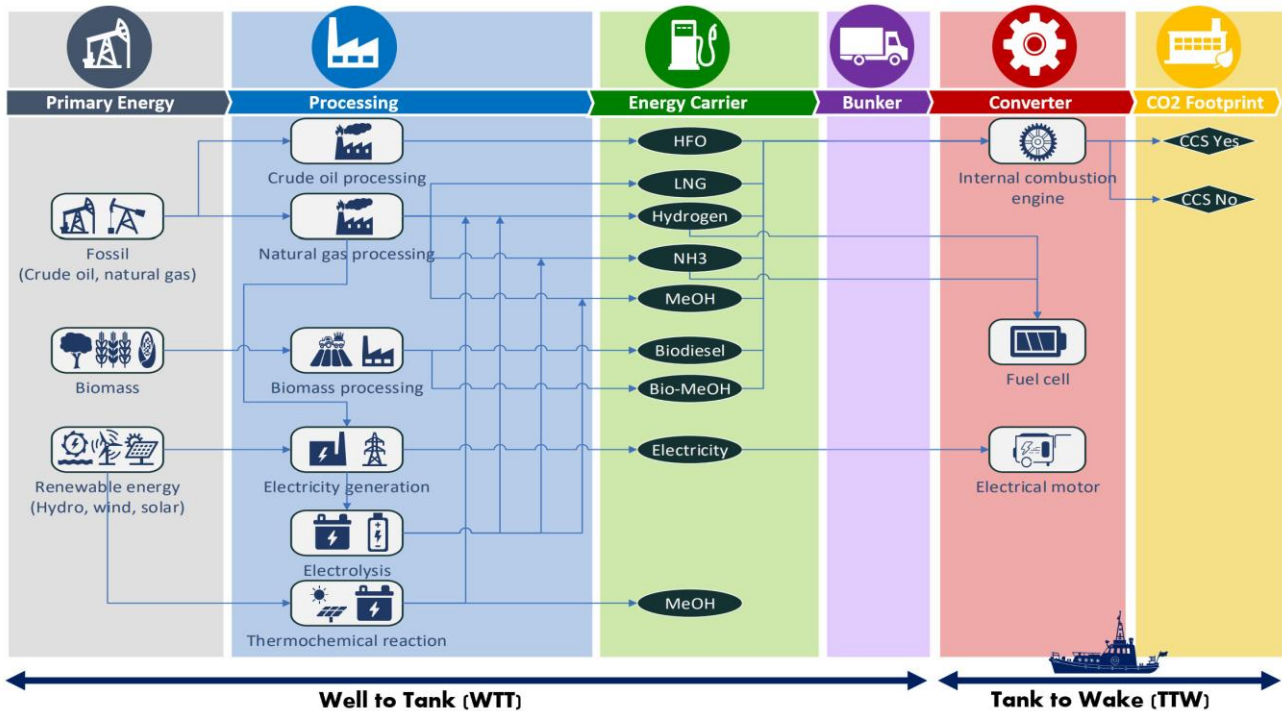
Το Σχήμα 1 συνοψίζει τη διαδικασία της ροής ενεργειών για την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Η εργασία ξεκίνησε από τον καθορισμό των διαφορετικών περιπτώσεων καυσίμων,



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής ερευνητικής διαδικασίας.

ακολουθούμενο από την απόκτηση δεδομένων για τη δημιουργία βάσης δεδομένων με σκοπό την ποσοτική αξιολόγηση ναυτιλιακών καυσίμων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν ποσοτικές εκτιμήσεις και σύγκριση μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών επιλογών. Τέλος, ένα παράδειγμα που συνδυάζει ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση επιλεγμένο για να καταδειχθεί η εφαρμογή των αποτελεσμάτων.

Το Σχήμα 2 και ο Πίνακας 1 (Li, 2021) δείχνουν τις 22 περιπτώσεις που μελετήθηκαν εδώ. Αυτές διαχωρίζονται λόγω της διαφορετικής πρωτογενούς πηγής ενέργειας (ορυκτά καύσιμα, βιομάζα ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας), της επεξεργασίας, των φορέων ενέργειας και των συστημάτων πρόωσης (παλινδρομικές μηχανές και κυψέλες καυσίμου). Κάποιες μέθοδοι περιλάμβαναν εγκατάσταση τεχνολογιών δέσμευσης άνθρακα ώστε η σύγκριση να είναι συνεπής. Το μαζούτ χωρίς την παραπάνω τεχνολογία συμπεριλήφθηκε για λόγους αναφοράς.



Σχήμα 2: Πιθανές μέθοδοι παραγωγής ναυτιλιακών καυσίμων. Με ακρωνύμια CCS: Δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα, EM: Ηλεκτρικός κινητήρας, FC: Κυψέλη καυσίμου, ICE: Κινητήρας εσωτερικής καύσης, LNG: Υγροποιημένο φυσικό αέριο, MeOH: Μεθανόλη. (Li, 2021)

Πιθανές Μέθοδοι Παραγωγής Ναυτιλιακών Καυσίμων	Συντομογραφίες
Περίπτωση 1: (Περίπτωση Αναφοράς) Crude–HFO–ICE (1)	HFO (Base case)
Περίπτωση 2: Crude–HFO–ICE–CCS	HFO (CCS)
Περίπτωση 3: NG–LNG–ICE	LNG
Περίπτωση 4: NG–LNG–ICE–CCS	LNG (CCS)
Περίπτωση 5: NG–H <sub>2</sub> –ICE	BLUE H <sub>2</sub>
Περίπτωση 6: NG–H <sub>2</sub> –FC	BLUE H <sub>2</sub> (FC)
Περίπτωση 7: NG–NH <sub>3</sub> –ICE	BLUE NH <sub>3</sub>
Περίπτωση 8: NG–NH <sub>3</sub> –FC	BLUE NH <sub>3</sub> (FC)
Περίπτωση 9: NG–MeOH–ICE	MEOH
Περίπτωση 10: NG–MeOH–ICE–CCS	BLUE MEOH (CCS)
Περίπτωση 11: NG–Electricity–EM	NG-E
Περίπτωση 12: NG–Electricity–H <sub>2</sub> –FC (2)	BLUE E-H <sub>2</sub> (FC)
Περίπτωση 13: NG–Electricity–NH <sub>3</sub> –FC (2)	BLUE E-NH <sub>3</sub> (FC)
Περίπτωση 14: NG–Electricity–MeOH–ICE (2)	BLUE E-MEOH
Περίπτωση 15: Biomass–Biodiesel–ICE (3)	BIO-DIESEL
Περίπτωση 16: Biomass–Bio-MeOH–ICE (3)	BIO-MEOH
Περίπτωση 17: Solar–Electricity–EM	SOLAR E
Περίπτωση 18: Solar–Electricity–H <sub>2</sub> –FC	SOLAR E-H <sub>2</sub> (FC)
Περίπτωση 19: Solar–Electricity–NH <sub>3</sub> –FC	SOLAR E-NH <sub>3</sub> (FC)
Περίπτωση 20: Solar–Electricity–MeOH–ICE	SOLAR E-MEOH
Περίπτωση 21: Solar–Thermochemical–H <sub>2</sub> -FC	SOLAR T-H <sub>2</sub> (FC)
Περίπτωση 22: Solar–Thermochemical–MeOH	SOLAR T-MEOH





- (1) HFO (Περίπτωση 1) συμπεριλαμβάνεται ως περίπτωση αναφοράς.
- (2) NG-electricity-derived fuels: Καύσιμα που παράγονται από φυσικό αέριο (NG) με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας (Περιπτώσεις 12, 13,14) συμπεριλαμβάνονται για λόγους πληρότητας.
- (3) Βιοκαύσιμα (Περιπτώσεις 15, 16) υποθέτουμε ότι έχουν ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα και δεν απαιτείται σύστημα δέσμευσής του (CCS) (Li, 2021).

Πίνακας 1: Πιθανές μέθοδοι παραγωγής ναυτιλιακών καυσίμων.

Πρωτίστως έπρεπε να αποκτηθούν δεδομένα ενέργειας και κόστους για να χρησιμοποιηθούν ως εισροές για τον υπολογισμό. Σε αυτή την εργασία, η απόκτηση δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση αποτελεσμάτων προσομοίωσης από την εμπορική έκδοση του προγράμματος ASPEN και από πληροφορίες που εξήχθησαν από βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Το ASPEN HYSYS, ως κορυφαίος προσομοιωτής χημικών διεργασιών, έχει ένα αποκλειστικό πακέτο ιδιοτήτων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και των αντιδράσεων των υδρογονανθράκων (Linde, n.d.-a). Επιπρόσθετα, με τα ενσωματωμένα ενεργειακά και οικονομικά εργαλεία ανάλυσης, το ASPEN μπορεί να προσφέρει με συνέπεια υπολογισμούς ενέργειας και κόστους. Σε αυτή την έρευνα, η προσομοίωση ASPEN HYSYS χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί η ενεργειακή ένταση και το κόστος καθώς τα υπάρχοντα δεδομένα είναι περιορισμένα για την παραγωγή ναυτιλιακών καυσίμων με μεθόδους που βρίσκονται ακόμα υπό ανάπτυξη. Αν και ορισμένα άρθρα έχουν αναφέρει την ενεργειακή ένταση και το κόστος παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων μεμονωμένα, διαφορετικοί ερευνητές μπορεί να προβαίνουν σε διαφορετικές υποθέσεις και γνωμοδοτήσεις, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε ασυνέπεια των παραγόντων ενέργειας και κόστους. Εδώ, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο ASPEN που καλύπτει τις περιπτώσεις που βασίζονται στα ορυκτά και τη βιομάζα, ενώ για περιπτώσεις που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Το μοντέλο ASPEN καλύπτει τις περισσότερες διαδικασίες που εμπλέκονται σε όλο τον κύκλο ζωής του καυσίμου, εξαιρουμένων των μετατροπών ενέργειας όπως, οι μηχανές εσωτερικής καύσης (Internal Combustion Engines, ICE), οι κυψέλες καυσίμου και οι ηλεκτρικοί κινητήρες για τους οποίους, σε αυτή τη μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία της βιβλιογραφίας. Η μοντελοποίηση ASPEN καλύπτει μόνο τα ναυτιλιακά καύσιμα που έχουν βάση τα ορυκτά και τη βιομάζα, κατασκευασμένα συμφώνως ενός υποδείγματος μοντέλου ASPEN (ASPEN HYSYS., 2019). Για καύσιμα με βάση το φυσικό αέριο, το υπόδειγμα ASPEN που χρησιμοποιήθηκε έχει τίτλο «μοντέλο εγκατάστασης φυσικού αερίου» και περιλαμβάνει την επεξεργασία της πρώτης ύλης από την κεφαλή του φρέατος του κοιτάσματος μέχρι το στάδιο της ανάκτησης των υγρών υδρογονανθράκων που εντοπίζονται μέσα στο φυσικό αέριο (Natural Gas Liquids, NGL), που



με τη σειρά της αποτελείται από τη «γλύκανση» του φυσικού αερίου για την απομάκρυνση όξινων αερίων, την αφυδάτωση για αφαίρεση της περίσσειας νερού, και στη συνέχεια την ανάκτηση των NGL ώστε να διαχωριστεί από τους υδρογονάνθρακες με πιο ογκώδη μοριακή δομή το μεθάνιο και να παραχθεί τελικά ένα καθαρό ρεύμα μεθανίου. Μετά την ανάκτηση των NGL, το πλούσιο σε μεθάνιο ρεύμα τροφοδοτεί επακόλουθες παραγωγικές μονάδες για την έναρξη παραγωγής διαφόρων τύπων ναυτιλιακών καυσίμων. Σε αυτή την έρευνα, η ακολουθία των σταδίων επεξεργασίας ναυτιλιακών καυσίμων μοντελοποιήθηκε με βάση τις εμπορικές διαδρομές παραγωγής. Για παράδειγμα, η παραγωγή H<sub>2</sub> βασίστηκε στο εργοστάσιο παραγωγής υδρογόνου της Linde (Aspentech, 2021), η οποία ξεκινά με αναμόρφωση μεθανίου με ατμό, ακολουθούμενη από μία αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου, και τέλος το H<sub>2</sub> διαχωρίζεται και καθαρίζεται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία απορόφησης μεταβαλλόμενης πίεσης (Pressure Swing Absorption, PSA) πριν ψυχθεί κρυογονικά σε συνθήκες αποθήκευσης -253 °C σε ατμοσφαιρική πίεση. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα μοντέλα προσομοίωσης ASPEN διατίθενται στο Παράρτημα Α.

Επιπλέον, η διαδικασία δέσμευσης άνθρακα διαμορφώθηκε επίσης με βάση την τεχνολογία γλυκαντικών του παραδείγματος ASPEN με τίτλο «μοντέλο εγκατάστασης φυσικού αερίου» (SourGas, n.d.) για την αφαίρεση του CO<sub>2</sub> από τα αέρια εξάτμισης κινητήρα εσωτερικής καύσης, εάν απαιτείται. Δείτε τον Πίνακα 2 (Li, 2021) για χρήσιμες αναφορές που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μοντελοποίηση ASPEN. Στην περαιτέρω προσομοίωση χρησιμοποιώντας το ASPEN, τα ενεργειακά και οικονομικά εργαλεία ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν για λεπτομερή προσομοίωση κόστους και ενέργειας. Πληροφορίες για άλλες περιπτώσεις που δεν μπορούσαν να προσομοιωθούν χρησιμοποιώντας το ASPEN αποκτήθηκαν από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Οι πηγές αναφέρονται επίσης στον Πίνακα 2.

Πηγές Βάσης Δεδομένων		Μοντέλο ASPEN Βιβλιογραφίας		Ανασκόπηση
Πιθανές Μέθοδοι Παραγωγής Ναυτιλιακών Καυσίμων	Παραπομπές	Βάση Δεδομένων Ενέργειας	Βάση Δεδομένων Κόστους	
Περίπτωση Αναφοράς: Crude–HFO–ICE	(DNV.GL., 2019a)	(The Engineers Post., 2021)		
Crude–HFO–ICE–CCS	(SourGas, n.d.), (DNV.GL., 2019a)	(The Engineers Post., 2021)		
NG–LNG–ICE	(Ekwonu, 2013)	(The Engineers Post., 2021)	(DNV.GL., 2019b)	



NG-LNG-ICE-CCS	(SourGas, n.d.),(Ekwonu, 2013)	(The Engineers Post., 2021)	
NG-H2-ICE	(Aspentech, 2021),(Ekwonu, 2013)	(The Engineers Post., 2021)	(DNV.GL., 2019b)
NG-H2-FC	(Aspentech, 2021)	(Machinery Spaces., n.d.),(Olabode, 2021)	(DNV.GL., 2019b)
NG-NH3-ICE	(Ekwonu, 2013),(Linde, n.d.-b),(Essential Chemical Industry, 2016)	(The Engineers Post., 2021)	(DNV.GL., 2019b)
NG-NH3-FC	(Linde, n.d.-b),(Essential Chemical Industry, 2016)	(Machinery Spaces., n.d.),(Olabode, 2021)	
NG-MeOH-ICE	(Ekwonu, 2013)	(The Engineers Post., 2021)	(DNV.GL., 2019b)
NG-MeOH-ICE-CCS	(SourGas, n.d.),(Ekwonu, 2013)	(The Engineers Post., 2021)	
NG-Electricity-EM	(Ekwonu, 2013),(Inside mines, n.d.),(Greed, n.d.),(Siemens, n.d.)	(Machinery Spaces., n.d.),(Storm, 2021)	(DNV.GL., 2019b)
NG-Electricity-H2-FC	(Ekwonu, 2013)	(Machinery Spaces., n.d.),(Olabode, 2021),(Burton et al., 2021)	
NG-Electricity-NH3-FC	(Ekwonu, 2013)	(Machinery Spaces., n.d.),(Olabode, 2021),(Storm, 2021),(Burton et al., 2021)	
NG-Electricity-MeOH-ICE	(Ekwonu, 2013)	(The Engineers Post., 2021),(Storm, 2021),(Burton et al., 2021)	
Biomass-Biodiesel-ICE	(Rafieyan, 2020)	(The Engineers Post., 2021)	(DNV.GL., 2019b)
Biomass-Bio-MeOH-ICE	N.A.	(The Engineers Post., 2021)	
Solar-Electricity-EM	N.A.	(Machinery Spaces., n.d.)	(HomeGuide., n.d.)



Solar–Electricity– H2–FC	N.A.	(Machinery Spaces., n.d.),(Olabode, 2021),(Burton et al., 2021),(Scottish Government., 2020)	(DNV.GL., 2019b),(HomeGuide., n.d.)
Solar–Electricity– NH3–FC	N.A.	(The Engineers Post., 2021),(Olabode, 2021),(Burton et al., 2021)	(DNV.GL., 2019b),(HomeGuide., n.d.)
Solar–Electricity– MeOH–ICE	N.A.	(The Engineers Post., 2021),(Burton et al., 2021)	(HomeGuide., n.d.)
Solar– Thermochemical– H2–FC	N.A.	(Machinery Spaces., n.d.),(Olabode, 2021)	(HomeGuide., n.d.)
Solar– Thermochemical– MeOH	N.A.	(The Engineers Post., 2021)	(HomeGuide., n.d.)

Πίνακας 2: Πηγές της βάσης δεδομένων για την αξιολόγηση των ναυτιλιακών καυσίμων (Ανατρέξτε στους πίνακες A1 και A2 στο Παράρτημα Β για λεπτομέρειες).

Χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέχθηκαν από την προσομοίωση ASPEN και τη βιβλιογραφία προέκυψαν, η ενέργεια, το κόστος, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και οι εκπομπές λοιπών αερίων ρύπων ανά μονάδα ενέργειας πρόωσης. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της ενεργειακής απόδοσης και του κόστους, καθώς και του προφίλ εκπομπών οποιωνδήποτε πλοίων όταν χρησιμοποιούνταν διαφορετικά καύσιμα. Για το σύστημα πρόωσης παλινδρομικού κινητήρα, χρησιμοποιήθηκε τυπική απόδοση 45%, λαμβανόμενη ως μέση τιμή μεταξύ παλαιών και νεότερων πλοίων. Η ίδια απόδοση χρησιμοποιήθηκε για όλα τα καύσιμα, με την υπόθεση ότι η βασική τεχνολογία του κινητήρα δεν θα άλλαζε δραστικά όσον αφορά την απόδοση με εναλλαγή καυσίμου. Η ακριβής τιμή δεν είχε σημασία κατά τη σύγκριση του σχετικού κόστους και ενέργειας του κύκλου ζωής των εναλλακτικών καυσίμων που χρησιμοποιούν το ίδιο σύστημα πρόωσης. Αντιθέτως, η ακριβής τιμή απόδοσης ήταν σημαντική για σύγκριση με συστήματα κυψελών καυσίμου, αλλά οι τιμές του 45% που επιλέχθηκαν θεωρούμε ότι επαρκούν, δεδομένης της αβεβαιότητας που σχετίζεται με την απόδοση των κυψελών καυσίμου.

Τα διαγράμματα ροής ενέργειας Sankey σχεδιάστηκαν για να αναπαραστήσουν τη ροή ενέργειας του κύκλου ζωής κατά τη χρήση διαφορετικών καυσίμων επί του σκάφους. Σε αυτή την έρευνα, χρησιμοποιήθηκε το διαδικτυακό λογισμικό Sankey-MATIC, που παρήχθη από τον Steve Bogart, για τη δημιουργία των διαγραμμάτων Sankey (Steve Bogart, n.d.). Με σκοπό



την υποβοήθηση της απεικόνισης, χρησιμοποιήθηκαν πολλά χρώματα για να αναπαραστήσουν τις διαφορετικές ενεργειακές ροές. Το κόκκινο χρώμα αντιπροσωπεύει τις απώλειες ενέργειας από διάφορες διεργασίες κατά τη διάρκεια της παραγωγής του ναυτιλιακού καυσίμου και τη μετατροπή ενέργειας, ενώ τα υπόλοιπα χρώματα, συμπεριλαμβανομένων των γκρι, μπλε και πράσινου χρησιμοποιήθηκαν για να υποδείξουν την υπολειπόμενη ενέργεια προώσεως από τα ορυκτά καύσιμα, τα μπλε καύσιμα και τα πράσινα καύσιμα, αντίστοιχα. Η αριστερή στήλη του διαγράμματος Sankey συμβολίζει τη συνολική ενέργεια που απαιτείται από την πρωτογενή πηγή ώστε να παραχθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας πρόωσης για όλες τις περιπτώσεις. Η συνολική ενέργεια πρόωσης εμφανίζεται στην δεξιότερη στήλη του διαγράμματος Sankey. Τα διαγράμματα Sankey εμφανίζονται εδώ για ορισμένα καύσιμα και εκτενέστερα στα παραρτήματα.

Τέλος, τα συστήματα δέσμευσης άνθρακα χρησιμοποιήθηκαν είτε στη φάση παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων χωρίς άνθρακα και με βάση ορυκτά ( $H_2$ ,  $NH_3$ ,  $MeOH$ ), ή στη φάση χρήσεως για το μαζούτ και το υγροποιημένο φυσικό αέριο. Και στις δύο περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε μια απόδοση κατακράτησης της τάξης του 90%. Λεπτομέρειες δίνονται στο παράρτημα. Για το LNG, εκτιμήσεις για ανεξέλεγκτη διαφυγή/εκπομπές μεθανίου ( $CH_4$ ) στη φάση παραγωγής περιλαμβάνονται επίσης, ώστε να καταλήξουμε σε εκτιμήσεις εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ισοδύναμων του διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ).

Μετά τον ποσοτικό υπολογισμό της ενέργειας, των εκπομπών και του κόστους από το ASPEN, τα υποκειμενικά κριτήρια αξιολόγησης των καυσίμων ορίστηκαν με βάση διάφορα σημαντικά χαρακτηριστικά ενός ιδανικού ναυτιλιακού καυσίμου, όπως δίνονται παρακάτω:

1. Υψηλή ειδική ενέργεια ( $kJ/kg$ ) και ενεργειακή πυκνότητα ( $kJ/m^3$ ) για χαμηλή μάζα καυσίμου και όγκο αποθήκευσης.
2. Λιγότερη ένταση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος παραγωγής για ένα ανταγωνιστικό από άποψη κόστους καύσιμο.
3. Χαμηλές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κύκλου ζωής ( $g CO_2e/kJ$ ) και δυνατότητα επίτευξης μείωσης του άνθρακα κατά 50% έως το 2050.
4. Χαμηλές εκπομπές μη θερμοκηπιακών αερίων ( $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $PM$ ) κύκλου ζωής για συμμόρφωση με τους κανονισμούς ECA του IMO.
5. Η δυνατότητα κλιμάκωσης της παραγωγής καυσίμου για να μπορεί να καλύψει την πρόσθετη ζήτηση από τη ναυτιλία εκτός από την υπάρχουσα ζήτηση του κλάδου.



6. Η ασφαλής χρήση επί του σκάφους, με στενό εύρος αναφλεξιμότητας, μη τοξικό, μη διαβρωτικό και η ύπαρξη διαθεσιμότητας κανονιστικού πλαισίου και κατευθύνσεων για την εφαρμογή επί του σκάφους.

7. Ωριμη τεχνολογία που περιλαμβάνει υποδομές ανεφοδιασμού, μετατροπείς ενέργειας και εγκαταστάσεις παραγωγής.

Με βάση αυτά τα ιδανικά χαρακτηριστικά του ναυτιλιακού καυσίμου, πραγματοποιήθηκε μια ποσοτική ανάλυση μέσω σύγκρισης των μετρήσιμων χαρακτηριστικών των εναλλακτικών καυσίμων. Οι τιμές των μετρήσιμων χαρακτηριστικών ελήφθησαν χρησιμοποιώντας τις βάσεις δεδομένων που συγκεντρώθηκαν και έπειτα αυτές οι τιμές διαιρέθηκαν με τις τιμές αναφοράς του μαζούτ για να ληφθούν οι αδιάστατες σχετικές τιμές. Στην αξιολόγηση αυτή συμπεριλήφθηκαν 6 παράμετροι απόδοσης όπως καταγράφονται παρακάτω. Το αποτέλεσμα της αξιολόγησης σχολιάζεται στην Ενότητα 3.1.

1. Σχετική μάζα.
2. Σχετικός όγκος.
3. Σχετική ενέργεια κύκλου ζωής.
4. Σχετικό κόστος κύκλου ζωής.
5. Σχετικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπιου.
6. Σχετικές εκπομπές λοιπών αέριων ρύπων.

Ωστόσο, καθώς η δυναμική ενός εναλλακτικού καυσίμου επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, επιπρόσθετα των μετρήσιμων χαρακτηριστικών του, άλλα κριτήρια όπως η δυνατότητα αύξησης της παραγωγής, η ασφάλεια χρήσης, η διαθεσιμότητα κανονισμών και κατευθυντήριων γραμμών για το χειρισμό του και το επίπεδο ωρίμανσης της σχετικής τεχνολογίας θα επηρεάσουν επίσης τη δυνατότητα εφαρμογής του σε μεγάλη κλίμακα. Ως εκ τούτου, για τη διευκόλυνση της χάραξης πολιτικής και των οικονομικών αποφάσεων, παρέχεται ένα λεπτομερές παράδειγμα με τη συμπερίληψη τόσο ποσοτικών όσο και ποιοτικών κριτηρίων. Στον Πίνακα 3 (Li, 2021) περιλαμβάνονται όλες οι παράμετροι του παραδείγματος με τους αντίστοιχους συντελεστές στάθμισης. Οι τιμές των παραγόντων στάθμισης έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη βαθμολογία και κατάταξη των ναυτιλιακών καυσίμων. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ο ορισμός και οι τιμές στάθμισης των παραγόντων αυτών στην παρούσα εργασία, όπου σκοπός είναι η επίδειξη της διαδικασίας.



Τα ποιοτικά κριτήρια διαχωρίστηκαν σε 3 κατηγορίες βαθμολογίας, με την υψηλότερη να αντιστοιχεί σε 10 πόντους (που αντιπροσωπεύεται από πράσινο κύκλο), ακολουθούμενη από την μεσαία με 7 πόντους (αντιπροσωπεύεται από ένα κίτρινο τετράγωνο), και τέλος τη χαμηλότερη με 4 πόντους (που αντιπροσωπεύεται από ένα κόκκινο τρίγωνο). Αυτό το σύστημα βαθμολογίας χρησιμοποιήθηκε για τον ποσοτικό προσδιορισμό των ποιοτικών κριτηρίων. Ο πρώτος παράγοντας, που είναι η δυνατότητα κλιμάκωσης της παραγωγής, σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενέργειας κατά κανόνα, η πρωτογενής ενέργεια θα πρέπει να ικανοποιεί την τρέχουσα ζήτηση από τις υπάρχουσες βιομηχανίες προτού να προμηθεύσει την παραγωγή ναυτιλιακών καυσίμων και ως εκ τούτου, ένα καύσιμο κατηγοριοποιείται ως απίθανο να αξιοποιηθεί εάν η τρέχουσα παραγωγή του δεν είναι σε θέση να εκπληρώσει την τρέχουσα ζήτηση από άλλους κλάδους. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η ασφάλεια του καυσίμου, η οποία προσδιορίστηκε ποσοτικά με βάση τα επίπεδα ευφλεκτότητας, τοξικότητας και διαβρωτικότητας. Στη συνέχεια αξιολογήθηκε, η διαθεσιμότητα κανονισμών και κατευθυντήριων γραμμών για τον ανεφοδιασμό και τον χειρισμό επί του πλοίου. Η τεχνολογική ωριμότητα εκτιμήθηκε με βάση το τρέχων επίπεδο της εκάστοτε τεχνολογίας· ενώ ορισμένες τεχνολογίες που έχουν ήδη εμπορευματοποιηθεί έλαβαν την υψηλότερη βαθμολογία, άλλες που είναι διαθέσιμες σε μικρή κλίμακα και σε κατάσταση έρευνας και ανάπτυξης κατηγοριοποιήθηκαν κάτω από τη μεσαία και τη χαμηλότερη βαθμολογία αντίστοιχα. Δείτε τον Πίνακα 4 (Li, 2021) για την περίληψη του συστήματος βαθμολόγησης.

	<b>Αξιολόγηση Ναυτιλιακού Καυσίμου</b>	<b>Βαρύτητα (%)</b>
Ποσοτικοί παράγοντες	Σχετική μάζα καυσίμου επί του πλοίου	7.5%
	Σχετικός όγκος καυσίμου επί του πλοίου	7.5%
	Σχετική ενέργεια κύκλου ζωής (WTW)	20%
	Σχετικό κόστος κύκλου ζωής (WTW)	20%
	Σχετικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τον κύκλο ζωής (WTW)	20%
	Σχετικές εκπομπές μη θερμοκηπιακών αερίων κατά τον κύκλο ζωής (WTW)	5%



Ποιοτικοί παράγοντες	Επεκτασιμότητα παραγωγής καυσίμου	5%
	Ασφάλεια καυσίμου	5%
	Διαθεσιμότητα κανονιστικού πλαισίου και κατευθυντήριων γραμμών	5%
	Ετοιμότητα τεχνολογίας	5%

Πίνακας 3: Κριτήρια αξιολόγησης των ναυτιλιακών καυσίμων και οι αντίστοιχες βαρύτητες τους.

Πηγές Βάσης Δεδομένων	Βαθμολογία = 10	Βαθμολογία = 7	Βαθμολογία = 4
Επεκτασιμότητα παραγωγής καυσίμου	Επεκτάσιμη	Επεκτάσιμη, αλλά με δυσκολίες	Απίθανη
Ασφάλεια καυσίμου	Ασφαλές, μη τοξικό, μη διαβρωτικό	Ενδιάμεσο, έντονα τοξικό, διαβρωτικό	Επικίνδυνο, πολύ τοξικό, πολύ διαβρωτικό
Διαθεσιμότητα κανονιστικού πλαισίου και κατευθυντήριων γραμμών	Διαθέσιμο	Απαιτεί τροποποίηση	Μη διαθέσιμο
Ετοιμότητα τεχνολογίας	Εισηγμένη στην αγορά	Μικρής κλίμακας	Έρευνα και ανάπτυξη

Πίνακας 4: Βαθμολογίες και ορισμοί ποιοτικών παραγόντων.



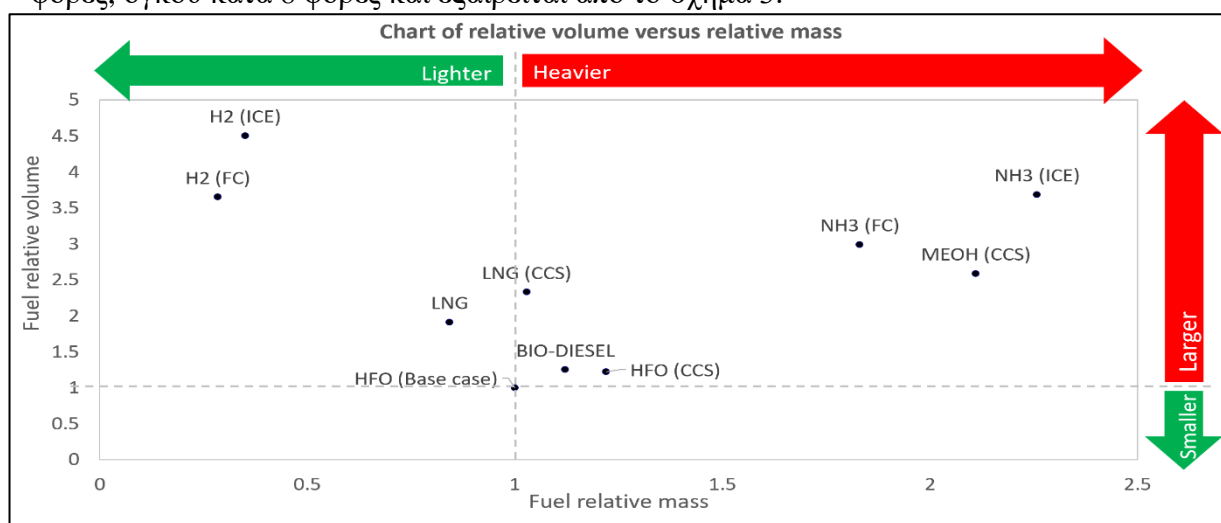


### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 3.1. ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

##### 3.1.1. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΟΓΚΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (kJ/kg) και η ειδική ενέργεια (kJ/m<sup>3</sup>) είναι επιθυμητά χαρακτηριστικά των ναυτιλιακών καυσίμων καθώς υποδεικνύουν ότι το καύσιμο απαιτεί μικρότερη δεξαμενή αποθήκευσης και έχει ελαφρύτερη μάζα. Για ακριβέστερη ένδειξη της μάζας και του όγκου των ναυτιλιακών καυσίμων επί του σκάφους, η συνολική απόδοση του συστήματος και η κατανάλωση ή απώλεια ενέργειας υπολογίζονται για τον προσδιορισμό μάζας και όγκου καυσίμου. Το σχήμα 3 (Li, 2021), δείχνει τη σχετική μάζα και όγκο των εναλλακτικών καυσίμων. Το μαζούτ χωρίς εγκατάσταση CCS χρησιμοποιείται ως βάση αναφοράς. Από το σχήμα 3, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μάζα και ο όγκος της αμμωνίας και της μεθανόλης είναι σχετικά μεγαλύτερα σε σχέση με του μαζούτ. Το υδρογόνο είναι ελαφρύτερο, ωστόσο, ο όγκος αποθήκευσης είναι 3,6 έως 4,5 φορές μεγαλύτερος ανάλογα με τον τύπο των μετατροπέων ενέργειας και, ως εκ τούτου, η χρήση υδρογόνου μπορεί να μην είναι ευνοϊκή για ένα σκάφος μεγάλων αποστάσεων. Αυτό το αποτέλεσμα ευθυγραμμίζεται με τη μάζα και τον όγκο του υδρογόνου που αναφέρθηκαν από τον Mckinlay (McKinlay et al., 2021), ο οποίος δήλωσε πως η απαίτηση όγκου του υδρογόνου βρίσκεται εντός του βιώσιμου εύρους για χρήση εν πλω. Το βιοντίζελ έχουν παρόμοιες ιδιότητες καθώς το HFO, και το LNG έχουν παρόμοια μάζα αλλά είναι 1,9 έως 2,3 φορές μεγαλύτερα σε όγκο. Μεταξύ όλων, το LNG και το βιοντίζελ φαίνεται να είναι τα καταλληλότερα εναλλακτικά καύσιμα. Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας ως φορέα ενέργειας με χρήση παταριών απαιτεί αύξηση βάρους κατά 16 φορές, όγκου κατά 8 φορές και εξαιρείται από το σχήμα 3.



Σχήμα 3: Σχετικές μάζες και όγκοι διαφόρων ναυτιλιακών καυσίμων.

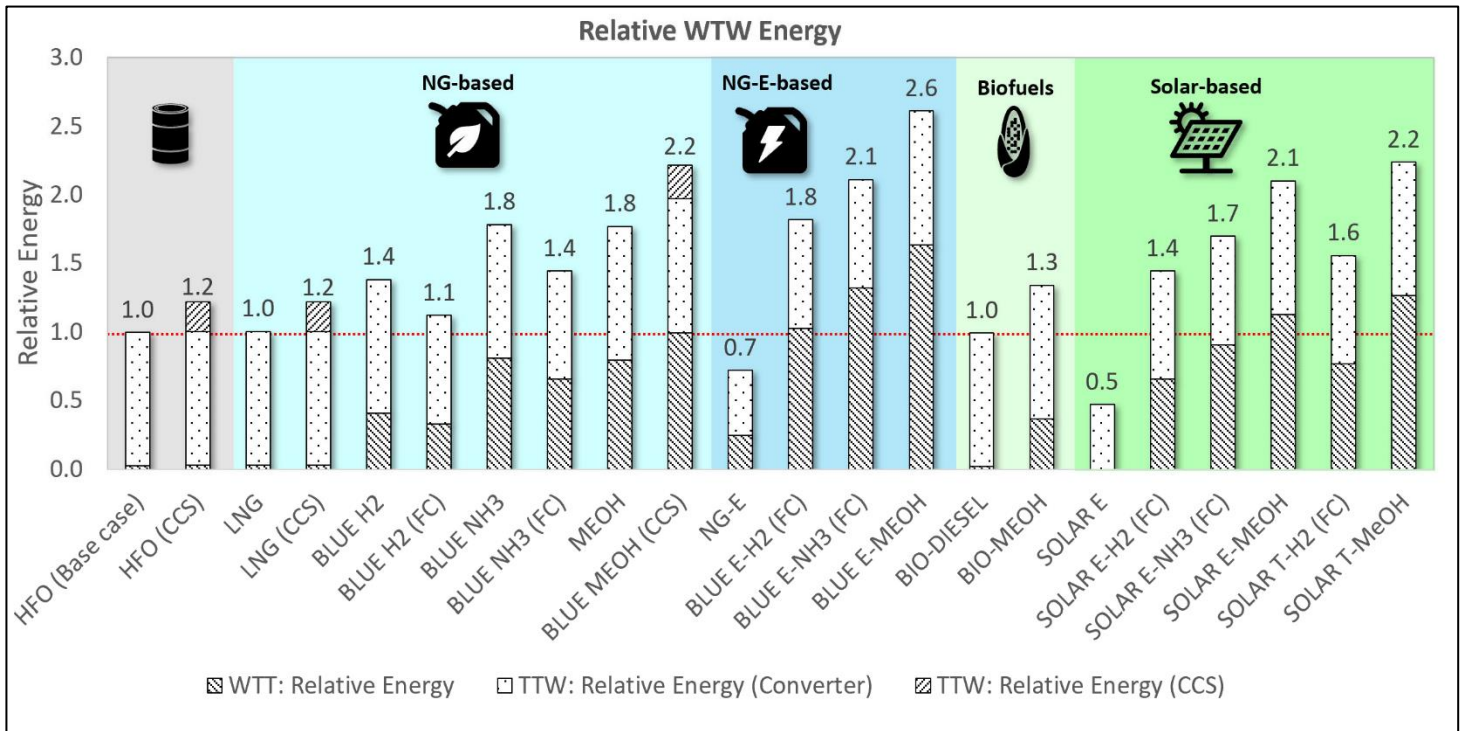


### 3.1.5. ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ

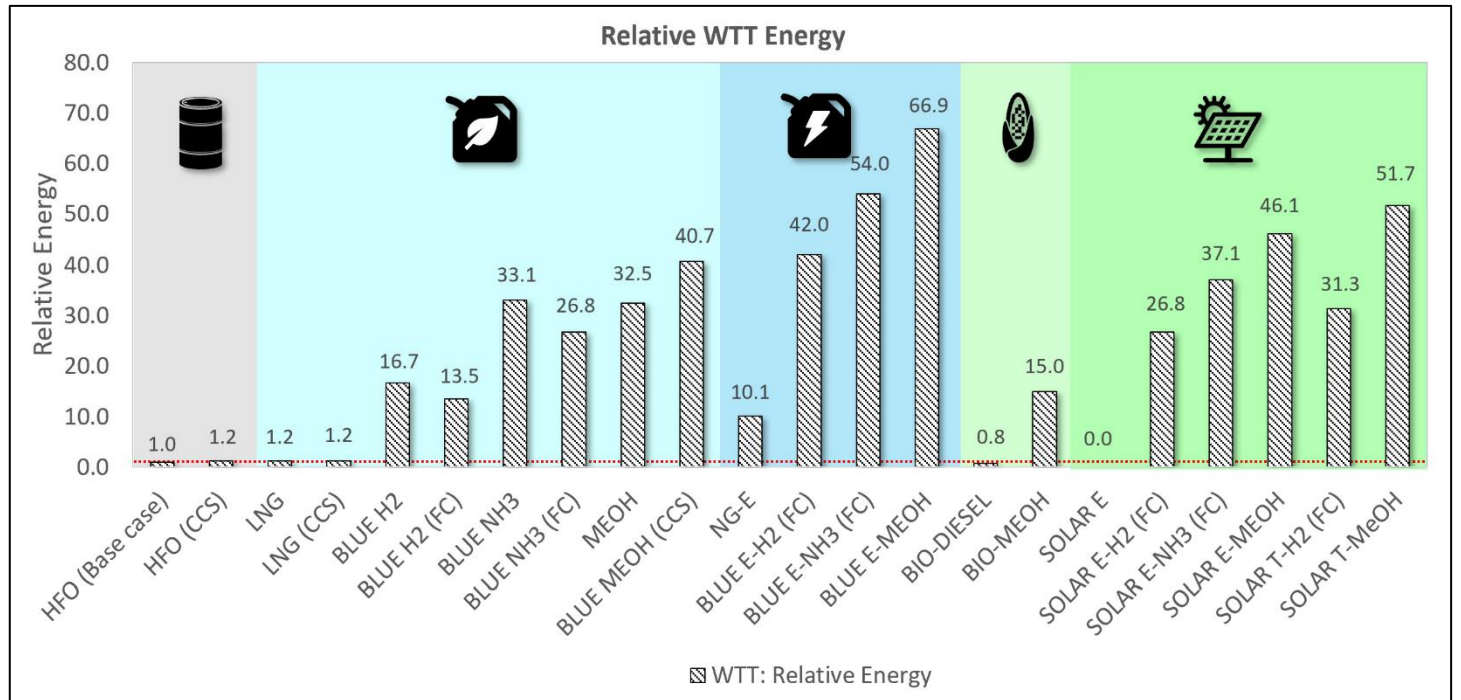
Η κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή και κατανάλωση καυσίμου σχετίζεται στενά με την εξοικονόμησή του. Σε αυτή την ενότητα, η σχετική ενέργεια κύκλου ζωής για διάφορα ναυτιλιακά καύσιμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4 (Li, 2021). Για τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια, η σχετική ενέργεια είναι χαμηλότερη από του μαζούτ, γεγονός που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην εξαιρετικά αποδοτική διαδικασία μετατροπής ενέργειας με χρήση ηλεκτρικών κινητήρων με απόδοση έως και 95%. Στη συνέχεια, η ενέργεια κύκλου ζωής για το βιοντίζελ είναι ισοδύναμη με αυτή του μαζούτ λόγω των απλών διαδικασιών παραγωγής του με λιγότερες απώλειες ενέργειας. Ωστόσο, δεδομένου ότι η περίπτωση αναφοράς (HFO) δεν είναι καύσιμο μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα, απαιτείται εγκατάσταση κατάλληλου συστήματος δέσμευσης άνθρακα. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι για το μαζούτ ακόμη και με χρήση του παραπάνω συστήματος δεν μηδενίζονται οι εκπομπές άνθρακα λόγω της ρεαλιστικής απόδοσης δέσμευσης του άνθρακα (90%) που χρησιμοποιούμε (δείτε την Ενότητα 3.1.4 για περισσότερες λεπτομέρειες). Από το Σχήμα 4, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι απαιτείται περίπου 20% επιπλέον ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος δέσμευσης άνθρακα, γεγονός που καθιστά τις διαδρομές που το χρησιμοποιούν πιο ενεργοβόρες από την ηλεκτρική ενέργεια, το βιοντίζελ και το υδρογόνο με βάση το φυσικό αέριο με κυψέλη καυσίμου ως μετατροπέα ενέργειας. Όλα τα υπόλοιπα εναλλακτικά καύσιμα όπως η αμμωνία και η μεθανόλη που παράγονται από διαφορετικές πρώτες ύλες και το πράσινο υδρογόνο είναι συγκριτικά μεγαλύτερης εντάσεως ενέργειας από το μαζούτ με εγκατάσταση CCS, γεγονός που τα καθιστά λιγότερο ελκυστικά από πλευράς ενέργειας. Είναι επίσης ενδιαφέρον να διερευνηθεί η κατανάλωση ενέργειας σε επιμέρους τμήματα του κύκλου ζωής, όπως αυτό της παραγωγής έως την αποθήκευση (Well-To-Tank, WTT) και από την αποθήκευση έως τη χρήση (Tank-To-Wake, TTW), τα οποία φαίνονται στα σχήματα 5 και 6 (Li, 2021). Γενικά, η κατανάλωση ενέργειας για το τμήμα TTW σχετίζεται με την απόδοση των μετατροπέων ενέργειας. Σε αυτή τη μελέτη περιλαμβάνονται τρεις τύποι μετατροπέων ενέργειας: μια μηχανή εσωτερικής καύσης, μία κυψέλη καυσίμου και ένας ηλεκτρικός κινητήρας με ενεργειακή απόδοση 45% (The Engineers Post., 2021), 60% (Olabode, 2021) και 92,5% (Machinery Spaces., n.d.), αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, η απώλεια ενέργειας κατά την παραγωγή καυσίμου WTT παρουσιάζει μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ εναλλακτικών μεθόδων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5, η κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου, αμμωνίας και μεθανόλης είναι 13 έως 67 φορές υψηλότερη από τη συμβατική παραγωγή ορυκτών καυσίμων. Η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο της



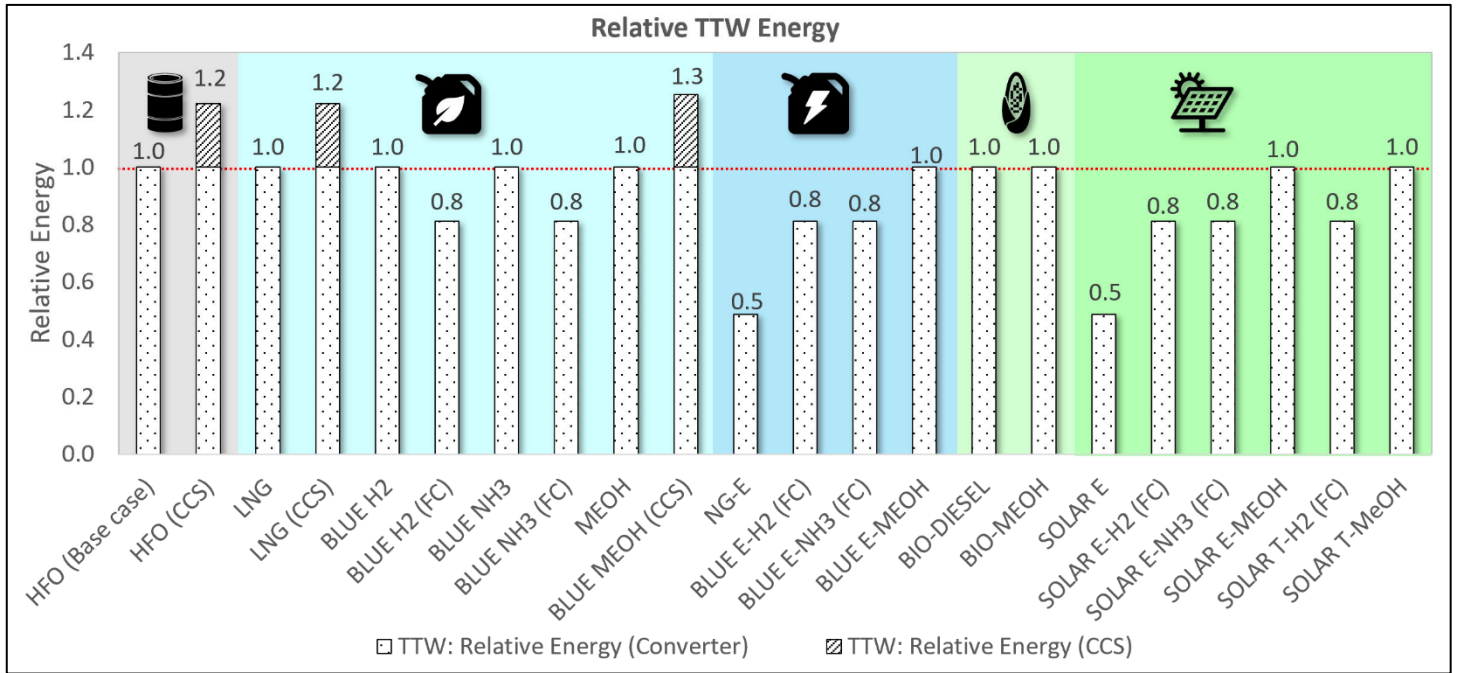
πρώτης ύλης και τις διεργασίες που εμπλέκονται κατά την παραγωγή καυσίμου. Για παράδειγμα, η παραγωγή Αμμωνίας από αναμόρφωση ατμού φυσικού αερίου καταναλώνει 26,8 φορές περισσότερη ενέργεια από την παραγωγή του μαζούτ, ενώ η παραγωγή της από ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνει 37,1 φορές περισσότερη ενέργεια. Στην επόμενη παράγραφο οπτικοποιούνται τα αίτια αυτής της τεράστιας ενεργειακής διαφοράς.



Σχήμα 4: Σχετική ενέργεια κύκλου ζωής, χωρισμένη στη συνεισφορά των τμημάτων α) εξόρυξης/παραγωγής έως την αποθήκευση (Well-to-tank) και β) αποθήκευσης έως και τη χρήση (Tank-to-wake).



Σχήμα 5: Σχετική ενέργεια εξόρυξης/παραγωγής έως την αποθήκευση (Well-to-tank) εναλλακτικών καυσίμων.

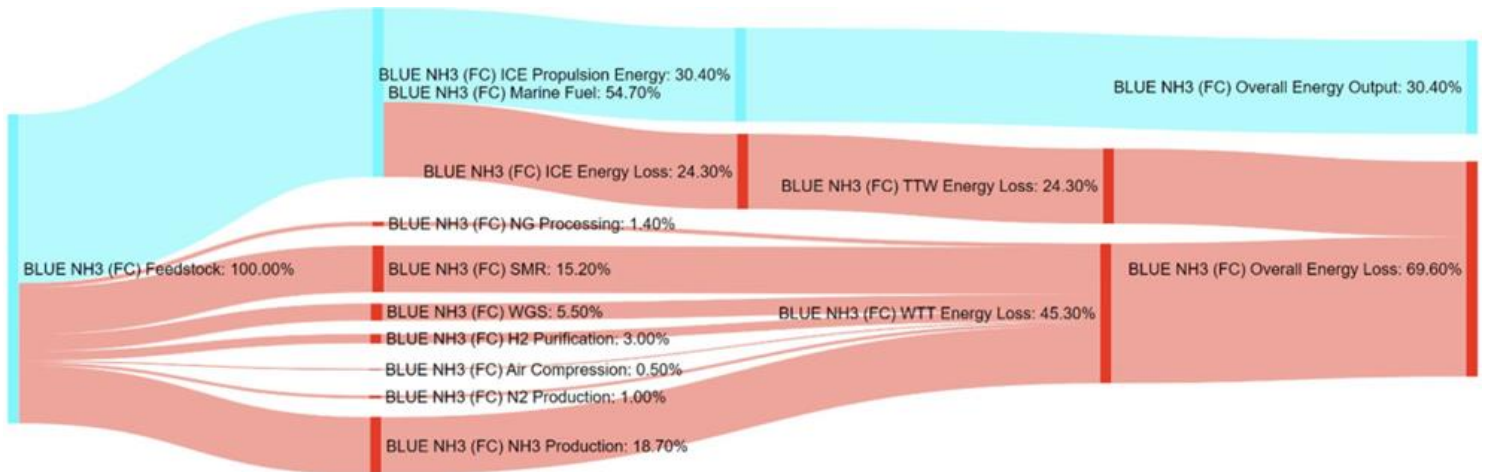


Σχήμα 6: Σχετική ενέργεια αποθήκευσης έως και τη χρήση (Tank-to-wake) εναλλακτικών καυσίμων.

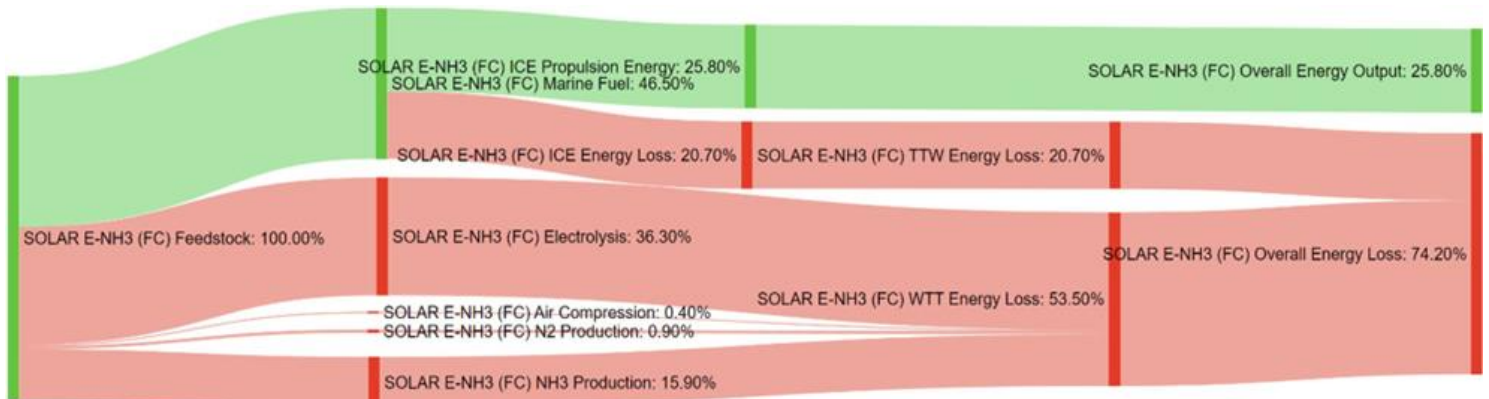
Ένα από τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του κύκλου ζωής με χρήση ASPEN είναι ότι επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των απωλειών ενέργειας, που απεικονίζονται εδώ με διαγράμματα Sankey. Από το διάγραμμα Sankey στο σχήμα 7, μπορούμε να παρατηρήσουμε πώς καταναλώνεται το σύνολο της ενέργειας και ότι το 30,4% απομένει για την πρόωση του πλοίου. Επιπλέον, περίπου το 45,3% της ενέργειας από την πρώτη ύλη χάνεται κατά την παραγωγή καυσίμου, με την πλειονότητα της απώλειας ενέργειας να εντοπίζεται στην αναμόρφωση του μεθανίου με χρήση ατμού (Steam Methane Reforming, SMR) και την παραγωγή αμμωνίας. Στη συνέχεια, από το 54,7% της ενέργειας που απομένει μετά την παραγωγή καυσίμου, μόνο το 30,4% της ενέργειας μετατρέπεται σε ενέργεια πρόωσης, ενώ το 24,3% χάνεται στην κυψέλη καυσίμου και τον ηλεκτρικό κινητήρα κατά τη μετατροπή ενέργειας. Συγκρίσεις της ροής ενέργειας μεταξύ διαφόρων μεθόδων μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα Sankey. Για παράδειγμα, η παραγωγή αμμωνίας από αναμόρφωση ατμού φυσικού αερίου και από ηλιακή ηλεκτρόλυση έχουν διαφορετική συνολική ενεργειακή απόδοση με τη διαφορά να απεικονίζεται χρησιμοποιώντας διαγράμματα Sankey στα σχήματα 7 και 8 (Li, 2021). Όπως φαίνεται σε αυτά τα σχήματα, το 53,5% της ενέργειας χάνεται κατά τη διαδικασία της παραγωγής αμμωνίας από ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια, ποσοστό υψηλότερο από το 45,3% που χάνεται αν η αμμωνία παραχθεί από αναμόρφωση ατμού φυσικού αερίου. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην εξαιρετικά ενεργοβόρα διαδικασία ηλεκτρόλυσης, η οποία καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από τη διαδικασία αναμόρφωσης (SMR). Εν κατακλείδι, η αμμωνία που παράγεται και από τις δύο αυτές



περιπτώσεις είναι πολύ ενεργοβόρα σε σύγκριση με τις μεθόδους παραγωγής άλλων ορυκτών καυσίμων. Περιλαμβάνονται διαγράμματα Sankey για τις λοιπές περιπτώσεις στο Παράρτημα Γ, Εικόνες A9–A30. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να βοηθήσουν τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και ανάπτυξης τεχνολογίας να οπτικοποιήσουν τη συνολική ροή ενέργειας των κύκλων ζωής των ναυτιλιακών καυσίμων.



Σχήμα 7: Διάγραμμα ροής ενέργειας Sankey για αμμωνία που παράγεται μέσω αναμόρφωσης μεθανίου με υδρατμό.



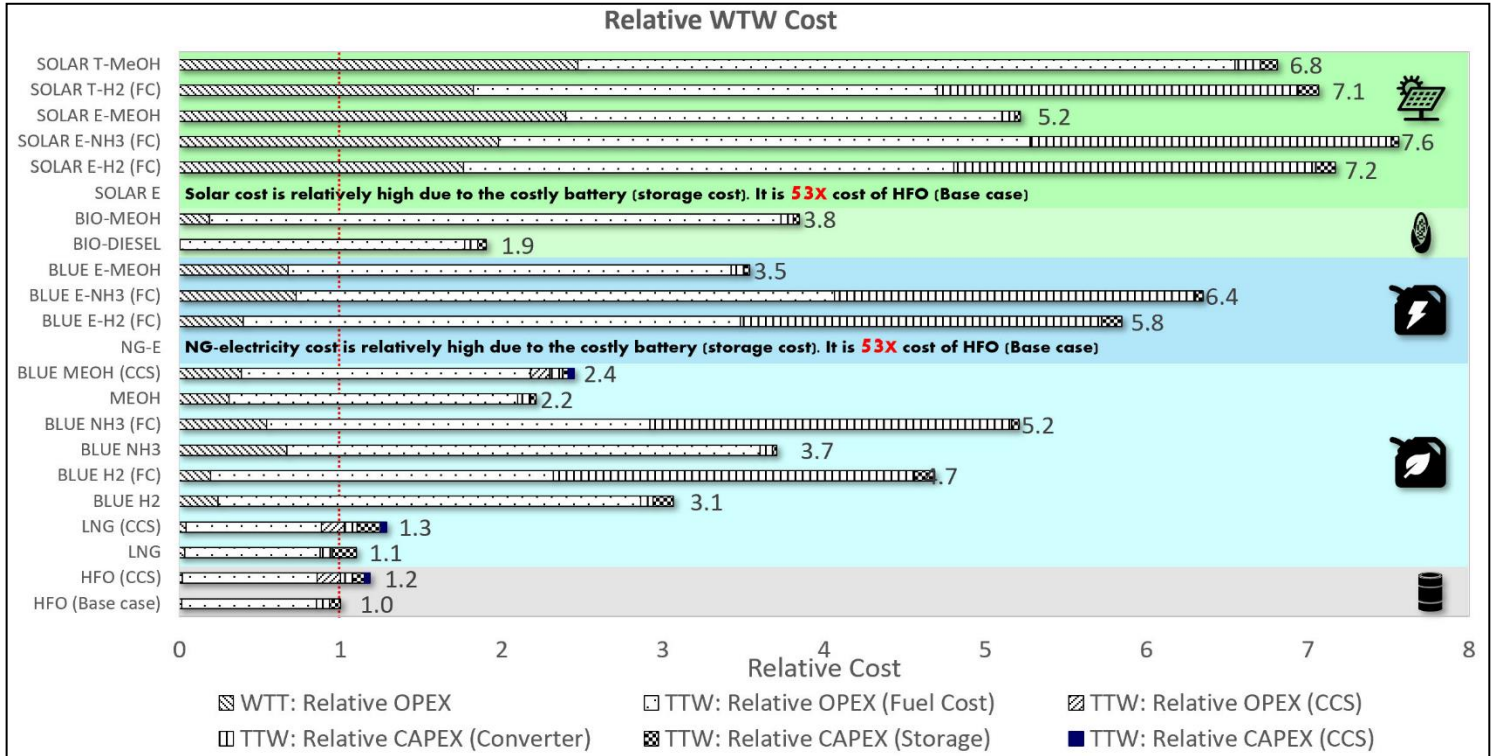
Σχήμα 8: Διάγραμμα ροής ενέργειας Sankey για αμμωνία που παράγεται μέσω ηλιακής ενέργειας και της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης.

### 3.1.5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Το Σχήμα 9 (Li, 2021) δείχνει το συνολικό κόστος των διαφόρων εναλλακτικών επιλογών σε σχέση με το κόστος αναφοράς του μαζούτ. Από το γράφημα, φαίνεται ότι η εγκατάσταση συστημάτων δέσμευσης άνθρακα είναι η φθηνότερη λύση για την απαθρακοποίηση της ναυτιλιακής βιομηχανίας, η οποία θα αύξανε το συνολικό κόστος κατά 20% περίπου, ενώ η μετάβαση στο υγροποιημένο φυσικό αέριο με εγκατάσταση αντίστοιχων συστημάτων θα αύξανε το συνολικό κόστος κατά 30% και το βιοντίζελ θα αύξανε το συνολικό κόστος κατά 90%. Εναλλακτικά, η μετάβαση σε μεθανόλη απαιτεί αύξηση κατά τουλάχιστον 220% του



συμβατικού συνολικού κόστους καυσίμου ενώ η μετάβαση σε υδρογόνο και αμμωνία που παράγεται χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους θα αύξανε συνολικά το κόστος κατά περισσότερο από 300%, λόγω του υψηλού κόστους λειτουργίας (TTW) και του κεφαλαιακού κόστους των μετατροπέων ενέργειας όπως οι κυψέλες καυσίμου.



Σχήμα 9: Σχετικό κόστος κύκλου ζωής, χωρισμένο στη συνεισφορά των τμημάτων α) εξόρυξης/παραγωγής έως την αποθήκευση (Well-to-tank) και β) αποθήκευσης έως και τη χρήση (Tank-to-wake).

Παρόμοια τάση με αυτή που εμφανίζεται στην κατανάλωση ενέργειας από την παραγωγή στην αποθήκευση (WTT), ακολουθεί και το κόστος παραγωγής καυσίμου που υπολογίζεται ανά μονάδα ενέργειας που καταναλώνεται και αντανακλά τις τεράστιες διαφορές μεταξύ των υπό μελέτη περιπτώσεων. Το κόστος παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων είναι 2 έως 185 φορές υψηλότερο από αυτό του μαζούτ. Ως εκ τούτου, οι παραγωγοί καυσίμων θα ήταν απρόθυμοι να παράγουν αυτά τα καύσιμα υψηλής έντασης ενέργειας εκτός εάν μπορούν να τα πουλήσουν σε υψηλότερη τιμή ή η τιμολόγηση επιβάλλεται από κανονισμούς. Για το κόστος χρήσης TTW, το κόστος καυσίμου είναι ο παράγοντας με την μεγαλύτερη συνεισφορά. Το κόστος καυσίμου σχετίζεται στενά με το κόστος της πρώτης ύλης, την πολυπλοκότητα της διαδικασίας, και την ωριμότητα του κλάδου παραγωγής του (Balcombe, 2019). Επομένως, εάν μπορούν να παραχθούν εναλλακτικά καύσιμα χρησιμοποιώντας πιο ώριμη τεχνολογία και σε χαμηλότερες τιμές, η μετάβαση σε αυτά φαίνεται να είναι οικονομικότερη.



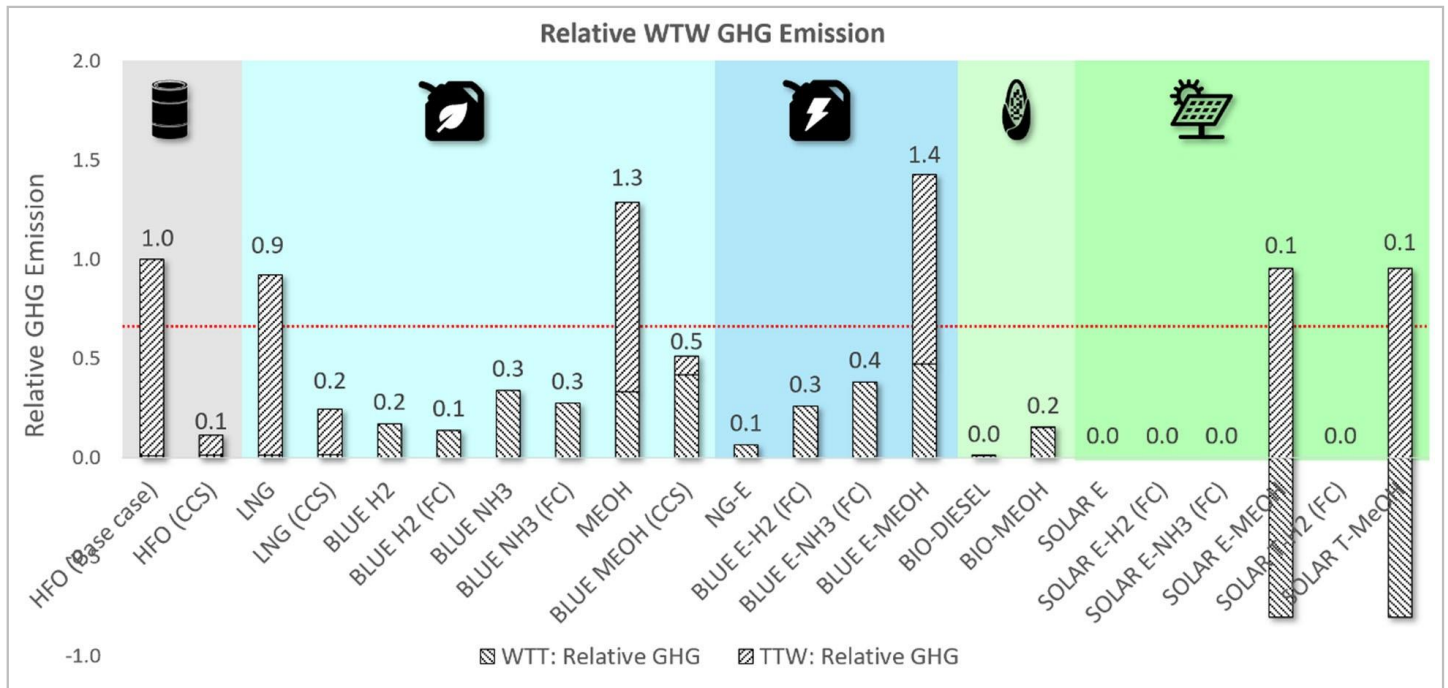
### 3.1.5. ΣΧΕΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΚΥΚΛΟ ΖΩΗΣ

Εκτός από το κόστος των καυσίμων, μια σημαντική ποσοτική εκτίμηση πρέπει να γίνει και για τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Οι εκπομπές GHG του κύκλου ζωής είναι ένας δείκτης της περιβαλλοντικής απόδοσης του καυσίμου, ο οποίος αντιπροσωπεύει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ξεκινώντας από την παραγωγή μέχρι το στάδιο κατανάλωσης του. Γενικά, όλες οι περιπτώσεις ναυτιλιακών καυσίμων με βάση το φυσικό αέριο περιλαμβάνουν ποσότητες μεθανίου, λόγω διαφυγής του, στις συνολικές εκπομπές τους. Ωστόσο, η διαφυγή μεθανίου από τις μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν LNG θεωρείται ότι είναι αμελητέα λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας σχετικά με την ποσότητα που διαφεύγει στο περιβάλλον, επιπλέον πολλοί κατασκευαστές έχουν ισχυριστεί ότι η εν λόγω διαφυγή από τους κινητήρες έχει εξαλειφθεί σε μεγάλο βαθμό λόγω της συνεχούς τεχνολογικής βελτίωσης (Chambers, 2021). Υποθέτουμε ότι το 90% του άνθρακα που εκπέμπεται από την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μπλε καυσίμων κατακρατείται από κατάλληλα συστήματα. Εν συνέχεια, το βιοντίζελ θεωρείται ουδέτερο ως προς τον άνθρακα λαμβάνοντας υπόψη ότι η βιομάζα καταναλώνει CO<sub>2</sub> κατά τη φάση ανάπτυξης της. Η παραγωγή μεθανόλης μέσω της μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια καταναλώνει διοξείδιο του άνθρακα, άρα η ποσότητα καταναλισκόμενου άνθρακα στη σύνθεση μεθανόλης υπολογίζεται ως μείωση και θα λαμβάνεται υπόψη ως αρνητική ποσότητα άνθρακα στον προσδιορισμό της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου κύκλου ζωής. Ανάλυση των παραπάνω εκπομπών παρουσιάζεται στο Σχήμα 10 (Li, 2021).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, το μαζούτ, το υγροποιημένο φυσικό αέριο και η μεθανόλη είναι μεταξύ των καυσίμων με τις υψηλότερες εκπομπές άνθρακα κατά το στάδιο χρήσης τους (TTW) και, ως εκ τούτου, απαιτείται η εγκατάσταση συστημάτων δέσμευσης άνθρακα για να καταστούν χαμηλές οι εκπομπές τους στο στάδιο αυτό, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται με τις στήλες HFO (CCS), LNG (CCS) και BLUE MEOH (CCS). Συμπερασματικά, το HFO και το LNG γίνονται πιο «καθαρά» με συνολικές εκπομπές άνθρακα τόσο χαμηλές όσο το 10 έως 20% αυτών των συμβατικών καυσίμων πλοίων. Ωστόσο, το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει μόνο με την προϋπόθεση ότι το CCS είναι σε θέση να συλλάβει το 90% των εκπομπών CO<sub>2</sub> στο ρεύμα των καυσαερίων. Με την ενσωμάτωση CCS, αυτές οι διαδρομές καυσίμου θα ήταν ισάξιες με το μπλε υδρογόνο και την αμμωνία όσον αφορά τις εκπομπές άνθρακα. Παρατηρούμε ότι οι εκπομπές της μεθανόλης είναι από τις υψηλότερες



γεγονός στο οποίο συμβάλλουν οι υψηλές εκπομπές άνθρακα κατά τη διαδικασία παραγωγής και επεξεργασίας της (WTT), όπως αναφέρεται και στην πηγή (Balcombe, 2019). Όλες οι περιπτώσεις υδρογόνου και αμμωνίας παρουσιάζουν χαμηλότερες εκπομπές GHG από τα συμβατικά HFO και LNG. Τα πράσινα καύσιμα που παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής-ηλεκτρικής ενέργειας, του πράσινου υδρογόνου και της πράσινης αμμωνίας, έχουν μηδενικές εκπομπές άνθρακα σε όλο τον κύκλο ζωής τους, ενώ η πράσινη μεθανόλη έχει μόνο 10% εκπομπές άνθρακα συγκριτικά. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (όπως το αποτύπωμα άνθρακα της μεταποίησης ηλιακών πάνελ και ανεμογεννητριών) δεν περιλαμβάνονται λόγω αβεβαιότητας σχετικά με τα μεγέθη τους. Για λόγους συνέπειας, τυχόν εκπομπές GHG που σχετίζονται με την κατασκευή των εγκαταστάσεων παραγωγής των άλλων καυσίμων επίσης δεν περιλαμβάνονται.



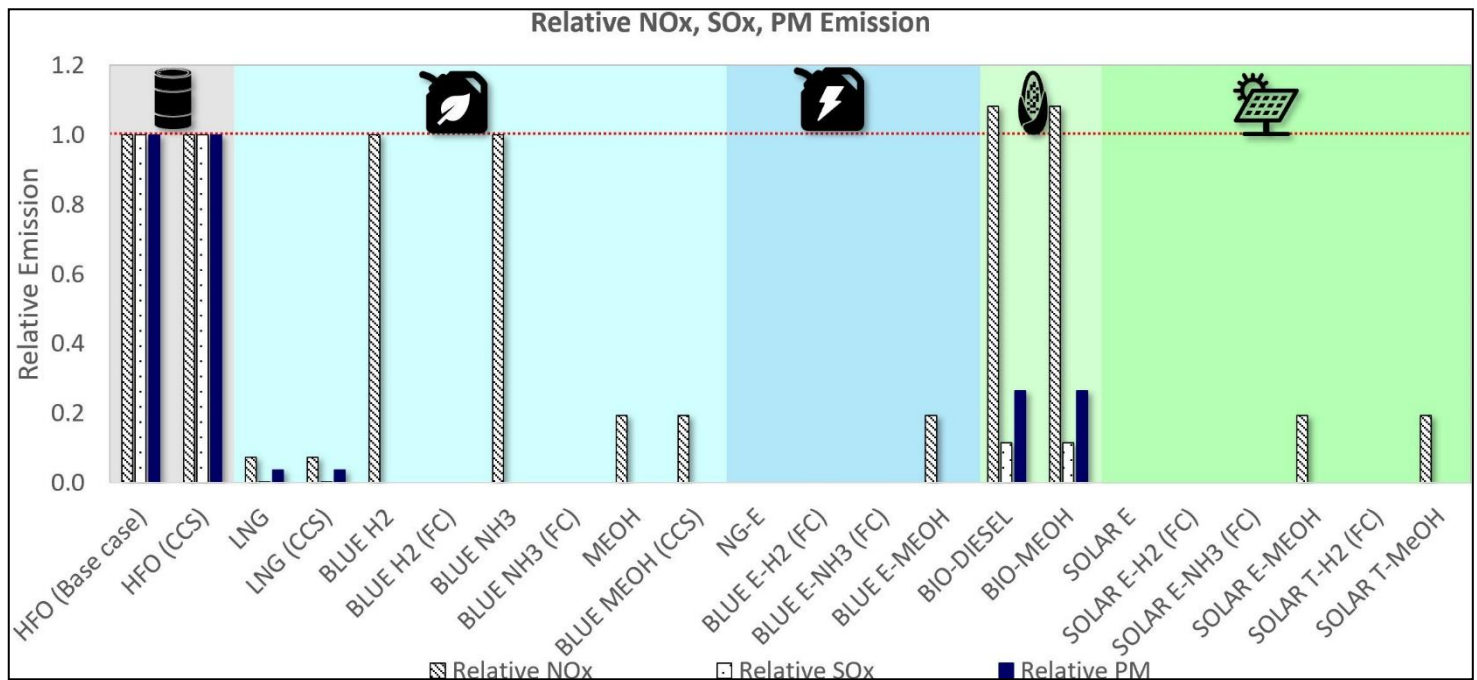
Σχήμα 10: Σχετικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τον κύκλο ζωής, χωρισμένες στη συνεισφορά των τμημάτων α)εξόρυξης/παραγωγής έως την αποθήκευση (Well-to-tank) και β) αποθήκευσης έως και τη χρήση(Tank-to-wake).

Άλλοι ρύποι, συμπεριλαμβανομένων των NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> και PM, πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη. Από το σχήμα 11 (Li, 2021), διακρίνουμε ότι σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να μειωθούν οι εκπομπές αυτών των ρύπων, εκτός από τα βιοκαύσιμα, τα οποία τείνουν να έχουν παρόμοιες εκπομπές NO<sub>x</sub> με το μαζούτ, (Gilbert et al., 2018). Υπάρχουν κάποιες ενδείξεις ότι τα βιοκαύσιμα μειώνουν τις εκπομπές σωματιδίων (Gilbert et al., 2018), παρατήρηση που συνάδει με το αποτέλεσμα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης που πραγματοποιήθηκε από τον Foretich (Foretich et al., 2021). Οι κυψέλες καυσίμου δεν παράγουν NO<sub>x</sub>, ενώ δεν είναι σαφές εάν οι παλινδρομικοί κινητήρες υδρογόνου παράγουν περισσότερο ή λιγότερο NO<sub>x</sub> από το





μαζούτ. Μπορεί να αναμένεται ότι το υδρογόνο ίσως επιτρέπει τρόπους λειτουργίας όπου θα χρησιμοποιείται καύση με φτωχότερο μίγμα και, ως εκ τούτου, θα παράγεται μικρότερη ποσότητα NO<sub>x</sub>, αλλά έως τώρα οι τεχνολογίες αυτές εξακολουθούν να βρίσκονται σε επίπεδο σχεδιασμού, επομένως δεν μπορούν να επιβεβαιωθούν οι εν λόγω υποθέσεις για την παραγωγή NO<sub>x</sub> από καύση υδρογόνου, αμμωνίας και μεθανόλης. Η αμμωνία θα χρειαζόταν επίσης σημαντική δέσμευση οξειδίων του αζώτου μετά την καύση, εάν και σε παλινδρομικούς κινητήρες, ενώ ενδέχεται να περιμένουμε αμελητέα παραγόμενα NO<sub>x</sub> εάν χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου. Λόγω έλλειψης δεδομένων για την καύση αμμωνίας σε παλινδρομικούς κινητήρες, στο Σχήμα 11, τόσο η NH<sub>3</sub> όσο και το H<sub>2</sub> στους κινητήρες αυτούς έχουν την ίδια τιμή με το μαζούτ. Όμως γίνεται αντιληπτό ότι η NH<sub>3</sub> πιθανώς να χρειάζεται δαπανηρή εκκαθάριση καυσαερίων.



Σχήμα 11: Εκπομπές μη θερμοκηπιακών αερίων (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM) των εναλλακτικών καυσίμων.

### 3.1.5. ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΠΟΣΟΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Το Σχήμα 12 (Li, 2021) συνοψίζει τα αποτελέσματα από την ποσοτική αξιολόγηση συγκεντρώνοντας τις σχετικές τιμές μάζας, όγκου, ενέργειας κύκλου ζωής, κόστους κύκλου ζωής και εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου κύκλου ζωής σε ενιαίο γράφημα. Όσο μικρότερη είναι η σχετική τιμή, τόσο υψηλότερες είναι οι δυνατότητες της μεθόδου παραγωγής και χρήσης του καυσίμου, καθώς τα ιδανικά χαρακτηριστικά των ναυτιλιακών καυσίμων είναι η



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

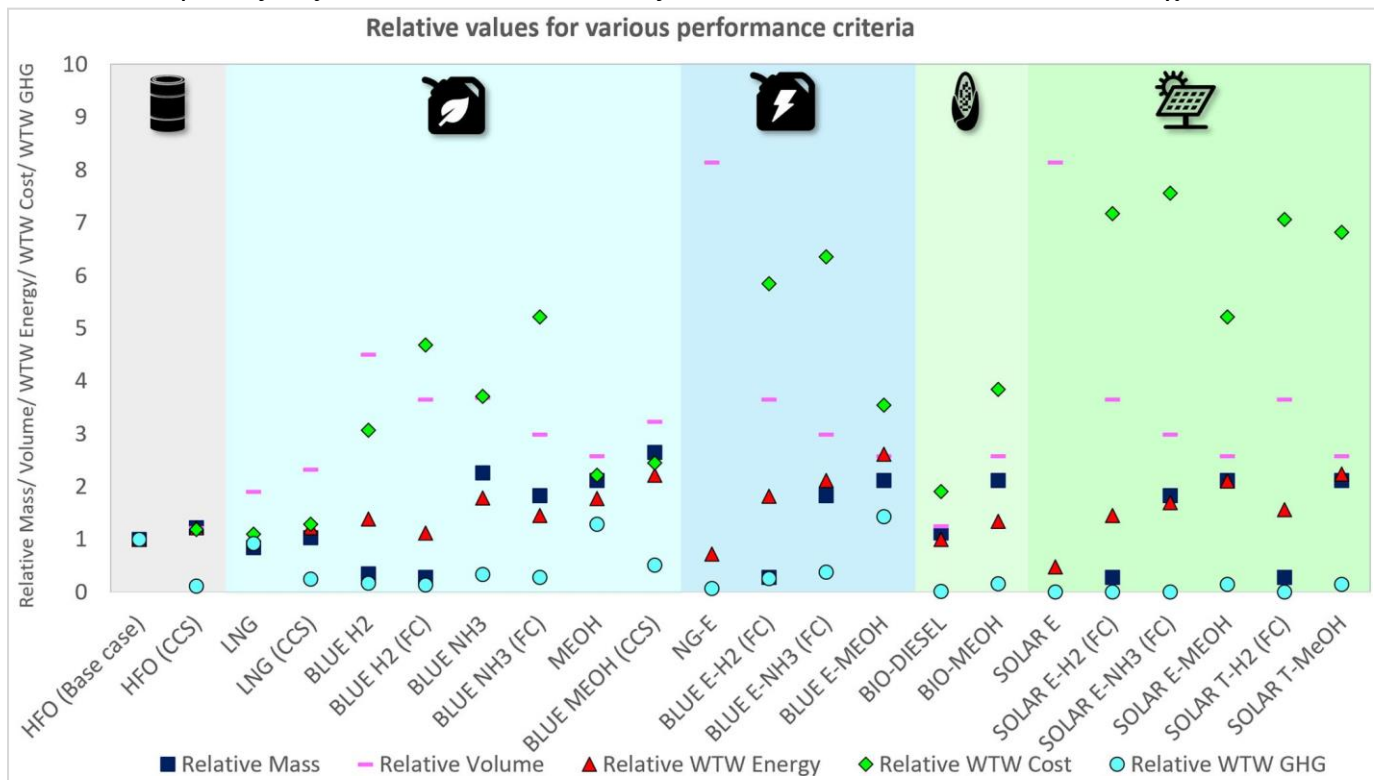
χαμηλή μάζα, ο χαμηλός όγκος, η χαμηλή ενέργεια WTW, το χαμηλό κόστος WTW και οι χαμηλές εκπομπές GHG κατά τον κύκλο ζωής.

Με αναφορά στο Σχήμα 12 και στον Πίνακα 5, οι σχετικές τιμές διαφόρων εναλλακτικών περιπτώσεων μπορούν να συγκριθούν. Για παράδειγμα, το μαζούτ με εγκατάσταση συστήματος δέσμευσης άνθρακα αυξάνει τη μάζα και τον όγκο καυσίμου κατά 22%, την ενέργεια και το κόστος κύκλου ζωής κατά 22% και 18% αντίστοιχα, αλλά οι εκπομπές GHG του WTW μειώνονται κατά 89% σε μόλις 11% σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Ένα άλλο παράδειγμα, που είναι το μπλε υδρογόνο που παράγεται από φυσικό αέριο, έχει 72% μείωση μάζας καυσίμου αλλά 265% αύξηση του όγκου του. Η παραγωγή του μπλε υδρογόνου καταναλώνει επίσης 12% περισσότερη ενέργεια και έχει ως αποτέλεσμα 369% υψηλότερο σχετικό κόστος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η εναλλακτική μειώνει τις συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 86%. Αυτό επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιείται «μπλε» ηλεκτρισμός για την παραγωγή υδρογόνου, διαφορετικά, οι εκπομπές άνθρακα θα ήταν πολύ υψηλότερες. Το υδρογόνο μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο ως καύσιμο μηδενικού άνθρακα μόνο εάν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας· για παράδειγμα, το υδρογόνο που παράγεται από την ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια και ηλιοθερμικές διεργασίες. Παραγωγή υδρογόνου με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από καύση φυσικού αερίου παράγει επίσης χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Ωστόσο, το συνολικό κόστος είναι 12% υψηλότερο από αυτό του υδρογόνου που παράγεται από αναμόρφωση ατμού μεθανίου.

Όσον αφορά την ενέργεια, η χρήση ορυκτών καυσίμων με εγκατεστημένο CCS έχει ως αποτέλεσμα 22% υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Το υδρογόνο, η αμμωνία και η μεθανόλη με βάση το φυσικό αέριο συνεπάγονται 12%, 45% και 122% υψηλότερο ενεργειακό κόστος για την παραγωγή της ίδιας προωθητικής ενέργειας, ενώ το υδρογόνο που παράγεται από ηλιακή ενέργεια, η αμμωνία και η μεθανόλη συνεπάγονται 45%, 70% και 110% υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας αντίστοιχα. Η ενεργειακή ένταση του βιοντίζελ είναι η ίδια με την περίπτωση αναφοράς (HFO), ενώ η βιομεθανόλη συνεπάγεται 30% αύξηση ενεργειακών απωλειών. Ως εκ τούτου, το βιοντίζελ είναι η πιο ενεργειακά αποδοτική εναλλακτική οδός για την απανθρακοποίηση, ακολουθούμενη από υδρογόνο αναμόρφωσης ατμού και στη συνέχεια την εγκατάσταση συστημάτων δέσμευσης άνθρακα και τα υπόλοιπα ναυτιλιακά καύσιμα. Η εγκατάσταση των παραπάνω συστημάτων (CCS) είναι ενεργοβόρα, ωστόσο, με βάση τα αποτελέσματα που λαμβάνονται εδώ, η ενεργειακή απαίτηση για την παραγωγή καθαρότερων καυσίμων όπως το υδρογόνο, η αμμωνία και η μεθανόλη είναι πολύ υψηλότερη.



Όσον αφορά το κόστος, η χρήση ορυκτών καυσίμων με εγκατεστημένο CCS έχει ως αποτέλεσμα 18–29% υψηλότερα έξοδα το υδρογόνο, η αμμωνία και η μεθανόλη με βάση το φυσικό αέριο αυξάνουν το συνολικό κόστος κατά 369%, 421% και 145%, αντίστοιχα· το υδρογόνο, η αμμωνία και η μεθανόλη που προέρχονται από εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνουν το συνολικό κόστος κατά 617%, 647% και 422%, αντίστοιχα, ενώ το



Σχήμα 12: Σύνοψη ποσοτικής αξιολόγησης.

βιοντίζελ και η βιομεθανόλη συνεπάγονται αυξήσεις κόστους κατά 90% και 284%. Ως εκ τούτου, η εγκατάσταση CCS είναι η πιο οικονομική μέθοδος απανθρακοποίησης, ακολουθούμενη από τα βιοκαύσιμα, ενώ στον αντίποδα τα εναλλακτικά καύσιμα που παράγονται με χρήση ηλιακής ενέργειας είναι οι πιο δαπανηρές λύσεις.

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 5<sub>α</sub> (Li, 2021), η συνολική βαθμολογία κάθε ναυτιλιακού καυσίμου, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα κριτήρια αξιολόγησης, κανονικοποιείται σε βαθμολογία που κυμαίνεται μεταξύ 1 και 10, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5<sub>β</sub>. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες βαθμολογιών. Η πρώτη με βαθμολογίες μεταξύ 1 και 4 είναι η κατηγορία χαμηλής προοπτικής (που αντιπροσωπεύεται από ένα κόκκινο τρίγωνο), η δεύτερη κατηγορία με εύρος βαθμών από 4 έως 7 ονομάζεται κατηγορία μέτριας προοπτικής (που αντιπροσωπεύεται από ένα κίτρινο τετράγωνο) και, τέλος, με βαθμολογίες από 7 έως 10 σημεία έχουμε την κατηγορία ναυτιλιακών καυσίμων υψηλών προοπτικών (που αντιπροσωπεύεται από έναν πράσινο κύκλο).



(α)								
Τύπος Καυσίμου	Σχετική Μάζα	Σχετικός Όγκος	Σχετική Ενέργεια (WTW)	Σχετικό Κόστος (WTW)	Σχετικές Εκπομπές GHG (WTW)	Σχετικές Εκπομπές (NOx)	Σχετικές Εκπομπές (SOx)	Σχετικές Εκπομπές (PM)
HFO (Περίπτωση Αναφοράς)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
HFO (CCS)	122%	122%	122%	118%	11%	100%	100%	100%
LNG	84%	191%	101%	110%	92%	7%	0%	4%
LNG (CCS)	103%	233%	122%	129%	24%	7%	0%	4%
BLUE H2	35%	450%	138%	306%	17%	100%	0%	0%
BLUE H2 (FC)	28%	365%	112%	469%	14%	0%	0%	0%
BLUE NH3	226%	368%	178%	371%	34%	100%	0%	0%
BLUE NH3 (FC)	183%	299%	145%	521%	27%	0%	0%	0%
MEOH	211%	259%	177%	221%	129%	19%	0%	0%
BLUE MEOH (CCS)	264%	324%	222%	245%	51%	19%	0%	0%
NG-E	1669%	814%	72%	5304%	6%	0%	0%	0%
BLUE E-H2 (FC)	28%	365%	182%	585%	26%	0%	0%	0%
BLUE E-NH3 (FC)	183%	299%	211%	635%	38%	0%	0%	0%
BLUE E-MEOH	211%	259%	261%	354%	143%	19%	0%	0%
BIO-DIESEL	112%	125%	100%	190%	1%	108%	11%	26%
BIO-MEOH	211%	259%	134%	384%	15%	108%	11%	26%
SOLAR E	1669%	814%	47%	5375%	0%	0%	0%	0%
SOLAR E-H2 (FC)	28%	365%	145%	717%	0%	0%	0%	0%
SOLAR E-NH3 (FC)	183%	299%	170%	757%	0%	0%	0%	0%
SOLAR E-MEOH	211%	259%	210%	522%	15%	19%	0%	0%
SOLAR T-H2 (FC)	28%	365%	156%	707%	0%	0%	0%	0%
SOLAR T-MeOH	211%	259%	224%	681%	15%	19%	0%	0%



(β)						
Τύπος Καυσίμου	Βαθμολογία 1-10 Μάζας Καυσίμου (Από το βαρύτερο στο ελαφρύτερο)	Βαθμολογία 1-10 Όγκου Καυσίμου (Από το μικρότερο στο μεγαλύτερο)	Βαθμολογία 1-10 Ενέργειας WTW (Από την υψηλότερη στη χαμηλότερη)	Βαθμολογία 1-10 Κόστους WTW (Από το υψηλότερο στο χαμηλότερο)	Βαθμολογία 1-10 Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου (Από τις υψηλότερες στις χαμηλότερες)	Βαθμολογία 1-10 Εκπομπών Μη Θερμοκηπιακών αερίων (Από τις υψηλότερες στις χαμηλότερες)
HFO (Περίπτωση Αναφοράς)	9.6	10.0	7.8	10.0	3.7	1.2
HFO (CCS)	9.5	9.7	6.9	9.7	9.3	1.2
LNG	9.7	8.9	7.8	9.9	4.2	9.7
LNG (CCS)	9.6	8.3	6.9	9.6	8.5	9.7
BLUE H2	10.0	5.6	6.2	7.2	8.9	7.2
BLUE H2 (FC)	10.0	6.7	7.3	4.9	9.1	10.0
BLUE NH3	8.9	6.6	4.5	6.3	7.9	7.2
BLUE NH3 (FC)	9.2	7.5	5.9	4.2	8.3	10.0
MEOH	9.0	8.0	4.5	8.3	1.9	9.5
BLUE MEOH (CCS)	8.7	7.2	2.7	8.0	6.8	9.5
NG-E	1.0	1.0	9.0	1.0	9.6	10.0
BLUE E-H2 (FC)	10.0	6.7	4.3	3.4	8.4	10.0
BLUE E-NH3 (FC)	9.2	7.5	3.1	2.7	7.6	10.0
BLUE E-MEOH	9.0	8.0	1.0	6.5	1.0	9.5
BIO-DIESEL	9.5	9.7	7.8	8.8	9.9	5.9
BIO-MEOH	9.0	8.0	6.3	6.1	9.0	5.9
SOLAR E	1.0	1.0	10.0	1.0	10.0	10.0
SOLAR E-H2 (FC)	10.0	6.7	5.9	1.5	10.0	10.0
SOLAR E-NH3 (FC)	9.2	7.5	4.8	1.0	10.0	10.0
SOLAR E-MEOH	9.0	8.0	3.1	4.2	9.1	9.5
SOLAR T-H2 (FC)	10.0	6.7	5.4	1.7	10.0	10.0
SOLAR T-MeOH	9.0	8.0	2.6	2.0	9.1	9.5

Πίνακας 5: (α) Σύνοψη της ποσοτικής αξιολόγησης σε ποσοστά σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς (Μαζούτ χωρίς τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα), (β) Σύνοψη της ποσοτικής αξιολόγησης σε κανονικοποιημένες βαθμολογίες μεταξύ 1 και 10.



### 3.2. ΈΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Για μια ενδεδειγμένη αξιολόγηση που καλύπτει όχι μόνο ποσοτικές παραμέτρους αλλά και άλλες όπως η επεκτασιμότητα, η δυνατότητα χρήσης και διαχείρισης του εκάστοτε ναυτιλιακού καυσίμου εν πλώ στα σκάφη και το επίπεδο ετοιμότητας των τεχνολογιών προς εφαρμογή, συμπεριλαμβάνουμε σε αυτήν την ενότητα ορισμένες ποιοτικές παραμέτρους. Με βάση τον ορισμό των βαθμολογιών στον Πίνακα 4, η ποιοτική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 13 (Li, 2021).

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα στον Πίνακα 5 και στο Σχήμα 13, πραγματοποιήθηκε μια αξιολόγηση, ως παράδειγμα, ακολουθώντας τους προκαθορισμένους συντελεστές στάθμισης (βλ. Πίνακα 3). Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται χρησιμοποιώντας ένα σύστημα συνολικής βαθμολογίας στην τελευταία στήλη του Σχήματος 14 (Li, 2021) και υπολογίστηκε με βάση την στάθμιση του κάθε επιμέρους κριτηρίου. Τα ορυκτά ναυτιλιακά καύσιμα με την εγκατάσταση CCS πέτυχαν την υψηλότερη βαθμολογία, ακολουθούμενα από το βιοντίζελ, το υδρογόνο που παράγεται μέσω αναμόρφωσης ατμού και στη συνέχεια την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με διάφορα μέσα. Η παραγωγή αμμωνίας και μεθανόλης με διαφορετικές μεθόδους πέτυχαν χαμηλότερες βαθμολογίες και, ως εκ τούτου, θεωρήθηκε ότι έχουν μειωμένες προοπτικές να αποτελέσουν μελλοντικά ναυτιλιακά καύσιμα. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της μελέτης θα άλλαζαν σημαντικά εάν εφαρμόζαμε διαφορετικό ποσοστό στάθμισης για κάθε παράμετρο, και ως εκ τούτου, η συζήτηση εδώ προορίζεται να χρησιμεύσει ως παράδειγμα για την επίδειξη της μεθοδολογίας.

Τύπος Καυσίμου	Επεκτασιμότητα Παραγωγής ● Επεκτάσιμη ■ Δύσκολα Επεκτάσιμη ▲ Απίθανη	Ασφάλεια (Αναφλεξιμότητα, τοξικότητα, διαβρωτικότητα) – (Επικρατεί η χειρότερη βαθμολογία)	Κανονιστικό πλαίσιο και κατευθυντήριες γραμμές ● Πλήρως διαθέσιμο ■ Διαθέσιμο, απαιτείται τροποποίηση ▲ Μη Διαθέσιμο	Ετοιμότητα Τεχνολογίας ● Εισηγμένη στην αγορά ■ Μικρής κλίμακας ▲ Έρευνα και Ανάπτυξη
HFO (Περίπτωση Αναφοράς)	● Επεκτάσιμη	● Ασφαλές, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	● Κώδικας IGF (1)	● Εισηγμένη στην αγορά
HFO (CCS)	● Επεκτάσιμη	● Ασφαλές, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	● Κώδικας IGF	● Εισηγμένη στην αγορά
LNG	● Επεκτάσιμη	● Ασφαλές, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	● Κώδικας IGF	● Εισηγμένη στην αγορά
LNG (CCS)	● Επεκτάσιμη	● Ασφαλές, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	● Κώδικας IGF	● Εισηγμένη στην αγορά
BLUE H2	● Επεκτάσιμη	▲ Επικίνδυνο, Μη	■ Απαιτεί αναθεώρηση του	■ Μικρής κλίμακας



		τοξικό, Μη διαβρωτικό	κώδικα IGF	
BLUE H2 (FC)	● Επεκτάσιμη	▲ Επικίνδυνο, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
BLUE NH3	● Επεκτάσιμη	▲ Ενδιάμεσο, Πολύ τοξικό, Διαβρωτικό	▲ Ο IGC δεν το επιτρέπει, απαιτείται αναθεώρηση του κώδικα IGF (2)	■ Μικρής κλίμακας
BLUE NH3 (FC)	● Επεκτάσιμη	▲ Ενδιάμεσο, Πολύ τοξικό, Διαβρωτικό	▲ Ο IGC δεν το επιτρέπει, απαιτείται αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
MEOH	● Επεκτάσιμη	■ Ενδιάμεσο, Έντονα τοξικό, Διαβρωτικό	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
BLUE MEOH (CCS)	● Επεκτάσιμη	■ Ενδιάμεσο, Έντονα τοξικό, Διαβρωτικό	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
NG-E	● Επεκτάσιμη	● Ασφαλές, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	● Μέρος 6, Κεφάλαιο 2, Παράγραφος 1, Ισχύς μπαταρίας (3)	● Εισηγμένη στην αγορά
BLUE E-H2 (FC)	■ Μη οικονομική	▲ Επικίνδυνο, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
BLUE E-NH3 (FC)	■ Μη οικονομική	▲ Ενδιάμεσο, Πολύ τοξικό, Διαβρωτικό	▲ Ο IGC δεν το επιτρέπει, απαιτείται αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
BLUE E-MEOH	■ Μη οικονομική	■ Ενδιάμεσο, Έντονα τοξικό, Διαβρωτικό	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
BIO-DIESEL	■ Δύσκολη	■ Ασφαλές, Μη τοξικό, Διαβρωτικό κατά την αποσύνθεση	● ISO 8217:2017 προδιαγραφές καυσίμων	■ Μικρής κλίμακας
BIO-MEOH	■ Δύσκολη	■ Ενδιάμεσο, Έντονα τοξικό, Διαβρωτικό κατά την αποσύνθεση	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
SOLAR E	▲ Απίθανη	● Ασφαλές, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	● Μέρος 6, Κεφάλαιο 2, Παράγραφος 1, Ισχύς μπαταρίας	● Εισηγμένη στην αγορά
SOLAR E-H2 (FC)	▲ Απίθανη	▲ Επικίνδυνο, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
SOLAR E-NH3 (FC)	▲ Απίθανη	▲ Ενδιάμεσο, Πολύ τοξικό, Διαβρωτικό	▲ Ο IGC δεν το επιτρέπει, απαιτείται αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
SOLAR E-MEOH	▲ Απίθανη	■ Ενδιάμεσο, Έντονα τοξικό, Διαβρωτικό	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
SOLAR T-H2 (FC)	▲ Απίθανη	▲ Επικίνδυνο, Μη τοξικό, Μη διαβρωτικό	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας
SOLAR T-MeOH	▲ Απίθανη	■ Ενδιάμεσο, Έντονα τοξικό, Διαβρωτικό	■ Απαιτεί αναθεώρηση του κώδικα IGF	■ Μικρής κλίμακας

(1) Ο Διεθνής Κώδικας Ασφάλειας για Πλοία που χρησιμοποιούν αέρια ή άλλα καύσιμα χαμηλού σημείου ανάφλεξης που συντομογραφείται ως IGF, έχει υιοθετηθεί από τον IMO.

(2) Ο Διεθνής Κώδικας Κατασκευής και Εξοπλισμού Πλοίων που Μεταφέρουν Υγροποιημένα Αέρια χύμα που συντομογραφείται ως IGC, έχει υιοθετηθεί από τον IMO.

(3) Παραπομπή στους κανόνες κλάσεων των νηογνομώνων.

Σχήμα 13: Σύνοψη της ποιοτικής αξιολόγησης με χρωματικό κώδικα που δηλώνει τη βαθμολογία ( ● = 10, ■ = 7, ▲ = 4).



Κωνσταντίνος Σταθάς

“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”

Ναυτιλιακό Καύσιμο	Μάζα καυσίμου επί του πλοίου	Όγκος καυσίμου επί του πλοίου	Σχετική Ενέργεια (WTW)	Σχετικό Κόστος (WTW)	Σχετικές Εκπομπές GHG (WTW)	Σχετικές Εκπομπές non-GHG (WTW)	Επεκτασιμότητα Παραγωγής	Ασφάλεια Καυσίμου	Κανονιστικό πλαίσιο	Ετοιμότητα Τεχνολογίας	Συνολική Βαθμολογία
	● Ελαφρύ ■ Μεσαίο ▲ Βαρύ	● Μικρός ■ Μεσαίος ▲ Μεγάλος	● Χαμηλή ■ Μεσαία ▲ Υψηλή	● Χαμηλό ■ Μεσαίο ▲ Υψηλό	● Χαμηλές ■ Μεσαίες ▲ Υψηλές	● Χαμηλές ■ Μεσαίες ▲ Υψηλές	● Εύκολη ■ Δύσκολη ▲ Απίθανη	● Ασφαλές ■ Μέτριο ▲ Επικίνδυνο	● Υφίσταται ■ Αναθεώρηση ▲ Δεν Υφίσταται	● Εισηγμένη στην αγορά ■ Μικρής κλίμακας ▲ Έρευνα και ανάπτυξη	
HFO (Περίπτωση Αναφοράς)	●	●	●	●	▲	▲	●	●	●	●	78.3
HFO (ICE, CCS)	●	●	■	●	●	▲	●	●	●	●	85.3
NG-LNG (ICE)	●	●	●	●	■	●	●	●	●	●	82.4
NG-LNG (ICE, CCS)	●	●	■	●	●	●	●	●	●	■	86.6
NG-H2 (ICE)	●	■	■	●	●	●	●	▲	■	■	73.8
NG-H2 (FC)	●	■	●	■	●	●	●	▲	■	■	74.2
NG-NH3 (ICE)	●	■	■	■	●	●	●	▲	▲	■	65.1
NG-NH3 (FC)	●	●	■	■	●	●	●	▲	▲	■	66.8
NG-MEOH (ICE)	●	●	■	●	▲	●	●	■	■	■	62.5
NG-MEOH (ICE, CCS)	●	●	▲	●	■	●	●	■	■	■	67.0
NG-E (EM)	▲	▲	●	▲	●	●	●	●	●	●	65.6
BLUE E-H2 (FC)	●	■	■	▲	●	●	■	▲	■	■	62.1
BLUE E-NH3 (FC)	●	●	▲	▲	●	●	■	▲	▲	■	55.2
BLUE E-MEOH (ICE)	●	●	▲	■	▲	●	■	■	■	■	48.5
BIODIESEL (ICE)	●	●	●	●	●	■	■	■	●	■	85.9
BIO-MEOH (ICE)	●	●	■	■	●	■	■	■	■	■	72.6
SOLAR E (EM)	▲	▲	●	▲	●	●	▲	●	●	●	65.5
SOLAR-E-H2 (FC)	●	■	■	▲	●	●	▲	▲	■	■	63.4
SOLAR-E-NH3 (FC)	●	●	■	▲	●	●	▲	▲	▲	■	58.7
SOLAR-E-MEOH (ICE)	●	●	▲	■	●	●	▲	■	■	■	62.8
SOLAR-T-H2 (FC)	●	■	■	▲	●	●	▲	▲	■	■	62.7
SOLAR-T-MeOH (ICE)	●	●	▲	▲	●	●	▲	■	■	■	57.3

Σχήμα 14: Βαθμολογίες εναλλακτικών καυσίμων (Εύρος 1-10 όπου, ● ≥ 7, > 4, ■ > 4, ▲ ≤ 4).





## 4. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η απανθρακοποίηση της ναυτιλίας θεωρείται ότι μπορεί να επιτευχθεί με μια ποικιλία πρωτογενών πηγών ενέργειας, μεθόδων παραγωγής καυσίμων και τεχνολογιών πρόωσης. Αυτή η εργασία ποσοτικοποίησε πολλές από αυτές τις προσεγγίσεις όσον αφορά τα συνολικά μεγέθη της ενέργειας, του κόστους και της σκοπιμότητας. Για τα ορυκτά καύσιμα, πρέπει να χρησιμοποιούνται συστήματα δέσμευσης άνθρακα, αλλά ουσιαστικά δεν απαιτείται κάποια επιπλέον αλλαγή, ενώ τα καύσιμα που παράγονται από ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια δεν έχουν εκπομπές άνθρακα αλλά είναι δαπανηρά και μπορεί η χρήση τους να απαιτεί αλλαγές τόσο στην αλυσίδα εφοδιασμού όσο και στον μέθοδο πρόωσης. Για παράδειγμα, η έρευνα έδειξε ότι το υδρογόνο που παράγεται από την αναμόρφωση φυσικού αερίου με χρήση υπέρθερμου ατμού κατατάσσεται υψηλότερα από το ανανεώσιμο υδρογόνο που προέρχεται από ηλεκτρόλυση, λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής έντασης και κόστους κατά τη διάρκεια της παραγωγή του και του επιπέδου επεκτασιμότητας του που επηρεάζεται από τη διαθεσιμότητα πρώτης ύλης. Η παραπάνω παρατήρηση είναι ευθυγραμμισμένη με την πηγή (Al-Enazi et al., 2021), έγγραφο το οποίο αναφέρει ότι η μετάβαση σε LNG είναι μία άμεσα διαθέσιμη επιλογή ενώ το υδρογόνο και η αμμωνία με βάση το φυσικό αέριο μπορούν να χρησιμεύσουν ως «γέφυρα» μεταξύ των τρεχόντων ορυκτών καυσίμων και των μελλοντικών που θα προέρχονται από το υδρογόνο.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι οι συνολικές εκπομπές άνθρακα. Μία επιλογή ουδέτερη ως προς τον άνθρακα, τα βιοκαύσιμα, έχουν υψηλές προοπτικές ως μελλοντικά καύσιμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άμεση αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων, ελαχιστοποιώντας έτσι την ανάγκη τροποποίησης των υπαρχουσών τεχνολογιών. Στη συνέχεια, η εγκατάσταση CCS για τα ορυκτά καύσιμα μπορεί δυναμικά να μειώσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> (με χαμηλότερο κόστος) και κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με άλλα καθαρά καύσιμα όπως το μπλε υδρογόνο, η αμμωνία και η μεθανόλη. Η μετάβαση στη μεθανόλη δεν είναι τόσο ελπιδοφόρα καθώς η διαδικασία παραγωγής της είναι πολύ ενεργοβόρα και έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Μόνο με χρήση βιομεθανόλης μπορούν να μειωθούν σημαντικά οι εκπομπές CO<sub>2</sub> (Gray et al., 2021) για να επιτευχθεί ο στόχος που έχει θέσει ο IMO έως το 2050. Όλες οι περιπτώσεις υδρογόνου και αμμωνίας δίνουν χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub>, ωστόσο η μετάβαση σε υδρογόνο ή αμμωνία (Al-Aboosi et al., 2021) μέσω της «μπλε οδού» (Atilhan et al., 2021) δεν θα οδηγούσε σε



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

μηδενική χρήση άνθρακα στη ναυτιλιακή βιομηχανία, εκτός εάν χρησιμοποιούνταν μια «πράσινη οδός» παραγωγής.

Όσον αφορά την ενέργεια, η ηλεκτρική ενέργεια είναι το πιο ενεργειακά αποδοτικό εναλλακτικό καύσιμο, ακολουθούμενη από το βιοντίζελ, το υδρογόνο μέσω αναμόρφωσης με υπέρθερμο ατμό, την εγκατάσταση CCS για ορυκτά καύσιμα, τη βιομεθανόλη, και στη συνέχεια άλλα εναλλακτικά καύσιμα. Η τροφοδοσία με ηλεκτρικό ρεύμα είναι η πιο αποτελεσματική διαδρομή· ωστόσο, ο συνδυασμός χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας και υψηλού κόστους μπαταριών την έχουν καταστήσει ακατάλληλη για την υπερπόντια ναυτιλία μεγάλων αποστάσεων. Τα βιοκαύσιμα είναι μια ουδέτερη ως προς τον άνθρακα λύση (ειδικά το βιοντίζελ (Foretich et al., 2021), με ενεργειακά αποδοτικές διαδικασίες παραγωγής) και είναι καύσιμα υψηλών προοπτικών (Romano & Yang, 2021). Η απόδοση του υδρογόνου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο παραγωγής και χρήσης. Το υδρογόνο που παράγεται από φυσικό αέριο και αξιοποιείται σε κυψέλες καυσίμου μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικό από το πράσινο υδρογόνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης. Ένα σημαντικό εύρημα από την ενεργειακή αξιολόγηση είναι ότι η εγκατάσταση CCS, η οποία είναι η ίδια ενεργοβόρα, προσφέρει χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με αυτή που απαιτείται για την παραγωγή καθαρότερων καυσίμων όπως το υδρογόνο, η αμμωνία και η μεθανόλη. Γενικότερα, τα καύσιμα που προέρχονται από ηλεκτρόλυση και η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται με χρήση φυσικού αερίου παρουσιάζουν υψηλή ενεργειακή ένταση, καθιστώντας τα μια δαπανηρή εναλλακτική.

Όσον αφορά τις οικονομικές επιδόσεις, το κόστος παραγωγής καυσίμου και το κόστος μετατροπής ενέργειας συναποτελούν το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού κόστους. Η εγκατάσταση CCS για ορυκτά καύσιμα έχει το χαμηλότερο κόστος, ακολουθούν το βιοντίζελ, η μεθανόλη που παράγεται από φυσικό αέριο και η βιομεθανόλη. Το υδρογόνο και η αμμωνία έχουν δυνατότητα να είναι πιο ανταγωνιστικά ως προς το κόστος από τη μεθανόλη, εάν χρησιμοποιηθεί κινητήρας διπλού καυσίμου ως μετατροπέας ενέργειας. Διαφορετικά, το κόστος της κυψέλης καυσίμου μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές επενδυτικές απαιτήσεις για την εφαρμογή της τεχνολογίας και τον εκσυγχρονισμό των σκαφών, καθιστώντας τα δύο καύσιμα μια δαπανηρή εναλλακτική. Από την άλλη πλευρά, τα εναλλακτικά καύσιμα από ανανεώσιμες πηγές μπορούν να είναι οικονομικά ανταγωνιστικά μόνο εάν το κόστος παραγωγής τους μειωθεί, διαφορετικά, η παραγωγή υδρογόνου, αμμωνίας, και μεθανόλης από φυσικό αέριο θα ήταν προτιμότερη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, τα εν λόγω καύσιμα εξακολουθούν να είναι πιο ακριβά από την εγκατάσταση CCS. Η εγκατάσταση CCS και το



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

βιοντίζελ φαίνεται ότι αποτελούν τα οικονομικότερα μέσα για την επίτευξη της απανθρακοποίησης καθώς είναι και τα πλέον ελπιδοφόρα για βραχυπρόθεσμες ή μακροπρόθεσμες λύσεις. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η δέσμευση CO<sub>2</sub> με τα σημερινά συστήματα CCS δεν είναι απόλυτη και το γεγονός ότι η παραγωγή βιοκαυσίμων μπορεί να περιλαμβάνει ορισμένες εκπομπές CO<sub>2</sub> (π.χ. από τα σύγχρονα συστήματα μεταφορών) είναι παράγοντες που θα μπορούσαν να περιπλέξουν τον υπολογισμό του κόστους ιδιαίτερα εάν εφαρμοστεί στο μέλλον η φορολόγηση του άνθρακα.

Εάν υπήρχε άφθονη ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, τα καύσιμα που αξιοποιούν ηλιακή ενέργεια στη διαδικασία παραγωγής τους όπως το υδρογόνο ή η αμμωνία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μείωση των εκπομπών άνθρακα, αλλά με υψηλό ενεργειακό κόστος. Υπάρχουν εκκρεμότητες όσον αφορά την πιστοποίηση και τους κανονισμούς για το χειρισμό και τον ανεφοδιασμό των καυσίμων αυτών. Εξετάζοντας το επίπεδο ωρίμανσης της τεχνολογίας διαφόρων εναλλακτικών καυσίμων, αυτή που σχετίζεται με τα βιοκαύσιμα, τη μεθανόλη, το LNG και την ηλεκτρική ενέργεια (για διαδρομές μικρών αποστάσεων) είναι πιο ώριμη. Στον αντίποδα για το υδρογόνο και την αμμωνία, είτε αξιοποιώντας μηχανές εσωτερικής καύσης είτε κυψέλες καυσίμου, η σχετική τεχνολογία είναι ακόμη υπό ανάπτυξη και χρειάζονται ακόμα σημαντικές τεχνολογικές και εφοδιαστικές εξελίξεις.

Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παραπάνω παράγοντες συνδυαστικά, διακρίνουμε ότι τα ορυκτά ναυτιλιακά καύσιμα με εγκατεστημένο CCS είναι η καλύτερη επιλογή για βραχυπρόθεσμη απανθρακοποίηση όσον αφορά το ενεργειακό και οικονομικό κόστος, αλλά και την ωρίμανση της αντίστοιχης τεχνολογίας, ακολουθούμενα από τα βιοκαύσιμα, το μπλε υδρογόνο, τη μεθανόλη, την μπλε αμμωνία, και την ηλεκτρική ενέργεια (για διαδρομές μικρών αποστάσεων) (Xing et al., 2021). Γενικά, το υδρογόνο, η αμμωνία και η μεθανόλη που παράγονται μέσω διαφορετικών διαδικασιών και πηγών έχουν υψηλό ενεργειακό και οικονομικό κόστος και χρειάζονται περαιτέρω τεχνολογικές εξελίξεις για να αξιοποιηθούν. Η επιλογή συστημάτων δέσμευσης άνθρακα, φυσικά, παρουσιάζει το μακροπρόθεσμο πρόβλημα της διαχείρισης του δεσμευμένου CO<sub>2</sub>, κάτι που δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας.



## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτή η εργασία πραγματοποίησε την αξιολόγηση των κύκλων ζωής 22 περιπτώσεων ναυτιλιακών καυσίμων και εξέτασε ποσοτικά τις προοπτικές των εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων μέσω σύγκρισης με το συμβατικό μαζούτ που κατέχει και το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς στις μέρες μας, με βάση τη μοντελοποίηση ASPEN. Οι σχετικές τιμές για έξι παραμέτρους αξιολόγησης υπολογίστηκαν και απεικονίστηκαν με τη μορφή διαγραμμάτων. Λεπτομερή διαγράμματα ροής ενέργειας Sankey δημιουργήθηκαν για κάθε περίπτωση και περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Γ. Η σχετική μάζα και ο όγκος των υπό μελέτη εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων επί του σκάφους φαίνονται στο Σχήμα 3, η σχετική ενεργειακή έντασή τους στο Σχήμα 4, το σχετικό τους κόστος στο Σχήμα 9 και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους αναλύονται στα σχήματα 10 και 11. Τέλος, όλες οι παράμετροι συνδυάστηκαν σε ένα ενιαίο γράφημα (βλ. Σχήμα 12, Πίνακας 5) ώστε να επιτευχθεί η συνολική σύγκριση. Εν ολίγοις, η εγκατάσταση CCS είναι η πιο οικονομική εναλλακτική λύση (18% πιο δαπανηρό από τα συμβατικά καύσιμα πλοίων), η ηλεκτρική ενέργεια είναι η πιο ενεργειακά αποδοτική επιλογή (μειώνει τη συνολική ενέργεια κατά 27–50%), τα συμβατικά καύσιμα με CCS και το βιοντίζελ απαιτούν μικρότερες αυξήσεις στον σχετικό όγκο (μόνο 22% και 25% περισσότερο όγκο αποθήκευσης αντίστοιχα, από αυτόν της περίπτωσης αναφοράς λόγω των επιπλέον ενεργειακών απαιτήσεων του συστήματος δέσμευσης άνθρακα και της χαμηλότερης ενεργειακής πυκνότητας του βιοντίζελ) και απαιτούν ελάχιστη τροποποίηση στην υπάρχουσα υποδομή και τέλος το υδρογόνο και η αμμωνία χρειάζονται την υψηλότερη ποσότητα ενέργειας για το στάδιο παραγωγής αλλά έχουν μηδανικές εκπομπές άνθρακα και σωματιδίων· ωστόσο, μπορεί να απαιτηθεί καθαρισμός των καυσαερίων από οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>). Κάθε περίπτωση έχει δυνατά και αδύνατα σημεία, καθιστώντας τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην εργασία αυτή, σημαντικά για την καθοδήγηση της επιλογής των καυσίμων και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων των ενδιαφερομένων μερών για την απεξάρτηση από τον άνθρακα στον ναυτιλιακό τομέα. Στο τελευταίο μέρος αυτής της εργασίας, δόθηκε ένα παράδειγμα κατάταξης όλων των περιπτώσεων με χρήση αυτών των αποτελεσμάτων και ορισμένων επιπρόσθετων υποκειμενικών ποιοτικών κριτηρίων, όπως παραδείγματος χάρη: τα επίπεδα ετοιμότητας τεχνολογίας, τους κανονισμούς και τη δυνατότητα επεκτασιμότητας των καυσίμων. Τα ναυτιλιακά καύσιμα με βάση τα ορυκτά με εγκατεστημένο CCS πέτυχαν την υψηλότερη βαθμολογία, ακολουθούμενα από το βιοντίζελ, το υδρογόνο που παράγεται μέσω αναμόρφωσης φυσικού αερίου με χρήση υπέρθερμου ατμού, την ηλεκτρική ενέργεια που



*Κωνσταντίνος Σταθάς*

*“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”*

παράγεται με διάφορα μέσα, ενώ η αμμωνία και η μεθανόλη που προέρχονται από διάφορες διεργασίες πέτυχαν χαμηλότερες βαθμολογίες. Τα βιοκαύσιμα φαίνεται να είναι ένας καλός συμβιβασμός όσον αφορά την ενέργεια, το κόστος και τις εκπομπές, ενώ η μεθανόλη από βιομάζα αποτελεί επίσης μια λύση χαμηλού κόστους με την παρατήρηση ότι οι εκπομπές αέριων ρύπων που δεν περιλαμβάνονται στα αέρια του φαινομένου του θερμοκηπίου δεν τείνουν να μειωθούν.



## Βιβλιογραφία

- ABS. (2019). *Setting the Course to Low Carbon Shipping*.
- Akker, J. V. D. (2017). *Carbon Capture Onboard LNG-Fueled Vessels*. Delft University of Technology.
- Al-Aboosi, F. Y., El-Halwagi, M. M., Moore, M., & Nielsen, R. B. (2021). Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100670. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100670>
- Al-Enazi, A., Okonkwo, E. C., Bicer, Y., & Al-Ansari, T. (2021). A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. *Energy Reports*, 7, 1962–1985. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.03.036>
- ASPEN HYSYS. (2019). *Natural Gas Plant Model; ASPEN HYSYS*.
- Aspentech. (2021). *Aspentech. Aspen Hysys*. <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-hysys>
- Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M. M., Atilhan, M., Moore, M., & Nielsen, R. B. (2021). Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.100668>
- Balcombe, P. ; B. J. ; L. C. ; S. L. ; S. J. ; H. A. ; S. I. (2019). *How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies*. 182, 72–88.
- Burton, N. A., Padilla, R. V., Rose, A., & Habibullah, H. (2021). Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110255. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110255>
- Chambers, S. (2021). *Global Methane Pledge to Be Unveiled at COP26 Heaps More Pressure on LNG Fuel Proponents*. <https://splash247.com/global-methane-pledge-to-be-unveiled-at-cop26-heaps-more-pressureon-lng-fuel-proponents/#:~:text=The%20study%20claims%20that%20by%202030%20methane%20slip,50%25%20compared%20with%20a%20first-generation%20low%20pressure%20engine>
- Deniz, C., & Zincir, B. (2016). Environmental and economical assessment of alternative marine fuels. *Journal of Cleaner Production*, 113, 438–449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.089>
- DNV.GL. (2019a). *Assessment of Selected Alternative Fuels and Technologies*.
- DNV.GL. (2019b). *Comparison of Alternative Marine Fuels*.
- Ekwonu, M. C. ; P. S. ; O. E. A. (2013). *Modelling and Simulation of Gas Engines Using Aspen HYSYS*. 1–4.
- Essential Chemical Industry. (2016, October 18). *Ammonia*. <https://essentialchemicalindustry.org/chemicals/ammonia.html?fbclid=IwAR0zT09j8GEq75xslaf45VoxKTBIHQJONzNFdWtJRh9XJ-d28GBXiifdVc>
- Foretich, A., Zaimes, G. G., Hawkins, T. R., & Newes, E. (2021). Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector. *Maritime Transport Research*, 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100033>



- Gilbert, P., Walsh, C., Traut, M., Kesime, U., Pazouki, K., & Murphy, A. (2018). Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. *Journal of Cleaner Production*, 172, 855–866. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.165>
- Gray, N., McDonagh, S., O’Shea, R., Smyth, B., & Murphy, J. D. (2021). Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. *Advances in Applied Energy*, 1, 100008. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100008>
- Greed, G. (n.d.). *Aspen HYSYS Lecture 08 Conversion Reactor*. Retrieved 21 March 2023, from <https://www.bing.com/videos/search?q=aspen+hysys+conversion+reactor&&view=detail&mid=4E59C27269350FDAA95C4E59C27269350FDAA95C&&FORM=VRDGAR&ru=/videos/search?q%3Daspen%2Bhysys%2Bconversion%2Breactor%26%26FORM%3DVEDVXX>
- Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S., & Grahn, M. (2019). Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass and Bioenergy*, 126, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008>
- HomeGuide. (n.d.). *Solar Panel Cost*. Retrieved 21 March 2023, from <https://homeguide.com/costs/solar-panel-cost>
- Inside mines. (n.d.). *Steam Cycle Simulation—HYSYS v8.6*. Retrieved 21 March 2023, from [https://inside.mines.edu/~jjechura/EnergyTech/Boiler\\_Steam\\_Cycle\\_HYSYSv8.6.pdf](https://inside.mines.edu/~jjechura/EnergyTech/Boiler_Steam_Cycle_HYSYSv8.6.pdf)
- Li, C. L. ; F. B. ; M. E. ; E. S. (2021). *A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost*.
- Linde. (n.d.-a). *Linde Hydrogen*. Retrieved 21 March 2023, from <https://www.linde-engineering.com/en/hydrogen/index.html>
- Linde. (n.d.-b). *Linde Supplies Ammonia Plants Using Two Different Process Concepts*. Retrieved 21 March 2023, from <https://www.lindeengineering.com/en/about-linde-engineering/success-stories/industry-partner-in-russia.html>
- Machinery Spaces. (n.d.). *Ships Power Generation Equipment & Distribution System*. Retrieved 21 March 2023, from <http://machineryspaces.com/electrical-plant.html>
- McKinlay, C. J., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2021). Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 28282–28297. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.066>
- Nigen. (2018, May 22). *How to Separate Nitrogen from Air*. <https://nigen.com/how-separate-nitrogen-from-airways-extract-nitrogen/>
- Olabode, O. H. ; F. S. ; R. M. ; G. I. S. (2021). Linear Modeling of Hydrogen Fuel Cell with Energy and Water By-products at 60% Efficiency Factor. *Agric. Environ.*, 39–43.
- Rafieyan, S. ; B. A. (2020, April 15). Process Simulation of Biodiesel Production from Soybean Oil with Aspen HYSYS: A Comparative Study of two different processes. *In Proceedings of the 11th International Chemical Engineering Congress & Exhibition*.
- Ren, J., & Liang, H. (2017). Measuring the sustainability of marine fuels: A fuzzy group multi-criteria decision making approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.004>



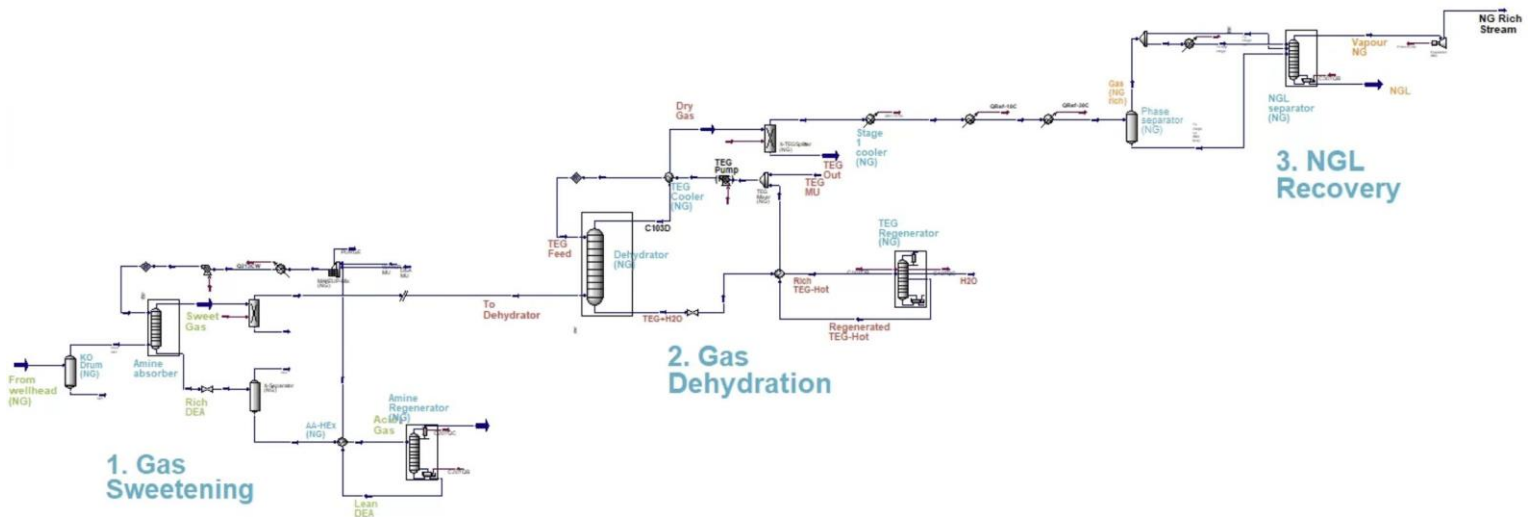
- Ren, J., & Lützen, M. (2017). Selection of sustainable alternative energy source for shipping: Multi-criteria decision making under incomplete information. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1003–1019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.057>
- Romano, A., & Yang, Z. (2021). Decarbonisation of shipping: A state of the art survey for 2000–2020. *Ocean & Coastal Management*, 214, 105936. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105936>
- Scottish Government. (2020). *Offshore Wind to Green Hydrogen: Opportunity Assessment*. <https://www.gov.scot/publications/scottish-offshore-wind-green-hydrogen-opportunity-assessment/pages/5/>
- Ship Technology. (2020, December 21). *Wartsila and Grieg to Build World’s First Green Ammonia-Fuelled Tanker*. <https://www.ship-technology.com/news/wartsila-grieg-first-green-ammonia-fuelledtanker/#:~:text=Once%20built%2C%20it%20will%20be%20the%20world%E2%80%99s%20first,by%20Zeeds%20%28Zero%20Emission%20Energy%20Distribution%20at%20Sea%29>
- Siemens. (n.d.). *Siemens Steam Turbines for Coal-Fired Steam Power Plants (SPP)*. Retrieved 21 March 2023, from <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:6ace0e54-d187-435c-93c0-10614dc5cbb6/steam-turbines-for-spp-presentation.pdf>
- SourGas. (n.d.). *Amine Types: MEA, DGA, DEA, DIPA, MDEA*. Retrieved 21 March 2023, from <https://sourgas.wordpress.com/2016/02/21/amine-types-mea-dga-dea-dipa-mdea/>
- Statkraft. (2021, June 23). <https://www.statkraft.com/newsroom/news-and-stories/archive/2021/hydrogen-deliveries/>.
- Steve Bogart. (n.d.). *SankeyMATIC*. Retrieved 21 March 2023, from <https://www.sankeymatic.com/>
- Storm, K. (2021). *Combined cycle power plant (1 × 1) labor estimate*.
- TEAMS. (n.d.). *The Total Energy and Emissions Analysis for Marine Systems Model. The Center for Energy Analysis and Policy*. Retrieved 21 March 2023, from <https://www.rit.edu/cla/teams/>
- The Engineers Post. (2021, September 26). *Difference between Internal and External Combustion Engine*. <https://www.theengineerspost.com/difference-between-internal-and-external-combustion-engine/#:~:text=The%20internal%20combustion%20engine%20has%20an%20efficiency%20of,of%20the%20external%20combustion%20engine%20is%20relatively%20low>
- Winebrake, J. J., Corbett, J. J., & Meyer, P. E. (2007). Energy Use and Emissions from Marine Vessels: A Total Fuel Life Cycle Approach. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57(1), 102–110. <https://doi.org/10.1080/10473289.2007.10465301>
- Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126651. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>



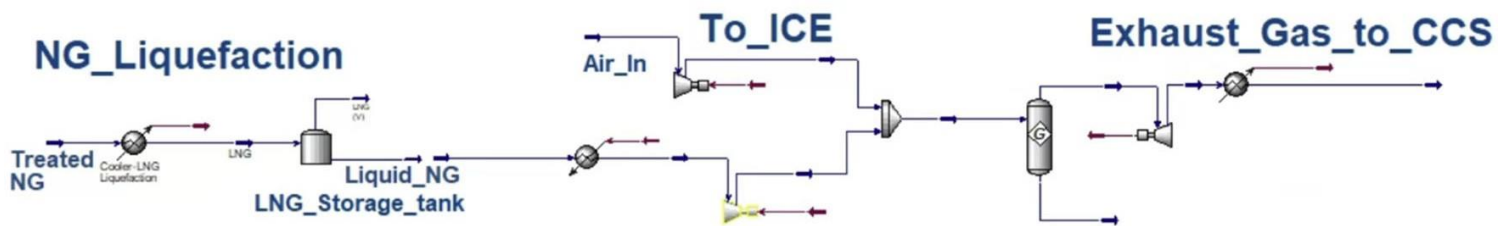


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

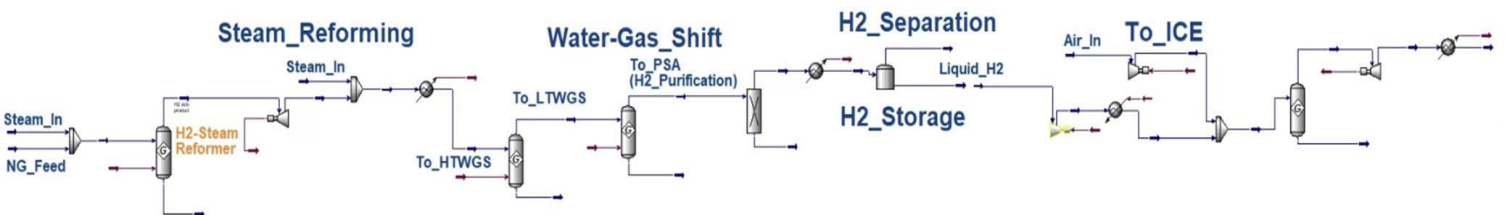
Η προσομοίωση ASPEN HYSYS χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη δεδομένων ενέργειας και κόστους. Επί του παρόντος, υπάρχουν περιορισμένα δεδομένα σχετικά με την ενεργειακή ένταση της παραγωγής ναυτιλιακών καυσίμων με διαφορετικές μεθόδους. Αν και ορισμένα άρθρα έχουν αναφέρει την ενεργειακή ένταση και το κόστος παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων, λόγω των διαφορών στις υποθέσεις που έγιναν στις αντίστοιχες μελέτες, τα αποτελέσματα δεν είναι συνεπή. Σε αυτή την εργασία με την έκδοση του ASPEN που κυκλοφορεί στο εμπόριο κατασκευάστηκαν μοντέλα με βάση την λειτουργία παρόμοιων σύγχρονων παραγωγικών μονάδων. Ανατρέξτε στον Πίνακα 2 για τις πηγές όπου βρέθηκαν οι συνθήκες της κάθε διαδικασίας. Αυτά τα μοντέλα περιλαμβάνουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής των εναλλακτικών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του σταδίου παραγωγής καυσίμου και της μετατροπής ενέργειας, με χρήση μηχανών εσωτερικής καύσης.



Σχήμα A1: Παράδειγμα ASPEN – « Μοντέλο Εγκατάστασης Φυσικού Αερίου ».



Σχήμα A2: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή και κατανάλωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (LNG) - ( Περιπτώσεις 3 και 4).

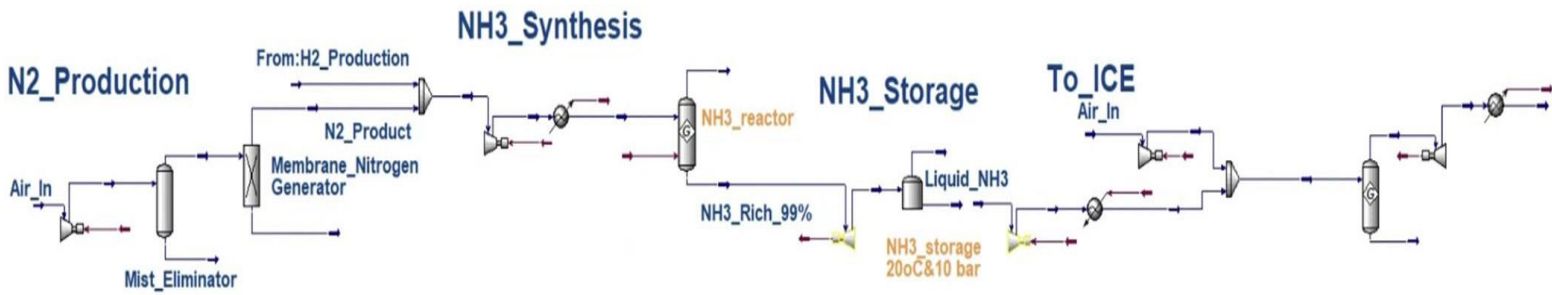


Σχήμα A3: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή και κατανάλωση Υδρογόνου (H2) προερχόμενου από Φυσικό Αέριο (NG) – ( Περιπτώσεις 5 και 6).

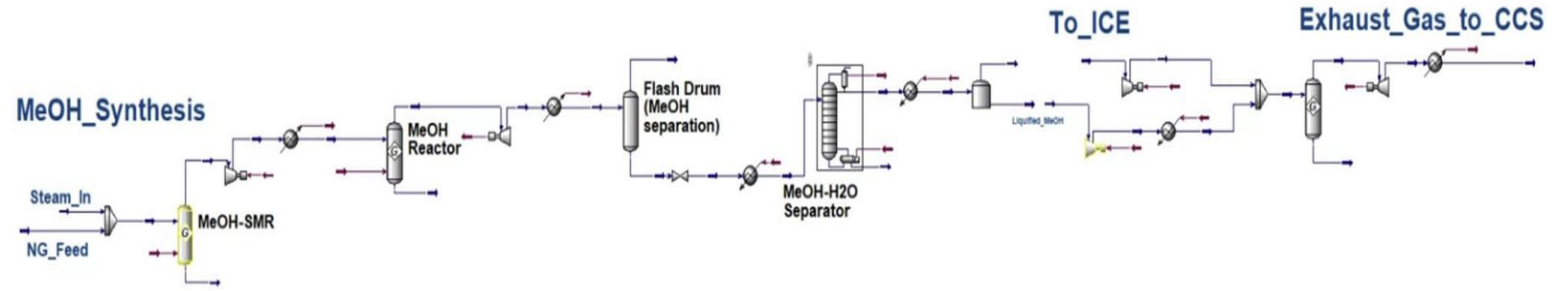


Κωνσταντίνος Σταθάς

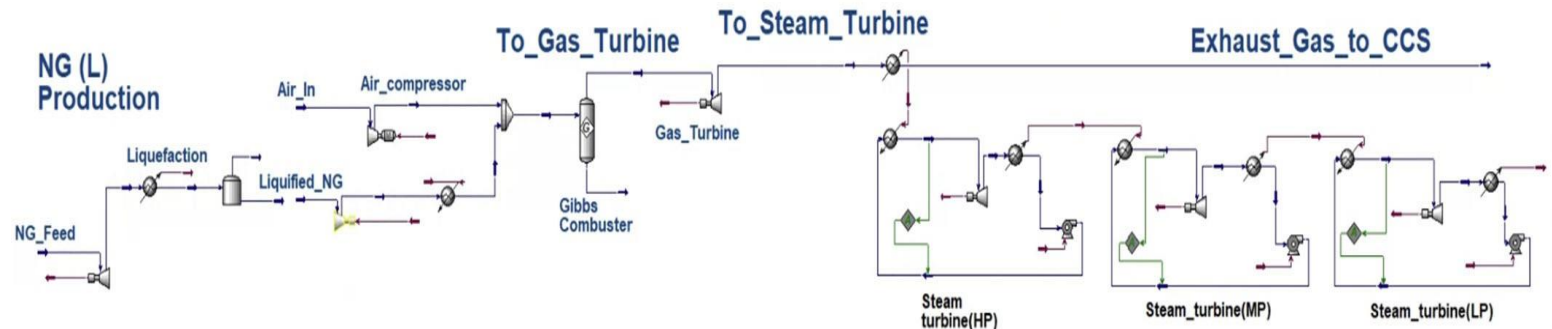
“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”



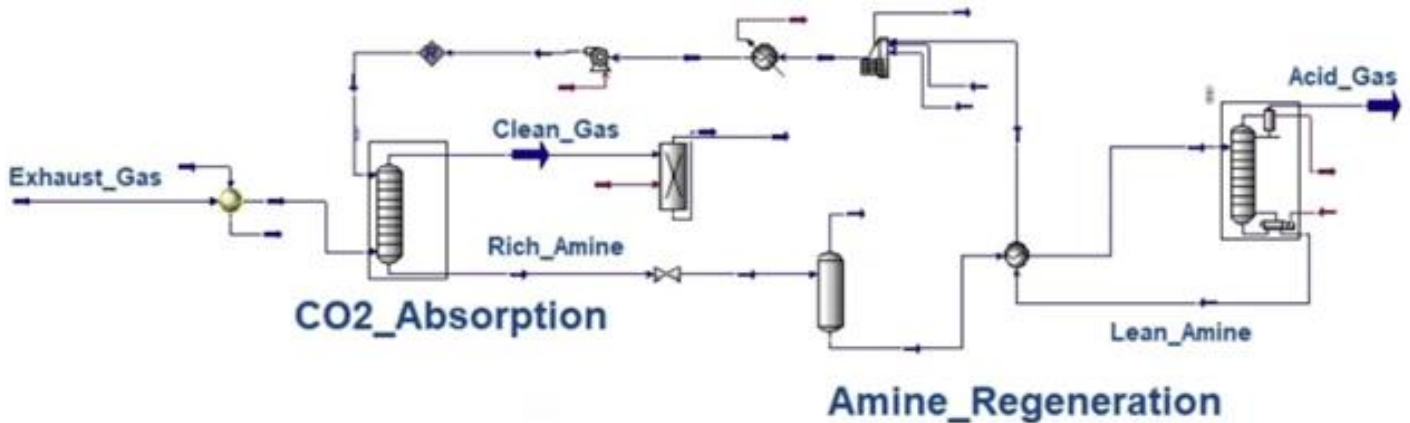
Σχήμα A4: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή και κατανάλωση Αμμωνίας (H<sub>2</sub>) προερχόμενης από Φυσικό Αέριο (NG) – ( Περίπτωσης 7 και 8).



Σχήμα A5: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή και κατανάλωση Μεθανόλης (MeOH) προερχόμενης από Φυσικό Αέριο (NG) – ( Περίπτωσης 9 και 10)



Σχήμα A6: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας προερχόμενης από Φυσικό Αέριο (NG) – ( Περίπτωση 11).



Σχήμα A7: Μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την τεχνολογία Δέσμησης και Αποθήκευσης Άνθρακα (Carbon Capture and Storage – CCS).

Τα σχήματα A1–A7 (Li, 2021) δείχνουν τη διάταξη προσομοίωσης για καύσιμα με βάση το φυσικό αέριο (Περίπτωσης 3,4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 που αναφέρονται στον Πίνακα 1, εξαιρουμένων των κυψελών καυσίμου και των ηλεκτρικών κινητήρων λόγω των περιορισμών του ASPEN) στο ίδιο περιβάλλον, υποθέτοντας ότι η πρώτη ύλη λαμβάνεται από την ίδια πηγή και έχει το



ίδιο πακέτο ιδιοτήτων, για να διασφαλιστεί μια πιο συνεπής προσομοίωση. Το μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για τις περιπτώσεις 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 και 11 ξεκινά από την τροφοδοσία φυσικού αερίου που προέρχεται απευθείας από το φρεάτιο εξόρυξης χρησιμοποιώντας το υπόδειγμα ASPEN με τίτλο «μοντέλο εγκατάστασης φυσικού αερίου» (ανατρέξτε στο Σχήμα A1). Αυτό το υπόδειγμα περιλαμβάνει μονάδες επεξεργασίας για την αφαίρεση όξινων αερίων, αφυδάτωση και διαχωρισμό υγρών παραγώγων του φυσικού αερίου (NGL) ώστε να προκύψει ροή καθαρού μεθανίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υδρογόνου, αμμωνίας και μεθανόλης (ανατρέξτε στο Σχήμα A2 για την προσομοίωση της διάταξης παραγωγής και χρήσης LNG). Η παραγωγή υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) ξεκίνησε μετά την ανάκτηση των (NGL), όπου το πλούσιο σε φυσικό αέριο (NG) μίγμα ψύχθηκε και υποβλήθηκε σε διαδικασία υγροποίησης για να παραχθεί το (LNG), το οποίο αποθηκεύεται στους  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$  και σε ατμοσφαιρική πίεση. Στη συνέχεια, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο ASPEN για κινητήρα εσωτερικής καύσης χρησιμοποιώντας έναν αντιδραστήρα Gibbs. Έγινε αναφορά στο μοντέλο κινητήρα αερίου που αναπτύχθηκε από τον Ekwonu (Ekwonu, 2013). Στο μοντέλο κινητήρα εσωτερικής καύσης περιλαμβάνονται ένας προθερμαντήρας, ένας συμπιεστής, ένας εναλλάκτης θερμότητας (ψυγείο), ένας μίκτης, ένας διαστολέας και ένας αντιδραστήρας. Επιπλέον, η διεργασία δέσμευσης άνθρακα διαμορφώθηκε με βάση την τεχνολογία γλυκαντικών ουσιών όπως στο υπόδειγμα ASPEN με τίτλο «μοντέλο εγκατάστασης φυσικού αερίου» (SourGas, n.d.) για την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> από τη ροή των καυσαερίων ενός κινητήρα (βλ. Εικόνα A7).

Το σχήμα A3 δείχνει το μοντέλο ASPEN για την παραγωγή υδρογόνου και τη μετατροπή ενέργειας χρησιμοποιώντας κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η παραγωγή H<sub>2</sub> βασίστηκε στη μονάδα παραγωγής υδρογόνου της εταιρείας Linde (Aspentech, 2021), ξεκινώντας με τη διαδικασία αναμόρφωσης ατμού που λαμβάνει χώρα παρουσία ατμού υψηλής θερμοκρασίας, ο οποίος προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας έναν αντιδραστήρα Gibbs. Η έξοδος από τον αναμορφωτή ατμού ρυθμίστηκε στους  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  και στα 23,3 bar και κατευθύνθηκε σε ένα διαστολέα και μετά έναν εναλλάκτη θερμότητας πριν από την αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου. Αυτή η διαδικασία έλαβε χώρα για την προετοιμασία ενός ρευστού χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας που ευνοεί τις αντιδράσεις μετατόπισης νερού-αερίου. Η αντίδραση στην οποία αναφερόμαστε είναι:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$ . Στη συνέχεια, μια αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου δύο σταδίων προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας δύο αντιδραστήρες Gibbs. Η αντίδραση που πραγματοποιήθηκε ήταν:  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$  για την παραγωγή μίγματος πλούσιου σε υδρογόνο. Τέλος, το υδρογόνο διαχωρίστηκε από το διοξείδιο του



Κωνσταντίνος Σταθάς

“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”

άνθρακα με τη διαδικασία απορρόφησης με μεταβολή πίεσης για παραγωγή υδρογόνου με 99% καθαρότητα. Το υδρογόνο στη συνέχεια ψύχθηκε κρυογονικά σε συνθήκες αποθήκευσης  $-253^{\circ}\text{C}$  σε ατμοσφαιρική πίεση. Το επόμενο βήμα, της διαδικασίας εκμετάλλευσης του εν λόγω ναυτιλιακού καυσίμου μοντελοποιήθηκε για την περίπτωση κινητήρα εσωτερικής καύσης ως μετατροπέα ενέργειας, παρόμοια με τη διαδρομή LNG. Ωστόσο, η δεύτερη επιλογή μετατροπέα ενέργειας, που ήταν η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, δεν κατέστη δυνατό να αναπαρασταθεί μέσω του ASPEN λόγω περιορισμών του προγράμματος. Δεν απαιτήθηκε δέσμευση άνθρακα για τον καθαρισμό των καυσαερίων από τον κινητήρα καθώς η καύση υδρογόνου είναι «καθαρή».

Το σχήμα A4 δείχνει το μοντέλο ASPEN για την παραγωγή αμμωνίας και τη μετατροπή ενέργειας χρησιμοποιώντας κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η μέθοδος παραγωγής βασίστηκε στο εργοστάσιο παραγωγής αμμωνίας της εταιρείας Linde, γνωστό και ως Linde Ammonia Concept (LAC) (Linde, n.d.-b). Η μονάδα LAC αποτελείται από μια σύγχρονη μονάδα υδρογόνου, μια τυπική μονάδα αζώτου και μια εγκατάσταση σύνθεσης αμμωνίας υψηλής απόδοσης. Η μονάδα υδρογόνου προσομοιώνεται σύμφωνα με το μοντέλο ASPEN στο σχήμα A3. Στη μονάδα αζώτου, οι γεννήτριες αζώτου μεμβράνης (Membrane Nitrogen Generators, MNG), οι οποίες έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας, χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό του αζώτου από τον αέρα. Στην προσομοίωση μας, η μεμβράνη χρησιμοποιήθηκε από έναν διαχωριστήρα στοιχείων, με το κόστος λειτουργίας και την κατανάλωση ενέργειας να υπολογίζονται στη μονάδα αεροσυμπιεστή, η οποία συμπίεσε τον αέρα έως τα 8 bar. Ο πεπιεσμένος αέρας διήλθε μέσα από την μεμβράνη (MNG), η οποία επιλεκτικά συγκράτησε το οξυγόνο, τους υδρατμούς και άλλες ακαθαρσίες, αφήνοντας μόνο το άζωτο να την διαπεράσει, επιτυγχάνοντας υψηλή ομοιογένεια της ροής μετά φίλτρου που πλέον περιέχει κατά 95% καθαρό άζωτο με δυνατότητα απόδοσης έως και 99,5% (Nigen, 2018). Μετά την παραγωγή καθαρού αζώτου και υδρογόνου, η σύνθεση αμμωνίας προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας έναν αντιδραστήρα Gibbs σε θερμοκρασία  $100^{\circ}\text{C}$  και πίεση 200 bar (Essential Chemical Industry, 2016). Το παραγόμενο προϊόν ( $\text{NH}_3$ ) οδηγήθηκε σε έναν διαστολέα με σκοπό να προετοιμαστεί για αποθήκευση όπου απαιτούνται συνθήκες θερμοκρασίας  $20^{\circ}\text{C}$  και πίεσης 10 bar. Η αντίδραση που πραγματοποιείται στον αντιδραστήρα αμμωνίας είναι:  $3\text{H}_2 + \text{N}_2 = 2\text{NH}_3$ .

Το σχήμα A5 δείχνει το μοντέλο ASPEN για τη σύνθεση μεθανόλης. Σε αυτή την εργασία, η σύνθεση μεθανόλης αναπαραστάθηκε σε πίεση 80 bar και θερμοκρασία  $190^{\circ}\text{C}$  χρησιμοποιώντας έναν αντιδραστήρα Gibbs. Η αναμόρφωση φυσικού αερίου με υπέρθερμο



Κωνσταντίνος Σταθάς

“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”

ατμό για την παραγωγή μεθανόλης ήταν ελαφρώς διαφορετική από την αντίστοιχη διεργασία που εκτελέστηκε για την παραγωγή υδρογόνου. Ομοίως, και οι δύο διεργασίες αναμόρφωσης (SMR) συνέβησαν παρουσία ατμού υψηλής θερμοκρασίας και προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας έναν αντιδραστήρα Gibbs. Για την παραγωγή μεθανόλης, η έξοδος του αναμορφωτή ατμού ρυθμίστηκε στους 1300 °C και σε πίεση 39,3 bar και στάλθηκε απευθείας σε εναλλάκτη θερμότητας ή ψυγείο. Η εμπλεκόμενη χημική αντίδραση είναι:  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$ . Για την παραγωγή μεθανόλης, δεν απαιτήθηκε αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου. Η ροή προϊόντων από τον αναμορφωτή ατμού στάλθηκε απευθείας σε έναν αντιδραστήρα σύνθεσης μεθανόλης. Οι βέλτιστες συνθήκες για την σύνθεση μεθανόλης ήταν θερμοκρασία περίπου 200 °C και πίεση μεταξύ 50 και 100 bar. Οι αντιδράσεις που εμπλέκονται στον αντιδραστήρα μεθανόλης είναι:  $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$  και  $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$ . Τα προϊόντα του αντιδραστήρα μεθανόλης αποτελούνταν από περίσσεια αντιδρώντων που δεν αντέδρασαν και παραγόμενο νερό ως παραπροϊόν και έπρεπε να διαχωριστούν από τη μεθανόλη. Ένας διαχωριστήρας ατμού-υγρού θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να διαχωριστεί η υγρή μεθανόλη από τα πτητικά αέρια συστατικά των προϊόντων μειώνοντας τη θερμοκρασία και την πίεση τους. Στη συνέχεια, το μείγμα νερού και η μεθανόλη θα μπορούσε να διαχωριστεί χρησιμοποιώντας μια στήλη απόσταξης. Για τη στήλη απόσταξης νερού-μεθανόλης προσδιορίστηκαν οι αναλογίες αναρροής και βρασμού στις τιμές 0,5 και 40 αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές λήφθηκαν με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος για να ληφθεί 99,5% καθαρή μεθανόλη ως απόσταγμα η οποία αποθηκεύτηκε στους 20 °C και σε πίεση 1 atm και στη συνέχεια μετατράπηκε σε ενέργεια πρόωσης με χρήση κινητήρα εσωτερικής καύσης. Κατά την καύση της απελευθερώνεται CO<sub>2</sub> και επομένως απαιτήθηκε η εγκατάσταση CCS για τη δέσμευση έως και 90% του CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια.

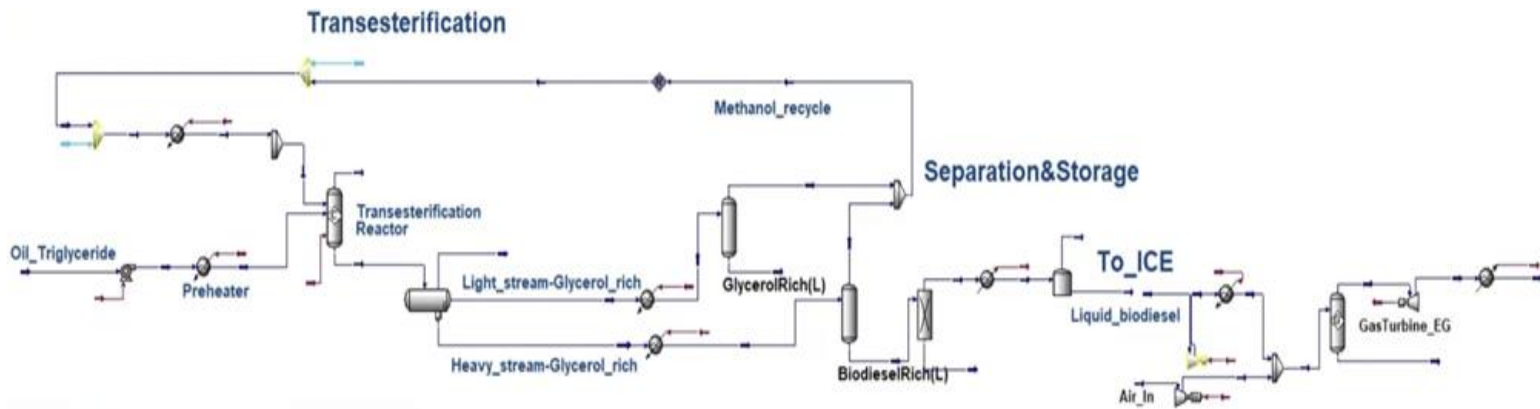
Το σχήμα A6 δείχνει το μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από καύση φυσικού αερίου σε εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής με χρήση αεριοστρόβιλου συνδυασμένου κύκλου. Για συνδυασμένο κύκλο παραγωγής ενέργειας, έγινε αναφορά στην προσομοίωση κύκλου ατμού που αναπτύχθηκε από την Inside Mines (Inside mines, n.d.). Σχετικά με την μπλε ηλεκτρική ενέργεια, απαιτείται εγκατάσταση CCS για την περίπτωση αυτή. Ο σχεδιασμός της τουρμπίνας ατμού βασίστηκε στον αμοστρόβιλο της Siemens, στο σχέδιο της σειράς SST-6000 (Siemens, n.d.). Για αμοστρόβιλους ισχύος από 300 MW έως 1200 MW, οι παράμετροι ατμού ήταν πίεση 300 bar και θερμοκρασία μεταξύ 600–630 °C. Το σχήμα A7 δείχνει το μοντέλο προσομοίωσης ASPEN για την τεχνολογία σύλληψης άνθρακα. Δέσμευση άνθρακα με χρήση απορρόφησης αμίνης, η οποία αναπτύχθηκε



Κωνσταντίνος Σταθάς

“Σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων για την ναυτιλία με όρους ενέργειας και κόστους κύκλου ζωής”

ακολουθώντας το μοντέλο ASPEN με τίτλο «μοντέλο εγκατάστασης φυσικού αερίου» (SourGas, n.d.), χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί ο ενεργειακός συντελεστής εγκατάστασης CCS. Ο απορροφητής CO<sub>2</sub> λειτούργησε στους 40 °C με διαιθανολαμίνη (DEA) ως υλικό απορρόφησης και στη συνέχεια η παραγωγή αμίνης πραγματοποιήθηκε στους 120 °C.



Σχήμα A8: Προσομοίωση ASPEN για την παραγωγή βιοντίζελ μέσω μετεστεροποίησης.

Το Σχήμα A8 (Li, 2021) δείχνει ναυτιλιακά καύσιμα βιολογικής βάσης (Περίπτωση 15 στον Πίνακα 1) που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοντίζελ από σόγια μέσω μετεστεροποίησης. Αυτή η διαδικασία προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο που προτάθηκε από τους Mello (Rafieyan, 2020), υποθέτοντας ποσοστό μετατροπής 98%, και η αντίδραση έγινε σε ατμοσφαιρική πίεση και 60 °C. Για να εξασφαλιστεί η πλήρης μετεστεροποίηση, η μοριακή αναλογία μεθανόλης προς φυτικό έλαιο έπρεπε να είναι 6:1 και η περιεκτικότητα σε καταλύτη 1% αναλογία κατά βάρος φυτικού ελαίου. Προστέθηκε μια επιπλέον λειτουργία της μονάδας για το διαχωρισμό, τον καθαρισμό και την ψύξη του βιοντίζελ σε συνθήκες αποθήκευσης στους 25 °C. Η κατανάλωση ενέργειας κατά τις διαδικασίες φύτευσης και συγκομιδής της σόγιας εξαιρέθηκαν λόγω μη διαθέσιμων πληροφοριών. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι το βιοντίζελ είναι μια επιλογή ναυτιλιακού καυσίμου μηδενικού άνθρακα και δεν απαιτείται εφαρμογή συστήματος δέσμευσης, διότι παρόλο που η καύση του παράγει διοξείδιο του άνθρακα θεωρούμε ότι αυτή η ποσότητα καταναλώνεται κατά τη φωτοσύνθεση της σόγιας καθώς εξετάζουμε τον κύκλο ζωής του ξεκινώντας από την ανάπτυξη του φυτού.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

Σε αυτή την έρευνα, η βάση δεδομένων αποκτήθηκε από διαφορετικές πηγές, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων που λήφθηκαν από την προσομοίωση με χρήση του ASPEN και για περιπτώσεις όπου η προσομοίωση δεν ήταν δυνατή, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τη βιβλιογραφία. Με τη χρήση αυτών των βάσεων δεδομένων, προχωρήσαμε στην αξιολόγηση και σύγκριση των διαφόρων εναλλακτικών καυσίμων. Ο Πίνακας A1 δείχνει τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την ενεργειακή αξιολόγηση και ο Πίνακας A2 την αντίστοιχη για την εκτίμηση κόστους.

<b>Ναυτιλιακό Καύσιμο</b>	<b>Συντελεστής Κατανάλωσης Ενέργειας από την Παραγωγή έως την Αποθήκευση (WTT) -(Ενέργεια που καταναλώθηκε σε (kj)/kj Παραγόμενου Καυσίμου)</b>	<b>Συντελεστής Κατανάλωσης Ενέργειας από την Αποθήκευση έως την και την Χρήση (TTW) - (Ενέργεια που καταναλώθηκε σε (kj)/kj Ενέργειας Πρόωσης)</b>	<b>Συντελεστής Απόδοσης Κινητήρα/ Συντελεστής Απόδοσης Κυψέλης Καυσίμου</b>
(Περίπτωση Αναφοράς): CRUDE-HFO-ICE	Επεξεργασία Μαζούτ = 0,02 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	Κινητήρας Εσωτερικής Καύσης (Internal Combustion Engine – ICE) = 45% (DNV.GL., 2019a)
CRUDE-HFO-ICE-CCS	Επεξεργασία Μαζούτ = 0,02 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης) Τεχνολογία Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα (Carbon Capture and Storage - CCS) = 0.2 (συμφώνως ASPEN)	ICE = 45%
NG-LNG-ICE-CCS	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.025 (συμφώνως ASPEN) Υγροποίηση = 0.006 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης) CCS = 0.197 (συμφώνως ASPEN)	ICE = 45%
NG-H2-ICE	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.025 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή H <sub>2</sub> (Αναμόρφωση Μεθανίου με Υδρατμό – SMR) = 0,2538 (συμφώνως ASPEN) Αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου (Water-gas Shift Reaction – WGS) = 0,092 (συμφώνως ASPEN) Καθαρισμός H <sub>2</sub> με την τεχνική απορρόφησης με αλλαγή πίεσης (Pressure Swing Absorption – PSA) = 0,05 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	ICE = 45%



NG-H2-FC	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.025 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή H2 (SMR) = 0,2538 (συμφώνως ASPEN) WGS = 0,092 (συμφώνως ASPEN) Καθαρισμός H2 (PSA) = 0,05 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	Ηλεκτρικός Κινητήρας = 92,5% (Ekwonu, 2013) Κυψέλη Καυσίμου = 60% (Machinery Spaces., n.d.)
NG-NH3-ICE	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.025 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή H2 (SMR) = 0,279 (συμφώνως ASPEN) WGS = 0,101 (συμφώνως ASPEN) Καθαρισμός H2 (PSA) = 0,055 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή Αζώτου (N2) = 0,027 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή Αμμωνίας (NH3) = 0,027 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	ICE = 45%
NG-NH3-FC	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.025 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή H2 (SMR) = 0,279 (συμφώνως ASPEN) WGS = 0,101 (συμφώνως ASPEN) Καθαρισμός H2 (PSA) = 0,055 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή Αζώτου (N2) = 0,027 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή Αμμωνίας (NH3) = 0,343 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	Ηλεκτρικός Κινητήρας = 92,5% Κυψέλη Καυσίμου = 60%
NG-MEOH-ICE-CCS	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.031 (συμφώνως ASPEN) SMR = 0,409 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή Μεθανόλης = 0,175 (συμφώνως ASPEN) Διαχωρισμός Μεθανόλης = 0,201 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης) CCS = 0.21 (συμφώνως ASPEN)	ICE = 45%
NG-ELECTRICITY-EM	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.0222 (συμφώνως ASPEN) Υγροποίηση = 0.0175 (συμφώνως ASPEN) Αεριοστρόβιλος Συνδυασμένου Κύκλου (Combined Cycle Gas Turbine - CCGT) = 0,52 (Siemens, n.d.) CCS = 0.2403 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	Ηλεκτρικός Κινητήρας = 92,5%
NG-ELECTRICITY-H2-FC	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.0222 (συμφώνως ASPEN) Υγροποίηση = 0.0175 (συμφώνως ASPEN) Αεριοστρόβιλος Συνδυασμένου Κύκλου (Combined Cycle Gas Turbine - CCGT) = 0,52 CCS = 0.2403 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	Ηλεκτρικός Κινητήρας = 92,5% Κυψέλη Καυσίμου = 60% Συνολική απόδοση TTW = 92,5% * 60% = 55,5%





	Ηλεκτρόλυση (Παραγωγή H <sub>2</sub> ) = 0,6 (Storm, 2021)		
NG-ELECTRICITY-NH <sub>3</sub> -FC	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.0222 (συμφώνως ASPEN) Υγροποίηση = 0.0175 (συμφώνως ASPEN) CCGT = 0,52 CCS = 0.2403 (συμφώνως ASPEN) Ηλεκτρόλυση (Παραγωγή H <sub>2</sub> ) = 0,6 Παραγωγή N <sub>2</sub> = 0,027 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή NH <sub>3</sub> = 0,343 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	Ηλεκτρικός Κινητήρας = 92,5% Κυψέλη Καυσίμου = 60%
NG-ELECTRICITY-MEOH-ICE	Επεξεργασία Φυσικού Αερίου = 0.0222 (συμφώνως ASPEN) Υγροποίηση = 0.0175 (συμφώνως ASPEN) CCGT = 0,52 CCS = 0.2403 (συμφώνως ASPEN) Ηλεκτρόλυση (Παραγωγή H <sub>2</sub> ) = 0,6 Παραγωγή Μεθανόλης = 0,175 (συμφώνως ASPEN) Διαχωρισμός Μεθανόλης = 0,201 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	ICE = 45%
BIOMASS-BIODIESEL-ICE	Επεξεργασία Σόγιας = Αμελητέα (Υποθέτουμε) Μετεστεροποίηση και διαχωρισμός = 0,02 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	ICE = 45%
BIOMASS-(BIO-MEOH)-ICE	Παραγωγή Συνθετικού Αέριου Καυσίμου = Μηδεν (Υποθέτουμε) Παραγωγή Μεθανόλης = 0,377 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	ICE = 45%
SOLAR-ELECTRICITY-EM	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ηλιακή = Μηδεν (Υποθέτουμε)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	Ηλεκτρικός Κινητήρας = 92,5%
SOLAR-ELECTRICITY-H <sub>2</sub> -FC	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ηλιακή = Μηδεν (Υποθέτουμε) Ηλεκτρόλυση (Παραγωγή H <sub>2</sub> ) = 0,6 Συμπύεση = 0,06 (HomeGuide., n.d.)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	Ηλεκτρικός Κινητήρας = 92,5% Κυψέλη Καυσίμου = 60%
SOLAR-ELECTRICITY-NH <sub>3</sub> -FC	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ηλιακή = Μηδεν (Υποθέτουμε) Ηλεκτρόλυση (Παραγωγή H <sub>2</sub> ) = 0,6 Παραγωγή N <sub>2</sub> = 0,02 (συμφώνως ASPEN) Παραγωγή NH <sub>3</sub> = 0,343 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	Ηλεκτρικός Κινητήρας = 92,5% Κυψέλη Καυσίμου = 60%
SOLAR-ELECTRICITY-MEOH-ICE	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ηλιακή = Μηδεν (Υποθέτουμε) Ηλεκτρόλυση (Παραγωγή H <sub>2</sub> ) = 0,6 Παραγωγή Μεθανόλης = 0,377 (συμφώνως ASPEN)	TTW = (Λήφθηκε υπόψη στον συντελεστή απόδοσης)	ICE = 45%

Πίνακας Α1: Συντελεστές ενέργειας και οι αντίστοιχες πηγές τους.



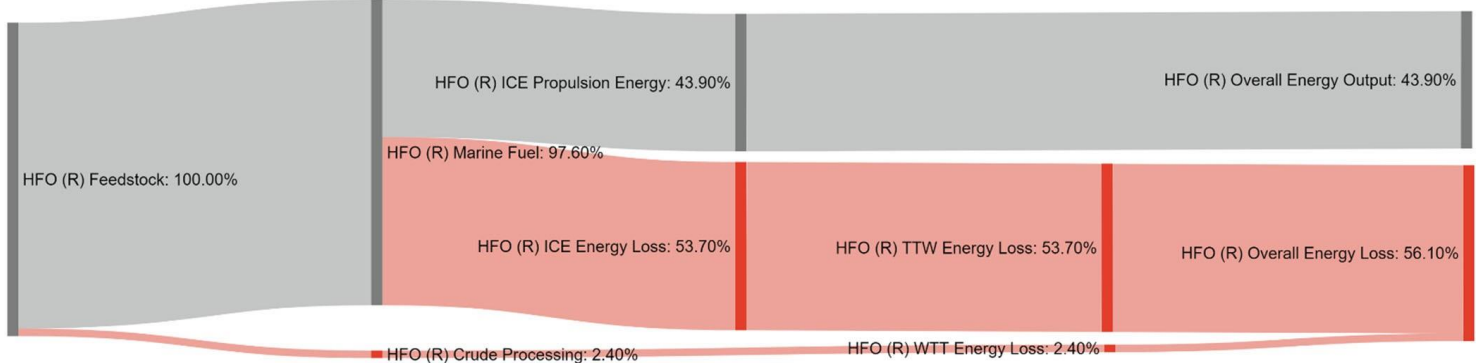
Ναυτιλιακό Καύσιμο	Συντελεστής Ενεργειακού Κόστους (\$/kj Ενέργειας Πρόωσης) *Για Ηλιακή Ενέργεια(Home Guide., n.d.)	Συντελεστής Ενεργειακού Κόστους-συμφώνως ASPEN (\$/kj Ενέργειας Πρόωσης)	Κόστος Καυσίμου (\$/kj Ενέργειας Πρόωσης) Δεδομένα από βιβλιογραφία (DNV.GL., 2019b)	Μετατροπείς ενέργειας (ICE/FC) (\$/kW) (DNV.GL., 2019b)	Κόστος Αποθήκευσης (\$/kj Ισοδύναμο του LNG) (DNV.GL., 2019b)	Κεφαλαιακό Κόστος Τεχνολογίας Δέσμευσης Άνθρακα (CCS) (Akker, 2017)
(Περίπτωση Αναφοράς): CRUDE-HFO-ICE	$4,86 \times 10^{-7}$	Δεν ορίζεται	$1,78 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$3,01 \times 10^{-5}$	0
CRUDE-HFO-ICE-CCS	$4,86 \times 10^{-7}$	$3,03 \times 10^{-6}$	$1,78 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$3,01 \times 10^{-5}$	$5,84 \times 10^{-6}$
NG-LNG-ICE-CCS	$1,22 \times 10^{-6}$	$3,03 \times 10^{-6}$	$1,78 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,20 \times 10^{-4}$	$5,84 \times 10^{-6}$
NG-H2-ICE	$8,68 \times 10^{-6}$	Δεν ορίζεται	$5,56 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$2,41 \times 10^{-4}$	0
NG-H2-FC	$8,68 \times 10^{-6}$	Δεν ορίζεται	$4,50 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$2,41 \times 10^{-4}$	0
NG-NH3-ICE	$2,40 \times 10^{-5}$	Δεν ορίζεται	$6,22 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$4,01 \times 10^{-5}$	0
NG-NH3-FC	$2,40 \times 10^{-5}$	Δεν ορίζεται	$5,05 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$7,52 \times 10^{-5}$	0
NG-MEOH-ICE-CCS	$1,35 \times 10^{-5}$	$2,55 \times 10^{-6}$	$3,35 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$4,01 \times 10^{-5}$	$5,84 \times 10^{-6}$
NG-ELECTRICITY-EM	$5,05 \times 10^{-6}$	Δεν ορίζεται	$5,01 \times 10^{-5}$	0	$3,71 \times 10^{-1}$	0
NG-ELECTRICITY-H2-FC	$5,05 \times 10^{-6}$	Δεν ορίζεται	$1,29 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$2,41 \times 10^{-4}$	0
NG-ELECTRICITY-NH3-FC	$1,96 \times 10^{-5}$	Δεν ορίζεται	$1,34 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$7,52 \times 10^{-5}$	0
NG-ELECTRICITY-MEOH-ICE	$1,31 \times 10^{-5}$	Δεν ορίζεται	$1,37 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$4,01 \times 10^{-5}$	0
BIOMASS-BIODIESEL-ICE	$4,50 \times 10^{-8}$	Δεν ορίζεται	$3,55 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$3,01 \times 10^{-5}$	0
BIOMASS-(BIO-MEOH)-ICE	$8,07 \times 10^{-6}$	Δεν ορίζεται	$3,35 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$4,01 \times 10^{-5}$	0
SOLAR-ELECTRICITY-EM	$1,11 \times 10^{-5}$ [32]	Δεν ορίζεται	$1,20 \times 10^{-5}$	0	$3,71 \times 10^{-1}$	0
SOLAR-ELECTRICITY-H2-FC	$1,61 \times 10^{-5}$ [32]	Δεν ορίζεται	$5,26 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-4}$	0
SOLAR-ELECTRICITY-NH3-FC	$2,56 \times 10^{-5}$ [32]	Δεν ορίζεται	$7,87 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$7,52 \times 10^{-5}$	0
SOLAR-ELECTRICITY-MEOH-ICE	$1,92 \times 10^{-5}$ [32]	Δεν ορίζεται	$1,46 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$4,01 \times 10^{-5}$	0

Πίνακας Α2: Συντελεστές Κόστους και οι αντίστοιχες πηγές τους.

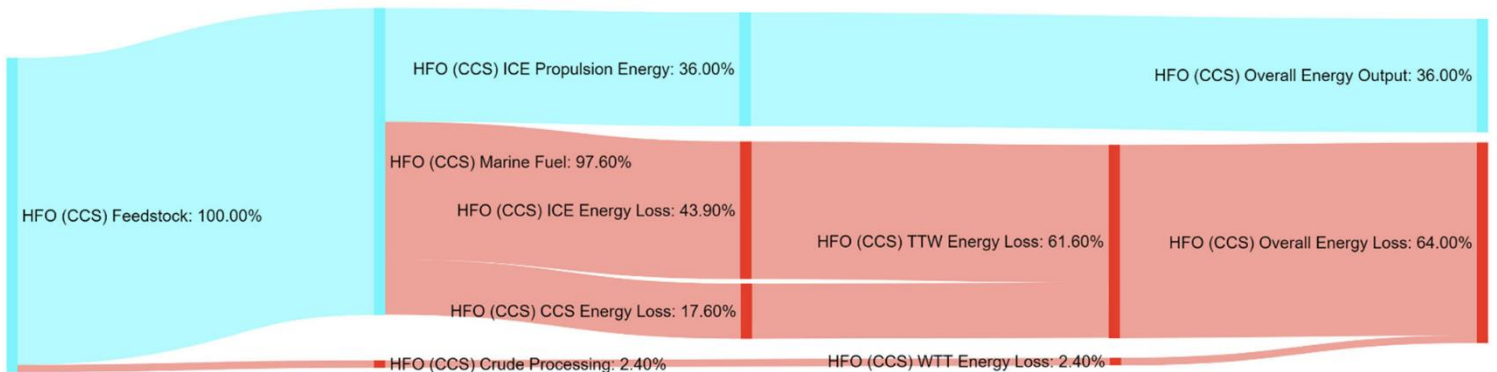


## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

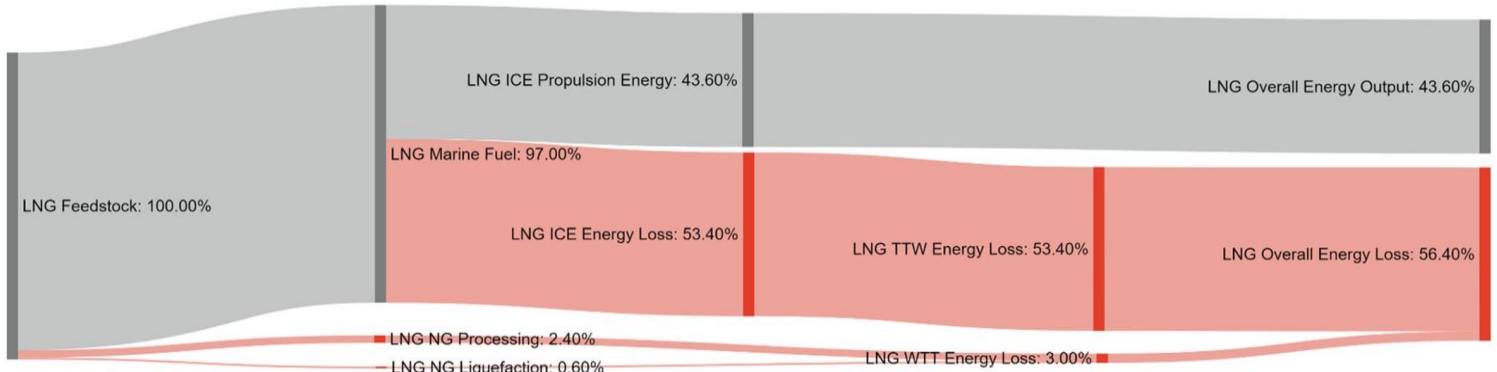
Τα διαγράμματα Sankey είναι ένα πολύ σημαντικό εύρημα αυτής της εργασίας, διότι απεικονίζουν τη ροή και τις απώλειες ενέργειας για καθεμία από τις διεργασίες κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των ναυτιλιακών καυσίμων. Η ροή ενέργειας έχει φορά από αριστερά προς τα δεξιά, όπου η αριστερή στήλη δείχνει τη συνολική ενέργεια που απαιτείται από την πρώτη ύλη όπου έχουμε συγκέντρωση του συνόλου (100%) της ενέργειας. Οι απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια της παραγωγής του καυσίμου και της μετατροπής ενέργειας υποδεικνύονται από τις κόκκινες χρωματικές γραμμές και τέλος το ποσοστό της συνολικής απώλειας ενέργειας και η ενέργεια που απομένει για την πρόωση του πλοίου εμφανίζονται στο δεξί άκρο του κάθε διαγράμματος (Li, 2021).



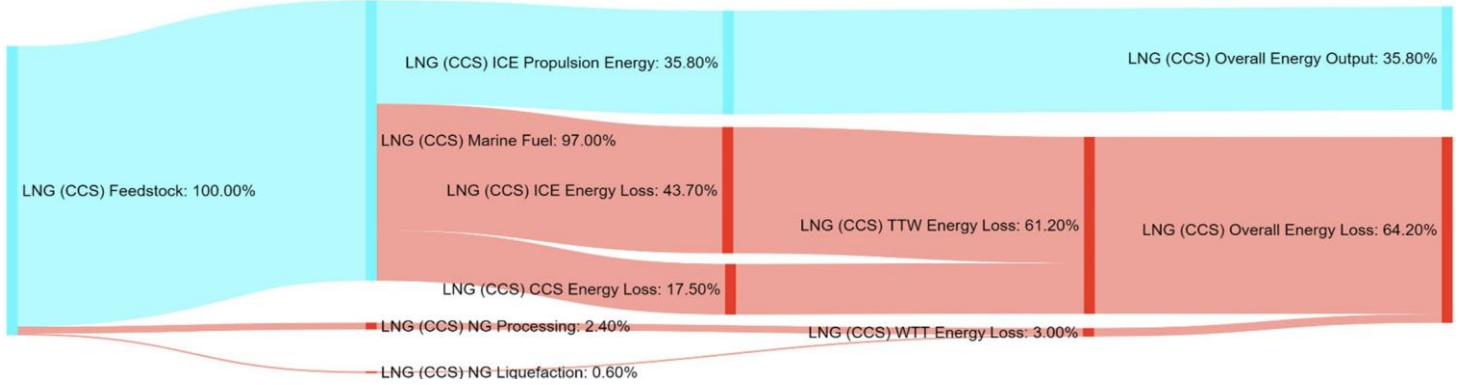
Σχήμα A9: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση αναφοράς του Μαζούτ (Heavy Fuel Oil – HFO).



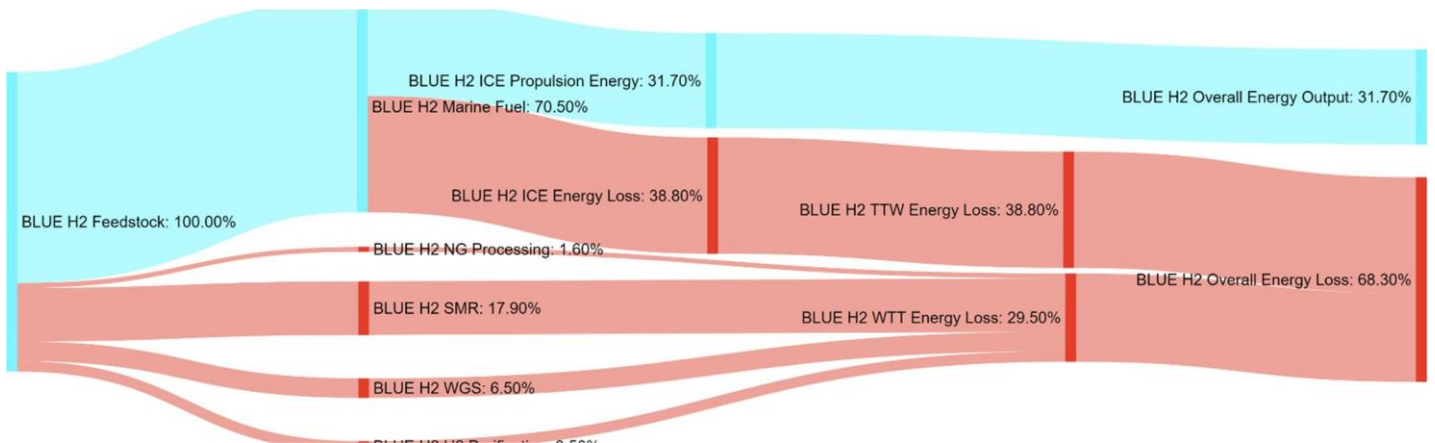
Σχήμα A10: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση μαζούτ με τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, HFO (CCS).



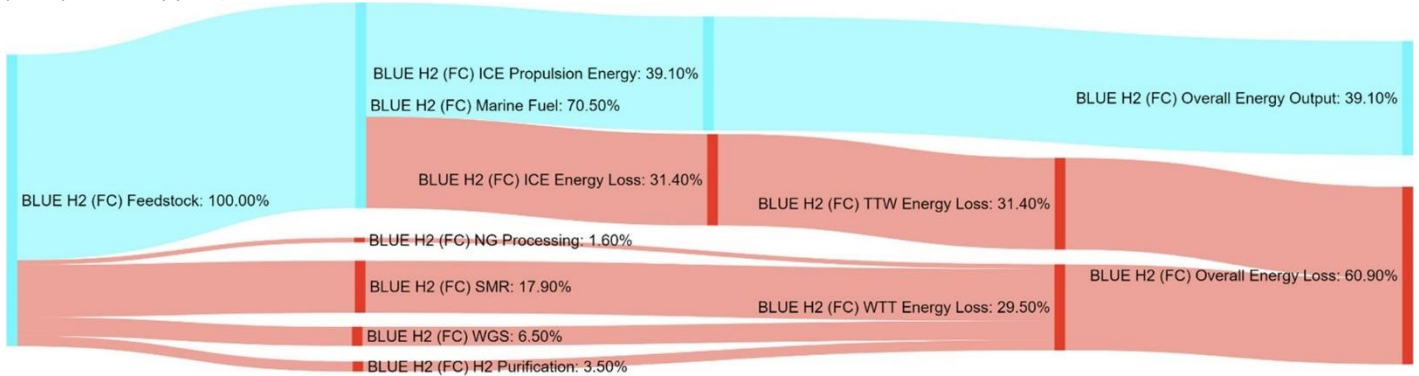
Σχήμα 11: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, LNG.



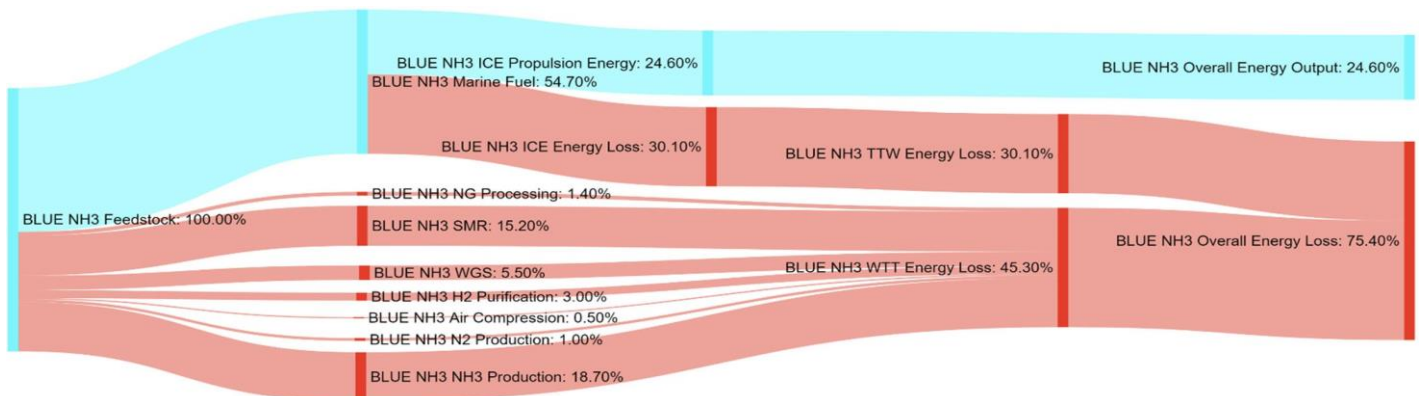
Σχήμα A12: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου με τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, LNG (CCS).



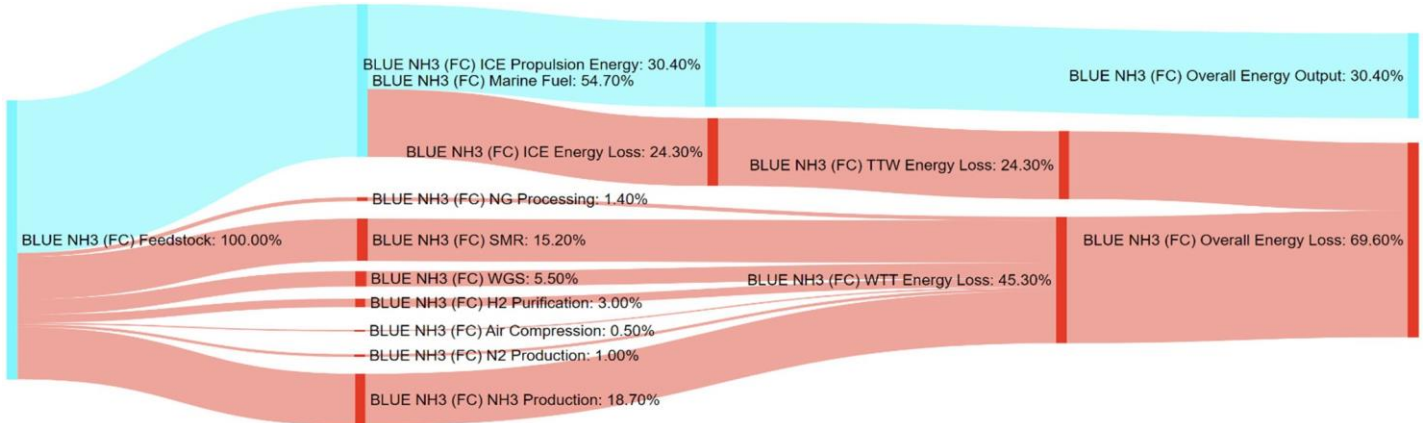
Σχήμα A13: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου από φυσικό αέριο με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης ως μετατροπέα ενέργειας, BLUE H2.



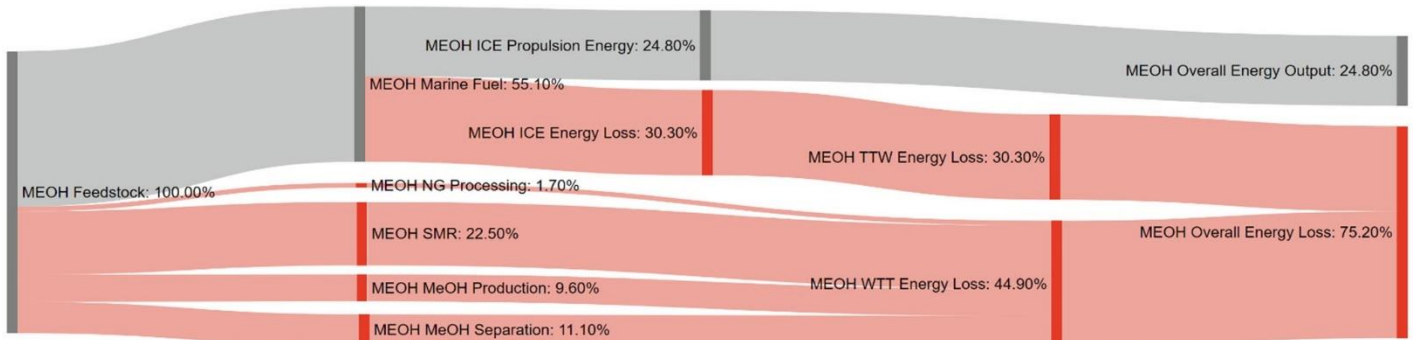
Σχήμα A14: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου από φυσικό αέριο με χρήση κυψέλης καυσίμου ως μετατροπέα ενέργειας, BLUE H2(FC).



Σχήμα A15: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Αμμωνίας παραγόμενης από φυσικό αέριο με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης ως μετατροπέα ενέργειας, BLUE NH3.



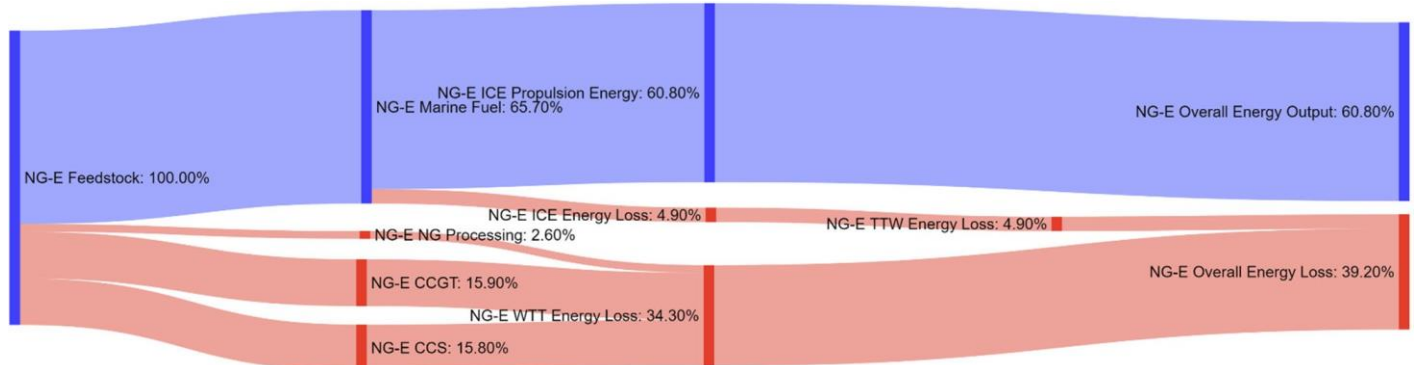
Σχήμα A16: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Αμμωνίας παραγόμενης από φυσικό αέριο με χρήση κυψέλης καυσίμου ως μετατροπέα ενέργειας, BLUE NH3 (FC).



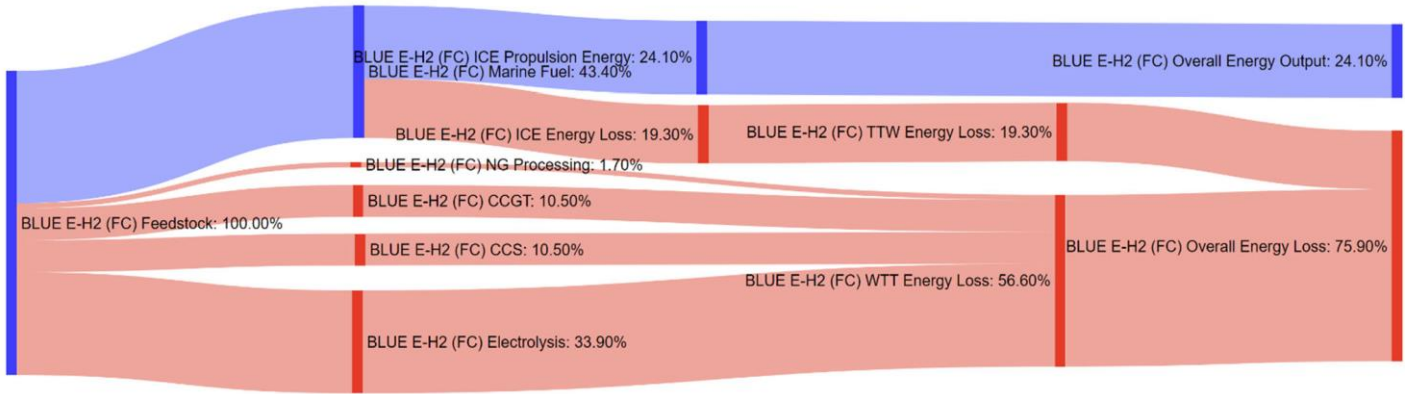
Σχήμα A17: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης από φυσικό αέριο με χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης ως μετατροπέα ενέργειας, MEOH.



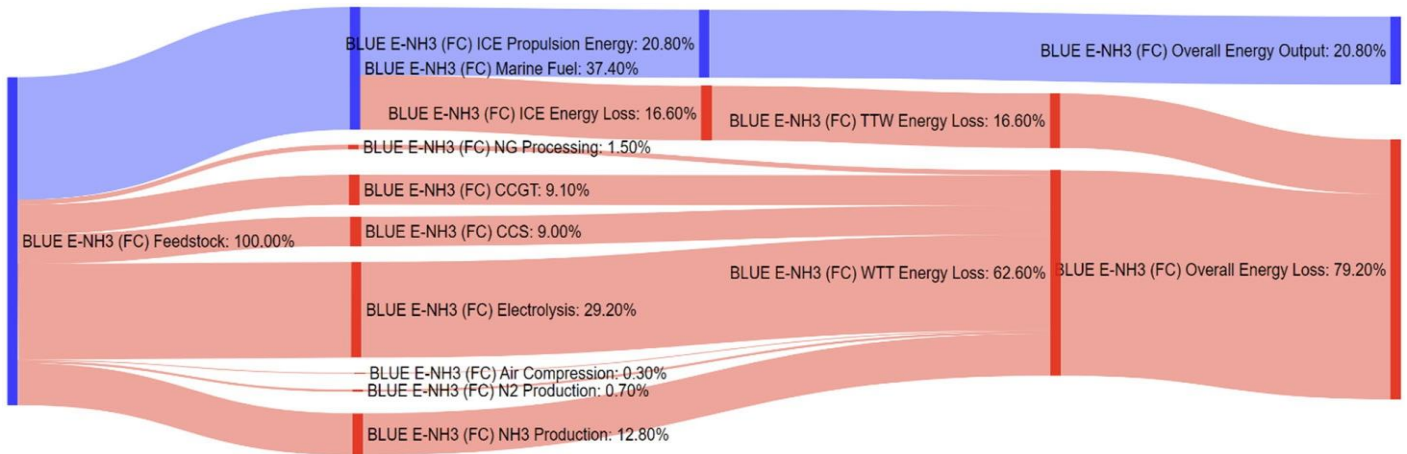
Σχήμα A18: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης από φυσικό αέριο με τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα, BLUE MEOH (CCS).



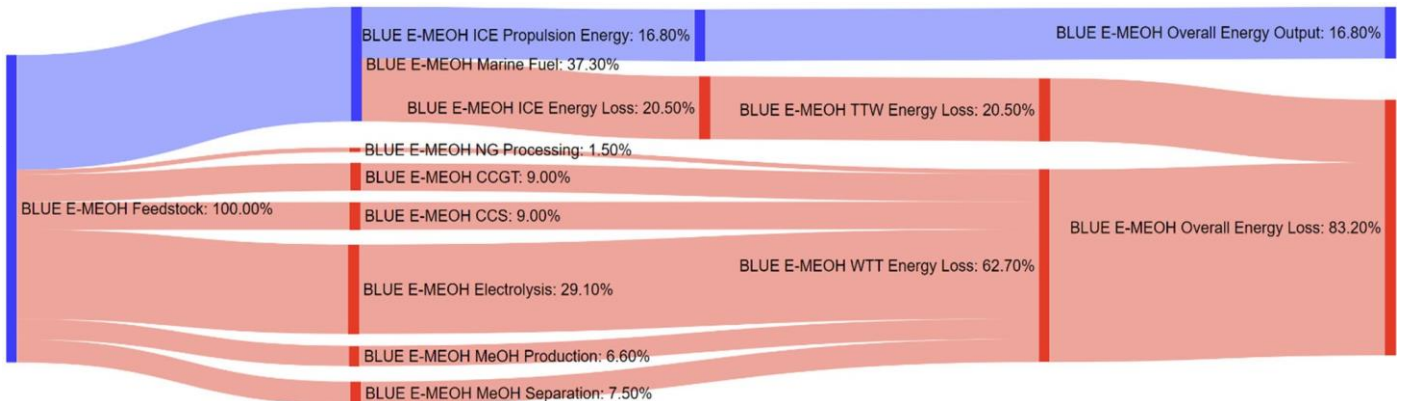
Σχήμα A19: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Ηλεκτρικής Ενέργειας παραγόμενης από φυσικό αέριο, NG-E.



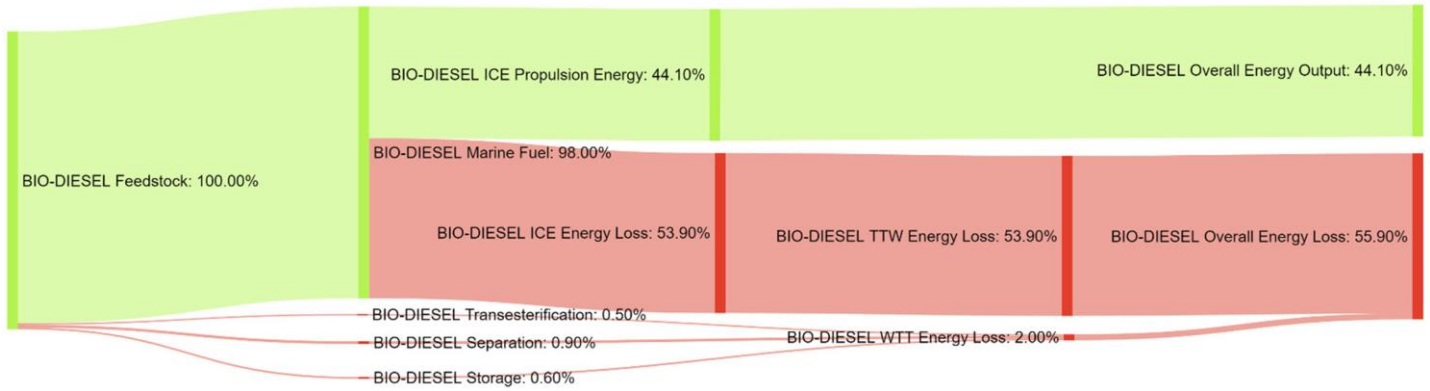
Σχήμα A20: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από φυσικό αέριο, NG-E-H2(FC).



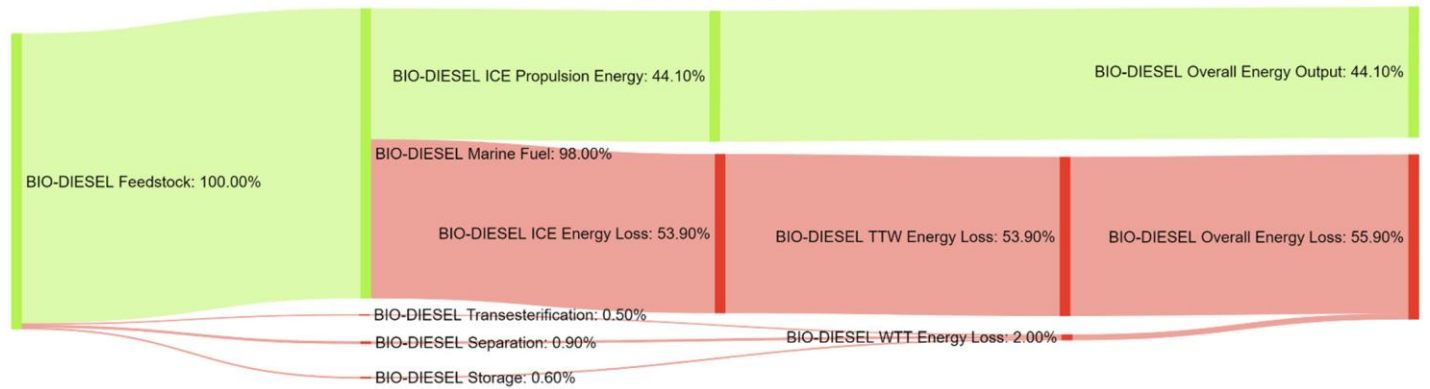
Σχήμα A21: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Αμμωνίας παραγόμενης με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από φυσικό αέριο, NG-E-NH3(FC).



Σχήμα A22: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από φυσικό αέριο, NG-E-MEOH.



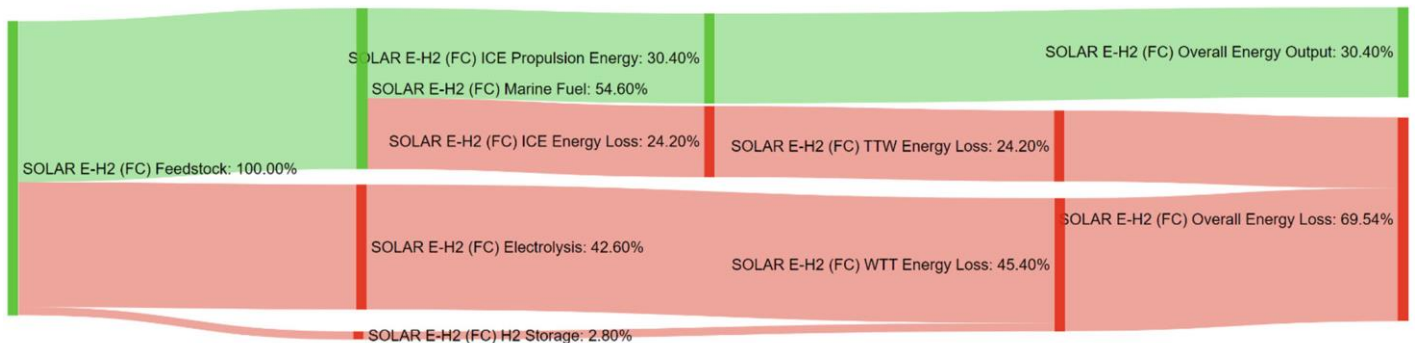
Σχήμα A23: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Βιοντίζελ παραγόμενου από βιομάζα, BIO-DIESEL.



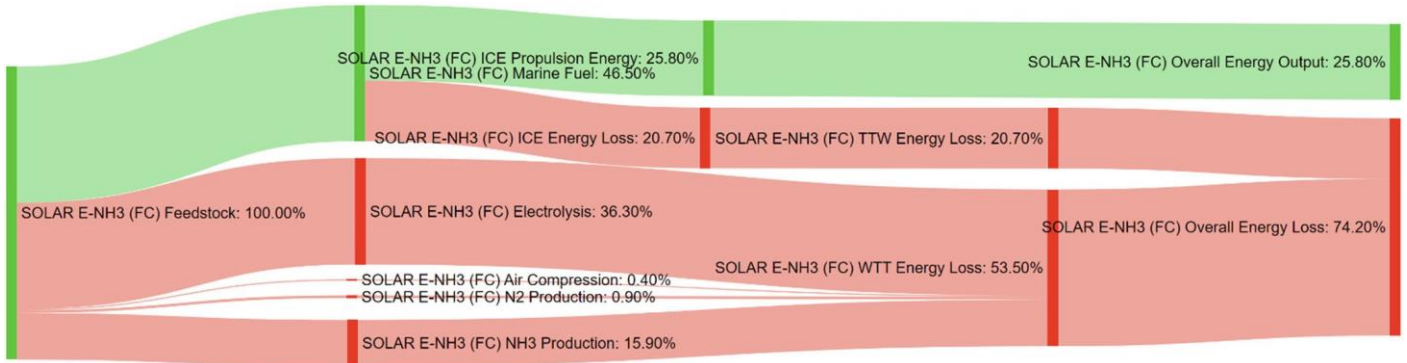
Σχήμα A24: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Βιομεθανόλης παραγόμενης από βιομάζα, BIO-MEOL.



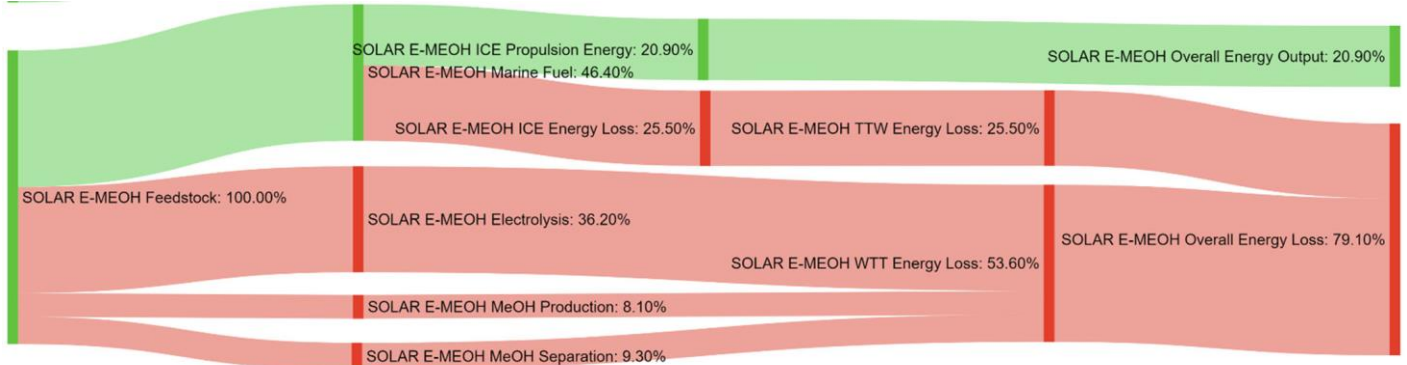
Σχήμα A25: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Ηλεκτρικής Ενέργειας παραγόμενης από ηλιακή ενέργεια, SOLAR-E.



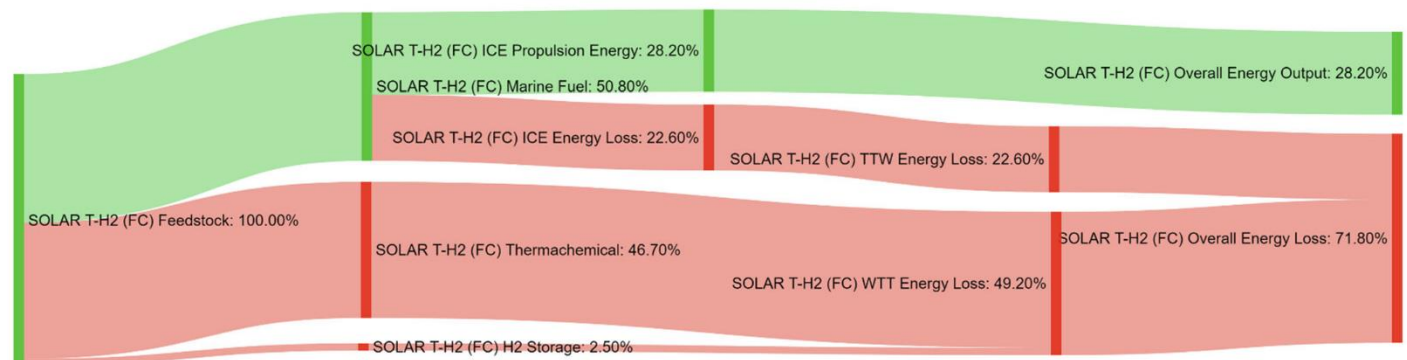
Σχήμα A26: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ηλιακή ενέργεια, SOLAR-E-H2(FC).



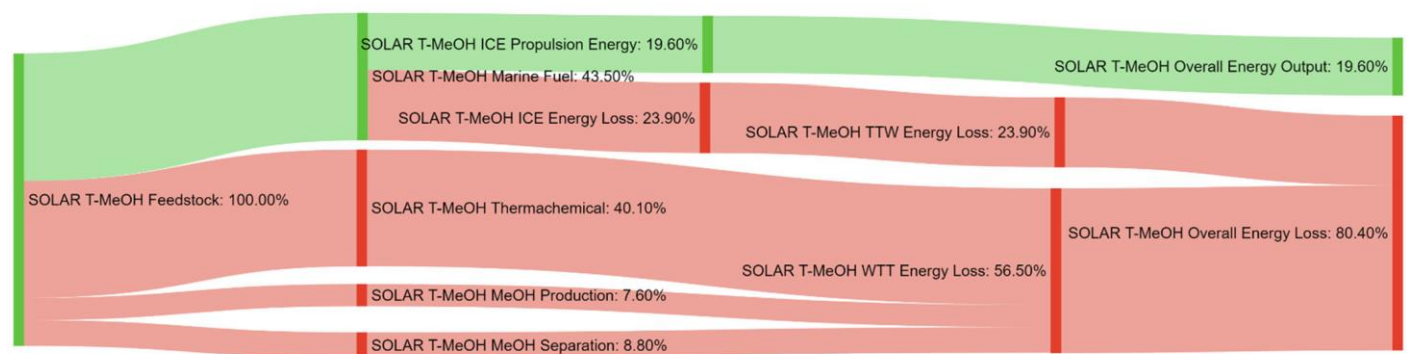
Σχήμα A27: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Αμμωνίας παραγόμενης με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ηλιακή ενέργεια, SOLAR-E-NH3(FC).



Σχήμα A28: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ηλιακή ενέργεια, SOLAR-E-MEOH.



Σχήμα A29: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Υδρογόνου παραγόμενου με χρήση ηλιακής θερμικής ενέργειας, SOLAR-T-H2.



Σχήμα A30: Διάγραμμα Sankey για την περίπτωση Μεθανόλης παραγόμενης με χρήση ηλιακής θερμικής ενέργειας, SOLAR-T-MEOH.