

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μελέτης Πλοίου και Θαλασσιών Μεταφορών



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου
Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

ΟΝΟΜΑ/ΕΠΩΝΥΜΟ: Παναγιώτης Σαμαράς

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δημήτριος Β. Λυρίδης

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2022

Κενή σελίδα.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στο τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022.

Πρώτα και κύρια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, Αναπληρωτή Καθηγητή Δημήτριο Β. Λυρίδη, τόσο για την υποστήριξη και τη βοήθεια του κατά την εκπόνηση της εργασίας, όσο και για την συγκατάθεση του για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την εταιρεία Neptune Lines για την διάθεση των δεδομένων που ζητήθηκαν, δίχως τα οποία δεν θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση της περίπτωσης μελέτης της εν λόγω εργασίας.

Χρωστάω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στην εταιρεία Load Line Marine SA, όπου μέλος του εργατικού της δυναμικού αποτελώ κι εγώ, καθώς τόσο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, όσο και κατά το προηγούμενο διάστημα, μου έδωσε την ελευθερία, αλλά και το κίνητρο για να ολοκληρώσω τη διαδικασία των σπουδών μου.

Ευχαριστώ τους φίλους και συναδέλφους μηχανικούς, Ζήνωνα και Κωνσταντίνο, για την συμπαράσταση τους κατά τη διάρκεια της πορείας μου στη Σχολή.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους γονείς μου, Λευτέρη και Έβελυν, οι οποίοι έχουν υπάρξει ακούραστοι υποστηρικτές όλων των επιλογών και των προσπαθειών μου.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την κοπέλα μου, Δήμητρα, δίχως την επιρροή και την υποστήριξη της οποίας, η πορεία μου στο Ε.Μ.Π. δεν θα ήταν η ίδια.

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|--|----|
| Ευχαριστίες..... | 3 |
| Πίνακας Περιεχομένων | 4 |
| Κατάλογος Πινάκων..... | 6 |
| Κατάλογος Εικόνων | 7 |
| Κατάλογος Σχημάτων | 8 |
| Συντομογραφίες | 10 |
| Περίληψη | 11 |
| Abstract..... | 12 |
| 1. Εισαγωγή | 13 |
| 2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση | 15 |
| 3. Κλιματική Αλλαγή και Ναυτιλία | 19 |
| 3.1. Κανονισμοί..... | 20 |
| 3.2. Ο κύκλος του άνθρακα..... | 22 |
| 4. Ναυτιλία και υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)..... | 25 |
| 4.1. Σχεδιασμός και τεχνολογία πλοίων | 26 |
| 4.1.1. Δεξαμενές καυσίμου..... | 27 |
| 4.1.2. Σύστημα παροχής καυσίμου | 28 |
| 4.2. Υποδομές παροχής καυσίμου (bunkering)..... | 30 |
| 4.3. Υπάρχων στόλος – Βιβλίο παραγγελιών..... | 33 |
| 5. Το υγροποιημένο βιομεθάνιο (bioLNG) | 35 |
| 5.1. Παραδείγματα εφαρμογής και ανάπτυξης | 36 |
| 5.2. Η αγορά του βιομεθανίου..... | 39 |
| 5.2.1. Υπάρχουσα και μελλοντική ζήτηση..... | 41 |
| 5.2.2. Διαθεσιμότητα στην παραγωγή..... | 44 |
| 5.2.3. Υποστήριξη για ανάπτυξη του βιομεθανίου (bioLNG) στην Ευρώπη..... | 49 |
| 5.3. Πρώτη ύλη – βιομάζα | 53 |
| 5.4. Αναερόβια χώνευση..... | 57 |
| 5.5. Διαδικασία παραγωγής (bioLNG) | 58 |
| 6. Προσεγγίσεις κύκλου ζωής..... | 62 |
| 6.1. Αξιολόγηση κύκλου ζωής – Life-cycle Assessment (LCA) | 64 |
| 6.2. Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής – Life-cycle cost Analysis (LCCA) | 66 |
| 6.3. Εφαρμογές στη ναυτιλία και στα καύσιμα..... | 69 |
| 7. Μελέτη περίπτωσης και δεδομένα | 73 |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως
Ναυτιλιακού Καυσίμου

| | |
|---|-----|
| 7.1. Πλοίο, κύρια μηχανή, ηλεκτρογεννήτριες & προφίλ λειτουργίας | 74 |
| 7.2. Επιλογή και χαρακτηριστικά κύριων μηχανών και ηλεκτρογεννητριών..... | 79 |
| 7.3. Δεδομένα για το κόστος καυσίμων και εκπομπών άνθρακα..... | 82 |
| 7.4. Δεδομένα για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου..... | 86 |
| 8. Υπολογισμοί και αποτελέσματα | 88 |
| 8.1. Υπολογισμός καταναλώσεων και εκπομπών | 90 |
| 8.2. Υπολογισμός κόστους..... | 94 |
| 8.3. Αξιολόγηση επένδυσης..... | 98 |
| 8.4. Ανάλυση ευαισθησίας & προοπτική του bioLNG..... | 101 |
| 9. Συμπεράσματα και επόμενες μελέτες..... | 105 |
| Βιβλιογραφία | 108 |
| Παράρτημα – Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας | 113 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1: Ανθρακικό αποτύπωμα παραγωγής βιομεθανίου | 24 |
| Πίνακας 2: Προβληματικοί σταθμοί εξαγωγής στη φάση της κατασκευής | 26 |
| Πίνακας 3: Σύγκριση των μηχανών ME-GI & X-DF | 29 |
| Πίνακας 4: Σύνολο όλων των ευρωπαϊκών λιμανιών με υποδομή LNG | 32 |
| Πίνακας 5: Διαθεσιμότητα πρώτων υλών | 46 |
| Πίνακας 6: Απόβλητα, κατάλληλα για βιολογική επεξεργασία, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων..... | 53 |
| Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά πρώτων υλών, κατάλληλων για βιολογική επεξεργασία, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (EKA 2007)..... | 55 |
| Πίνακας 8: Τυπική σύσταση βιοαερίου μετά τον Χωνευτή..... | 59 |
| Πίνακας 9: Επεξήγηση όρων στις εξισώσεις υπολογισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά IMO..... | 72 |
| Πίνακας 10: Διαθέσιμα δεδομένα..... | 74 |
| Πίνακας 11: Βασικά χαρακτηριστικά πλοίου, κύριας μηχανής και ηλεκτρογεννητριών | 74 |
| Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά δείγματος και καταστάσεις πλοίου/κύριας μηχανής | 75 |
| Πίνακας 13: Προφίλ λειτουργίας Κύριας Μηχανής για την κατάσταση πλεύσης | 77 |
| Πίνακας 14: Προφίλ λειτουργίας Κύριας Μηχανής για την κατάσταση ελιγμών..... | 78 |
| Πίνακας 15: Προφίλ λειτουργίας ηλεκτρογεννητριών | 78 |
| Πίνακας 16: Κατανάλωση καυσίμου κύριας μηχανής και ηλεκτρογεννητριών..... | 78 |
| Πίνακας 17: Κύρια μηχανή και ηλεκτρογεννήτριες - υπάρχων πλοίο & μετασκευή..... | 79 |
| Πίνακας 18: Φόρτιση κύριας μηχανής 7S50ME-C8.2 και ειδική κατανάλωση καυσίμου πετρελαίου | 80 |
| Πίνακας 19: Φόρτιση ηλεκτρογεννήτριας 7L23/30H και ειδική κατανάλωση καυσίμου πετρελαίου | 80 |
| Πίνακας 20: Φόρτιση ηλεκτρογεννήτριας 7L23/30DF και ειδική κατανάλωση αερίου καυσίμου | 80 |
| Πίνακας 21: Φόρτιση κύριας μηχανής 7S50ME-C8.2-GI και ειδική κατανάλωση αερίου καυσίμου | 81 |
| Πίνακας 22: Κόστος ανεφοδιασμού καυσίμων (bunkering prices) για το λιμάνι του Rotterdam [49] και κόστος δικαιωμάτων εκπομπών άνθρακα από το EU Emission Trading System | 82 |
| Πίνακας 23: Ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή του κόστους των καυσίμων για το διάστημα αναφοράς | 83 |
| Πίνακας 24: Ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή του κόστους των καυσίμων για το διάστημα αναφοράς, πριν την αύξηση των τιμών | 84 |
| Πίνακας 25: Περιγραφή κόστους παραγωγής και διάθεσης του bioLNG | 85 |
| Πίνακας 26: Δεδομένα για τον υπολογισμό του ισοδύναμου CO ₂ κατά IMO | 87 |
| Πίνακας 27: Υπολογισμός ισοδύναμου CO ₂ για κάθε ένα από τα καύσιμα ενδιαφέροντος για κάθε φάση, και συνολικά..... | 87 |
| Πίνακας 28: Προφίλ λειτουργίας πλοίου και κύριας μηχανής | 90 |
| Πίνακας 29: Προφίλ λειτουργίας ηλεκτρογεννητριών | 91 |
| Πίνακας 30: Ειδικές καταναλώσεις κύριας μηχανής συναρτήσει της φόρτισης σε κάθε κατάσταση λειτουργίας | 91 |
| Πίνακας 31: Ειδικές καταναλώσεις ηλεκτρογεννητριών συναρτήσει της φόρτισης τους | 91 |
| Πίνακας 32: Υπολογισμός επιμέρους καταναλώσεων κύριας μηχανής | 92 |
| Πίνακας 33: Υπολογισμός επιμέρους καταναλώσεων ηλεκτρογεννητριών | 92 |

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 34: Ετήσιες συνολικές καταναλώσεις ανά σενάριο | 92 |
| Πίνακας 35: Υπολογισμός εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ανά σενάριο | 93 |
| Πίνακας 36: Υπολογισμός συνολικού κόστους ανά μήνα, συμπεριλαμβανομένων και των δικαιωμάτων άνθρακα, για όλα τα σενάρια της μελέτης, και σύγκριση σεναρίων, για την βραχυπρόθεσμη εκτίμηση της τιμής του bioLNG | 95 |
| Πίνακας 37: Υπολογισμός συνολικού κόστους ανά μήνα, συμπεριλαμβανομένων και των δικαιωμάτων άνθρακα, για όλα τα σενάρια της μελέτης, και σύγκριση σεναρίων, για την μακροπρόθεσμη εκτίμηση της τιμής του bioLNG | 96 |
| Πίνακας 38: Αξιολόγηση επένδυσης | 99 |
| Πίνακας 39: Εισροές στην ανάλυση ευαισθησίας | 101 |
| Πίνακας 40: Αποτέλεσμα ανάλυσης ευαισθησίας για τιμή του LNG στα 400 €/mt, για 10% πρόσμιξης bioLNG | 102 |
| Πίνακας 41: Αποτέλεσμα ανάλυσης ευαισθησίας για τιμή του LNG στα 1400 €/mt, για 10% πρόσμιξης bioLNG | 102 |
| Πίνακας 42: Αποτέλεσμα ανάλυσης ευαισθησίας για τιμή του LNG στα 400 €/mt, για 30% πρόσμιξης bioLNG | 103 |
| Πίνακας 43: Αποτέλεσμα ανάλυσης ευαισθησίας για τιμή του LNG στα 1400 €/mt, για 30% πρόσμιξης bioLNG | 103 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Ταχύς κύκλος άνθρακα, μεταξύ γης, ατμόσφαιρας και ωκεανών, σε γιγατόνους ανά έτος | 23 |
| Εικόνα 2: Τυπικές διατάξεις δεξαμενών καυσίμου και του κύριου εξοπλισμού | 27 |
| Εικόνα 3: Χάρτης πλοίων ανεφοδιασμού LNG | 31 |
| Εικόνα 4: Παράδοση φορτίου bioLNG σε σταθμό ανεφοδιασμού LNG της Shell | 37 |
| Εικόνα 5: 3D σχέδιο του εργοστασίου FirstBio2Shipping | 38 |
| Εικόνα 6: Πλοίο της TitanLNG κατά τη διάρκεια προμήθειας LNG/bioLNG στην Αμβέρσα | 39 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1: Οι μεγαλύτεροι εξαγωγείς LNG και οι αναπτυσσόμενοι τερματικοί σταθμοί εξαγωγών και εισαγωγών..... | 25 |
| Σχήμα 2: Χαρακτηριστικά Δεξαμενών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου | 28 |
| Σχήμα 3: Εκπομπές MEK διπλού καυσίμου..... | 29 |
| Σχήμα 4: Εξέλιξη του στόλου των πλοίων προμήθειας LNG | 30 |
| Σχήμα 5: Περιοχές λειτουργίας των πλοίων παροχής καυσίμου LNG..... | 31 |
| Σχήμα 6: Εξέλιξη του στόλου που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το LNG..... | 33 |
| Σχήμα 7: Σύνθεση του στόλου που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το LNG | 33 |
| Σχήμα 8: Βιβλίο παραγγελιών έναντι παραγγελιών πλοίων με εναλλακτικά καύσιμα | 34 |
| Σχήμα 9: Αριθμός εργοστασίων bioLNG - Παραγωγική δυνατότητα 2018-2024 | 35 |
| Σχήμα 10: Εξέλιξη του ευρωπαϊκού στόλου φορτηγών κατανάλωσης LNG | 36 |
| Σχήμα 11: Παραγωγή ενέργειας από βιομεθάνιο | 40 |
| Σχήμα 12: Ποσοστό σύνδεσης της παραγωγής βιομεθανίου στα δίκτυα μεταφορών και φυσικού αερίου κατά το 2020..... | 41 |
| Σχήμα 13: Αναμενόμενη ζήτηση βιομεθανίου στην Ευρώπη το 2040, με βάση δύο διαφορετικά σενάρια βιωσιμότητας..... | 42 |
| Σχήμα 14: Κατανάλωση φυσικού αερίου ανά τομέα | 43 |
| Σχήμα 15: Παραγωγή βιοαερίου ανά περιοχή και από διαφορετικές πρώτες ύλες..... | 45 |
| Σχήμα 16: Παραγωγική Διαδικασία Βιομεθανίου και ποσοστό αναβαθμιζόμενου βιοαερίου ανά περιοχή | 45 |
| Σχήμα 17: Δυναμικό παραγωγής βιομεθανίου ανά πρώτη ύλη και χώρα..... | 46 |
| Σχήμα 18: Δυναμικό Βιομεθανίου σε TWh/έτος στην Ευρώπη ανά κατηγορία πρώτης ύλης | 47 |
| Σχήμα 19: Σχετικές μελέτες για την διαθεσιμότητα των πρώτων υλών προς παραγωγή βιομεθανίου στην Ευρώπη..... | 47 |
| Σχήμα 20: Παγκόσμιο δυναμικό παραγωγής βιομεθανίου και βιοαερίου, σε σύγκριση με την σημερινή παραγωγή | 48 |
| Σχήμα 21: Αναμενόμενη χρήση του βιοαερίου και ποσοστό αναβάθμισης σε δύο διαφορετικά σενάρια βιώσιμης ανάπτυξης..... | 49 |
| Σχήμα 22: Αναμενόμενη απορρόφηση του βιομεθανίου από διάφορους κλάδους και για δύο διαφορετικά σενάρια βιώσιμης ανάπτυξης..... | 49 |
| Σχήμα 23: Υπάρχοντα υποστηρικτικά μέτρα και αναμενόμενη παραγωγή βιομεθανίου σε TWh/έτος έως το 2030 | 52 |
| Σχήμα 24: Στάδια Αναερόβιας Χώνευσης | 58 |
| Σχήμα 25: Στάδια παραγωγής βιοαερίου | 59 |
| Σχήμα 26: Τα βασικά μέρη μίας αγροτικής μονάδας παραγωγής βιοαερίου | 60 |
| Σχήμα 27: Βασικά στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος | 63 |
| Σχήμα 28: Γραφική αποτύπωση της δομής της LCA κατά ISO..... | 65 |
| Σχήμα 29: Ενδεικτική δομή των βημάτων της LCCA/LCC μεθοδολογίας | 68 |
| Σχήμα 30: Ανάλυση συστημάτων πλοίου σε τέσσερα στάδια του κύκλου ζωής για ολιστική μελέτη των εκπομπών αέριων ρύπων ενός πλοίου..... | 69 |
| Σχήμα 31: Γενικό διάγραμμα διαδρομής ενός καυσίμου | 70 |
| Σχήμα 32: Ο κύκλος ζωής για το ορυκτό LNG και για συμβατικά καύσιμα πετρελαίου..... | 71 |
| Σχήμα 33: Ο κύκλος ζωής του βιομεθανίου (bioLNG)..... | 72 |
| Σχήμα 34: Ιστόγραμμα καταγραφών ισχύος της Κύριας Μηχανής στο σύνολο του δείγματος ... | 75 |
| Σχήμα 35: Ιστόγραμμα καταγραφών Κύριας Μηχανής για την κατάσταση πλεύσης..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 36: Ιστόγραμμα καταγραφών Κύριας Μηχανής για την κατάσταση ελιγμών | 77 |
| Σχήμα 37: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου πετρελαίου της 7S50ME-C8.2..... | 80 |
| Σχήμα 38: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου πετρελαίου της 7L23/30H | 80 |
| Σχήμα 39: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου πετρελαίου της 7L23/30DF | 80 |
| Σχήμα 40: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης πιλοτικού καυσίμου της 7S50ME-C8.2-GI | 81 |
| Σχήμα 41: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης αέριου καυσίμου της 7S50ME-C8.2-GI | 81 |
| Σχήμα 42: Διάγραμμα εξέλιξης κόστους ανεφοδιασμού καυσίμων [€/mt] στο λιμάνι του Rotterdam τα τελευταία 3 χρόνια..... | 83 |
| Σχήμα 43: Διάγραμμα εξέλιξης κόστους ανεφοδιασμού καυσίμων [€/mt] στο λιμάνι του Rotterdam για τελευταία 3 χρόνια, έως και πριν την απότομη αύξηση των τιμών | 84 |
| Σχήμα 44: Εξέλιξη των δικαιωμάτων εκπομπών άνθρακα από το 2013 έως και σήμερα | 86 |
| Σχήμα 45: Μεθοδολογία υπολογισμών εκπομπών – Αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA) | 88 |
| Σχήμα 46: Μεθοδολογία υπολογισμών κόστους – Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (LCCA/LCC) | 89 |
| Σχήμα 47: Χρονική εξέλιξη της διαφοράς κόστους μεταξύ 1 ^{ου} και 2 ^{ου} σεναρίου, με και χωρίς το κόστος δικαιωμάτων άνθρακα..... | 97 |
| Σχήμα 48: Εξέλιξη επένδυσης και αξιολόγηση, με πληθωρισμό στο 3.1% και επιτόκιο 1.8%.. | 100 |
| Σχήμα 49: Εξέλιξη της επένδυσης και αξιολόγηση, με πληθωρισμό στο 7,5 και επιτόκιο στο 1.5% | 100 |

Συντομογραφίες

CNG – Compressed Natural Gas
COP – Conference of Parties
D/G – Diesel Generator
DF – Dual Fuel
ETS – Emission Trading System
EU – European Union
FGC – Fuel Gas Consumption
FOC – Fuel Oil Consumption
GHG – Greenhouse Gas
HFO – Heavy Fuel Oil
IEA – International Energy Agency
IMO – International Maritime Organization
ISO – International Organization of Standardization
LCA – Life Cycle Assessment
LCC – Life Cycle Costing
LCCA – Life Cycle Cost Analysis
LCV – Lower Calorific Value
LNG – Liquefied Natural Gas
LOC – Lubrication Oil Consumption
M/E – Main Engine
MGO – Marine Gas Oil
NDC – Nationally Determined Contributions
NGVA – Natural & bioGas Vehicle Association
NPV – Net Present Value
POC – Pilot Oil Consumption
RED II (Renewable Energy Directive)
ROI – Return of Investment
SFGC – Specific Fuel Gas Consumption
SFOC – Specific Fuel Oil Consumption
SLOC – Specific Lubrication Oil Consumption
SPOC – Specific Pilot Oil Consumption
STS – Ship-to-ship
TtW – Tank to Wake
UN – United Nations, Ηνωμένα Έθνη
UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change
VLSFO – Very Low Sulphur Fuel Oil
WtT – Well to Tank
WtW – Well to Wake
ΑΠΕ – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑΧ – Αναερόβια Χώνευση
ΔΕΔΑ - Δημόσια επιχείρηση Δικτύων Διανομής Αερίου
ΕΕ – Ευρωπαϊκή Ένωση

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να διερευνήσει την προοπτική του υγροποιημένου βιομεθανίου (bioLNG) ως ναυτιλιακό καύσιμο. Η προοπτική του αφορά στον τρόπο αλλά και το εκτιμώμενο δυναμικό παραγωγής, στις υποδομές που υφίστανται λόγω του υγροποιημένου φυσικού αερίου στη ναυτιλιακή βιομηχανία, στην δραστική μείωση ρύπων σε όλο τον κύκλο ζωής του, καθώς επίσης και στο εκτιμώμενο κόστος που το συνοδεύει. Συνεπώς, η εργασία περιλαμβάνει μία εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση και μία μελέτη περίπτωσης. Από τη μία, βιβλιογραφική επισκόπηση εστιάζει περισσότερο στο νομικό και κανονιστικό πλαίσιο που υφίσταται, τόσο σε επίπεδο ναυτιλίας, όσο και ευρύτερα, καθώς επίσης και στη διαδικασία παραγωγής και τη διαθεσιμότητα του bioLNG. Παράλληλα, μελετάται και το LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο, ώστε να αποτελέσει περίπτωση βάσης για τη σταδιακή υιοθέτηση του bioLNG, μιας και πρόκειται για σχεδόν ίδιο καύσιμο, απλά διαφορετικού τρόπου παραγωγής. Από την άλλη, η μελέτη περίπτωσης έχει σκοπό να εξετάσει τις εκπομπές ρύπων και το συνολικό λειτουργικό κόστος, συμπεριλαμβάνοντας το κόστος των δικαιωμάτων διοξειδίου του άνθρακα, για τρία διαφορετικά συνέρια, η σύγκριση των οποίων μπορεί να δώσει μία εκτίμηση για το πιθανό όφελος από την χρήση του bioLNG. Τα τρία σενάρια αποτελούνται i) από την αποκλειστική χρήση πετρελαίου, ii) από την αποκλειστική χρήση LNG, και iii) από την χρήση μίγματος LNG και bioLNG. Η μελέτη περίπτωσης αφορά συγκεκριμένο Ro-Ro πλοίο, για το οποίο διατέθηκαν πραγματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς. Για την υλοποίηση της, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο που συνδυάζει μία μέθοδο αξιολόγησης του κύκλου ζωής (LCA) και μία μέθοδο ανάλυσης του κόστους κύκλου ζωής (LCCA). Επιπλέον, στο πλαίσιο της μελέτης περίπτωσης, η παρούσα διπλωματική εργασία προχώρησε σε μία αξιολόγηση επένδυσης μετασκευής πλοίου ώστε να χρησιμοποιεί LNG, καθώς αποτελεί αναγκαίο βήμα για την μετάβαση στο bioLNG. Παράλληλα, για την διαχείριση του εύρους που χαρακτηρίζει ορισμένες μεταβλητές του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε και μία ανάλυση ευαισθησίας, προκειμένου να αποδειχθούν οι περιοχές τιμών που έχει όφελος η χρήση του bioLNG σε κάποια δεδομένη ποσότητα πρόσμιξης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς για να γίνει ανταγωνιστικό το bioLNG έναντι του LNG χρειάζεται σταδιακή μείωση του κόστους προμήθειας αυτού, και ταυτόχρονη σημαντική αύξηση στις τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Επειδή, όμως, πράγματι αναμένεται μία τέτοια εξέλιξη και για τις δύο μεταβλητές, το bioLNG φαίνεται πως μπορεί να είναι μία λύση στην κατεύθυνση της απανθρακοποίησης, και να προτιμηθεί μελλοντικά έναντι των υπολοίπων εναλλακτικών καυσίμων, με σημαντικό όφελος από τη μείωση των εκπομπών αερίων, αλλά και από το σχετικό οικονομικό όφελος.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: κλιματική αλλαγή, απανθρακοποίηση, ναυτιλία, υγροποιημένο βιομεθάνιο, υγροποιημένο φυσικό αέριο, μελέτη κύκλου ζωής, μελέτη περίπτωσης

Abstract

Present diploma thesis examines the potential of bioLNG as a marine fuel. To cover all its aspects, the study focuses on the production process and production potential, the available infrastructure due to the role of LNG in maritime industry, the environmental footprint in terms of emission reduction and the economic aspects of adopting bioLNG. Therefore, this work includes an extensive literature review and a detailed case study of emissions and costs. On the one hand, the literature review comprises the regulatory aspect, especially in respect to the maritime industry, and the production process of bioLNG, together with its production potential. Meanwhile, the case of LNG as a marine fuel is also examined because it can serve as a basis for the growth and gradual adoption of bioLNG, since these two are extremely similar fuels, but with different production processes. On the other hand, the case study aims to examine the emissions and the overall operational costs, including the cost of carbon permits, for three different scenarios. The comparison of the scenarios can show some indications for the possible benefit from use of bioLNG. These three scenarios include the use of fuel oil, the ii) use of LNG only, and iii) the use of a combined mixture between LNG and bioLNG. The case study refers to a specific Ro-Ro ship, for which real data are available and are being used in the calculations. For the materialization of the case study, a framework was adopted for appreciating the emissions and the operational costs. This framework combined a life-cycle assessment approach and a life-cycle cost analysis approach. Additionally, present thesis conducted an assessment for a theoretical investment, referring to a ship retrofit for using LNG as a fuel, which is a necessary step towards the wide adoption of bioLNG. For handling the large value range of several variables, including fuel prices, a multivariable sensitivity analysis was employed, in order to show the areas of benefit, with respect to the changing variables. Based on the results, for bioLNG to be competitive against LNG, there should be a progressive reduction in bunkering cost (and therefore production) of bioLNG, together with a significant increase in the carbon permits. However, because this could be an actual future scenario, bioLNG could be assumed as a strong solution towards decarbonization, while also be of high preference with respect to other alternative and renewable fuels.

KEYWORDS: climate change, decarbonization, maritime industry, biomethane, bioLNG, LNG, life-cycle assessment, life-cycle cost analysis, case study

1. Εισαγωγή

Σήμερα, η Κλιματική Αλλαγή και οι συνέπειες της είναι μία κοινώς αποδεκτή πραγματικότητα. Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι τέτοια που μπορεί να αποσταθεροποιήσει το κλίμα σε τέτοιο βαθμό ώστε να απειλήσει την ανθρώπινη ζωή, όχι μόνο στο μέλλον, αλλά και στο σήμερα. Για την αναχαίτιση των συνεπειών της Κλιματικής Αλλαγής, γίνεται μία τεράστια προσπάθεια από κράτη και οργανισμούς παγκοσμίως ώστε να υλοποιηθεί μία πράσινη μετάβαση σε μία οικονομία μηδενικών ρύπων που θα αποτρέψει, τόσο βραχυπρόθεσμα, αλλά και μακροπρόθεσμα, τις καταστροφές που μπορεί να επιφέρει μία παρατεταμένη κλιματική κρίση. Από τη μία η τεχνολογική πρόοδος, και από την άλλη η πολιτική βούληση των ηγεσιών ανά τις χώρες, ιδιαίτερα των ανεπτυγμένων, είναι τα δύο απαραίτητα προκειμένου να υλοποιηθεί αυτή η πράσινη μετάβαση. Όσον αφορά την τεχνολογική πρόοδο, παρατηρούμε διαρκώς ολοένα και περισσότερα τεχνολογικά επιτεύγματα ικανά να μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Εναλλακτικά καύσιμα, κινητήρες χαμηλών ρύπων, εναλλακτικές μορφές παραγωγής ενέργειας, τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα, είναι ορισμένα από εκείνα που συμβάλλουν άλλα λιγότερο και άλλα περισσότερο στην προσπάθεια απανθρακοποίησης. Σχετικά με την πολιτική πρωτοβουλία, εδώ και αρκετά χρόνια υπάρχει το πλαίσιο συνεννόησης των κρατών για τη διαμόρφωση μίας από κοινού στρατηγικής για το κλίμα, η οποία όμως περιοριζόταν σε πολύ μικρές παρεμβάσεις, που μας έφτασαν και στο σημερινό σημείο. Κατά την τελευταία δεκαετία έχουν γίνει σημαντικά βήματα σε επίπεδο αποφάσεων, όπως η Συμφωνία του Παρισιού για το κλίμα, αλλά πρέπει να γίνουν πολλά ακόμα βήματα για την υλοποίηση της πράσινης μετάβασης. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναλάβει ισχυρή πρωτοβουλία για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας, με αρκετούς ενδιάμεσους στόχους, ξεοδεύοντας τεράστια χρηματικά ποσά στην τεχνολογική ανάπτυξη παράλληλα με τη λήψη αποφάσεων για αλλαγή του κανονιστικού πλαισίου που θα οδηγήσει τις βιομηχανίες αλλά και την κοινωνία να κάνει αυτή τη μετάβαση σε μία οικονομία μηδενικού άνθρακα.

Η ναυτιλία, αν και πολύ συντηρητική ως βιομηχανία, έχει κάνει κάποια μικρά βήματα στην κατεύθυνση της απανθρακοποίησης, επενδύοντας τόσο στις διάφορες τεχνολογίες μείωσης που αναπτύσσονται, όσο και γύρω από τα εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα. Ταυτόχρονα, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός προσπαθεί να εισάγει ένα κανονιστικό πλαίσιο που θα υποχρεώνει σε σημαντική μείωση ρύπων και θα ωθεί σε πράσινες τεχνολογίες και καύσιμα. Ως εναλλακτική στη συμβατική λύση του πετρελαίου ως ναυτιλιακό καύσιμο, πολύ έδαφος έχει κερδίσει κατά τα τελευταία χρόνια το υγροποιημένο φυσικό αέριο, το οποίο αν και ορυκτό καύσιμο, έχει σαφώς μειωμένους ρύπους σε σχέση με το πετρέλαιο και των διάφορων παραγώγων του. Γι' αυτό και από πολλούς θεωρείται ως μεταβατικό καύσιμο για τα επόμενα χρόνια, έως ότου καταστεί εφικτή η υιοθέτηση άλλων εναλλακτικών καυσίμων ή τεχνολογιών πρόωσης. Σημαντική προοπτική, σε αυτό το πλαίσιο, έχει το υγροποιημένο βιομεθάνιο. Πρόκειται για ένα βιοκαύσιμο, με πρώτη ύλη τα διάφορα είδη βιομάζας, το οποίο δεσμεύει άνθρακα κατά την παραγωγή του, καθιστώντας το ένα ανανεώσιμο καύσιμο. Η προοπτική του είναι μεγάλη γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με το υγροποιημένο φυσικό αέριο, σε κάποια περιεκτικότητα, δίχως καμία προϋπόθεση, έως ότου γίνει περαιτέρω ανταγωνιστικό. Δύναται να χρησιμοποιήσει όλες τις υποδομές του φυσικού αερίου, τόσο στα πλοία, όσο και στη μεταφορά και διάθεση του, ενώ το δυναμικό παραγωγής του ανά τον κόσμο είναι μεγάλο. Παρόλα αυτά, η προοπτική του χρίζει περαιτέρω διερεύνησης, τόσο για το άμεσο μέλλον, όσο και μακροπρόθεσμα, ώστε να διαπιστωθεί αν μπορεί να αποτελέσει την πρώτη επιλογή μεταξύ των εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων, ή και να συγκριθεί μαζί με

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

συμβατικά καύσιμα, συνυπολογίζοντας όλα τα κόστη, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους από τα δικαιώματα εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, καθώς η ναυτιλία συμπεριλαμβάνεται σταδιακά στο Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Ρύπων.

Συνεπώς, η παρούσα μελέτη εστιάζει στο υγροποιημένο βιομεθάνιο, αναλύοντας το τόσο από περιβαλλοντικής σκοπιάς, όσο και από οικονομικής, μέσω μίας μελέτης περίπτωσης. Για την ανάγκη της μελέτης, γίνεται αναλυτική αναφορά στο νομικό και κανονιστικό πλαίσιο, ενώ αναλύεται και η περίπτωση του υγροποιημένου φυσικού αερίου ως περίπτωση βάσης. Η μελέτη στηρίζεται σε μεθοδολογίες κύκλου ζωής, ώστε να συγκριθούν μεταξύ τους διαφορετικά σενάρια καυσίμων, τόσο σε επίπεδο περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όσο και οικονομικών επιπτώσεων. Η δομή της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται παρακάτω:

Το Κεφάλαιο 2 περιλαμβάνει μία εκτενή βιβλιογραφική επισκόπηση γύρω από τα ζητήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω και αφορούν στην υλοποίηση της μελέτης. Αυτά είναι το νομικό και κανονιστικό πλαίσιο, το υγροποιημένο φυσικό αέριο ως ναυτιλιακό καύσιμο, το υγροποιημένο βιομεθάνιο, οι μεθοδολογίες κύκλου ζωής και οι εφαρμογές τους.

Το Κεφάλαιο 3 αφορά στην Κλιματική Αλλαγή, στον κύκλο του άνθρακα ως διαδικασία, στην οποία κιάλας στηρίζεται η παραγωγή του βιομεθανίου, και στην ανάλυση των σχετικών κανονισμών.

Το Κεφάλαιο 4 περιγράφει την παρούσα κατάσταση και την προοπτική για το υγροποιημένο φυσικό αέριο, την τεχνολογία και τις υποδομές που το συνοδεύουν.

Το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει μία εκτενή ανάλυση σε ότι αφορά το υγροποιημένο βιομεθάνιο, τα παραδείγματα ανάπτυξης του, την υπάρχουσα κατάσταση στην αγορά και τις σχετικές τάσεις, την πρώτη ύλη και τη διαδικασία παραγωγής του.

Το Κεφάλαιο 6 αναλύει τη μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη περίπτωσης στην παρούσα διπλωματική, δηλαδή τις προσεγγίσεις κύκλου ζωής, τόσο σε επίπεδο ρύπων όσο και κόστους.

Το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει ένα κομμάτι του υπολογιστικού μέρους της εργασίας, και συγκεκριμένα την περιγραφή της μελέτης περίπτωσης, τα διαθέσιμα δεδομένα, την αρχική τους επεξεργασία καθώς και κάποια πρώτα συμπεράσματα που απορρέουν από αυτή.

Το Κεφάλαιο 8 περιλαμβάνει το υπόλοιπο σκέλος του υπολογιστικού μέρους της εργασίας, το οποίο εστιάζει στο βασικό υπολογιστικό μοντέλο για τις εκπομπές και το κόστος, στην αξιολόγηση μία επένδυσης στο υγροποιημένο φυσικό αέριο, ώστε να χρησιμοποιηθεί ως περίπτωση βάσης, και στην ανάλυση ευαισθησίας για την διερεύνηση της προοπτικής του υγροποιημένου βιομεθανίου. Μαζί με την περιγραφή του μοντέλου και των υπολογισμών, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης.

Το Κεφάλαιο 9 συμπυκνώνει τα συμπεράσματα από όλη την έκταση της εργασίας, και προτείνει ορισμένα θέματα προς ανάπτυξη, σε συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, συμπεριλαμβάνεται η βιβλιογραφία που αξιοποιήθηκε και το παράρτημα με τα αναλυτικά αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας.

2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Το νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο γύρω από το ζήτημα της Κλιματικής Αλλαγής και του περιβάλλοντος συνολικά αποτελεί τη βάση όποιας μελέτης γύρω από το ζήτημα της απανθρακοποίησης της ναυτιλίας. Η πρώτη πρωτοβουλία αφορά τα Ηνωμένα Έθνη και η υπογραφή της Σύμβαση για την Κλιματική Αλλαγή από τα Ηνωμένα Έθνη [1], όπου έθεσε το πλαίσιο για περαιτέρω πρωτοβουλίες. Ακολούθησε το Πρωτόκολλο του Κιότο [2], η Συμφωνία του Παρισιού [3] και εσχάτως η Συμφωνία της Γλασκόβης [4]. Η Συμφωνία του Παρισιού αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη εκ των διασκέψεων για το κλίμα και εκ των αποφάσεων που ιστορικά έχουν παρθεί για τους σκοπούς αυτούς, καθώς για πρώτη φορά γίνεται σαφής λόγος για ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, θέτοντας συγκεκριμένους στόχους. Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Ένωση λαμβάνει μεγαλύτερες πρωτοβουλίες στην κατεύθυνση της απανθρακοποίησης, κάτι το οποίο είναι εμφανές από τους στόχους που έχει θέσει βάσει της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας [5] και της προσπάθειας που γίνεται κατά τους τελευταίους μήνες να ενισχύσει την προσπάθεια υλοποίησης των στόχων. Οι στόχοι είναι αρκετά φιλόδοξοι, και αντιστοιχούν σε 50% έως και 55% μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, και σε κλιματική ουδετερότητα το 2050. Τέλος, η ναυτιλιακή βιομηχανία, μέσω του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού προσπαθεί να προσαρμοστεί στους στόχους για το κλίμα, θέτοντας από το 2018 τον οδικό χάρτη για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου [6]. Αν και η δυσκολία είναι μεγάλη λόγω της φύσης της βιομηχανίας, γίνονται βήματα, έστω και μικρά, στην κατεύθυνση της απανθρακοποίησης, όπως φαίνεται και στην τελευταία απόφαση της σχετικής επιτροπής του Οργανισμού [7].

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) αποτελεί για πολλούς ένα μεταβατικό καύσιμο στην κατεύθυνση προς την κλιματική ουδετερότητα, αφού άλλωστε είναι ορυκτό. Παρόλα αυτά, αυτή τη στιγμή είναι και η μόνη ρεαλιστική επιλογή μεγάλης κλίμακας έναντι των συμβατικών επιλογών στα καύσιμα, στο πλαίσιο της απανθρακοποίησης, καθώς έχει σαφώς μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Οι μελέτες για την παρούσα αλλά και μελλοντική κατάσταση στην αγορά της ενέργειας και των καυσίμων, τόσο από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας [8], όσο και από την BP [9], συνομολογούν αυτή την πραγματικότητα, μαζί με το γεγονός πως ακόμα παραμένουν ψηλά στις προτιμήσεις το πετρέλαιο και τα παράγωγα του. Ωστόσο, δεν μπορεί να παραμεριστεί το γεγονός πως το LNG έχει πράγματι μία ανοδική τάση. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη για την παρούσα και μελλοντική κατάσταση αναφορικά με την αγορά του LNG από τη Shell [10], πέραν της παρατήρησης πως όντως μπορεί να βοηθήσει στην δραστική μείωση των ρύπων, κάνει λόγο για 65% ανάπτυξης μέσα στα επόμενα χρόνια. Θα πρέπει, βέβαια, να ληφθεί υπόψη η σημερινή ενεργειακή κρίση που έχει εκτοξεύσει την τιμή του LNG, και μπορεί να καθυστερήσει κάποια χρόνια τις έως τώρα προβλέψεις. Αντίστοιχη μελέτη, αλλά για τα τις υποδομές παροχής LNG, από το Global Energy Monitor [11], κάνει λόγο για τα μεγαλύτερα έργα σε επίπεδο επένδυσης σε ότι αφορά τερματικούς σταθμούς LNG. Επιπλέον, μεγάλοι νηογνώμονες, όπως ο ABS και ο DNV, έχουν υιοθετήσει εδώ και αρκετά χρόνια οδηγίες και κανονισμούς αναφορικά με τη χρήση του LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο, ενώ υποστηρίζουν διαρκώς με μελέτες τους την βιωσιμότητα μίας τέτοιας επιλογής [12], [13]. Παράλληλα, μελετάται και η βελτιστοποίηση σε διάφορα ζητήματα που δημιουργεί το LNG, όπως είναι η αποθήκευση του πάνω στο πλοίο [14], η μεταφορά και διάθεση του, οι κανονισμοί ασφαλείας και τα συστήματα πρόωσης που μπορεί να είναι αποτελεσματικότερα για τα πλοία LNG [15]. Με βάση το τελευταίο, όσον αφορά του κατασκευαστές κινητήρων, υπάρχουν πολλαπλές πλέον επιλογές σε κινητήρες που μπορούν να κάψουν LNG αποδοτικά, ενώ διερευνώνται επιπλέον επιλογές. Ενδεικτικά, από τις αρχές της

προηγούμενης δεκαετίας, η MAN έχει παρουσιάσει σε σχετική μελέτη για τα κόστη και τα οφέλη από το LNG σε πλοία κοντέινερ [16]. Παράλληλα, σε ερευνητικό επίπεδο, γίνονται προσπάθειες περαιτέρω διερεύνησης της σκοπιμότητας γύρω από το LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο σε επίπεδο επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη τους διάφορους παράγοντες της αγοράς [17]. Σε επίπεδο εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου για το LNG, και τα οφέλη που αυτό παρουσιάζει στο συγκεκριμένο πεδίο έναντι συμβατικών καυσίμων, η πρόσφατη μελέτη της sphera για λόγο της SEA-LNG και της SGMF [18] δείχνει πως πράγματι, ακόμα και με ένα από τα πιο καθαρά παράγωγα του πετρελαίου (πχ. very low sulphur fuel oil), η μείωση είναι σημαντική, τουλάχιστον 23%. Η εξάρτηση, βέβαια, από τις διαθέσιμες τεχνολογίες σε επίπεδο κινητήρων είναι δεδομένη, και συνεπώς μπορεί η μείωση των ρύπων εν τέλει να είναι πολύ μεγαλύτερη. Τέλος, η πρόσφατη μελέτη της SEA-LNG αποτυπώνει την σημερινή εικόνα ανοδική τάση τόσο σε κατασκευή πλοίων που καίνε LNG, όσο και σε υποδομές διάθεσης του ανά τον κόσμο [19].

Το υγροποιημένο βιομεθάνιο (bioLNG) αποτελεί ένα εναλλακτικό, ανανεώσιμο καύσιμο, το οποίο μπορεί να έχει μεγάλη προοπτική για αξιοποίηση του στη ναυτιλία λόγω του δυναμικού παραγωγής που μπορεί να αναπτυχθεί, αλλά και λόγω της υπάρχουσας και αυξανόμενης διαθεσιμότητας υποδομών για το LNG, τόσο στα πλοία, όσο και στα λιμάνια και τους τερματικούς σταθμούς. Χρησιμοποιείται άλλωστε σε συνδυασμό με το LNG, με σκοπό να μειώσει το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα, καθώς κατά την παραγωγή του δεσμεύει μεγάλη ποσότητα CO₂. Πιο συγκεκριμένα, ένα μείγμα με 20% bioLNG μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αέριων θερμοκηπίου κατά 18%, όπως αναφέρει χαρακτηριστικά σχετική μελέτη [20], ενώ η ίδια μελέτη αναφέρει πως μπορεί να αποτελέσει ένα αρκετά ανταγωνιστικό καύσιμο, σε σύγκριση με άλλα μικρού ή και μηδενικού άνθρακα. Αναφορικά με την προοπτική παραγωγής του σε μεγάλη κλίμακα, σχετική μελέτη της ENGIE και του Bureau Veritas δείχνουν πως στην Ευρώπη και σε ορισμένες γειτονικές χώρες, υπάρχει τεράστιο δυναμικό παραγωγής λόγω της ύπαρξης μεγάλης ποσότητας βιομάζας διαθέσιμης για την παραγωγή βιομεθανίου [21]. Ταυτόχρονα, η ίδια μελέτη κάνει λόγο για σταδιακή μείωση του κόστους παραγωγής του έως και το 2050. Πιο συγκεκριμένα, μελέτη του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας αναφέρει πως παρόλο που αυτή τη στιγμή η διαφορά με το φυσικό αέριο είναι αισθητή, αυτή μειώνεται με την πάροδο του χρόνου [22]. Την παρούσα κατάσταση στην αγορά και ανά χώρα αποτυπώνει σχετική μελέτη [23], στην οποία αναφέρεται πως πράγματι η ναυτιλία κινείται στην κατεύθυνση υιοθέτησης του bioLNG. Ενδεικτικά, υπάρχουν σοβαρές επενδύσεις που γίνονται στην παραγωγή bioLNG και διάθεσης του στη ναυτιλία, όπως το έργο FirstBio2Shipping [24], το οποίο είναι το πρώτο εργοστάσιο παραγωγής bioLNG για τη ναυτιλία, έχει λάβει χρηματοδότηση 4.5 εκατομμυρίων ευρώ από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Μία πολύ ενδιαφέρουσα πρόσφατη μελέτη είναι και αυτή του CE Delft, που μελετά την διαθεσιμότητα και το κόστος του βιομεθανίου [25]. Η μελέτη αυτή επιβεβαιώνει την σημαντική προοπτική που έχει το bioLNG ως ναυτιλιακό καύσιμο, αλλά στέκεται και στο οικονομικό σκέλος, για το οποίο πολλοί παράγοντες παίζουν ρόλο, ένας εκ των οποίων είναι και το κόστος των δικαιωμάτων άνθρακα από το χρηματιστήριο ρύπων. Εν ολίγοις, θα πρέπει να αυξηθεί το εν λόγω κόστος αρκετά για να γίνει ανταγωνιστικό το bioLNG (στην παρούσα διπλωματική το εν λόγω ζήτημα αναπτύσσεται περαιτέρω).

Αναφορικά με την παραγωγή του, το bioLNG απαιτεί ποσότητες βιομάζας, η οποία με διάφορες μεθόδους παράγει βιοαέριο, το οποίο αναβαθμίζεται σε βιομεθάνιο, υγροποιείται και διανέμεται προς χρήση. Πολύ χρήσιμες είναι οι πληροφορίες για την επεξεργασία της βιομάζας περιέχει το εγχειρίδιο για την αξιολόγηση της βιομάζας από τον Frank Rosillo-Calle και άλλους [26]. Για την αξιοποίηση της βιομάζας, υπάρχουν πολλές μέθοδοι. Στο βιβλίο “Advances in

Chemical Engineering”, αναλύεται από τον Nachenius και άλλους η μέθοδος της πυρόλυσης [27], στη μελέτη του La Villetta και άλλων αναλύεται η μέθοδος της αεριοποίησης [28], ενώ στο βιβλίο “The Biogas Handbook: Science, Production and Applications” [29], αναλύεται επαρκώς η μέθοδος της αναερόβιας χώνευσης [30], η οποία χαρακτηρίζεται και ως η πιο αποδοτική, γι’ αυτό και προτιμάται. Από το ίδιο βιβλίο, η μελέτη από τον Petersson που αφορά στον καθαρισμό του βιοαερίου αποτυπώνει την πλήρη εικόνα για τη συνήθη σύσταση του βιοαερίου, και την καλύτερη δυνατή προσέγγιση στον καθαρισμό του [31]. Πολύ χρήσιμο οδηγό αποτελεί και το εγχειρίδιο για το βιοαέριο, όπως αυτό προέκυψε από το πρόγραμμα BigEast [32]. Τέλος, ως κομμάτια της παραγωγικής του διαδικασίας, στη δουλειά της Αγγελιδάκη και άλλων [33] αναλύεται η παρούσα κατάσταση και η προοπτική της αναβάθμισης του βιοαερίου, ενώ στη δουλειά της Pellegrini και άλλων [34] διερευνάται η υγροποίηση του βιομεθανίου μέσω κρυογενικής μεθόδου.

Για τη μελέτη του υγροποιημένου βιομεθανίου (bioLNG) ως ναυτιλιακό καύσιμο, οι δύο οπτικές αφορούν στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και στο κόστος. Αυτά, ωστόσο, δεν μπορούν να εξεταστούν διαφορετικά, παρά μόνο στη βάση μελέτης κύκλου ζωής. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει μία πρώιμη αξιολόγηση των συνεπειών, είτε αυτές αφορούν το περιβάλλον, τον άνθρωπο, ή το κόστος, ώστε να υποστηριχθεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων για μία επένδυση ή για διαμόρφωση πολιτικής/στρατηγικής. Οι διάφορες μεθοδολογίες κύκλου ζωής εμπεριέχουν όλα τις φάσεις ζωής για το υπό μελέτη αντικείμενο, δηλαδή από την παραγωγή έως τη χρήση για την περίπτωση των καυσίμων. Γενικότερα, οι μεθοδολογίες για την μελέτη κύκλου ζωής βασίζονται σε σχετικό ISO [35], όπως επίσης και στην σε καλές πρακτικές που έχουν εφαρμοστεί στη βιομηχανία γύρω από το αντικείμενο τους [36]. Δύο πιο πρόσφατες μελέτες αναλύουν την διάφορες μεθοδολογίες για την εκτίμηση συνεπειών σε όλο των κύκλο ζωής [37] και διάφορα εργαλεία για την υλοποίηση αυτών των μεθόδων. Η δεύτερη μελέτη επεκτείνεται σε όλο το φάσμα των εννοιών και αντίληψης γύρω από την προσέγγιση μέσω του κύκλου ζωής, είτε αυτό αφορά κόστος, είτε κοινωνικές επιπτώσεις, πέραν φυσικά από τις περιβαλλοντικές. Για την ανάλυση κόστους κύκλου ζωής, οι Asiedu και Gu κάνουν μία εκτενή ανάλυση των διαφόρων μεθόδων για την προσέγγιση του κόστους προϊόντων [38], ενώ για το συνδυασμό περιβαλλοντικών επιπτώσεων και οικονομικών επιπτώσεων, ο Swarr και άλλοι στη μελέτη τους αποτυπώνουν ένα μοντέλο που συνδυάζει την παραδοσιακή μεθοδολογία αξιολόγησης του κύκλου ζωής και τις ανάλυση κόστους στον κύκλο ζωής [39].

Σε επίπεδο εφαρμογής των παραπάνω μεθόδων κύκλου ζωής, εφαρμογές υπάρχουν τόσο στη ναυτιλία, όσο και σε ότι αφορά το βιομεθάνιο και το βιοαέριο, ιδιαίτερα στους τρόπους παραγωγής τους. Ενδεικτικά, ο Adelt και άλλοι στη μελέτη τους εφάρμοσαν μία μέθοδο κύκλου ζωής για να εκτιμήσουν συνολικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής βιομεθανίου, ενώ χρησιμοποιώντας την ίδια προσέγγιση, οι Carnevale και Lombardi σύγκριναν διαφορετικά ενδεχόμενα χρήσης του βιοαερίου [40]. Επιπλέον, μία παρόμοια προσέγγιση διακρίνεται και στην δουλειά των Ardolino και Arena, όπου μελετούν τη διαδικασία μετατροπής βιοαποβλήτων σε βιομεθάνιο, ώστε να συγκρίνουν διαφορετικές μεθόδους παραγωγής, με απώτερο σκοπό την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, ενώ σε αντίστοιχη μελέτη συγκρίνουν διαφορετικές προσεγγίσεις αναβάθμισης του βιοαερίου σε βιομεθάνιο. Σε κανονιστικό επίπεδο, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) αναπτύσσει οδηγίες για την εκτίμηση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σε μία προσέγγιση κύκλου ζωής [41], ενώ νωρίτερα η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εντάξει στο νομοθετικό της πλαίσιο το RED II [42], για την προώθηση της χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα εναλλακτικών καυσίμων προβλέποντας αναλυτικά ότι μπορεί να τα αφορά. Όσον αφορά εφαρμογές κύκλου ζωής στη ναυτιλία, υπάρχουν πολλές

περιπτώσεις στις οποίες έχουν αξιοποιηθεί οι σχετικές προσεγγίσεις ώστε να συγκριθούν διαφορετικά σενάρια και να υποστηριχθεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων. Ενδεικτικά, οι Βεντικός και Χατζηνικολάου έχουν αναπτύξει ένα συνολικό μοντέλο για την μελέτη των ρύπων από τα πλοία σε όλο τον κύκλο ζωής τους [43], ενώ η Utne έχει αναπτύξει αντίστοιχη μεθοδολογία για την εκτίμηση του κόστους κύκλου ζωής, με εφαρμογή στο Νορβηγικό στόλο αλιευτικών σκαφών [44]. Επιπλέον, μία ενδιαφέρουσα μελέτη είναι αυτή του Jeong και άλλων [45], η οποία εστιάζει στις εγκαταστάσεις πρόωσης και την βέλτιστη εκλογή αυτών βάσει ενός μοντέλου για την εκτίμηση των συνεπειών τόσο σε επίπεδο περιβαλλοντικό, όσο και σε επίπεδο οικονομικό. Μία ακόμα σημαντική μελέτη είναι αυτή του Hwang και άλλων [46] που εστιάζει σε πλοία με καύσιμο το LNG που λειτουργούν σε τοπικό/εθνικό επίπεδο, ώστε να εκτιμήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους μέσω μίας μεθοδολογίας αξιολόγησης κύκλου ζωής.

Τέλος, στην ανάπτυξη των αντικειμένων της παρούσας διπλωματική εργασίας και στους σχετικούς υπολογισμούς βοήθησαν αρκετά η διπλωματική του Α. Δημητριάδη [47], που αφορά μία μελέτη σκοπιμότητας για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην ακτοπλοΐα, η διπλωματική του Δ. Μπέκου για την μοντελοποίηση της αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών άνθρακα [48], καθώς επίσης και οι διαδικτυακές ιστοσελίδες Ship&Bunker [49] και Trading Economics [50], που διαθέτουν οικονομικά στοιχεία για καύσιμα και δικαιώματα εκπομπών άνθρακα.

3. Κλιματική Αλλαγή και Ναυτιλία

Η αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής αποτελεί μία από τις πιο μεγαλύτερες προκλήσεις για την ανθρωπότητα, ιδιαίτερα τις δεκαετίες που ακολουθούν [3]. Η αιτία πίσω από την Κλιματική Αλλαγή είναι φυσικά το φαινόμενο του θερμοκηπίου που ωθεί στην αύξηση της θερμοκρασίας στον πλανήτη. Η πρώτη σύλληψη του φαινομένου του θερμοκηπίου έγινε από επιστήμονες τον 19ο αιώνα, οι οποίοι το είδαν ως μια πιθανή εξήγηση για την χαμηλότερη θερμοκρασία που επικρατούσε στον πλανήτη στο σχετικά κοντινό παρελθόν (εποχή των παγετώνων). Ο Arrhenius το 1896 ήταν ο πρώτος που εξήγαγε συμπεράσματα έπειτα από υπολογισμούς σχετικά με την επίπτωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και στην θερμοκρασία του πλανήτη, ενώ θεώρησε πως η βιομηχανία θα ήταν δυνατό να προκαλέσει στον μέλλον θέρμανση του πλανήτη. Με βάση τα δεδομένα της εποχής, υπολόγισε πως εάν διπλασιαζόταν η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, θα μπορούσε να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας ίση με περίπου 5°C. Παρότι είχε γίνει αντιληπτό το φαινόμενο, δεν ήταν ακόμη σαφές το πρόβλημα που θα μπορούσε να δημιουργήσει¹. Επικρατούσε η λανθασμένη αντίληψη πως η ηλεκτρομαγνητική (θερμική) ακτινοβολία που ανακλάται από τη Γη στο διάστημα και θα μπορούσε να δεσμευτεί από το επιπλέον CO₂ της ατμόσφαιρας, δεσμευόταν ήδη από το εξατμισμένο νερό (υγρασία). Επίσης, μια άλλη θεώρηση που επικρατούσε ήταν αυτή που υποστήριζε πως το διοξείδιο του άνθρακα θα μπορούσε να απορροφηθεί από τη θάλασσα, δεδομένου πως έχει 50 φορές μεγαλύτερη διαλυτότητα στο θαλασσινό νερό απ' ό τι στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η θάλασσα σε συνδυασμό με την οργανική ύλη (δέντρα, βάλτοι κ.α.) θα μπορούσε να επιφέρει μια 'φυσική ισορροπία' και να εξισορροπηθεί η όποια περίσσεια θα δημιουργούταν. Κατά την δεκαετία του 1950, ως απόρροια της τεχνολογικής εξέλιξης και αναζήτησης που επέφερε ο δεύτερος παγκόσμιος πόλεμος, πραγματοποιήθηκαν πιο οργανωμένα πειράματα και περισσότεροι επιστήμονες ασχολήθηκαν με το ζήτημα αυτό. Έτσι έγινε ξεκάθαρο πως το διοξείδιο του άνθρακα αναμειγνύεται σε όλη την ατμόσφαιρα και δεν αποτελεί μεμονωμένο πρόβλημα κάποιων περιοχών, καθώς και ότι οι ωκεανοί δεν δύνανται να απορροφήσουν το αυξανόμενο εκλυόμενο CO₂ στην ατμόσφαιρα, δεδομένου ότι στα επιφανειακά στρώματα του νερού το CO₂ επαναεριοποιείται, πριν προλάβει να ανακυκλωθεί το νερό και να μετακινηθεί σε βαθύτερα στρώματα [51]. Σταδιακά, κατά τη διάρκεια της εικοσαετίας μεταξύ του 1960 και του 1980 και παρά την αβεβαιότητα που ακόμα επικρατούσε, ξεκίνησαν να υπάρχουν αξιόπιστα στατιστικά μοντέλα σχετικά με το εκλυόμενο CO₂ στην ατμόσφαιρα, καθώς και μελέτες για τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου. Μόλις το 1981 δύο επιστήμονες όπου μελέτησαν με προσοχή τα επικρατέστερα στατιστικά μοντέλα της εποχής, κατέστησαν σαφή τον κίνδυνο του αυξανόμενου διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, προβλέποντας πως στις αρχές του 21ου αιώνα θα ήταν εμφανής η αύξηση αυτή και εάν δεν λαμβάνονταν μέτρα για τον περιορισμό της, θα επέφερε μια πολύ μεγαλύτερη κλιματική αλλαγή από αυτήν του προηγούμενου αιώνα. Σημαντική υπήρξε επίσης η εξέταση του περιεχόμενου CO₂ σε κομμάτια πάγων της Γροιλανδίας, τα οποία χρονολογούνταν έως και 150.000 χρόνια σε ηλικία. Με αυτόν τον τρόπο, συμφωνώντας με τα υπολογιστικά μοντέλα της εποχής, έγινε αντιληπτό πως η ποσότητα του CO₂ στην ατμόσφαιρα, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία του πλανήτη [51]. Ενδεικτικά μια μεταβολή της τάξης του 50% στο διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας, επιφέρει θερμοκρασιακή μεταβολή ίση με 3 βαθμούς κελσίου. Αυτή η μεταβολή σε συνδυασμό με την αυξομείωση των δασικών εκτάσεων, του πλαγκτόν στη θάλασσα, αλλά και των εκπομπών μεθανίου, οδηγούν στην ύπαρξη των κλιματικών κύκλων. Κατά την δεκαετία του 1990 και του 2000, δεν υπήρχε κανένα υπολογιστικό μοντέλο που να μην καταδείκνυε την συσχέτιση

¹ Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας: Βιομάζα – <http://www.cres.gr/services/istos.chtm?prnbr=24773&locale=el>

μεταξύ CO₂ και θερμοκρασίας, κάτι το οποίο επιβεβαιωνόταν από την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Έτσι από τις απαρχές του 21^{ου} αιώνα όλα τα διεθνή επιστημονικά πάνελ, τα πανεπιστήμια και οι σχετικοί οργανισμοί συμφωνούσαν πως οι κυβερνήσεις θα έπρεπε να υιοθετήσουν αυστηρούς κανονισμούς για τον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ακόμα και με την πλήρη εξάλειψη των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂, η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη θα πρέπει να διατηρηθεί κάτω από τους 2 βαθμούς κελσίου σε σχέση με τα επίπεδα του 19^{ου} αιώνα, όπου για να συμβεί αυτό θα πρέπει το σύνολο των εκπομπών από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης να μην ξεπεράσει το 1 τρις τόνων CO₂ [3]. Το 2009 αυτό το ‘περιθώριο’ είχε φτάσει στο μισό, ενώ με τους σημερινούς ρυθμούς θα αρκούσε μόλις έως το 2050 για να ξεπεραστεί. Οι συνέπειες μιας θερμοκρασιακής αύξησης πέραν των 2 βαθμών κελσίου σε σχέση με τα επίπεδα του 19^{ου} αιώνα θα μπορούσαν να αποβούν καταστροφικές για τον πλανήτη και το ανθρώπινο είδος [3]. Η περεταίρω ανάλυση τους ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

3.1. Κανονισμοί

Σημαντική οπτική είναι και αυτή των κανονισμών που διαχρονικά έχουν υιοθετηθεί προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου και συνεπώς η θερμοκρασιακή αύξηση του πλανήτη. Το πρώτο διεθνές μέτρο αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής υπήρξε η Σύμβαση για την Κλιματική Αλλαγή από τα Ηνωμένα Έθνη (UN Framework Convention on Climate Change – UNFCCC), που υπεγράφη 1992 στο Ρίο ντε Τζανέιρο και τέθηκε σε εφαρμογή τον Μάρτιο του 1994 [1]. Με την σύμβαση αυτή, όλα τα συμβαλλόμενα μέρη (186 χώρες, 40 βιομηχανικές και 146 αναπτυσσόμενες) είχαν την υποχρέωση να θεσμοθετήσουν κατάλληλα προγράμματα προκειμένου να μειώσουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, ενώ οι βιομηχανικές χώρες εξ αυτών, να σταθεροποιήσουν τις εκπομπές τους έως το έτος 2000. Έκτοτε, και σε ετήσια βάση, πραγματοποιείται η Διάσκεψη των Μερών της Σύμβασης (Conference of the Parties – COP), αποτελώντας το μέσο παρακολούθησης και αξιολόγησης των ετήσιων αναφορών των αποθεμάτων τους σε Αέρια του Θερμοκηπίου, που υποβάλλουν όλα τα συμβαλλόμενα μέρη της Σύμβασης.

Όντας ευρέως αποδεκτό ότι η παραπάνω Σύμβαση δεν επαρκούσε για την μείωση των εκπομπών, το 1997 (COP 3) υιοθετήθηκε το Πρωτόκολλο του Κιότο (Kyoto Protocol) και τέθηκε σε εφαρμογή το 2005 (COP11) [2]. Αποτέλεσε έναν ‘οδηγό’, περιλαμβάνοντας τα απαραίτητα βήματα για την μακροπρόθεσμη αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Κατά μέσο όρο η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου που τέθηκε ως στόχος για την πρώτη ‘περίοδο δέσμευσης – 2008-2012’, ήταν στο 5,2% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Ο παραπάνω στόχος αφορούσε τις βιομηχανικές και όχι τις αναπτυσσόμενες χώρες, για τις οποίες δεν είχε τεθεί κάποιος σαφής περιορισμός, αλλά οι δράσεις τους θα περιοριζόνταν στα πλαίσια της παροχής βοήθειας στις βιομηχανικές χώρες. Για την επίτευξη του στόχου αυτού και με γνώμονα την κατά το λιγότερο δυνατό επιβάρυνση της οικονομίας, στο πρωτόκολλο συμπεριελήφθησαν και οι μηχανισμοί της εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών, η κοινή εφαρμογή και ο μηχανισμός καθαρής ανάπτυξης. Ο πρώτος μηχανισμός προβλέπει την αγοροπωλησία δικαιωμάτων εκπομπών μεταξύ των χωρών, αλλά και κάποιων άλλων συμβαλλόμενων μερών (π.χ. εργοστάσια παραγωγής ενέργειας) σύμφωνα με τη θεωρία των περιουσιακών δικαιωμάτων. Οι άλλοι δύο αφορούν σε προγράμματα έργων σχετικά με την επίτευξη του παραπάνω στόχου. Εκτός από τα παραπάνω όμως μέσω του πρωτοκόλλου συγκεκριμενοποιήθηκαν και τα αέρια του θερμοκηπίου τα οποία αφορά ο στόχος της μείωσης [2].

Συγκεκριμένα αυτά είναι τα παρακάτω:

- Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) – το σημαντικότερο εξ αυτών
- Μεθάνιο (CH₄)
- Υποξείδιο του αζώτου (N₂O)
- Υδροφθοράνθρακες (HFC)
- Υπερφθοράνθρακες (PFC)
- Εξαφθοριούχο θείο (SF₆)

Μια επίσης σημαντική Διάσκεψη αποτέλεσε αυτή του 2015 (COP21) στο Παρίσι, γνωστή και ως Συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement) [3]. Τότε, για πρώτη φορά, συμφώνησαν από κοινού όλα τα κράτη για την υιοθέτηση ταχύτερων και πιο φιλόδοξων προσπαθειών για την αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής, υποστηρίζοντας περαιτέρω και τα αναπτυσσόμενα κράτη. Ο βασικός στόχος της συμφωνίας ήταν η επίτευξη του περιορισμού της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη σε επίπεδα χαμηλότερα των 2°C, ή και 1.5°C, σε σύγκριση με την προ-βιομηχανική εποχή. Για να επιτευχθεί αυτός, θα πρέπει οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου να περιοριστούν το συντομότερο δυνατόν, έτσι ώστε να μπορέσει να υπάρξει ουδετερότητα στο δεύτερο μισό του αιώνα [3]. Στα πλαίσια αυτά, τέθηκε επιπλέον και ο στόχος της περαιτέρω ανάπτυξης σχετικών τεχνολογιών, κατάλληλων νομικών πλαισίων, καθώς και παροχής οικονομικών εργαλείων. Το κυρίως σώμα της Συμφωνίας, προκειμένου να γίνουν με συγκεκριμένο και σαφή προγραμματισμό τα παραπάνω, αποτέλεσε η υιοθέτηση των Εθνικά Καθορισμένων Εισφορών (Nationally Determined Contributions – NDCs) από όλα τα συμμετέχοντα κράτη. Με αυτόν τον τρόπο το κάθε κράτος θέτει συγκεκριμένους στόχους σε εγχώριο επίπεδο, ενώ σε επίπεδο πενταετίας οι NDCs όλων των Μελών θα επικοινωνούνται, θα αξιολογούνται και θα αναβαθμίζονται σε σχέση με τις προηγούμενες, κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Έτσι, σε συνδυασμό με τις ετήσιες αναφορές εκπομπών θα παρακολουθείται σε παγκόσμιο επίπεδο η πρόοδος και τα αποτελέσματα των σχετικών μέτρων. Η πιο πρόσφατη εξέλιξη σχετικά με την Κλιματική Αλλαγή είναι η τελευταία συνεδρίαση της διάσκεψης των μελών της UNFCCC, η COP26, που διεξήχθη στη Γλασκόβη στο τέλος του 2021. Παρόλο που τέθηκαν για ακόμα μία φορά οι στόχοι για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας, η Συμφωνία της Γλασκόβης δεν θέτει περαιτέρω φιλόδοξους στόχους [4], και συνεπώς ο οδικός χάρτης δεν τροποποιήθηκε από τις τελευταίες μεγάλες αποφάσεις για το Κλίμα.

Ωστόσο, η Ευρωπαϊκή Ένωση φαίνεται να επιμένει στην υιοθέτηση μίας αρκετά φιλόδοξης περιβαλλοντικής πολιτικής από το 2019 κιόλας, όπου η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) έβαλε τα θεμέλια για υπερφιλόδοξους στόχους στη γηραιά ήπειρο. Πιο συγκεκριμένα, έθεσε ως ενδιάμεσο στόχο για το 2030 την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στο 50% έως 55% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, ενώ για το 2050 προβλέπει κλιματική ουδετερότητα για την Ευρώπη [5]. Σε αυτή την κατεύθυνση κινούνται και μία σειρά από άλλες νομοθετικές πρωτοβουλίες σε επίπεδο Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, όπως είναι η οδηγία για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η οποία προσβλέπει στην περαιτέρω αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, και ιδιαίτερα καυσίμων, όπως τα βιοκαύσιμα [42]. Αυτή τη στιγμή, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προετοιμάζει μία σημαντική αναθεώρηση της κλιματικής και ενεργειακής της πολιτικής και νομοθεσίας, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της. Η λεγόμενη και ως “Fit for 55”, δηλαδή η μείωση κατά 55% των εκπομπών θερμοκηπίου έως το 2030². Αυτή η δέσμη μέτρων που θα συναποτελέσουν την “Fit for 55” είναι κατά έναν τρόπο η επικαιροποίηση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (European Green Deal) σε σχέση με τη μείωση των

² “Fit for 55” package, European Council – <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ειδικότερα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε και δύο προτάσεις για την απεξάρτηση της ναυτιλίας από τον ορυκτό άνθρακα. Οι κύριες προτάσεις της Επιτροπής αφορούν συνολικά εννέα πρωτοβουλίες που θα αλλάξουν τον τρόπο που ζούμε, οδηγούμε, παράγουμε και κάνουμε συναλλαγές στην Ευρώπη.

Η πρώτη πρωτοβουλία που αφορά στη ναυτιλία, είναι από τις πιο σημαντικές αποφάσεις ιστορικά για την βιομηχανία της ναυτιλίας, και είναι η ένταξη της για πρώτη φορά στο Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Ρύπων (EU Emission Trading System – ETS). Προβλέπεται, λοιπόν, πως πλέον το χρηματιστήριο ρύπων θα καθορίζει κόστος δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ και για τη ναυτιλία, το οποίο επιβαρύνεται κάθε πλοιοκτήτης στο 100% των εκπομπών κάθε πλοίου. Ο υπολογισμός των ρύπων για τη ναυτιλία είναι υπό διαμόρφωση, αλλά ήδη προβλέπεται σε ένα βαθμό από οδηγίες του IMO και τις αποφάσεις της ΕΕ [41], [42]. Η δεύτερη πρόταση για τη ναυτιλία αφορά τα καύσιμα πλοίων σε ευρωπαϊκούς λιμένες. Η δεύτερη πρωτοβουλία, το Fuel EU Maritime, θα καθορίζει ανώτατο όριο για την περιεκτικότητα σε αέρια θερμοκηπίου που εκλύονται από την ενέργεια που χρησιμοποιείται από πλοία τα οποία καταπλέουν σε ευρωπαϊκούς λιμένες. Καλύπτει όλα τα καύσιμα ανανεώσιμων και χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, συμπεριλαμβανομένων των υδρογονανθράκων και των παράγωγων καυσίμων της ναυτιλίας.

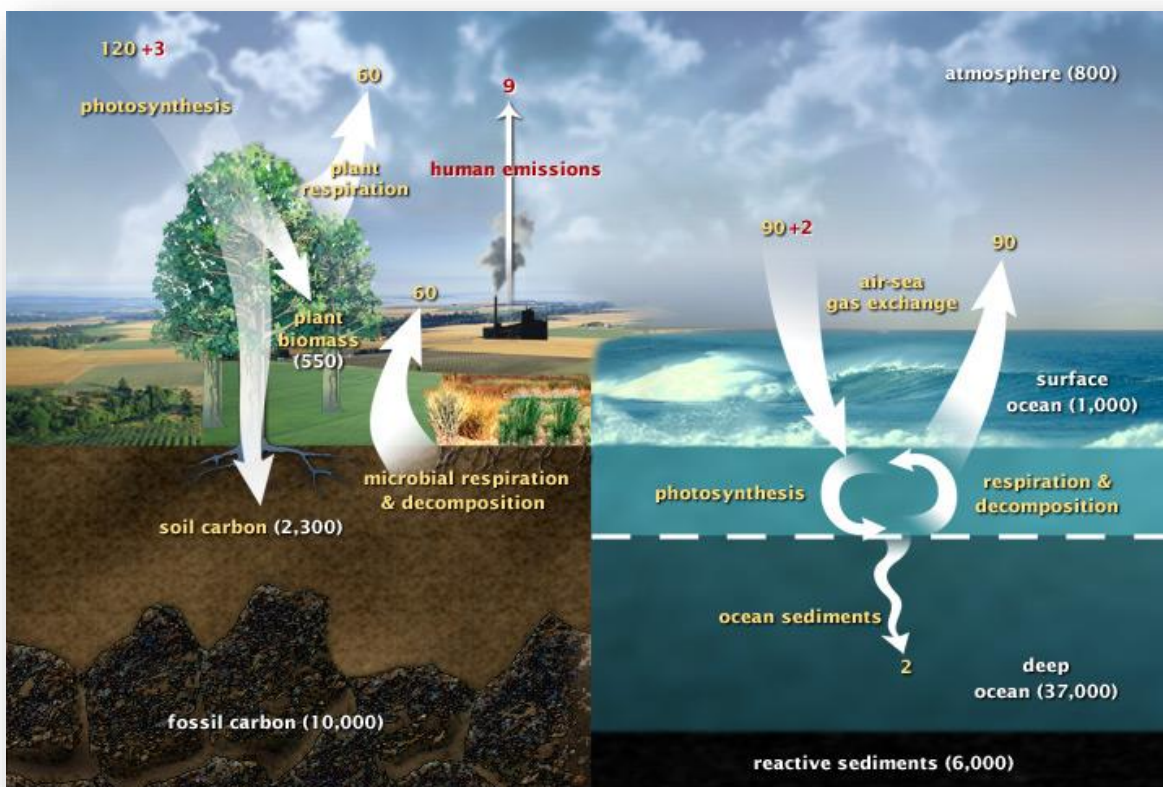
Όσον αφορά τη ναυτιλία αυτή καθ' αυτή, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει εκδώσει οδικό χάρτη στην κατεύθυνση της απεξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, με την απόφαση της συνεδρίασης της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (Marine Environmental Protection – MEPC) ήδη από το 2018 (MEPC72) [6]. Δυστυχώς όμως, ενώ πράγματι γίνεται μία προσπάθεια απανθρακοποίησης της, η Ναυτιλία είναι μία βιομηχανία αρκετά συντηρητική που δεν αφήνει εύκολα περιθώριο στην καινοτομία και στην αλλαγή. Θα αναγκαστεί, ωστόσο, να προσαρμοστεί και σε μεγαλύτερες αλλαγές όσο πλησιάζει το 2030, αλλά και έπειτα, λόγω των φιλόδοξων στόχων που έχουν τεθεί σε κανονιστικό επίπεδο διεθνώς. Η τελευταία εξέλιξη από πλευράς Ναυτιλίας είναι η τελευταία συνεδρίαση της MEPC, τον Ιούνιο του 2022 (MEPC78), η απόφαση της οποίας εξειδικεύει τους στόχους στην κατεύθυνση της απανθρακοποίησης, επικαιροποιώντας τη σχετική στρατηγική του IMO [7].

3.2. Ο κύκλος του άνθρακα

Ο κύκλος του άνθρακα αποτελεί τον βιοχημικό κύκλο κατά τον οποίο ο άνθρακας εναλλάσσεται μεταξύ της ατμόσφαιρας και της γης, μέσω των δεξαμενών άνθρακα. Δεξαμενές – ή αποθέματα – άνθρακα αποτελούν κατά βάση το έδαφος, οι ωκεανοί, τα φυτά και η ατμόσφαιρα. Η αποδέσμευση άνθρακα από μια δεξαμενή, οδηγεί στη δέσμευση του από μία άλλη. Σε γενικές γραμμές, ο κύκλος του άνθρακα παίζει το ρόλο του θερμοστάτη στη γη, αφού εξασφαλίζει την διατήρηση μιας συγκεκριμένης ποσότητας διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, το οποίο με τη σειρά του διατηρεί σταθερά τα επίπεδα θερμοκρασίας στον πλανήτη. Περίσσεια CO₂ οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας και σε θερμά κλίματα εν γένει, ενώ η απώλεια CO₂ σε ψυχρότερα κλίματα, όπως κατά την εποχή των παγετώνων. Οι κύκλοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στον βραδύ και τον ταχύ:

- **Ο Βραδύς Κύκλος**, ο οποίος διαρκεί 100-200 εκατομμύρια χρόνια, σχετίζεται με την μετακίνηση του άνθρακα στο εσωτερικό του φλοιού της γης και στα βαθύτερα στρώματα του ωκεανού, αν και αυτό το κομμάτι του κύκλου ολοκληρώνεται σε λίγες χιλιάδες χρόνια. Κατά τον βραδύ κύκλο επιστρέφεται άνθρακας στην ατμόσφαιρα μέσω των ηφαιστειών.

- **Ο Ταχύς Κύκλος** περιγράφεται από την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση του άνθρακα μέσω της βιόσφαιρας, το σύνολο δηλαδή των οικοσυστημάτων της γης. Τα φυτά και το φυτοπλαγκτόν αποτελούν τα βασικά δομικά στοιχεία του ταχέως κύκλου του άνθρακα, αφού ο άνθρακας ανακυκλώνεται στην ατμόσφαιρα μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Η λειτουργία του ταχέως κύκλου είναι άμεσα ορατή, καθώς μέσω αυτού ανακυκλώνονται ετησίως περί τα 1,000-100,000 εκατομμύρια τόνοι άνθρακα. Στην Εικόνα 1 φαίνεται η ανακύκλωση αυτή μεταξύ της γης, της ατμόσφαιρας και των ωκεανών, σε επίπεδο γιγατόνων ανά έτος (κίτρινα χρώματα), καθώς και οι αποθηκευμένες ποσότητες στις διάφορες δεξαμενές (άσπρο χρώμα). Με κόκκινο χρώμα φαίνονται οι ανθρωπογενείς εισφορές [51].



Εικόνα 1: Ταχύς κύκλος άνθρακα, μεταξύ γης, ατμόσφαιρας και ωκεανών, σε γιγατόνους ανά έτος

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται σαφές πως με τη χρήση ορυκτών καυσίμων έχουμε μετατόπιση πολύ μεγάλων ποσοτήτων άνθρακα από το υπέδαφος στην ατμόσφαιρα, με τις γνωστές συνέπειες για το κλίμα.

Στην περίπτωση των βιοκαυσίμων ωστόσο, η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τους αποτελείται είτε άμεσα (αγροτικά, δασικά υπολείμματα κλπ.), είτε έμμεσα (κοπριά, λύματα κ.α.) από οργανική ύλη, δηλαδή βιομάζα. Με αυτόν τον τρόπο η ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που εκλύεται στην ατμόσφαιρα κατά την καύση του καυσίμου, έχει δεσμευτεί κατά την καλλιέργεια της πρώτης ύλης, μέσω της φωτοσύνθεσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και άρα τα βιοκαύσιμα, και στη συγκεκριμένη περίπτωση το βιομεθάνιο και το BioLNG, δεν αυξάνουν την ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, παρά το ανακυκλώνουν. Γι' αυτό το λόγο μιλάμε και για βιογενές (biogenic) CO₂.

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Έτσι, μέσω της χρήσης του BioLNG αποφεύγεται η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, με τους παρακάτω τρόπους, είτε άμεσα, είτε και έμμεσα:

- Μέσω της αντικατάστασης μέρος των ορυκτών καυσίμων.
- Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη η κοπριά ή και τα λύματα, μέσω της αποφυγής διαρροής μεθανίου στην ατμόσφαιρα κατά την αποθήκευσή τους.
- Μέσω της βελτίωσης της ποιότητας του εδάφους λόγω της χρήσης του χωνεμένου υπολείμματος, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε μεγαλύτερες ποσότητες δέσμευσης CO₂.
- Μέσω της άμεσης δέσμευσης CO₂ κατά την παραγωγική διαδικασία του βιομεθανίου, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να διατεθεί/πωληθεί για χρήση σε άλλες βιομηχανίες [42].

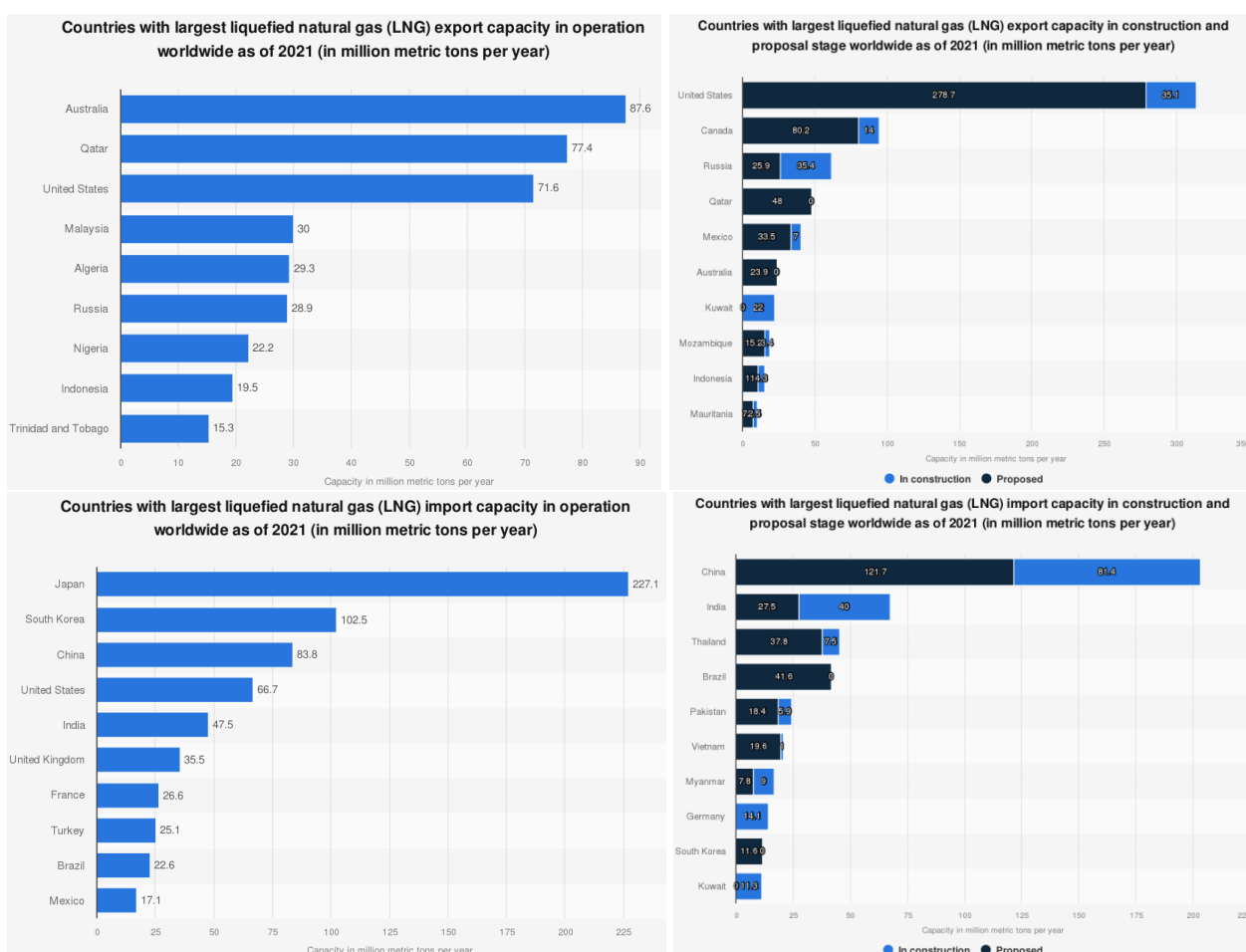
Σχετικό είναι και το πόρισμα του ευρωπαϊκού κανονισμού RED II, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 1, ο οποίος περιλαμβάνει το ανθρακικό αποτύπωμα για την παραγωγή βιομεθανίου, για διάφορες πρώτες ύλες και τεχνικές κατά την παραγωγή.

Πίνακας 1: Ανθρακικό αποτύπωμα παραγωγής βιομεθανίου [42]

| Biomethane production system | Technological option | Typical greenhouse gas emissions (g CO ₂ eq/MJ) | Default greenhouse gas emissions (g CO ₂ eq/MJ) |
|-----------------------------------|--|---|---|
| Biomethane from wet manure | Open digestate, no off-gas combustion ¹ | -20 | 22 |
| | Open digestate, off-gas combustion ² | -35 | 1 |
| | Close digestate, no off-gas combustion | -88 | -79 |
| | Close digestate, off-gas combustion | -103 | -100 |
| Biomethane from maize whole plant | Open digestate, no off-gas combustion | 58 | 73 |
| | Open digestate, off-gas combustion | 43 | 52 |
| | Close digestate, no off-gas combustion | 41 | 51 |
| | Close digestate, off-gas combustion | 26 | 30 |
| Biomethane from biowaste | Open digestate, no off-gas combustion | 51 | 71 |
| | Open digestate, off-gas combustion | 36 | 50 |
| | Close digestate, no off-gas combustion | 25 | 35 |
| | Close digestate, off-gas combustion | 10 | 14 |

4. Ναυτιλία και υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) αποτελεί ένα ορυκτό καύσιμο το οποίο εξάγεται από 21 χώρες, εισάγεται από 42, ενώ σχετίζεται με το 11% της παραγωγής φυσικού αερίου σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ζήτηση του LNG για το 2021 ήταν συνολικά 380 εκατομμύρια τόνοι, αυξημένο κατά 6% σε σχέση με το 2020, ενώ αναμένεται να αυξηθεί έως το 2040 στους 700 εκατομμύρια τόνους σύμφωνα με σχετική έκθεση της Shell [10]. Πολλές χώρες επίσης κατασκευάζουν τερματικούς σταθμούς εισαγωγής και εξαγωγής LNG, είτε εντασσόμενες για πρώτη φορά στον τομέα αυτό, είτε αναβαθμίζοντας το υπάρχον δυναμικό. Είναι σαφές πως εάν συγκρίνουμε τις σημερινές ποσότητες εισαγωγών και εξαγωγών LNG με τις ποσότητες που πρόκειται να διοχετευτούν στην αγορά από τους υπό κατασκευή τερματικούς σταθμούς, θα δούμε πως η παραπάνω υπόθεση για αύξηση της ζήτησης τα επόμενα χρόνια είναι βάσιμη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Οι μεγαλύτεροι εξαγωγείς LNG και οι αναπτυσσόμενοι τερματικοί σταθμοί εξαγωγών και εισαγωγών³

Φυσικά, προβληματισμό εγείρει το γεγονός πως από τους σταθμούς που είναι σε φάση μελέτης, αδειοδότησης ή εύρεσης της απαραίτητης χρηματοδότησης, κάποιος μπορεί να σταματήσει, είτε ελλείψει εξασφάλισης των απαραίτητων συμβολαίων πώλησης, είτε λόγω μη εύρεσης χρηματοδότησης, είτε εξ αιτίας προβληματισμών για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της επένδυσης σε βάθος χρόνου [11], όπως ενδεικτικά φαίνεται στον Πίνακα 2. Η σχετική

³ World Energy Monitor – Statista: <https://www.statista.com/>

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

πρόβλεψη του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας στη μελέτη του 2017 για τις παγκόσμιες ενεργειακές προοπτικές [8], ήταν πως έως το 2040 οι ανάγκες σε LNG θα τριπλασιαζόντουσαν, ενώ στην ίδια μελέτη το 2021 προέβλεπε πως το παγκόσμιο εμπόριο υγροποιημένου φυσικού αερίου θα αυξηθεί από τις τιμές του 2020 έως και το 2025, αλλά από εκεί και πέρα προκειμένου να επιτευχθεί το σενάριο της κλιματικής ουδετερότητας το 2050, κατά την δεκαετία του 2030, οι απαιτήσεις θα μειώνονται κατά 5% ετησίως έως ότου φτάσουν τους 118 εκατομμύρια τόνους ετησίως το 2050 [11].

Πίνακας 2: Προβληματικοί σταθμοί εξαγωγής στη φάση της κατασκευής [11]

| Project | Country | Capacity (MTPA) | Issue |
|---|------------------|-----------------|--|
| Annova LNG Brownsville Terminal | USA | 5 | Project abandoned March 2021 |
| Bear Head LNG Terminal | Canada | 8 | Financing fell through |
| Browse LNG Terminal | Australia | 12 | FID delayed in March 2020; FID in 2021 considered possible but unlikely |
| Commonwealth LNG Terminal | USA | 7 | No FID as of May 2021 |
| Corpus Christi LNG Terminal (Stage 3) | USA | 11.5 | FID delayed beyond 2022 |
| Darwin LNG Train 2 | Australia | 6.3 | FID delayed |
| Driftwood LNG Terminal | USA | 4 | FID delayed until 2023. Tellurian's stock delisted after shares plummet over 90% |
| Energie Saguenay | Canada | 11 | Project in trouble since withdrawal of Berkshire Hathaway in 2020 |
| Freeport LNG Terminal Train 4 | USA | 5.1 | FID delayed in 2020; company may reach FID in mid 2021 |
| Goldboro LNG | Canada | 10 | FID delayed but CEO predicts FID in Summer 2021 |
| Jordan Cove LNG Terminal | USA | 7.5 | Project shelved after denial of permits and lack of offtake agreements |
| Kitimat LNG Terminal | Canada | 18 | Project shelved after Chevron and Woodside pull out |
| Lake Charles LNG Terminal (Train 3) | USA | 5.5 | No FID as of May 2021 |
| LNG Canada Terminal | Canada | 14 | In construction but completion delayed to 2025. Cost overruns likely. |
| Magnolia LNG Terminal | USA | 8.8 | Project dumped for \$2 million after directors resign |
| Mexico Pacific LNG Terminal | Mexico | 8 | FID delayed to late 2021 or early 2022 |
| Mozambique LNG Terminal | Mozambique | 12.9 | Force majeure declared after insurgent attack |
| Papua LNG (Total) | Papua New Guinea | 5.4 | FID delayed to 2023 after Covid delays |
| Papua New Guinea Exxon (Train 3) | Papua New Guinea | 3.3 | FID delayed |
| Plaquemines LNG Terminal | USA | 20 | FID delayed but predicted for mid-2021 |
| Pluto LNG Terminal Train 2 | Australia | 5 | FID delayed |
| Port Arthur LNG Terminal | USA | 22 | FID delayed to 2022 |
| Rio Grande LNG Terminal | USA | 27 | FID delayed after Engie pullout; project reduced in size |
| Rovuma LNG | Mozambique | 15.2 | FID delayed; project impacted by crisis at Mozambique LNG Terminal |
| Scarborough LNG Terminal | Australia | 7 | FID delayed in 2020; may be reached in late 2021 |
| Tangguh LNG Terminal T3 | Indonesia | 3.8 | Construction delay |
| Woodfibre LNG Terminal | Canada | 2.1 | Construction delayed by 1 year due to Covid; sponsor aims for 2021 FID |

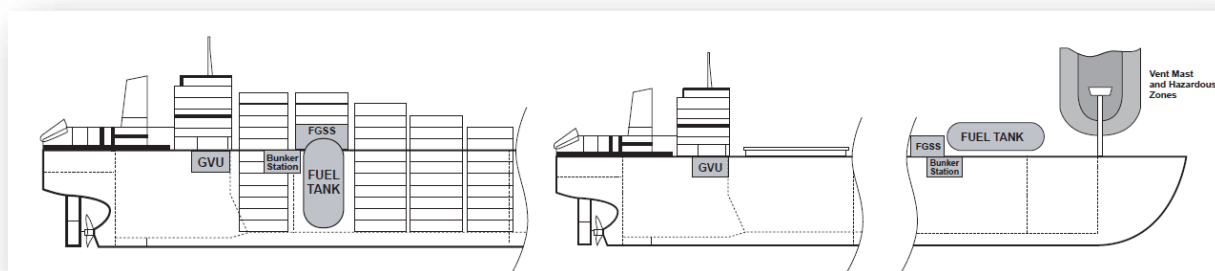
4.1. Σχεδιασμός και τεχνολογία πλοίων

Αξίζει να σημειωθεί πως το LNG αποτελεί ένα καύσιμο που υπάρχει ως επιλογή αρκετά χρόνια, καθώς οι πρώτες δοκιμές καύσης του από πλοία έγιναν την δεκαετία του 1970. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και από τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου τα οποία καίνε στις μηχανές τους (διπλού καυσίμου) την ποσότητα εκείνη του φορτίου η οποία αεριοποιείται κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του. Εκτός αυτών, μικρότερα πλοία όπως επιβατηγά και άλλα που

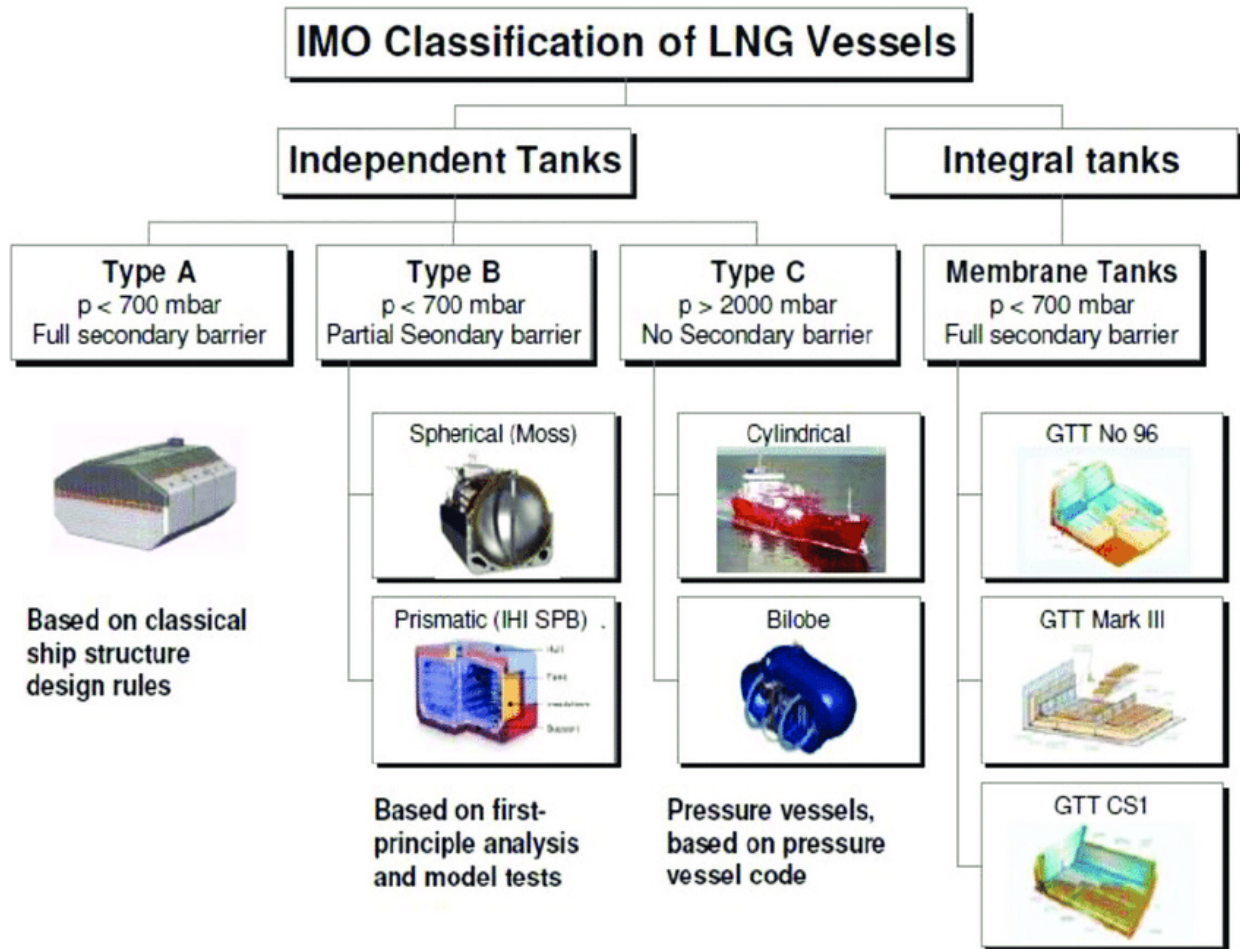
δραστηριοποιούνται στα πλαίσια της Ναυτιλίας Μικρών Αποστάσεων, καίνε στις μηχανές τους ήδη κάποια χρόνια το συγκεκριμένο καύσιμο. Από την άλλη, υπάρχουν διάφορα στοιχεία σε επίπεδο σχεδιασμού και επιλογής της κατάλληλης τεχνολογίας, τα οποία πρέπει να γίνουν με προσοχή, έτσι ώστε η τελική σχεδίαση και λειτουργία του πλοίου να είναι ανταγωνιστική. Τα δύο πιο βασικά αποτελούν ο σχεδιασμός για τις δεξαμενές του καυσίμου και το σύστημα παροχής του καυσίμου, συναρτήσκει και της τεχνολογίας του κινητήρα, τα οποία αναλύονται και παρακάτω. Πέρα από αυτά, ο εκάστοτε πλοιοκτήτης καλείται να επιλέξει σχεδίαση για διάφορα άλλα συστήματα που αφορούν το πλοίο, η ανάλυση όμως των οποίων ξεφεύγει από τα όρια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Επιγραμματικά αναφέρονται η κατηγοριοποίηση του μηχανοστασίου (Machinery Space Type), η διαχείριση του εξατμιζόμενου αερίου (Boil Off Gas Management) και η επιλογή καυσίμου στις ηλεκτρογεννήτριες [12].

4.1.1. Δεξαμενές καυσίμου

Ένα από τα βασικά ζητήματα που προκύπτουν είναι η επιλογή της δεξαμενής αποθήκευσης του καυσίμου. Ο προβληματισμός έγκειται τόσο στην επιλογή της τεχνολογίας, όσο και στο σημείο τοποθέτησης της, αφού είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες δεξαμενές πετρελαίου εξαιτίας της χαμηλότερης ενεργειακής πυκνότητας του LNG, ενώ δημιουργείται περαιτέρω χωροταξικό πρόβλημα λόγω της αναγκαίας μόνωσης που περιλαμβάνει καθώς και των συστημάτων που χρειάζονται για τη διαχείριση του αερίου. Οι τύποι των δεξαμενών χωρίζονται σε 3 κατηγορίες (Type A, Type B, Type C), οι οποίες είναι ανεξάρτητες από την κύρια κατασκευή του πλοίου καθώς και σε μια τέταρτη κατηγορία, αυτή των Membrane Tanks όπου είναι πλήρως ενσωματωμένες στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου, ενώ σε γενικές γραμμές αφορούν πλοία μεγάλου μεγέθους [Εικόνες 6,7]. Οι βασικές τους διαφορές είναι η πίεση λειτουργίας, το μέγεθος, το σχήμα και η ύπαρξη μερικού ή ολικού δευτερεύοντος προστατευτικού περιβλήματος (secondary barrier). Βασικό πλεονέκτημα των δεξαμενών Type A και Type B έναντι των υπολοίπων είναι πως παρέχουν προστασία από τις επιδράσεις της ελεύθερης επιφάνειας του καυσίμου εντός της δεξαμενής. Αντιθέτως για δεδομένη μονάδα όγκου οι Type A περιέχουν κατά 30-40% περισσότερο φορτίο, ενώ και οι Membrane Type έχουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα στο κομμάτι αυτό, που αποτελεί σημαντική παράμετρο δεδομένης της απαίτησης χώρου που υπάρχει σε αυτές τις σχεδιάσεις [14]. Επιπλέον, βασικό κριτήριο επιλογής της δεξαμενής είναι και το μέγεθος του πλοίου, καθώς οι Type C χρησιμοποιούνται στις μικρές κατασκευές, στα ενδιάμεσα μεγέθη οι Type A, ενώ στις εφαρμογές μεγάλου μεγέθους οι Type B και Membrane Type [15]. Τέλος, οι Type C έχουν χαμηλότερο κόστος και απλούστερη σχεδίαση, ενώ εξ αιτίας της λειτουργίας τους σε περιβάλλον αυξημένης πίεσης μπορούν να συγκρατήσουν το αεριοποιημένο αέριο (boil off gas) για μεγαλύτερο διάστημα [12]. Η Εικόνα 2 παρουσιάζει τις διαφορετικές διατάξεις δεξαμενών καυσίμου LNG, ενώ το Σχήμα 2 τα χαρακτηριστικά των δεξαμενών.



Εικόνα 2: Τυπικές διατάξεις δεξαμενών καυσίμου και του κύριου εξοπλισμού [12]



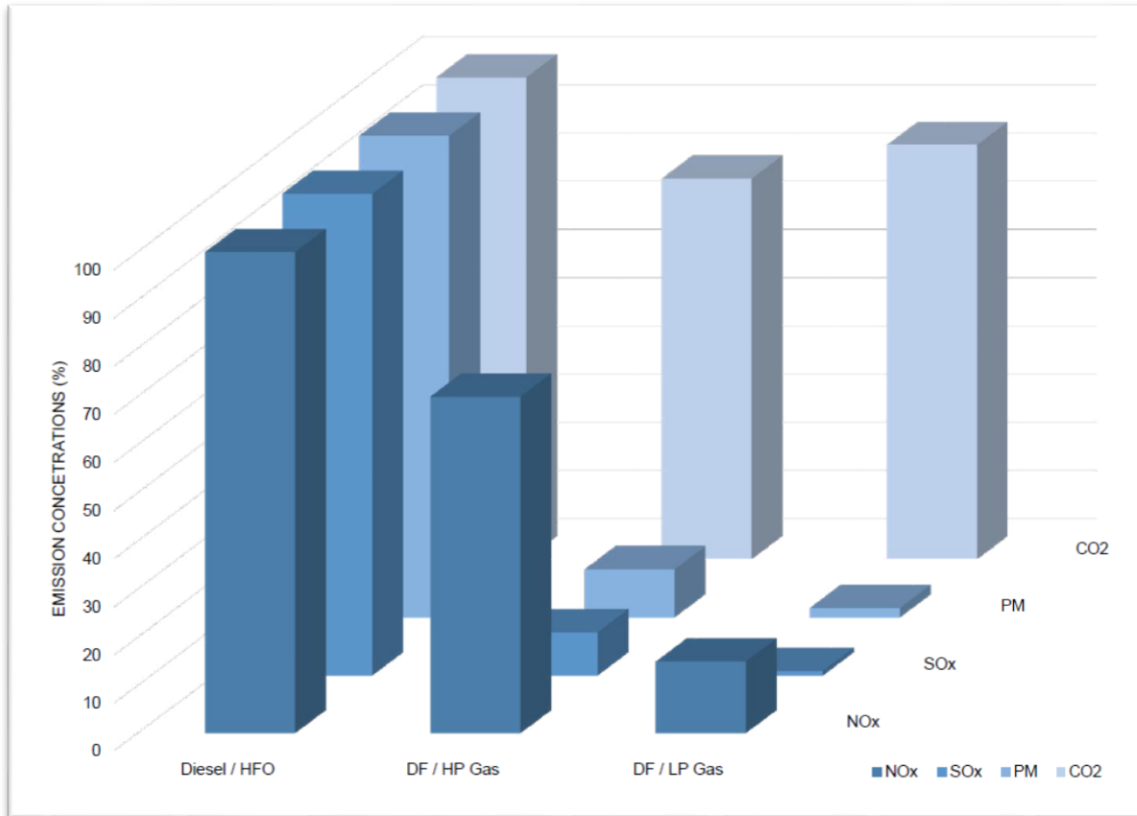
Σχήμα 2: Χαρακτηριστικά Δεξαμενών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου [15]

4.1.2. Σύστημα παροχής καυσίμου

Σκοπός του συστήματος αυτού είναι η παροχή του καυσίμου στη μηχανή ή τον εκάστοτε καταναλωτή (γεννήτριες, καζάνι) στις κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Στα συστήματα όπου γίνεται κρυογενικά ή υπό πίεση η αποθήκευση του καυσίμου, αυτό μπορεί να τροφοδοτηθεί κατευθείαν σε υγρή μορφή και έπειτα να αεριοποιηθεί στον καταναλωτή, ή σε συνδυασμό με το αέριο που αεριοποιείται από τη δεξαμενή αποθήκευσης. Πρακτικά, οι δύο επικρατέστερες κατηγορίες συστημάτων που υπάρχουν είναι οι εξής [12]:

- Κινητήρες διπλού καυσίμου και υψηλής πίεσης που λειτουργούν σε κύκλο Diesel εισάγοντας το αέριο στη μηχανή σε υψηλή πίεση (300 bar), με την έναυση να γίνεται με τη βοήθεια πιλοτικού καυσίμου (πετρελαίου). Μία επιλογή εκ των μοντέλων που διατίθενται στην αγορά, είναι το μοντέλο ME-GI Mk.2 και κατασκευάζεται από την MAN B&W.
- Κινητήρες διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσης, οι οποίοι λειτουργούν σε κύκλο Otto και εισάγουν στον θάλαμο καύσης το υγροποιημένο φυσικό αέριο, το οποίο καίγεται με τη βοήθεια του πιλοτικού καυσίμου (πετρέλαιο). Σε αυτή την κατηγορία κινητήρων ανήκουν ενδεικτικά τα μοντέλα ME-GA και WINGD X-DF της MAN B&W [52], αλλά υπάρχουν κι άλλες ακόμα επιλογές από άλλους κατασκευαστές.

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου



Σχήμα 3: Εκπομπές MEK διπλού καυσίμου [12]

Πίνακας 3: Σύγκριση των μηχανών ME-GI & X-DF [12]

| | WinGD X-DF | MAN ME-GI |
|---|----------------|-----------------|
| Cycle Type (in Gas Mode) | Otto | Diesel |
| Gas Supply Pressure [bar] | < 13 | 300 |
| BMEP [bar] | 17.3 | 19.0-21.5 |
| IMO NOx Compliance (in Gas Mode) | Tier III | Tier II |
| Liquid pilot % @ 30% MCR | ~1.0 | 3.0-5.0 |
| Methane Number Sensitive | < 80 | No |
| Knock/Misfire Sensitive | Yes | No |
| Methane Slip | Yes | Not significant |
| Development Status [Type (Year)] | XDF 2.0 (2020) | Mk 2.0 (2019) |

Βασικό κοινό χαρακτηριστικό που μοιράζονται οι δύο αυτές τεχνολογίες είναι πως το πιλοτικό καύσιμο – πετρέλαιο που χρησιμοποιείται για την έναυση του αερίου αντιπροσωπεύει ένα μικρό ποσοστό της παραγόμενης θερμικής ισχύος, οπότε θεωρείται αμελητέα η συμμετοχή του στην καύση. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, οι κινητήρες χαμηλής πίεσης παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά σε ό,τι αφορά τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, του θείου και αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ ο μεν κινητήρας της MAN χρησιμοποιεί σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων, ο δε της WINGD όχι [53]. Από την άλλη, υστερούν στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, έχουν

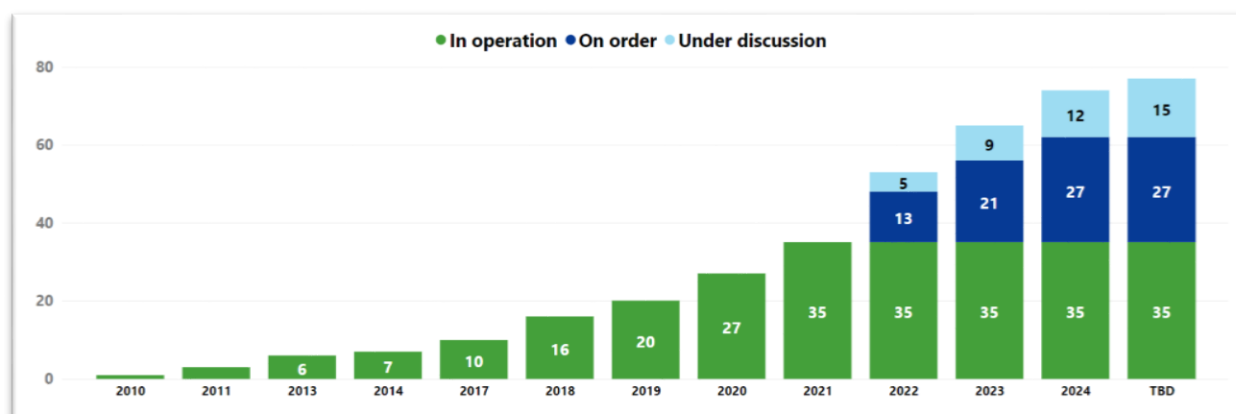
μεγαλύτερο ποσοστό διαφυγής μεθανίου καθώς και πιο ευαίσθητες συνθήκες λειτουργίας, με πιθανώς εμφανιζόμενα φαινόμενα κρουστικής καύσης, ή μη έναυσης. Η μηχανή υψηλής πίεσης ME-GI αποτελεί μιν ένα σύστημα το οποίο έχει σταθερότερες συνθήκες λειτουργίας και καλύτερες αποδόσεις σε ό,τι αφορά τα αέρια του θερμοκηπίου, αλλά είναι ένα ακριβότερο και πολυπλοκότερο σύστημα, από τις άλλες δύο επιλογές χαμηλής πίεσης. Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει ενδεικτικά τη σύγκριση των δύο τύπων μηχανών. Όπως είναι κατανοητό, η επιλογή του μοντέλου της μηχανής κατά την κατασκευή ενός πλοίου, πρέπει να γίνει έπειτα από αξιολόγηση διαφόρων παραγόντων, όπως το κόστος κτήσης και λειτουργίας, το οποίο θα πρέπει να μελετηθεί με τη μορφή του κύκλου ζωής για το συγκεκριμένο επιχειρησιακό περιβάλλον. Επίσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η εμπειρία που υπάρχει από τα διαθέσιμα πληρώματα για τη συντήρηση και τη λειτουργία του εκάστοτε συστήματος, καθώς και οι πληροφορίες από τα ήδη εγκατεστημένα συστήματα [12].

4.2. Υποδομές παροχής καυσίμου (bunkering)

Η βασικότερη ίσως προϋπόθεση για να μπορούμε να μιλάμε για την ανάπτυξη του στόλου των πλοίων κατανάλωσης υγροποιημένου φυσικού αερίου, είναι η ύπαρξη κατάλληλων υποδομών για την παροχή του στα πλοία που πρόκειται να το χρησιμοποιήσουν. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι με τους οποίους μπορεί ένα πλοίο να προμηθευτεί το εν λόγω καύσιμο. Αυτοί είναι οι εξής:

- Από εγκαταστάσεις στην ακτή (Shore to Ship Supply)
- Από φορτηγά οχήματα (Track to Ship Supply)
- Από άλλα πλοία (Ship to Ship Supply)

Σύμφωνα με τους Clarksons, κατά το 2021 το LNG ήταν διαθέσιμο ως ναυτιλιακό καύσιμο σε 141 λιμάνια και προβλέπεται να αναπτυχθεί περαιτέρω στα 170 λιμάνια εντός του 2022, ενώ σχετική μελέτη της Total υποστηρίζει πως το 2030 η αγορά του LNG Bunkering θα αποτελεί το 10% της αγοράς του Bunkering [19]. Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός πως στη συγκεκριμένη αγορά έχουν επενδύσει μερικές από τις μεγαλύτερες εταιρείες του ενεργειακού τομέα (Shell, Total, Energies, Gazprom, κ.α.), καθώς επίσης και η Δημόσια Επιχείρηση Αερίου (ΔΕΠΑ) και η ελληνική εταιρεία Probunkers.

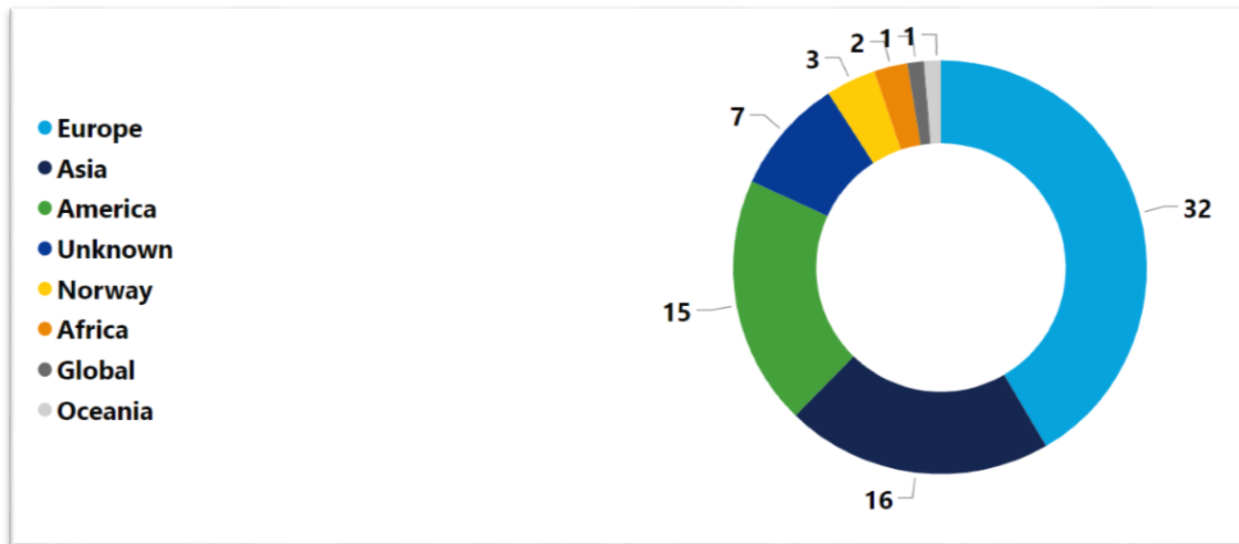


Σχήμα 4: Εξέλιξη του στόλου των πλοίων προμήθειας LNG [13]

Με βάση τα στοιχεία που διαθέτει ο Νηογνώμονας DNV, τα πλοία ανεφοδιασμού με καύσιμο LNG τα οποία βρίσκονται ήδη σε λειτουργία είναι συνολικά 35 σε όλον τον κόσμο, ενώ άλλα 27 έχουν παραγγελθεί και 15 ακόμα βρίσκονται στη φάση της μελέτης, χωρίς όμως να έχουν υπογραφεί ακόμα τα ναυπηγικά συμβόλαια. Ενδεικτικά, το Σχήμα 4 αποτυπώνει την εξέλιξη του στόλου των πλοίων προμήθειας LNG. Ενδιαφέρον έχει επίσης η κατανομή του στόλου αυτού σε

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

ό,τι αφορά την περιοχή λειτουργίας του. Πιο συγκεκριμένα τα 32 από τα συνολικά 77 πλοία που αναφέρθηκαν παραπάνω λειτουργούν ή πρόκειται να λειτουργήσουν σε ευρωπαϊκά λιμάνια, αντιπροσωπεύοντας το 41% των συνολικών πλοίων, κάτι το οποίο βρίσκεται σχεδόν σε συμφωνία με τον αριθμό των πλοίων που καταναλώνουν LNG και λειτουργούν εντός της Ευρώπης, αντιπροσωπεύοντας το 32% το συνολικού αριθμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5: Περιοχές λειτουργίας των πλοίων παροχής καυσίμου LNG [13]

Στην Εικόνα 3 φαίνεται η κατανομή των υποδομών που έχουν αναπτυχθεί ή αναπτύσσονται για την προμήθεια του καυσίμου LNG ως καύσιμο. Πιο συγκεκριμένα, φαίνονται τα πλοία, τα φορτηγά οι τερματικοί σταθμοί και οι αποθήκες οι οποίες θα μπορούν να προμηθεύσουν κατάλληλα τα πλοία με LNG. Επιπλέον με πράσινο χρώμα φαίνονται εκείνες οι υποδομές που ήδη λειτουργούν, ενώ με μπλε και με γκρι εκείνες που έχουν φτάσει στο στάδιο της κατασκευής, ή αντίστοιχα βρίσκονται υπό μελέτη [13].



Εικόνα 3: Χάρτης πλοίων ανεφοδιασμού LNG [13]

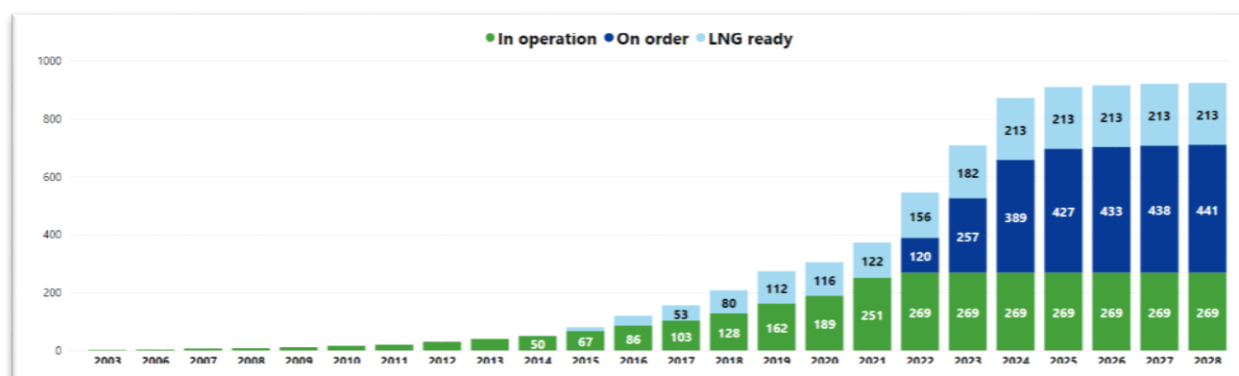
Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Πίνακας 4: Σύνολο όλων των ευρωπαϊκών λιμανιών με υποδομή LNG [54]

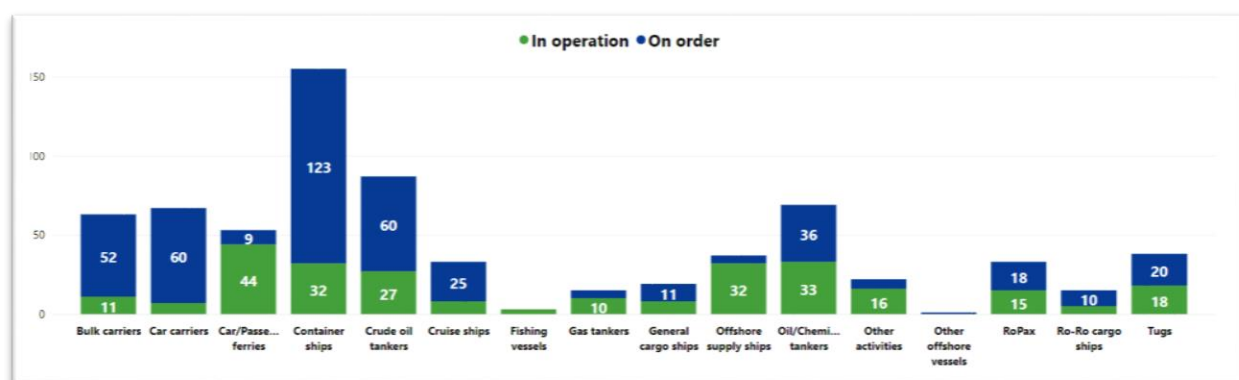
| Country | Port (city) | Type of LNG bunkering | TEN-T network |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Austria | Ennshafen | Truck-to-ship | Core |
| Belgium | Antwerp | Terminal (port)-to-ship | Core |
| | Antwerp | Truck-to-ship | Core |
| | Zeebrugge | Ship-to-ship | Core |
| Bulgaria | Ruse | Terminal (port)-to-ship | |
| Denmark | Hirtshals | Terminal (port)-to-Ship | Comprehensive |
| Estonia | Tallinn | Terminal (port)-to-ship | Core |
| Finland | Helsinki | Truck-to-ship | Core |
| | Helsinki | Ship-to-ship | Core |
| | Pori | Terminal (port)-to-ship | Comprehensive |
| | Tornio | Terminal (port)-to-ship | |
| France | Dunkirk | Ship-to-ship | Core |
| | Marseilles | Ship-to-ship | Core |
| | Marseilles | Ship-to-ship | Core |
| | Montoir-de-Bretagne | Ship-to-ship | |
| Germany | Brunsbüttel | Truck-to-ship | Comprehensive |
| | Brunsbüttel | Truck-to-ship | Comprehensive |
| | Cologne | Terminal (port)-to-ship | |
| | Hamburg | Ship-to-ship | Core |
| | Hamburg | Terminal (port)-to-ship | Core |
| | Mannheim | Truck-to-ship | |
| | Rostock | Terminal (port)-to-ship | Core |
| Italy | Rome | Truck-to-ship | Comprehensive |
| Lithuania | Klaipėda | Terminal (port)-to-ship | Core |
| Netherlands | Amsterdam | Truck-to-ship | Core |
| | Doesburg | Terminal (port)-to-ship | |
| | Moerdijk | Truck-to-ship | Core |
| | Rotterdam | Ship-to-ship | Core |
| | Rotterdam | Terminal (port)-to-ship | Core |
| | Rotterdam Europoort | Terminal (port)-to-ship | Core |
| Norway | Ågotnes | Terminal (port)-to-ship | |
| | Avaldsnes | Terminal (port)-to-ship | |
| | Bergen | Ship-to-ship | |
| | Bjugn | Terminal (port)-to-ship | |
| | Bodø | Terminal (port)-to-ship | |
| | Florø | Terminal (port)-to-ship | |
| | Fredrikstad | Terminal (port)-to-ship | |
| | Halhjem | Terminal (port)-to-ship | |
| | Hammerfest | Terminal (port)-to-ship | |
| | Haugesund | Ship-to-ship | |
| | Hordvikneset | Terminal (port)-to-ship | |
| | Kirkenes | Terminal (port)-to-ship | |
| | Kollsnes | Terminal (port)-to-ship | |
| | Kollsnes | Terminal (port)-to-ship | |
| | Kristiansund | Terminal (port)-to-ship | |
| | Lødingen | Terminal (port)-to-ship | |
| | Moskenes | Terminal (port)-to-ship | |
| | Os | Terminal (port)-to-ship | |
| | Polarbase | Terminal (port)-to-ship | |
| | Sandnessjøen | Ship-to-ship | |
| Snøhvit, Hammerfest | Terminal (port)-to-ship | | |
| Stavanger | Terminal (port)-to-ship | | |
| Portugal | Sines | Ship-to-ship | Core |
| Spain | Algeciras | Ship-to-ship | Core |
| | Barcelona | Ship-to-ship | Core |
| | Barcelona | Ship-to-ship | Core |
| | Barcelona | Terminal (port)-to-ship | Core |
| | Bilbao | Terminal (port)-to-ship | Core |
| | Cartagena | Terminal (port)-to-ship | Core |
| | Huelva | Terminal (port)-to-ship | Core |
| | Huelva | Ship-to-ship | Core |
| | | Huelva | Multiple truck-to-ship |
| Spain | Mugardos (Ferrol) | Terminal (port)-to-ship | Comprehensive |
| | Sagunto | Terminal (port)-to-ship | Comprehensive |
| | Santander | Terminal (port)-to-ship | Comprehensive available by 2022 |
| | Tenerife | Ship-to-ship | Core |
| | Valencia | Terminal (port)-to-ship | Core |
| | Valencia | Multiple truck-to-ship | Core |
| | | Valencia | Multiple truck-to-ship |
| Sweden | Gothenburg | Ship-to-ship | Core |
| | Lysekil | Ship-to-ship | |
| | Stockholm | Ship-to-ship | Core |
| United Kingdom | Gibraltar | Ship-to-ship | |

4.3. Υπάρχων στόλος – Βιβλίο παραγγελιών

Ένας άλλος ενθαρρυντικός παράγοντας σχετικά με τη βιωσιμότητα του LNG και κατ' επέκταση και του BioLNG για χρήση ως ναυτιλιακό καύσιμο είναι το βιβλίο παραγγελιών νέων πλοίων, το οποίο σε ένα σημαντικό ποσοστό αποτελείται από πλοία που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG. Αυτά, κατά κύριο λόγο απαρτίζονται από κρουαζιερόπλοια και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, αλλά αξιοσημείωτη είναι πλέον και η παρουσία των δεξαμενοπλοίων και των φορτηγών πλοίων [11]. Με βάση στοιχεία του Νοεμβρίου του 2021 και σύμφωνα με τους Clarksons, το βιβλίο παραγγελιών αποτελούταν κατά 34% από πλοία που καίνε εναλλακτικά καύσιμα (εκτός πετρελαίου δηλαδή). Αυτό σε καθαρό αριθμό μεταφράζεται σε 805 πλοία, συνολικού τονάζ 54.1m gt. Από τα 805 αυτά πλοία, τα 548 που αντιστοιχούν σε 47.3m gt θα εφοδιαστούν με μηχανές διπλού καυσίμου μπορώντας να κάψουν άμεσα LNG, ενώ και ένα περίπου 12% θα είναι LNG-ready⁴. Στις παρακάτω εικόνες, φαίνεται τόσο η εξέλιξη της μερίδας του παγκόσμιου στόλου που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το LNG (Σχήμα 6), όσο και η σύνθεση του ανά τύπο πλοίου (Σχήμα 7).



Σχήμα 6: Εξέλιξη του στόλου που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το LNG [13]



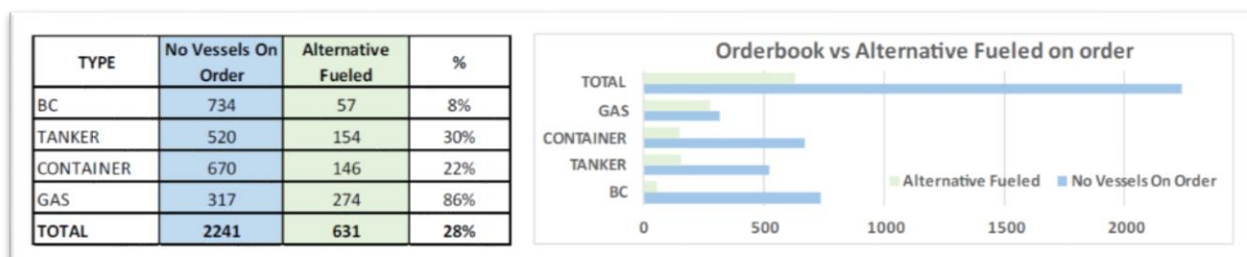
Σχήμα 7: Σύνθεση του στόλου που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το LNG [13]

Επίσης, ενδιαφέροντα είναι και τα παρακάτω συμπεράσματα, που σχετίζονται με το ποσοστό που καταλαμβάνουν τα πλοία καύσης LNG, σε σχέση με τον συνολικό αριθμό που βρίσκονται υπό παραγγελία, ανά κατηγορία πλοίου. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με σχετική αναφορά του ναυλομεσιτικού γραφείου Xclusiv Shipbrokers, το μεγαλύτερο ποσοστό καταλαμβάνουν τα

⁴ Alternative-fuelled' ships make up 34% of orderbook, Clarksons says, Dale Wainwright, 2021 – <https://www.tradewindsnews.com/esg/alternative-fuelled-ships-make-up-34-of-orderbook-clarksons-says/2-1-1106308>

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

πετρελαιοφόρα, μετά τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και τέλος τα φορτηγά πλοία (δεν γίνεται αναφορά στα πλοία μεταφοράς LNG), όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 [55]. Παρά τις όποιες διαφορές υπάρχουν, αναλόγως με την πηγή απ' όπου λαμβάνονται τα δεδομένα για το βιβλίο παραγγελιών, το βέβαιο συμπέρασμα είναι πως ετησίως παρατηρούμε αύξηση τόσο στον καθαρό αριθμό των παραγγελιών πλοίων καύσης LNG, όσο και στο ποσοστό που αυτά καταλαμβάνουν στον συνολικό αριθμό παραγγελιών.

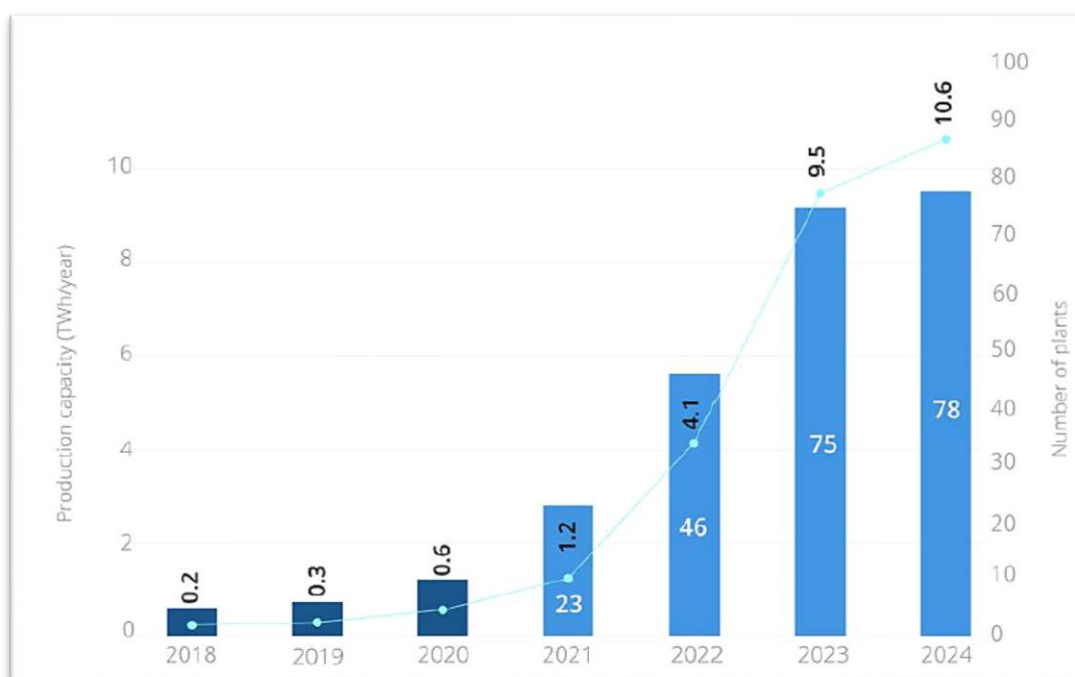


Σχήμα 8: Βιβλίο παραγγελιών έναντι παραγγελιών πλοίων με εναλλακτικά καύσιμα [55]

Όλα τα παραπάνω στοιχεία φανερώνουν την ανάπτυξη που πρόκειται να έχει τα επόμενα χρόνια, τόσο η αγορά του υγροποιημένου φυσικού αερίου γενικώς, όσο και τα πλοία κατανάλωσης αλλά και προμήθειας LNG. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως δεν απαιτούνται μετατροπές από τα πλοία αυτά για να καταναλώσουν το 'πράσινο' bioLNG, καθώς και τους κανονισμούς που έχει θεσπίσει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός, με βάση τους οποίους το LNG είναι σαφές πως λειτουργεί ως μεταβατικό καύσιμο και όχι ως η λύση στο πρόβλημα της απανθρακοποίησης της ναυτιλίας, καταλαβαίνουμε πως η μίξη του υγροποιημένου φυσικού αερίου με το υγροποιημένο βιομεθάνιο θα αποτελέσει συνήθη πρακτική τα επόμενα χρόνια.

5. Το υγροποιημένο βιομεθάνιο (bioLNG)

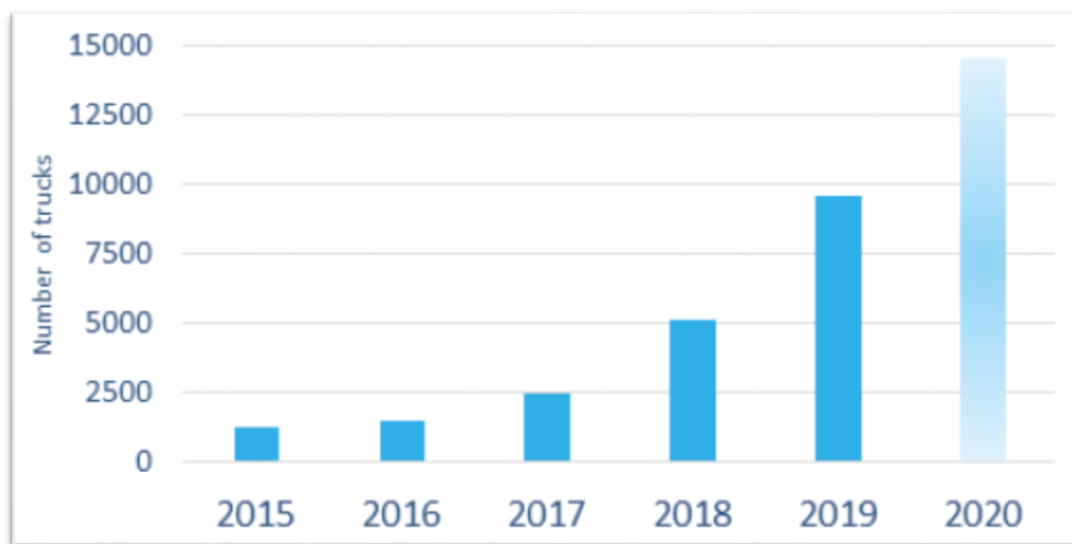
Το BioLNG παράγεται μέσω κατάλληλης επεξεργασίας οργανικών αποβλήτων και ως τελικό προϊόν έχει την ίδια σύσταση με το υγροποιημένο φυσικό αέριο, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις υπάρχουσες υποδομές χωρίς την ανάγκη κάποιας μετατροπής, είτε συνδυαστικά με το ορυκτό LNG σε κάποιο ποσοστό πρόσμιξης, είτε και μεμονωμένα. Πρόκειται για ένα εναλλακτικό καύσιμο με μικρό ή και μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα, ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής του, και κυρίως την πρώτη ύλη που χρησιμοποιεί. Η παραγωγή του είναι ακόμα περιορισμένη, αλλά έχουν γίνει πολλά και βήματα στην κατεύθυνση ανάπτυξης του, με πολύ μεγάλη προοπτική, η οποία φαίνεται και από την ανάλυση που ακολουθεί. Έως τον Αύγουστο του 2021, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, λειτουργούσαν συνολικά 16 εργοστάσια bioLNG. Συνυπολογίζοντας τα έργα εκείνα των οποίων η κατασκευή έχει ανακοινωθεί ή βρίσκεται σε φάση μελέτης, το 2024 οι μονάδες αυτές προβλέπεται να φτάσουν συνολικά τις 78. Η αντίστοιχη παραγωγική δυνατότητα για το 2021 ήταν 1.2 TWh/έτος, ενώ το 2024 αναμένεται να φτάσει τις 10.6 TWh/έτος[20], όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9: Αριθμός εργοστασίων bioLNG - Παραγωγική δυνατότητα 2018-2024 [17]

Η χρήση του BioLNG σχετίζεται αποκλειστικά με τον τομέα των μεταφορών, όπου και μπορεί να αποτελέσει ένα βιώσιμο, εύκολα αναπτυσσόμενο καύσιμο, που δύναται να συμμετάσχει δυναμικά στην απανθρακοποίηση της βιομηχανίας. Παρά την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης, ιδιαίτερα στο κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, στις "βαριές" βιομηχανίες, όπως είναι η ναυτιλία αλλά και τα μεγάλα φορτηγά που καλύπτουν μακρινές αποστάσεις χωρίς ανεφοδιασμό, δεν είναι εφικτό να επικρατήσει ο πλήρης εξηλεκτρισμός. Ενδεικτικά, με την πιο εξελιγμένη υπάρχουσα τεχνολογία, ένα φορτηγό 40 τόνων και αυτονομίας 1,000 χλμ. χρειάζεται μια μπαταρία βάρους 6 και πλέον τόνων για να καλύψει την απόσταση αυτή, ενώ με την χρήση των LNG και BioLNG οι απαιτήσεις αποθήκευσης του καυσίμου μεταφράζονται σε μια δεξαμενή 280 κιλών ή 620 λίτρων. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή είναι ήδη αναπτυγμένη έως έναν βαθμό, με μεγάλες επενδύσεις να πραγματοποιούνται στους τομείς της κατασκευής σταθμών ανεφοδιασμού και μονάδων υγροποίησης φυσικού αερίου. Ενδεικτικά, στην Ευρώπη υπάρχουν αυτή τη στιγμή πάνω από 4,000

σταθμοί ανεφοδιασμού CNG και πάνω από 500 LNG, από τους οποίους πάνω από 200 βρίσκονται στην Ιταλία και τη Γερμανία. Σημαντικό είναι επίσης πως οι κυρίαρχοι ευρωπαϊκοί κατασκευαστές φορτηγών, όπως οι IVECO, SCANIA, VOLVO, έχουν εντάξει πλήρως τόσο το συμπιεσμένο, όσο και το υγροποιημένο φυσικό αέριο (CNG-LNG) στους εμπορικούς τους καταλόγους, με ιδιαίτερη έμφαση στο μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο διάστημα. Το 2020, ο στόλος των φορτηγών αυτών στην Ευρώπη άγγιξε τα 15,000 οχήματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, με τις καινούργιες εγγραφές να κινούνται στο εύρος των 5,000 νέων οχημάτων, ενώ η NGVA (Natural & bioGas Vehicle Association) προβλέπει πως έως το 2030 τα φορτηγά αυτά θα αγγίξουν τα 280,000, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 25% του συνολικού αριθμού φορτηγών στην Ευρώπη [20].



Σχήμα 10: Εξέλιξη του ευρωπαϊκού στόλου φορτηγών κατανάλωσης LNG [20]

5.1. Παραδείγματα εφαρμογής και ανάπτυξης

Αν και υπάρχουν διάφορα παραδείγματα και εγχειρήματα τα οποία βρίσκονται υπό ανάπτυξη, μεγάλο ενδιαφέρον έχουν τα παραδείγματα της Shell, η οποία επεκτείνει ταχέως τις δραστηριότητες της στον τομέα του bioLNG, και του συνεταιρισμού των εταιρειών Nordsol, Attero και TitanLNG.

Shell bioLNG

Ο στόχος της Shell για το 2025 είναι να λειτουργεί 100 σταθμούς ανεφοδιασμού με φυσικό αέριο, το οποίο θα αναμειγνύεται με bioLNG (Εικόνα 4), μειώνοντας έτσι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Στόχος για το 2021 ήταν η λειτουργία 50 σταθμών, από τους οποίους έχουν ήδη τεθεί σε λειτουργία οι 39, οι οποίοι βρίσκονται εντός του Διευρωπαϊκού Δικτύου Μεταφορών (TEN-T). Επιπλέον σε όλο το δίκτυο ανεφοδιασμού υγροποιημένου φυσικού αερίου στην Ολλανδία, από τον Οκτώβρη του 2021, παρέχεται και BioLNG, αναμικμένο με το LNG σε ένα ποσοστό περίπου 30% και προερχόμενο από το εργοστάσιο της Nordsol. Για το 2023, ο στόχος της Shell Γερμανίας είναι να συμπεριλάβει σε όλο το δίκτυο προμήθειας LNG και την παροχή bioLNG⁵ [19]. Προκειμένου να ανεφοδιάσει τους σταθμούς στην Γερμανία με BioLNG, η Shell ξεκίνησε την κατασκευή της μεγαλύτερης μονάδας υγροποίησης βιομεθανίου της Γερμανίας, η οποία σε συνδυασμό με την μονάδα παραγωγής πράσινου υδρογόνου από ηλεκτρόλυση, καθώς και ανανεώσιμων καυσίμων

⁵ BioLNG Deep Dive – <https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/lng-for-transport/lng-for-road/biolng-deep-dive.html>

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

για την αεροπορική βιομηχανία, θα αντικαταστήσουν το υπάρχον διωλιστήριο του Rheinland. Η κατασκευή του εργοστασίου ξεκίνησε στις 9 Φεβρουαρίου του 2022 και αναμένεται να τελειώσει στα μέσα του 2023, συμβαδίζοντας με τον παραπάνω στόχο της Shell για το δίκτυο διανομής. Το εργοστάσιο θα λαμβάνει βιομεθάνιο μέσω αγωγού, το οποίο στη συνέχεια θα υγροποιεί, έχοντας παραγωγική δυνατότητα 100,000 τόνων ετησίως. Αυτό ενδεικτικά ισοδυναμεί με τις ετήσιες ανάγκες 4000-5000 φορτηγών⁶. Προκειμένου να ελεγχθεί η συμβατότητα και η αποτελεσματικότητα του bioLNG ως καύσιμο μεταφορών, η Shell τον Ιούνιο του 2021, σε συνεργασία με την εταιρεία οδικών μεταφορών DHL Freight και τον κατασκευαστή αντλιών Grundfos, ξεκίνησαν ένα σχετικό δοκιμαστικό εγχείρημα. Πιο συγκεκριμένα, τρία φορτηγά της DHL τα οποία θα μεταφέρουν τα προϊόντα της Grundfos μεταξύ 2 εργοστασίων της σε Γερμανία και Γαλλία, θα λειτουργήσουν για περίπου ενάμισι χρόνο με BioLNG, το οποίο θα προμηθεύονται από τη Shell. Κατά τους πρώτους 5 μήνες η χρήση του BioLNG οδήγησε σε μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 87 τόνους ή 85% σε σχέση με ένα κοινό φορτηγό κατανάλωσης πετρελαίου. Επιπλέον, το BioLNG αυτό παράγεται από αγροτικά απόβλητα, σύμφωνα με τα κριτήρια του κανονισμού RED II της Ευρωπαϊκής Ένωσης [42]. Με αυτό τον τρόπο και οι τρεις συμμετέχουσες εταιρείες μειώνουν το ανθρακικό τους αποτύπωμα, συμβαδίζοντας με τους Ευρωπαϊκούς κλιματικούς στόχους για το 2030⁷.



Εικόνα 4: Παράδοση φορτίου bioLNG σε σταθμό ανεφοδιασμού LNG της Shell

FirstBio2Shipping – Bio2Bunker

Ένα ακόμα εγχείρημα το οποίο βρίσκεται υπό κατασκευή είναι αυτό του συνεταιρισμού των εταιρειών Nordsoil, Attero και TitanLNG. Πιο συγκεκριμένα, η συνεργασία των εταιρειών αυτών αφορά στην κατασκευή μιας μονάδας παραγωγής BioLNG στο Wilp της Ολλανδίας, όπου βρίσκεται μια υπάρχουσα μονάδα διαχείρισης οργανικών αποβλήτων της εταιρείας Attero [24].

⁶ Shell starts building Germany's largest bio-LNG plant – LNG Prime, 2022 - <https://lngprime.com/europe/shell-starts-building-germanys-largest-bio-lng-plant/>

⁷ DHL & Grundfos pilot Bio-LNG in road freight with promising results – DHL, 2021 - <https://www.dhl.com/global-en/home/press/press-archive/2021/dhl-and-grundfos-pilot-bio-lng-in-road-freight-with-promising-results.html>

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Εκεί η Attero επεξεργάζεται ετησίως περίπου 225,000 τόνους αποβλήτων όπου στη συνέχεια ένα μέρος αυτών μετατρέπεται σε κομπόστ και το υπόλοιπο το χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιοαερίου και ηλεκτρικής ενέργειας⁸.



Εικόνα 5: 3D σχέδιο του εργοστασίου FirstBio2Shipping⁹

Η αναβάθμιση και μετατροπή του βιοαερίου σε bioLNG θα γίνεται με την πρωτοποριακή τεχνολογία της κρυογενικής υγροποίησης (cryogenic liquification) την οποία έχει αναπτύξει η Nordsol, στην οποία έχει επενδύσει και η Shell. Έτσι, η πιλοτική αυτή μονάδα αναμένεται να παράγει ετησίως 6,000,000 Nm³ βιοαερίου, τα οποία θα μετατρέπονται σε 2,400 τόνους bioLNG και 5,000 τόνους βιογενούς CO₂ (biogenic CO₂). Το πρώτο θα το διαχειρίζεται η TitanLNG, πωλώντας το ως ναυτιλιακό καύσιμο, ενώ το δεύτερο θα διατίθεται με τη μορφή χονδρικής πώλησης για βιομηχανική χρήση. Το σχετικό κόστος για την κατασκευή της μονάδας, η οποία φαίνεται σε 3D σχέδιο στην Εικόνα 5, ανέρχεται στα 7,226,764 €, ενώ χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση κατά το 60% του συνολικού ποσού, λαμβάνοντας δηλαδή 4,336,058 €. Η κατασκευή του ξεκίνησε τον Δεκέμβριο του 2021 και αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία το τέταρτο τρίμηνο του 2023. Έναν χρόνο νωρίτερα η TitanLNG εξασφάλισε χρηματοδότηση ύψους 11,000,000 € από το συνολικό απαιτούμενο ποσό των 55,000,000 € για την χρηματοδότηση του Bio2Bunker, με σκοπό την κατασκευή 3 πλοίων ανεφοδιασμού LNG – bioLNG. Το πρόγραμμα αναμένεται να διαρκέσει έως το 2024, ενώ τα χρήματα προήλθαν από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα EU's Connecting Europe Facility, το οποίο στοχεύει μεταξύ άλλων και στην απανθρακοποίηση των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στον τομέα των μεταφορών. Τα πλοία που πρόκειται να

⁸ Attero energiek met milieu – <https://www.attero.nl/en/our-sites/wilp/>

⁹ Nordsol – <https://nordsol.com/>

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

κατασκευαστούν θα προμηθεύουν τα λιμάνια του Zeebrugge στο Βέλγιο, του Λούμπεκ στη Γερμανία και του Ρότερνταμ στην Ολλανδία, ενώ έρχονται να προστεθούν στον ήδη υπάρχον στόλο της εταιρείας που αποτελείται από 4 πλοία¹⁰. Αυτή τη στιγμή η TitanLNG αποτελεί μια από τις ηγέτιδες εταιρείες στον ανεφοδιασμό των πλοίων με LNG και bioLNG στην βόρεια Ευρώπη και ιδιαίτερα στα λιμάνια του Άμστερνταμ, του Ρότερνταμ και της Αμβέρσας, όπως ενδεικτικά φαίνεται στην Εικόνα 6, ενώ δραστηριοποιείται και στον τομέα της βιομηχανίας, μέσω της εγκατάστασης συστημάτων παροχής ενέργειας σε εργοστασιακές μονάδες, που έχουν ως καύσιμο το LNG.



Εικόνα 6: Πλοίο της TitanLNG κατά τη διάρκεια προμήθειας LNG/bioLNG στην Αμβέρσα¹¹

5.2. Η αγορά του βιομεθανίου

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, είναι σημαντικό είναι να εξεταστεί και η δυναμική της αγοράς του βιομεθανίου, ένα εκ των ίδιων προϊόντων δηλαδή με το bioLNG, σε προγενέστερη όμως φάση της παραγωγικής διαδικασίας και με διαφορετική τελική χρήση. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι διότι υπό κάποιες προϋποθέσεις και με κατάλληλες μετατροπές, μεγάλος αριθμός υπάρχοντων μονάδων παραγωγής βιομεθανίου (και βιοαερίου) μπορούν να αναβαθμιστούν για την απευθείας παραγωγή bioLNG. Επιπλέον, μια μονάδα που παράγει βιομεθάνιο με σκοπό την έκχυση του στο δίκτυο φυσικού αερίου, μπορεί να διαθέσει μέρος της παραγωγής της σε κάποια άλλη μονάδα που θα το μετατρέψει σε bioLNG. Έτσι, ενισχύεται η βιωσιμότητα του BioLNG ως καύσιμο μεταφορών, αφού αφενός υπάρχει και αναπτύσσεται ραγδαία μια συγγενής σε αυτό βιομηχανία και αφετέρου σε περίπτωση μεγάλης ζήτησης ένα μέρος της συνολικής παραγωγής βιοαερίου και βιομεθανίου μπορεί να διατεθεί ως bioLNG.

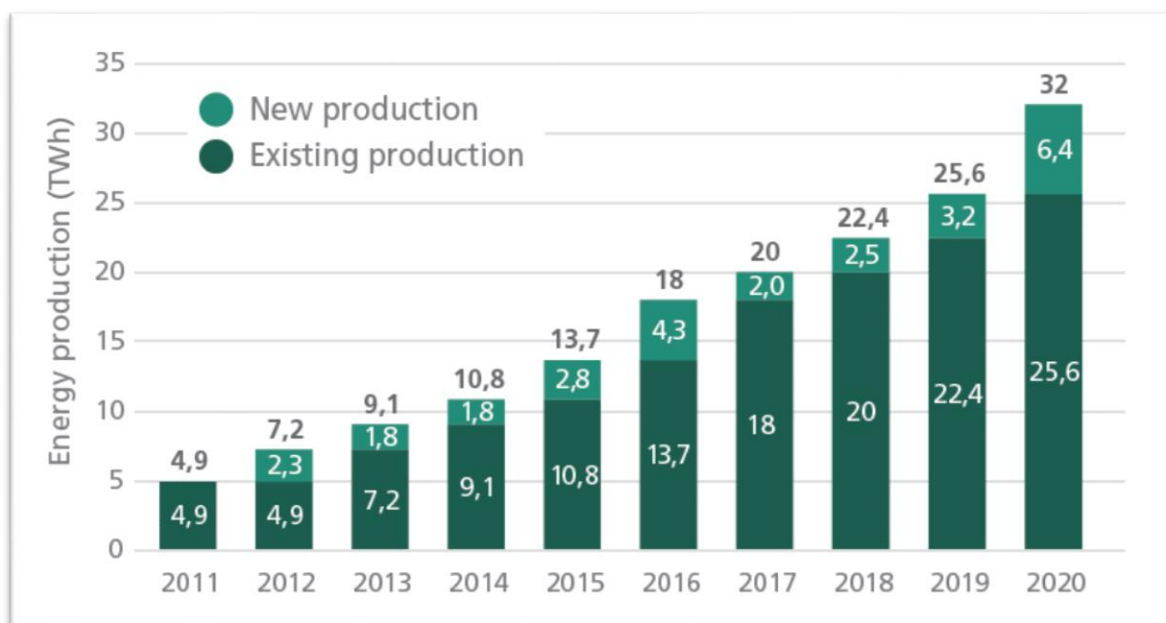
Στην Ευρώπη λειτουργούν τα περισσότερα εργοστάσια βιομεθανίου στον κόσμο και φαίνεται πως τα επόμενα χρόνια η αγορά αυτή αναμένεται να αναπτυχθεί ραγδαία. Ενδεικτικά, έως τον Οκτώβριο του 2021 υπήρχαν 1,023 μονάδες παραγωγής βιομεθανίου στην Ευρώπη, από

¹⁰ TitanLNG Press Release - Bio2Bunker Project – <https://titan-cleanfuels.com/titan-lngs-ambitious-bio-lng-breakthrough-project-receives-eu-funding/>

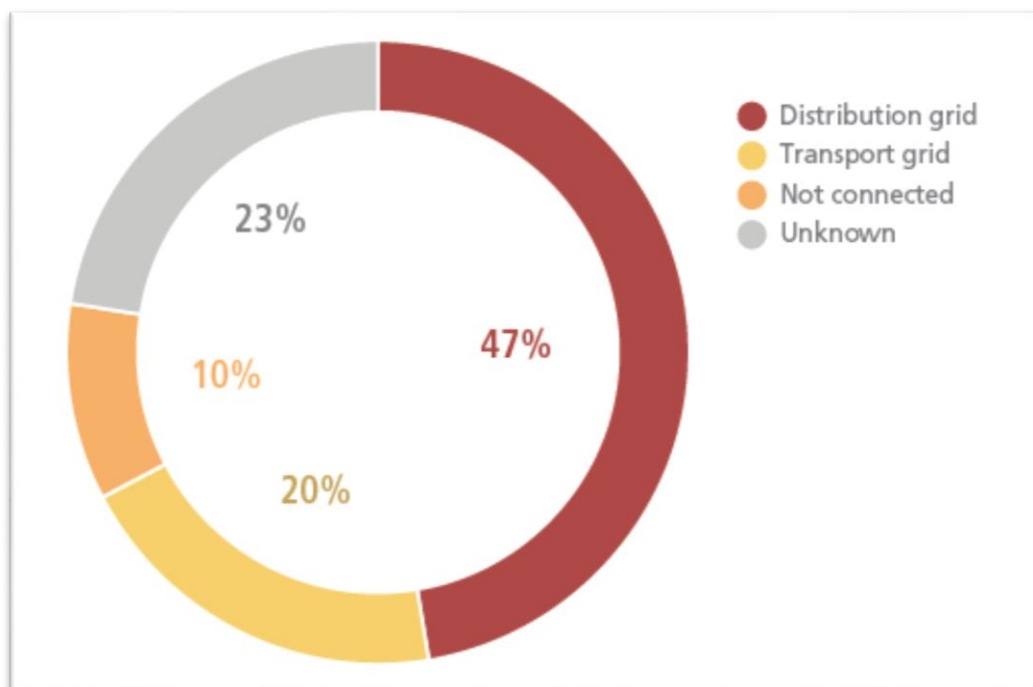
¹¹ FLOBAS Ventures – <https://www.flobasventures.com/>

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

729 το 2020 και 483 το 2018 αντίστοιχα. Μέσα στην τριετία αυτή παρατηρήθηκε, λοιπόν, αύξηση των μονάδων πάνω από 200% συνολικά. Η αντίστοιχη παραγωγή ενέργειας μεταφράζεται από 20 TWh το 2017, σε 32 TWh το 2020 [56], όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11. Από τις 20 χώρες εντός της ευρωπαϊκής επικράτειας που παράγουν βιομεθάνιο, την πρωτοκαθεδρία στην παραγωγή έχει η Γαλλία με 337 μονάδες, η Γερμανία με 242 μονάδες και η Αγγλία με 98, ενώ ακολουθούν η Σουηδία με 71, η Ολλανδία με 61, η Δανία με 51 και η Ελβετία με 40, καταλαμβάνοντας το 88% της αγοράς σε όρους μονάδων παραγωγής. Επίσης, σύμφωνα με το Σχήμα 12, στην πλειοψηφία τους οι μονάδες αυτές διαθέτουν το παραγόμενο βιομεθάνιο προς έκχυση στο δίκτυο του φυσικού αερίου (47%), ενώ η αμέσως επόμενη δημοφιλέστερη χρήση του είναι ως καύσιμο στον τομέα των μεταφορών (20%). Επιπλέον ένα 10% δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο και πραγματοποιεί ιδιοκατανάλωση, και για το εναπομείναν 23% δεν υπάρχουν επίσημα στοιχεία [56].



Σχήμα 11: Παραγωγή ενέργειας από βιομεθάνιο [56]

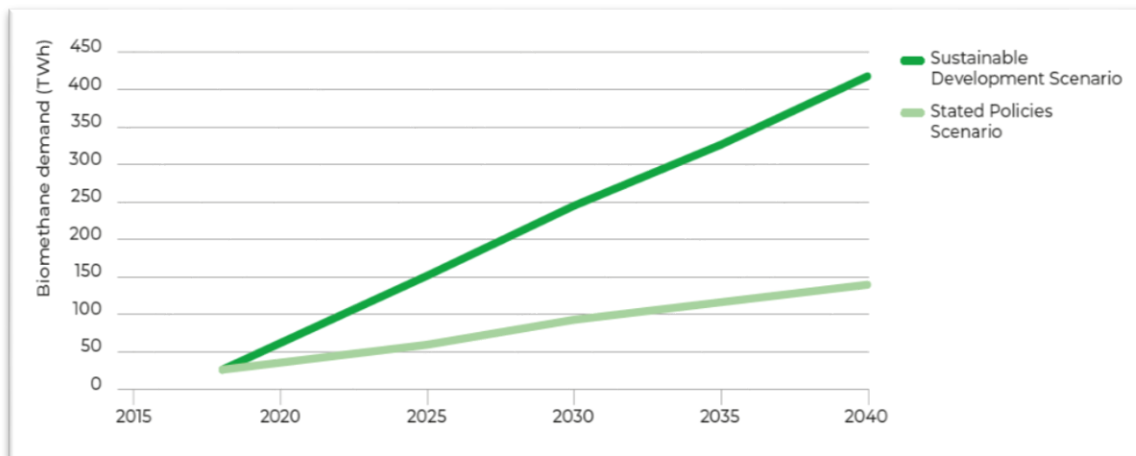


Σχήμα 12: Ποσοστό σύνδεσης της παραγωγής βιομεθανίου στα δίκτυα μεταφορών και φυσικού αερίου κατά το 2020 [56]

5.2.1. Υπάρχουσα και μελλοντική ζήτηση

Τα δεδομένα για την ανάπτυξη της παραγωγής βιομεθανίου δείχνουν μια έντονη ανάπτυξη του κλάδου τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με την σχετική ανάλυση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA) η ζήτηση βιομεθανίου στην Ευρώπη για το 2018 ήταν 23 TWh στο σύνολο της χρονιάς, το οποίο συμβαδίζει με το αντίστοιχο δυναμικό παραγωγής (Σχήμα 12). Η παραγωγή αυτή απορροφήθηκε κυρίως από τη χημική αλλά και άλλες βιομηχανίες, καθώς και από τις 'βαριές' μεταφορές στις οποίες συγκαταλέγεται και η ναυτιλία. Αναφέρεται επίσης πως για το 2040 υπάρχουν δύο σενάρια σχετικά με την αναμενόμενη ζήτηση του βιομεθανίου στην Ευρώπη. Και τα δύο αυτά σενάρια υποστηρίζουν μια συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση, η οποία όμως θα εξαρτηθεί από τις πολιτικές που θα ακολουθήσουν τα κράτη για την ανάπτυξη του κλάδου. Το συντηρητικότερο εκ των δύο (Stated Policies Scenario) είναι εκείνο το οποίο παίρνει ως δεδομένο την τήρηση των σημερινών πολιτικών ανάπτυξης, χωρίς την ύπαρξη κάποιας περαιτέρω στρατηγικής. Αν αυτό επιβεβαιωθεί, η ζήτηση το 2040 αναμένεται να φτάσει ετησίως τις 140 TWh. Το πιο αισιόδοξο σενάριο (Sustainable Development Scenario) το οποίο λαμβάνει ως δεδομένο την περαιτέρω ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών με σκοπό την επίτευξη του στόχου του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή, προβλέπει η ζήτηση να φτάσει τις 419 TWh το 2040 σε ευρωπαϊκό επίπεδο [23], όπως φαίνεται και Σχήμα 13.

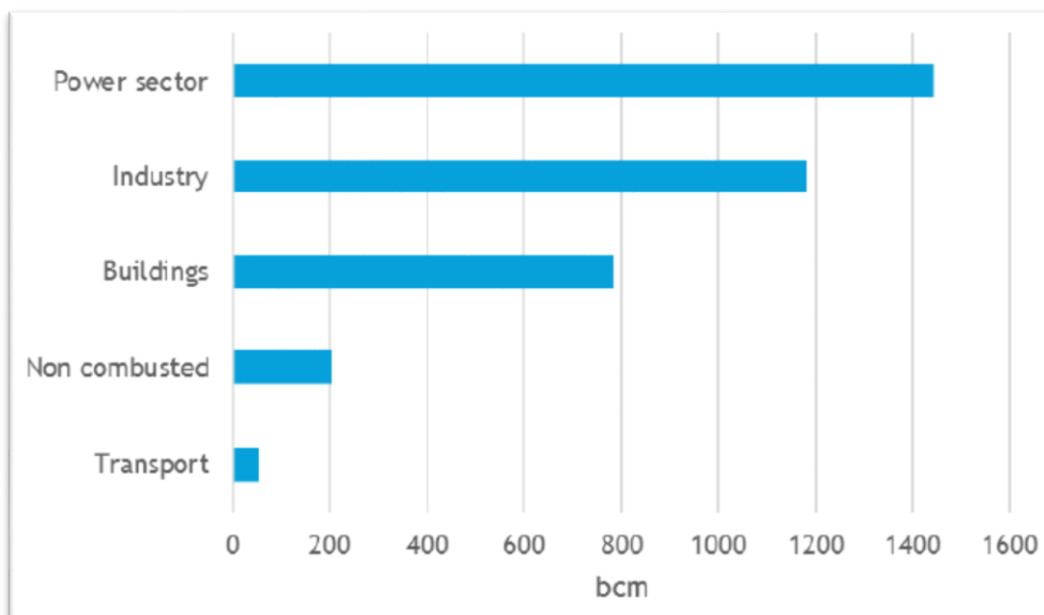
Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου



Σχήμα 13: Αναμενόμενη ζήτηση βιομεθανίου στην Ευρώπη το 2040, με βάση δύο διαφορετικά σενάρια βιωσιμότητας [30]

Η παραπάνω πρόβλεψη αφορά το σύνολο των βιομηχανιών, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται και η ναυτιλία. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως η χρήση του βιομεθανίου, και κατ' επέκταση και του BioLNG, μπορεί να γίνει χωρίς σημαντικές αναβαθμίσεις στις υπάρχουσες υποδομές, είναι αναμενόμενο να υπάρξει ζήτηση από διάφορους τομείς, πέραν του τομέα των μεταφορών και της ναυτιλίας. Οι εταιρείες παραγωγής και προμήθειας θα επιλέξουν να διαθέσουν το παραγόμενο βιομεθάνιο με βάση το δυνητικό κέρδος τους. Αυτό με τη σειρά του, εξαρτάται από το κόστος με το οποίο είναι διατεθειμένοι να επιβαρυνθούν οι καταναλωτές, καθώς και από την ποσότητα την οποία σκοπεύουν να καταναλώσουν. Αυτή τη στιγμή, σύμφωνα με τα υπάρχοντα στοιχεία, ο τομέας των μεταφορών απορροφά περίπου το 20% του παραγόμενου βιομεθανίου. Στο μέλλον, όμως, είναι αβέβαιο πως θα κατανεμηθεί η παραγωγή, αφού περισσότερες βιομηχανίες αναμένεται να καταναλώνουν βιομεθάνιο συνδυαστικά με το φυσικό αέριο. Με αυτό τον τρόπο θα επιτύχουν σημαντική αποφυγή εξόδων λόγω της μη αναβάθμισης των εγκαταστάσεων τους, καθώς και ανάπτυξης νέων υποδομών για τη χρήση άλλων εναλλακτικών καυσίμων, αφού η χρήση του βιομεθανίου γίνεται απευθείας από τις υπάρχουσες υποδομές του φυσικού αερίου. Επιπλέον κίνητρο αποτελεί το γεγονός πως τα βιοκαύσιμα, στα οποία ανήκει και το βιομεθάνιο, δεν επιβαρύνονται με κανένα κόστος στο ευρωπαϊκό χρηματιστήριο ρύπων. Οι βασικοί καταναλωτές φυσικού αερίου εντάσσονται στους τομείς της παραγωγής ενέργειας, σε διάφορες άλλες βιομηχανίες, καθώς και στις κτιριακές εγκαταστάσεις για θέρμανση, σύμφωνα με το Σχήμα 14. Σημασία έχει κατά πόσο στους τομείς αυτούς η ζήτηση για (υγροποιημένο) φυσικό αέριο θα μεταφραστεί σε ζήτηση για βιομεθάνιο, ή εάν κάποιο άλλο εναλλακτικό καύσιμο θα αποτελέσει βιώσιμη λύση με μεγαλύτερη προοπτική [25].

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου



Σχήμα 14: Κατανάλωση φυσικού αερίου ανά τομέα [9]

Σε γενικές γραμμές, το βιομεθάνιο αναμένεται να έχει μεγάλη ανάπτυξη σε τομείς όπου είναι δύσκολος ο εξηλεκτρισμός τους, όπως η χημική βιομηχανία, η βιομηχανία μετάλλων, τροφίμων και ποτών, ενώ κάποιες από αυτές έχουν ήδη ξεκινήσει να εντάσσουν στην παραγωγική τους διαδικασία το βιομεθάνιο και το βιοαέριο για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, καθώς και για άλλες μορφές ιδιοκατανάλωσης [23]. Σύμφωνα με τη μελέτη του CE Delft [25], ο τομέας της παραγωγής ενέργειας είναι πιθανό να χρησιμοποιήσει ως καύσιμο το βιομεθάνιο, κυρίως μεσοπρόθεσμα. Με τον τρόπο αυτόν και σε συνδυασμό με την δέσμευση και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα, θα μπορέσει να πετύχει, υπό συνθήκες, αρνητικούς ρύπους στην διαδικασία της παραγωγής. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως η παραγωγή ενέργειας μέσω ηλιακής και αιολικής ενέργειας έχει σημαντικά χαμηλότερα κόστη, με την παραγωγή τους, όμως, να είναι ασταθής και εξαρτώμενη από τις καιρικές συνθήκες, σε αντίθεση με τις μονάδες παραγωγής ενέργειας μέσω φυσικού αερίου/βιομεθανίου, που έχουν σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Σε ό,τι αφορά τις κτιριακές εγκαταστάσεις, το βιομεθάνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας με τις υπάρχουσες υποδομές του φυσικού αερίου και άρα αναμένεται να υπάρξει ζήτηση και σε αυτόν τον τομέα, παρά τις εναλλακτικές που δίνονται (υδρογόνο, αντλίες θερμότητας, ηλεκτρικό ρεύμα και άλλες μορφές βιομάζας) για την θέρμανση και το μαγείρεμα. Εξετάζοντας τον τομέα των μεταφορών, βλέπουμε πως η τωρινή κατανάλωση LNG είναι μικρή, ενώ ιδιαίτερα στον χώρο των αυτοκινήτων η τάση για εξηλεκτρισμό είναι μεγάλη. Από την άλλη, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μεταστροφή της εφοδιαστικής αλυσίδας των μεταφορών προς τα (ανανεώσιμα) αέρια εξυπηρετεί την κάλυψη των αναγκών στα μέσα εκείνα που δεν δύνανται να εξηλεκτριστούν. Κατά κύριο λόγο, δηλαδή, στη ναυτιλία και τις βαριές οδικές μεταφορές.

Συμπερασματικά, υπάρχουν πολλοί κλάδοι πέραν της ναυτιλίας οι οποίοι μπορεί στο μέλλον να απορροφήσουν την παραγωγή βιομεθανίου. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει τουλάχιστον περιστασιακά έλλειψη στον τομέα της ναυτιλίας, δεδομένου ότι η ζήτηση θα είναι εντονότερη, από άλλες, μεγαλύτερες βιομηχανίες και άρα η προμήθεια των πλοίων με το καύσιμο αυτό θα γίνει πιο κοστοβόρα για τους ναυλωτές και τους πλοιοκτήτες. Από την άλλη, εάν η ζήτηση δεν περιοριστεί στον τομέα των μεταφορών, η ανάπτυξη της βιομηχανίας της παραγωγής βιομεθανίου θα επιφέρει μεγαλύτερη τεχνογνωσία στις πρακτικές που ακολουθούνται, βελτιστοποίηση της παραγωγικής

διαδικασίας και τελικά σε μακροοικονομικό επίπεδο, μείωση του κόστους παραγωγής και αύξηση της διαθέσιμης πρώτης ύλης.

5.2.2. Διαθεσιμότητα στην παραγωγή

Η εξέταση της βιωσιμότητας του βιομεθανίου (BioLNG) ως ναυτιλιακό καύσιμο, εξαρτάται, όπως προαναφέρθηκε, τόσο από την τεχνολογική ωριμότητα για την παραγωγή και τη χρήση του, η οποία υπάρχει, όσο και από το δίκτυο προμήθειας (σταθμοί ανεφοδιασμού, bunkering infrastructure), το οποίο θα πρέπει να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες της αγοράς. Επιπλέον, δεδομένης της προέλευσης του καυσίμου, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί πως η παραγωγή του στους απαιτούμενους όγκους με βάση την προβλεπόμενη ζήτηση θα μπορεί να καλυφθεί από την διαθέσιμη πρώτη ύλη, δηλαδή από τα διάφορα είδη των οργανικών αποβλήτων και ενεργειακών καλλιεργειών που μπορούν να διατεθούν. Έτσι, είναι σκόπιμο να αναφερθούν οι ποσότητες των αποβλήτων σε παγκόσμιο, αλλά και ευρωπαϊκό επίπεδο, σε συνδυασμό με το κόστος που θα πρέπει να δαπανήσει ο εκάστοτε παραγωγός για να τα προμηθευτεί. Σε ό,τι αφορά την χρήση των ενεργειακών καλλιεργειών, θα γίνει απλώς μια αναφορά δεδομένου ότι σύμφωνα με τον κανονισμό RED II [42], η βιώσιμη ανάπτυξη του βιοαερίου προϋποθέτει ότι η χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τροφή για τον άνθρωπο ή τα ζώα. Επίσης, με τη χρήση των ενεργειακών καλλιεργειών δεν επιτυγχάνεται ουσιαστική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην παραγωγική διαδικασία, κάτι που είναι και το ζητούμενο.

Η διαθέσιμη βιομάζα για την παραγωγή ενέργειας, και άρα και βιομεθανίου, μπορεί να εξεταστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Αξιολογώντας ολόκληρη την ποσότητα εκείνη που δύναται να αποτελέσει πρώτη ύλη προς παραγωγή βιομεθανίου (θεωρητικό δυναμικό) [21].
- Αξιολογώντας την ποσότητα που απομένει για την παραγωγή, έχοντας υπολογίσει και αφαιρέσει τις ποσότητες εκείνες που διατίθενται για άλλες χρήσεις της βιομάζας, όπως για κομποστοποίηση, παραγωγή ινών και ζωοτροφών, ή για απευθείας απόθεση της στο έδαφος ως βελτιωτικό και για αποφυγή ξήρανσης του κ.α. (τεχνικό δυναμικό). Δευτερευόντως, υφίσταται και η ποσότητα εκείνη που λαμβάνει υπόψη της και κάποιους περιβαλλοντικούς περιορισμούς όπως η απώλεια βιοποικιλότητας και η υποβάθμιση του εδάφους (βιώσιμο δυναμικό) [25].

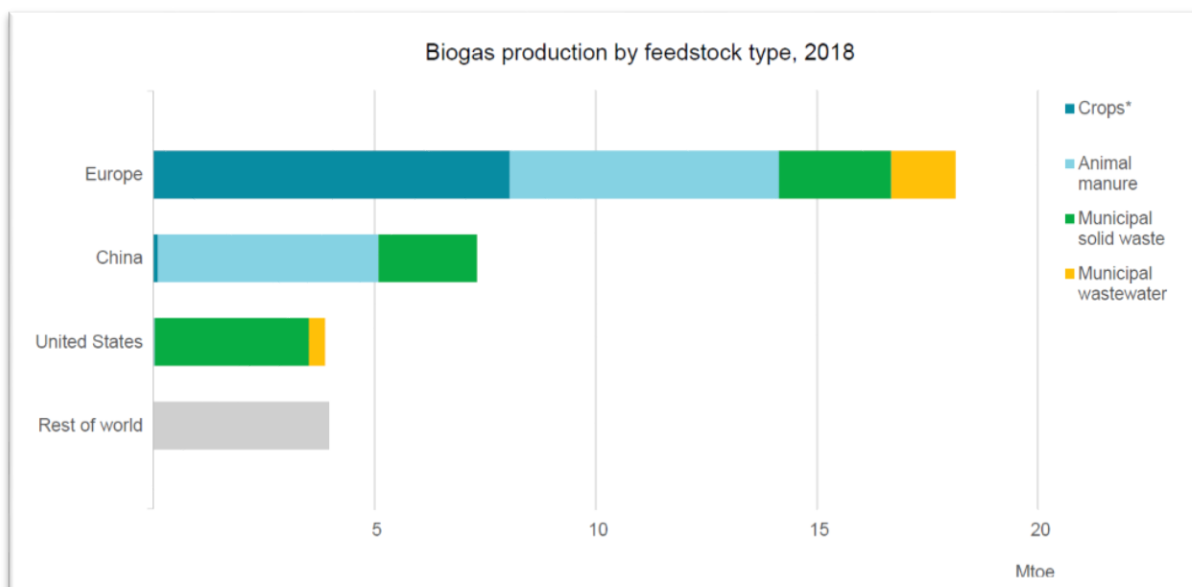
Επιπλέον, η διαθέσιμη βιομάζα μπορεί να χωριστεί σε 1ης και 2ης γενιάς, με βάση τον τρόπο παραγωγής του βιομεθανίου. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται μέσω αναερόβιας χώνευσης και αναβάθμισης του βιοαερίου, ενώ στη δεύτερη μέσω αεριοποίησης. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (IEA) η Ευρώπη αποτελεί με διαφορά τον μεγαλύτερο παραγωγό βιοαερίου και βιομεθανίου στον κόσμο [22], ενώ σύμφωνα και με τα σχήματα Σχήμα 15 και Σχήμα 16, οι βασικές πρώτες ύλες για την παραγωγή προέρχονται με φθίνουσα σειρά σε ότι αφορά την ποσότητα από:

- Υπολείμματα καλλιεργειών και ενεργειακές καλλιέργειες
- Κοπριά ζώων
- Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων
- Μονάδες Επεξεργασίας Λυμάτων

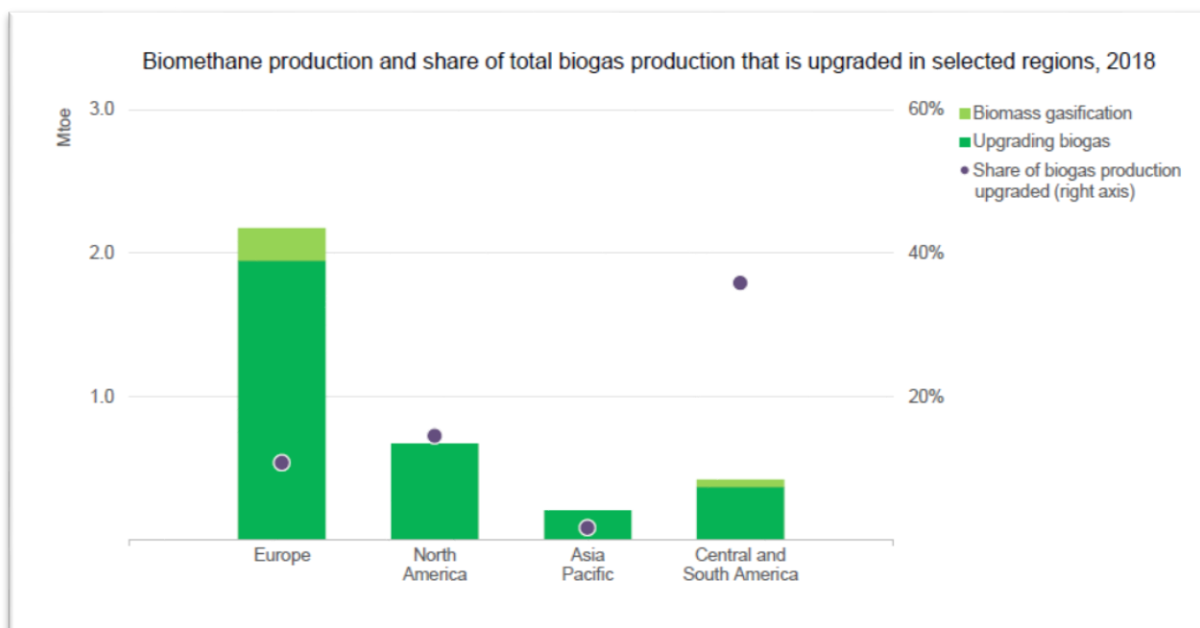
Στις παραπάνω πρώτες ύλες δεν συμπεριλαμβάνονται τα δασικά υπολείμματα που αποτελούν πρώτη ύλη κατάλληλη για παραγωγή βιομεθανίου μέσω αεριοποίησης. Αυτή τη στιγμή

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

ένα μόνο μικρό ποσοστό της παραγόμενης ποσότητας βιομεθανίου προέρχεται από αεριοποίηση, με το αναβαθμισμένο βιοαέριο που παράγεται μέσω αναερόβιας χώνευσης να αποτελεί την πιο συνήθη πρακτική.



Σχήμα 15: Παραγωγή βιοαερίου ανά περιοχή και από διαφορετικές πρώτες ύλες [22]

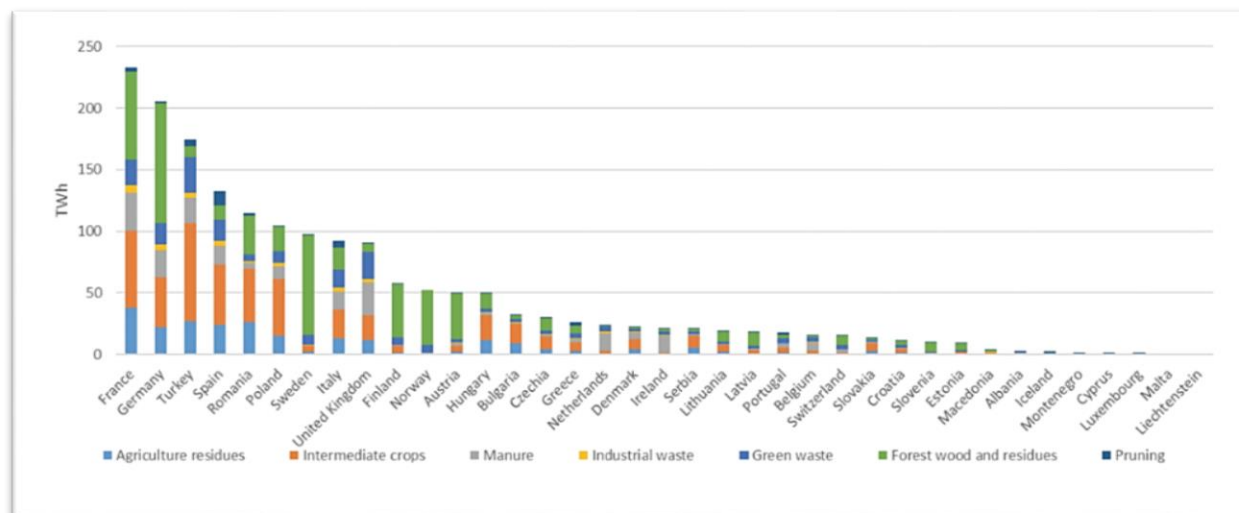


Σχήμα 16: Παραγωγική Διαδικασία Βιομεθανίου και ποσοστό αναβαθμιζόμενου βιοαερίου ανά περιοχή [22]

Σύμφωνα με σχετική μελέτη της ENGIE [21] για την προβλεπόμενη διαθεσιμότητα και το κόστος του βιομεθανίου σε χρονικό ορίζοντα ως το 2050, το δυναμικό της Ευρώπης ξεπερνά κατά πολύ τη σημερινή παραγωγή, η οποία σύμφωνα με τον οργανισμό European Biogas Association για το 2020 ήταν 191 TWh/έτος (συνδυαστικά βιοαέριο και βιομεθάνιο). Η μελέτη πραγματοποιήθηκε μελετώντας τις 27 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, καθώς και 10 ακόμα που έχουν δυναμική σε ό,τι αφορά την διαθέσιμη πρώτη ύλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 17. Πρώτα βρέθηκε το θεωρητικό δυναμικό των σχετικών πρώτων υλών, με βάση τη γεωγραφική

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

διαθεσιμότητα τους, τις επιμέρους ιδιαιτερότητες τους (όπως το ποσοστό των αγροτικών υπολειμμάτων για κάθε είδος καλλιέργειας, ανά στρέμμα καλλιεργημένης έκτασης) και το ενεργειακό περιεχόμενο (σχετική απόδοση μεθανίου), για την εκάστοτε πρώτη ύλη. Στη συνέχεια έγινε αναγωγή στο Τεχνικό Δυναμικό, λαμβάνοντας υπόψη τις κατάλληλες μειώσεις που προκύπτουν από άλλες, παράλληλες χρήσεις καθώς και από διάφορους επιπλέον περιορισμούς.



Σχήμα 17: Δυναμικό παραγωγής βιομεθανίου ανά πρώτη ύλη και χώρα [21]

Επομένως, οι πρώτες ύλες και η αντίστοιχη διαθεσιμότητα κατηγοριοποιήθηκαν σε 1^{ης} και 2^{ης} γενιά και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.

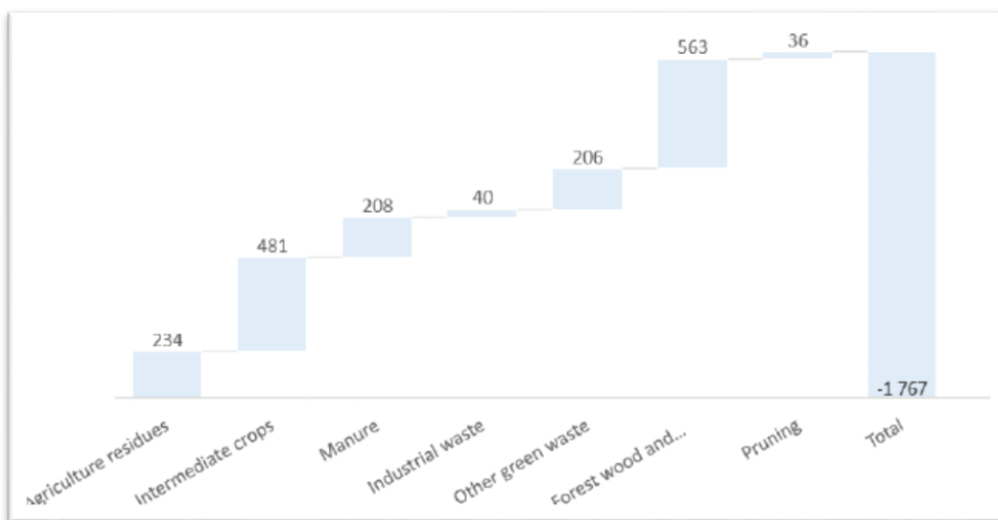
Πίνακας 5: Διαθεσιμότητα πρώτων υλών

| Γενιά | Πρώτη ύλη | Διαθεσιμότητα |
|------------------------|---|---------------|
| 1 ^{ης} Γενιάς | Αγροτικά υπολείμματα | 234 TWh/έτος |
| | Υπολείμματα ενδιάμεσων καλλιεργειών οι οποίες χρησιμεύουν στην διατήρηση της υγείας του εδάφους στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο κύριες καλλιέργειες | 462 TWh/έτος |
| | Βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών αποβλήτων | 106 TWh/έτος |
| | Βιομηχανικά απόβλητα τα οποία προέρχονται από την επεξεργασία αγροτικών ή ζωικών προϊόντων | 40 TWh/έτος |
| | Υδαρής κτηνοτροφική κοπριά | 70 TWh/έτος |
| | Ξηρή κτηνοτροφική κοπριά | 139 TWh/έτος |
| | Υπολείμματα από αστικά χόρτα και φύλλα που προέρχονται από το κλάδεμα των κήπων, των πάρκων κλπ., στις αστικές περιοχές | 105 TWh/έτος |
| 2 ^{ης} Γενιάς | Δασικά υπολείμματα που σχετίζονται με την αραίωση, τον καθαρισμό των δασών και την εμπορική χρήση των ξύλων | 562 TWh/έτος |
| | Υπολείμματα από το κλάδεμα μόνιμων καλλιεργειών σε αμπελώνες, ελαιώνες κ.α. | 36 TWh/έτος |

Συμπερασματικά, η διαθέσιμη πρώτη ύλη στην Ευρώπη (EU27 +10) μπορεί να προσφέρει ετήσια παραγωγή βιομεθανίου ίση με 1,700TWh, από της οποίες οι περίπου 1,100TWh έχουν προκύψει από βιομάζα 1^{ης} γενιάς και οι περίπου 600TWh από βιομάζα 2^{ης} γενιάς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 18. Επίσης έχει γίνει η παραδοχή πως το 100% των διαθέσιμων ενδιάμεσων καλλιεργειών, των αστικών υπολειμμάτων των φύλλων και χορταρικών, αλλά και της βιομάζας 2^{ης} γενιάς θα διατεθούν για την παραγωγή βιομεθανίου, χωρίς απορρόφηση από κάποια άλλη βιομηχανία, δεδομένου ότι αυτή τη στιγμή παραμένουν αναξιοποίητα. Ακόμα όμως και με

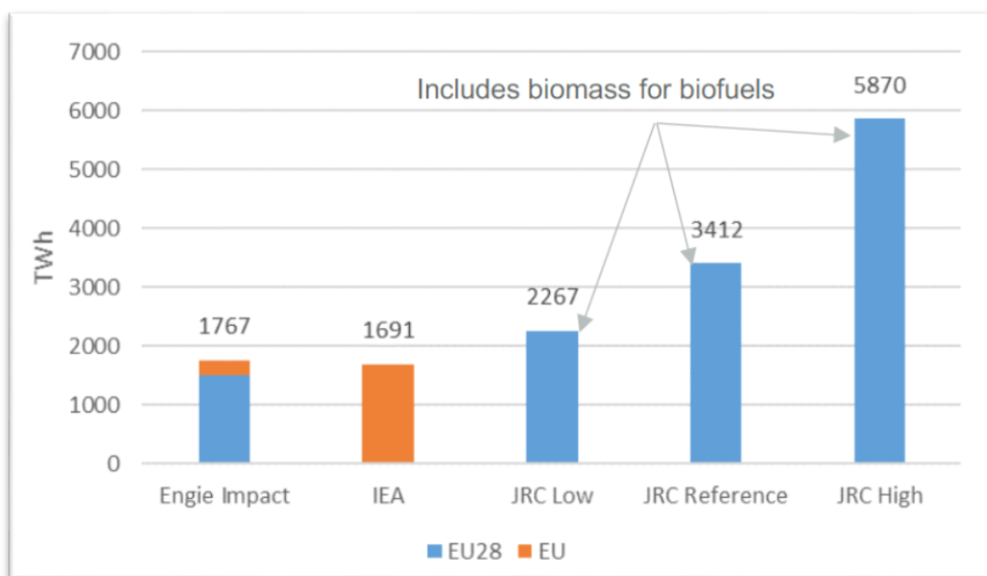
Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

αφαίρεση του 100% των τριών αυτών κατηγοριών, το δυναμικό παραμένει στις 482TWh/έτος, δηλαδή 2.5 φορές παραπάνω από τη σημερινή παραγωγή βιοαερίου και 15 φορές παραπάνω από την αντίστοιχη παραγωγή βιομεθανίου [21].



Σχήμα 18: Δυναμικό Βιομεθανίου σε TWh/έτος στην Ευρώπη ανά κατηγορία πρώτης ύλης [21]

Τα παραπάνω αποτελέσματα συμβαδίζουν και με τις σχετικές μελέτες του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και το Κοινό Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (Joint Research Center), με τη δεύτερη μελέτη να συμπεριλαμβάνει και τις πρώτες ύλες εκείνες οι οποίες προορίζονται για την παραγωγή άλλων βιοκαυσίμων (Σχήμα 19).

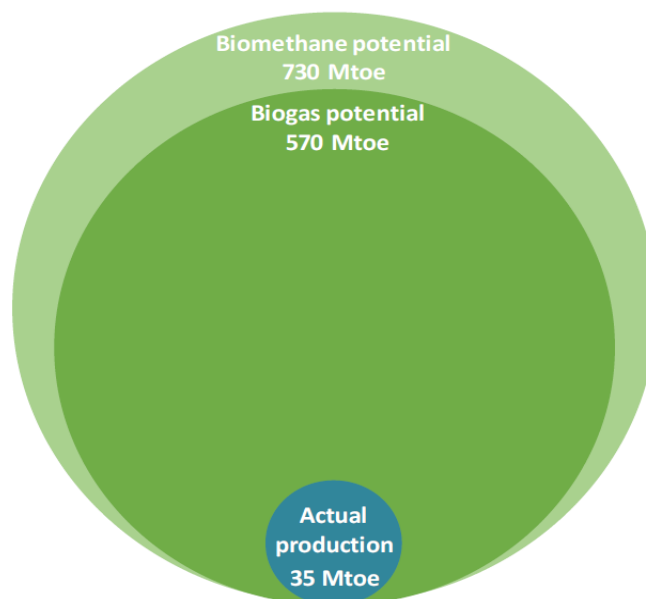


Σχήμα 19: Σχετικές μελέτες για την διαθεσιμότητα των πρώτων υλών προς παραγωγή βιομεθανίου στην Ευρώπη [21]

Σε παγκόσμιο επίπεδο, σύμφωνα με την μελέτη του IEA η οποία υπολόγισε το τεχνικό δυναμικό της διαθέσιμης βιομάζας με αντίστοιχο τρόπο και κάνοντας παρόμοιες παραδοχές με τη μελέτη της ENGIE [21], το δυναμικό για την παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου το 2018 ήταν 570 και 730 εκατομμύρια τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου, αντίστοιχα, ή 6,630TWh και 8,490TWh ετησίως. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός πως το βιομεθάνιο μπορεί να παραχθεί από την επιπλέον διαθέσιμη ξυλώδη βιομάζα μέσω της αεριοποίησης. Στο Σχήμα 20 αποτυπώνεται γραφικά το δυναμικό παραγωγής βιομεθανίου και βιοαερίου σε παγκόσμια κλίμακα, σε σύγκριση με την

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

σημερινή κατάσταση. Ενδεικτικά οι ποσότητες αυτές του δυναμικού παραγωγής είναι ικανές να καλύψουν το 20% της παγκόσμιας κατανάλωσης φυσικού αερίου [22]. Έως το 2040, το δυναμικό αυτό αναμένεται να αυξηθεί κατά 50%, εξ αιτίας της συνεχώς αναπτυσσόμενης παγκόσμιας οικονομίας που ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες συνεπάγεται μεγαλύτερη διαθεσιμότητα αγροτικών υπολειμμάτων και κοπριάς ζώων, λόγω της βελτιούμενης διατροφής του πληθυσμού τους. Επιπλέον, λόγω της βελτίωσης και των αστικών υποδομών αναμένεται να αυξηθούν κατά κόρων και τα διαθέσιμα προς επεξεργασία αστικά λύματα [22]. Έτσι, το 2040 το ετήσιο δυναμικό παραγωγής βιομεθανίου αναμένεται να είναι ίσο με 1095 τόνους ισοδύναμου πετρελαίου = 12,735 TWh = 46 EJ.

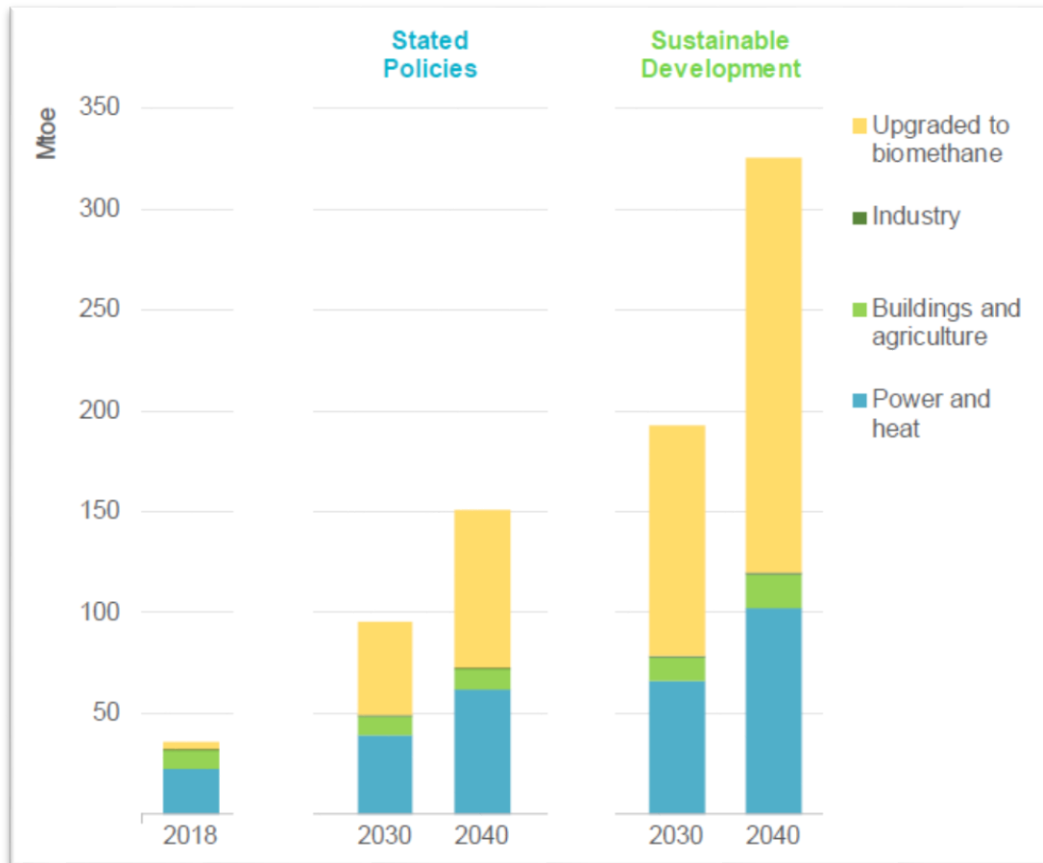


Σχήμα 20: Παγκόσμιο δυναμικό παραγωγής βιομεθανίου και βιοαερίου, σε σύγκριση με την σημερινή παραγωγή [30]

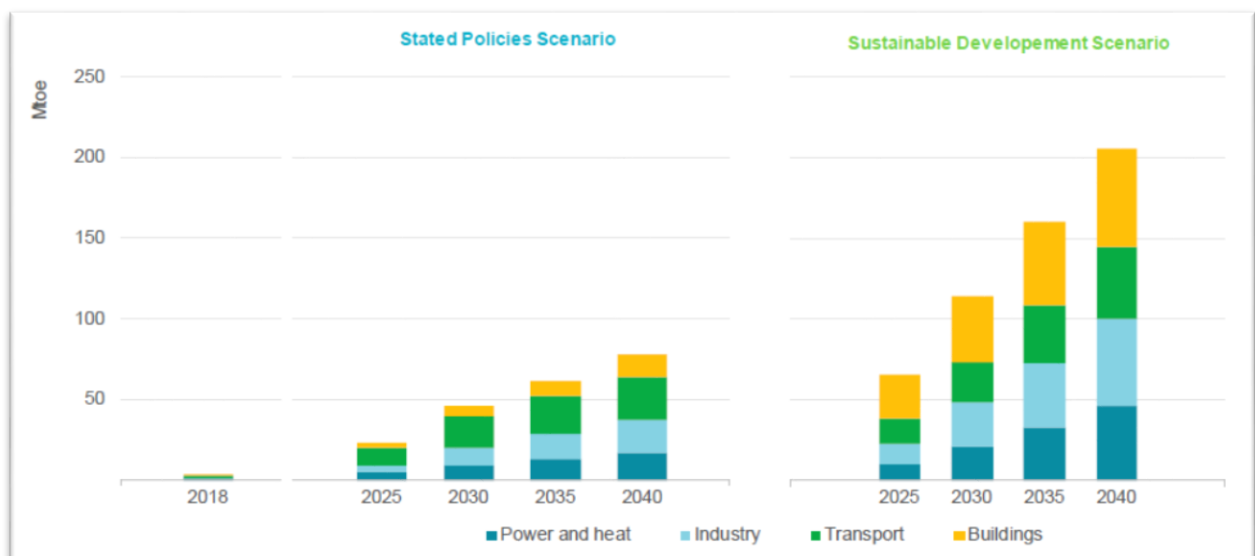
Ενδεικτικά, οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της παγκόσμιας ναυτιλίας για το 2030 αναμένεται να είναι 10.5 – 12.5 EJ και για το 2050, 10.2 – 23.2 EJ, με την αβεβαιότητα να έγκειται στο γεγονός πως από τη μια το 2050 τα πλοία θα είναι ενεργειακά αποδοτικότερα, από την άλλη όμως θα είναι περισσότερα σε αριθμούς, και οι μεταφορικές απαιτήσεις σε όρους tonnage μεγαλύτερες. Σε κάθε περίπτωση, το δυναμικό παραγωγής του βιομεθανίου, και κατ' επέκταση του bioLNG υπερκαλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του συνόλου της παγκόσμιας ναυτιλίας [25]. Φυσικά, όπως προαναφέρθηκε, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πως δεν πρόκειται να αναβαθμιστεί το σύνολο της παραγωγής του βιοαερίου σε βιομεθάνιο, και από την ποσότητα εκείνη που θα αναβαθμίζεται δεν θα διατίθεται όλο για την κάλυψη των αναγκών της ναυτιλίας.

Όμως, όπως προαναφέρθηκε, εξαιτίας της δυσκολίας απανθρακοποίησης του τομέα των μεταφορών με άλλους τρόπους όπως ο εξηλεκτρισμός, σε συνδυασμό με την ύπαρξη αλλά και ταχεία ανάπτυξη των αναγκαίων υποδομών, είναι σχεδόν βέβαιο πως η ναυτιλία και οι 'βαριές' μεταφορές θα απορροφήσουν μεγάλο μέρος της παραγωγής. Αυτό υποστηρίζεται εξάλλου και από την μελέτη του IEA [30], και αποτυπώνεται στο Σχήμα 19 και το Σχήμα 20, αλλά φαίνεται και από τις πολιτικές που ακολουθούν τα κράτη για την ανάπτυξη του βιομεθανίου, δίνοντας έμφαση στον τομέα των μεταφορών, όπως αναπτύσσεται στην επόμενη παράγραφο.

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου



Σχήμα 21: Αναμενόμενη χρήση του βιοαερίου και ποσοστό αναβάθμισης σε δύο διαφορετικά σενάρια βιώσιμης ανάπτυξης [22]



Σχήμα 22: Αναμενόμενη απορρόφηση του βιομεθανίου από διάφορους κλάδους και για δύο διαφορετικά σενάρια βιώσιμης ανάπτυξης [22]

5.2.3. Υποστήριξη για ανάπτυξη του βιομεθανίου (bioLNG) στην Ευρώπη

Καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη του βιομεθανίου παίζουν οι πολιτικές στήριξης που θα επικρατήσουν τα επόμενα χρόνια από μεριάς των κρατών. Με αυτό τον τρόπο θα μπορέσουν να δοθούν φορολογικά, χρηματοδοτικά, και άλλα όπως ασφαλιστικά κίνητρα, τα οποία θα οδηγήσουν

περισσότερους ιδιώτες να επενδύσουν στον χώρο αυτόν. Αυτή τη στιγμή δεν υπάρχει σαφής στόχος σχετιζόμενος αποκλειστικά με το βιομεθάνιο σε πανευρωπαϊκό επίπεδο. Οι στόχοι των Ευρωπαϊκών Κρατών που σχετίζονται με την ανάπτυξη του βιομεθανίου εντάσσονται στον κανονισμό RED II (Renewable Energy Directive) που ψηφίστηκε το 2018, θέτοντας στόχους για την ενέργεια και το κλίμα για την περίοδο 2020-2030 [42]. Στο πλαίσιο αυτό, η Ένωση θα πρέπει να έχει εντάξει τις Α.Π.Ε. σε ποσοστό 32% στην συνολική κατανάλωση ενέργειας, ενώ οι προμηθευτές καυσίμων εντός της Επικράτειας θα πρέπει κατ' ελάχιστο να παρέχουν το 14% της καταναλισκόμενης ενέργειας στον τομέα των μεταφορών μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ από το 14% αυτό, το 3.5% θα πρέπει να είναι βιοκαύσιμα, στα οποία ανήκει και το βιομεθάνιο [42]. Οι παραπάνω είναι οι συνολικοί στόχοι, οι οποίοι διαφέρουν από κράτος σε κράτος, δεδομένου του σημείου εκκίνησης του καθενός, καθώς και του δυναμικού του. Επιπλέον, στον τομέα της θέρμανσης και της ψύξης η Ευρωπαϊκή Ένωση οφείλει να αυξάνει ετησίως τη συμμετοχή των Α.Π.Ε. κατά 1.3%. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων το κάθε κράτος-μέλος, όπως και η Ελλάδα, ανέπτυξαν το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (National Energy and Climate Plans). Στα σχέδια αυτά αναλύεται στρατηγικός σχεδιασμός, εντός του οποίου εντάσσεται και η ανάπτυξη του βιομεθανίου και των υπολοίπων Α.Π.Ε. [42]. Το κάθε κράτος-μέλος έχει διαφορετικούς στόχους σχετικά με το βιομεθάνιο και δίνει διαφορετικά κίνητρα, ενώ στα περισσότερα δεν υπάρχει ποσοτικοποιημένος στόχος, με όρους παραγωγικής δυνατότητας. Παρακάτω, παρουσιάζονται συγκεκριμένα για κάθε χώρα συνοπτικά οι στόχοι, αλλά και τα μέτρα υποστήριξης για την ανάπτυξη του βιομεθανίου, τα οποία αποτυπώνονται και στο Σχήμα 23, μαζί με την αναμενόμενη παραγωγή βιομεθανίου.

Βέλγιο: Δεν υπάρχει συγκεκριμένος – ποσοτικοποιημένος στόχος για την αύξηση της παραγωγής. Τα μέτρα στήριξης εξαρτώνται από την περιοχή στην οποία θα κατασκευαστεί η εκάστοτε μονάδα. Η χρηματοδότηση κυμαίνεται από 27.5% έως 65%, αλλά με μέγιστο ποσό τις 250,000 ευρώ. Σε ό,τι αφορά την υποστήριξη στη φάση της λειτουργίας, σε κάποιες περιοχές δίνονται στους παραγωγούς βεβαιώσεις προέλευσης (Guarantees of Origin – GoOs) οι οποίες στη συνέχεια πωλούνται στις μονάδες παραγωγής ενέργειας. Για τους παραγωγούς που αγοράζουν τα GoOs υπάρχει επίσης χρηματοδοτική υποστήριξη. Η παραγωγή αναμένεται να φτάσει τις 5TWh ετησίως έως το 2030.

Δανία: Αν και δεν υπάρχει σαφής στρατηγική, η κυβέρνηση αναπτύσσει το δίκτυο του βιομεθανίου σε συνεργασία με τις εγχώριες εταιρείες ενέργειας. Η παραγωγή αναμένεται να απορροφηθεί κατά κύριο λόγο από την βιομηχανία για θέρμανση και παραγωγή ενέργειας. Η βοήθεια που δίνεται, σχετίζεται με την εξασφάλιση μιας ελάχιστης τιμής πώλησης από τους παραγωγούς βιομεθανίου για την έκχυση στο δίκτυο του φυσικού αερίου. Η παραγωγή το 2019 ήταν 4.4 TWh και με βάση τον σχεδιασμό που έχει γίνει, το 2030 αναμένεται να φτάσει τις 13.3 TWh. Επιπλέον, ενώ σήμερα μόνο το 58% της παραγωγής βιοαερίου αναβαθμίζεται και εκχύεται στο δίκτυο του φυσικού αερίου, από εδώ και πέρα το σύνολο των καινούργιων μονάδων παραγωγής θα πρέπει να αναβαθμίζουν το βιοαέριο σε βιομεθάνιο.

Γαλλία: Η Γαλλία αποτελεί το κράτος με τον πιο φιλόδοξο στόχο πανευρωπαϊκά για την παραγωγή του βιομεθανίου. Συγκεκριμένα, έως το 2030 θα πρέπει το 10% της αγοράς των αερίων (κυρίως φυσικό αέριο και υδρογόνο) να αποτελείται από ανανεώσιμα αέρια (βιομεθάνιο-πράσινο υδρογόνο). Ο στόχος για την παραγωγή είναι οι 6 TWh για το 2023 και οι 14-22 TWh για το 2028 οι οποίες ισοδυναμούν με το 6-8% της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης φυσικού αερίου. Οι αριθμοί αυτοί είναι εφικτοί, μιας που η σημερινή παραγωγή κυμαίνεται στις 5 TWh και τα υπό ανάπτυξη πρότζεκτ είναι δυναμικής 20 TWh. Η βασική βοήθεια του κράτους που παρέχεται στους

παραγωγούς, σχετίζεται με την σταθερή τιμή πώλησης του βιομεθανίου για την έγχυση στο δίκτυο του φυσικού αερίου.

Γερμανία: Παρότι η Γερμανία έχει την μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου σε παγκόσμιο επίπεδο με πάνω από 10,000 μονάδες παραγωγής, το εθνικό της σχέδιο για την ενέργεια περιλαμβάνει στόχους για την αύξηση της παραγωγής ενέργειας μέσω βιομάζας γενικά και όχι συγκεκριμένα για την ανάπτυξη του βιομεθανίου. Αυτή τη στιγμή, η Γερμανία καλύπτει το 8% των ενεργειακών της αναγκών μέσω της βιομάζας και έχει θέσει ως στόχο ετησίως τις 58 TWh για το 2030, κάτι το οποίο είναι δύσκολο να επιτευχθεί δεδομένων των χαμηλών επιδοτήσεων στους παραγωγούς κατά την πώληση και ενός μέγιστου αριθμού TWh που μπορούν να επιδοτηθούν (περίπου 4.2 TWh).

Ελλάδα: Δεν υπάρχει ακόμα κάποια πολιτική προώθησης της ανάπτυξης του βιομεθανίου, αλλά αυτή τη στιγμή λειτουργεί ένα πιλοτικό πρότζεκτ στο οποίο θα αναβαθμιστούν δύο υπάρχοντα εργοστάσια βιοαερίου στις Σέρρες και την Ημαθία τα οποία θα τροφοδοτούν τοπικά οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς καταναλωτές με βιομεθάνιο. Έτσι θα μελετηθεί η απόδοση τους και έπειτα θα θεσμοθετηθούν οι κατάλληλες διαδικασίες για την παραγωγή, την έγχυση, τη διανομή, την πώληση και τη χρήση του βιομεθανίου στη χώρα. Παρά την έλλειψη ξεκάθαρου νομοθετικού πλαισίου η αρμόδια υπηρεσία (Δημόσια Επιχείρηση Δικτύων Διανομής Αερίου-ΔΕΔΑ) λαμβάνει κατ' εξαίρεση προσωρινές άδειες και εντός του 2022 θα ξεκινήσει πιλοτικά και η διανομή του βιομεθανίου. Παράλληλα η ΔΕΔΑ έχει χαρτογραφήσει το δυναμικό των διαθέσιμων πρώτων υλών προς εκμετάλλευση για την παραγωγή σε 54 δήμους και τα αποτελέσματα είναι πολύ ενθαρρυντικά¹².

Ιταλία: Η Ιταλία, το 2018 έθεσε ως στόχο η παραγωγή βιομεθανίου στη χώρα να φτάσει τα 1.1 δις κυβικά μέτρα ετησίως έως το 2022. Η ποσότητα αυτή αναμένεται να απορροφηθεί αποκλειστικά από τον τομέα των μεταφορών. Επιπλέον εφαρμόζει ποσοστώσεις, σύμφωνα με τις οποίες το 2023 θα πρέπει το σύνολο των καταναλισκόμενων καυσίμων της χώρας να αποτελείται κατά 3% από προηγμένα βιοκαύσιμα (δεύτερης γενιάς) από τα οποία το 2.25% αφορά το βιομεθάνιο. Τα παραπάνω για να επιτευχθούν χρηματοδοτούνται με 4.7 δις ευρώ για την περίοδο 2018-2022. Επίσης, μιας και η ζητούμενη παραγωγή αναμένεται να επιτευχθεί σχετικά εύκολα, θα ακολουθήσει νέος μηχανισμός υποστήριξης με στόχο την αύξηση της παραγωγής στα 2.5 δις κυβικά μέτρα ετησίως και απορρόφηση από τους κλάδους της βιομηχανίας και των κτιριακών εγκαταστάσεων.

Ολλανδία: Σύμφωνα με το εθνικό κλιματικό σχέδιο της Ολλανδίας, η χώρα αποσκοπεί στην παραγωγή πράσινων αερίων συνολικής ενέργειας περίπου 19.5 TWh ετησίως, κάτι που ισοδυναμεί με το 5.4% της εγχώριας ζήτησης αερίου για το 2017. Ο παραπάνω στόχος θα υποστηριχθεί από υπερτιμήσεις για την έγχυση στο δίκτυο, οι οποίες θα εξαρτώνται από την ποσότητα του CO₂ που δεσμεύεται κατά την παραγωγική διαδικασία.

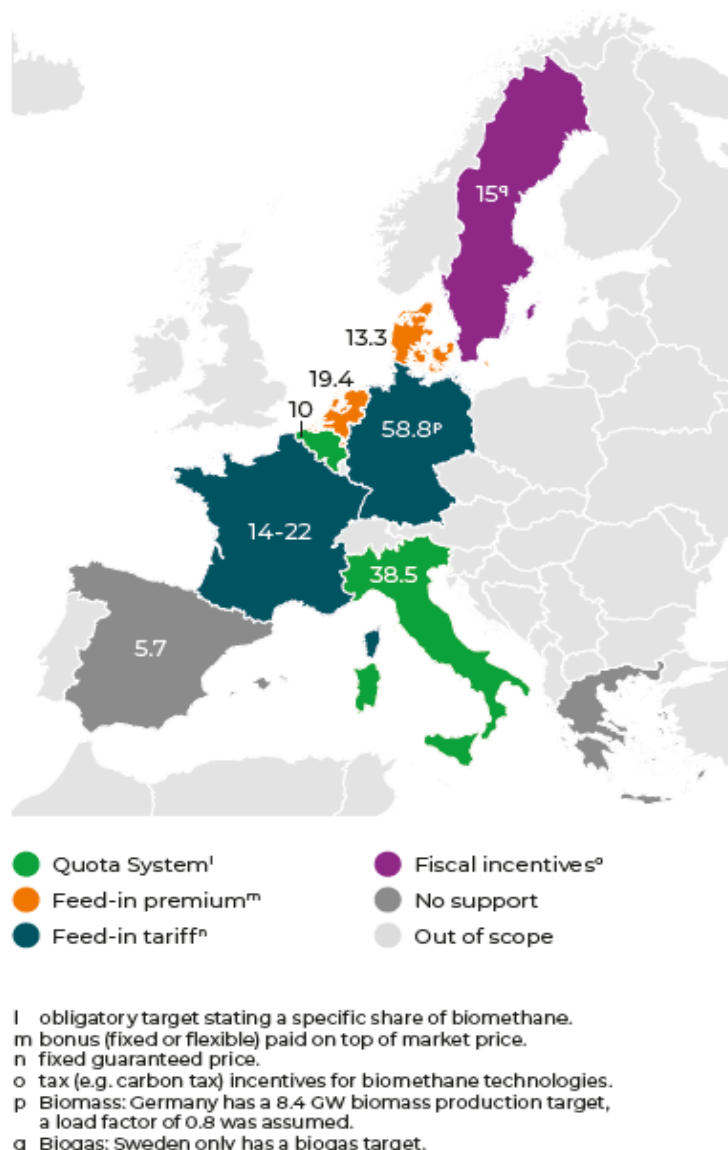
Ισπανία: Αν και δεν υπάρχει κάποιο επίσημο υποστηρικτικό μέτρο ακόμα, η χώρα στοχεύει στην ανάπτυξη της παραγωγής βιοαερίου και βιομεθανίου στο βραχυπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο διάστημα. Η παραγωγή αυτή αναμένεται να χρησιμοποιηθεί κατά κύριο λόγο από τον τομέα των μεταφορών, καθώς και ως υποκατάστατο του φυσικού αερίου στο δίκτυο διανομής

¹² Η ΔΕΔΑ «πρασινίζει» τα δίκτυα φυσικού αερίου με βιομεθάνιο και υδρογόνο, Μ. Τσάκας – https://www.imerisia.gr/opinions/30873_m-tsakas-i-deda-prasinizei-ta-diktya-fysikoy-aerioy-me-biomethanio-kai-ydrogono

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

της χώρας. Με αυτόν τον τρόπο η δυναμική του βιοαερίου πρόκειται να φτάσει τις 10.4 TWh το 2030, από τις οποίες το 55% θα αναβαθμίζεται σε βιομεθάνιο.

Σουηδία: Αν και στη χώρα δεν υπάρχει δεσμευτικό σχέδιο για την ανάπτυξη του βιομεθανίου ο οργανισμός Energigas Sweden (εθνικός οργανισμός για την ανάπτυξη των αερίων) ανέπτυξε το πλάνο National Biogas Strategy 2.0 το 2018, κατά το οποίο η ετήσια παραγωγή βιοαερίου θα φτάσει τις 15 TWh το 2030, από περίπου 3 TWh που είναι σήμερα. Από αυτές, οι 12 TWh αναμένεται να απορροφηθούν από τον τομέα των μεταφορών και 3 TWh από την βιομηχανία. Τα υποστηρικτικά μέτρα αυτή τη στιγμή σχετίζονται κυρίως με την μείωση των φόρων εκπομπής του CO₂. Ενδεικτικά, σε σύγκριση με τη βενζίνη το βιομεθάνιο έχει φοροελαφρύνσεις ίσες με 74 €/MWh. Επιπλέον για την παραγωγή βιοαερίου και βιομεθανίου από κοπριά, δίνεται επιδότηση της τάξης των 20-25 €/MWh.



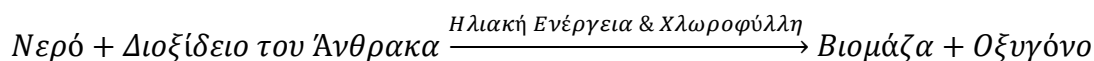
Σχήμα 23: Υπάρχοντα υποστηρικτικά μέτρα και αναμενόμενη παραγωγή βιομεθανίου σε TWh/έτος έως το 2030 [25]

Συμπερασματικά, τα μέτρα που έχουν θεσπιστεί για την ανάπτυξη της αγοράς του βιομεθανίου διαφέρουν από χώρα σε χώρα ως προς τη φύση και την ένταση τους. Όμως, είναι βέβαιο πως σε ολόκληρη την ευρωπαϊκή επικράτεια οι άμεσοι ή έμμεσοι στόχοι για τη δυναμική

της παραγωγής, δείχνουν πως έως το 2030 αυτή θα είναι πολλαπλάσια από τη σημερινή. Επιπλέον, οι πολιτικές αυτές αποσκοπούν σε έναν μεγάλο βαθμό στην απορρόφηση της παραγωγής από τον τομέα των μεταφορών, στον οποίο συγκαταλέγεται και η ναυτιλία. Λαμβάνοντας υπόψη μας λοιπόν τη διαθεσιμότητα της παραγωγής, την αναμενόμενη ζήτηση από τις διάφορες βιομηχανίες, αλλά και τους υπάρχοντες υποστηρικτικούς μηχανισμούς οι οποίοι ενδέχεται να ενταθούν στο άμεσο μέλλον, μπορούμε να θεωρήσουμε πως ως μέρος της αναπτυσσόμενης αυτής αγοράς, το bioLNG θα πρωταγωνιστήσει τα επόμενα χρόνια ως ναυτιλιακό καύσιμο, συνδυαστικά με το ορυκτό LNG.

5.3. Πρώτη ύλη – βιομάζα

Σε γενικές γραμμές η βιομάζα μπορεί να οριστεί ως η ύλη η οποία έχει οργανική προέλευση και αποτελεί το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αποβλήτων και υπολειμμάτων που προέρχονται από τη γεωργία, τη δασοκομία, τα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα. Η χημική σύσταση της βιομάζας αποτελείται κυρίως από άνθρακα, οξυγόνο, υδρογόνο, άζωτο, θείο, τέφρα (ανόργανα στοιχεία) και υγρασία. Η βιομάζα αποτελεί μια μορφή δεσμευμένης και αποθηκευμένης ηλιακής ενέργειας η οποία προκύπτει από την φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών. Κατά τη φωτοσύνθεση η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε χημική μέσω της χλωροφύλλης, η οποία χρησιμοποιεί ως συστατικά το διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα, νερό καθώς και κάποια άλλα ανόργανα συστατικά από το έδαφος. Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία της βιομάζας καθώς και έκλυση οξυγόνου στην ατμόσφαιρα. Θα μπορούσαμε να παρουσιάσουμε την διεργασία αυτή ως εξής:



Για την παραγωγή βιοαερίου/βιομεθανίου, η χρησιμοποιούμενη πρώτη ύλη αποτελείται από ένα ευρύ φάσμα τύπων βιομάζας. Οι πιο κοινές κατηγορίες πρώτης ύλης που χρησιμοποιούνται είναι ενδεικτικά οι εξής:

- Στερεή και υδαρής κοπριά.
- Γεωργικά υπολείμματα και υποπροϊόντα.
- Οργανικά απόβλητα που μπορούν να υποστούν χώνευση από τρόφιμα και αγροτικές βιομηχανίες (φυτικής και ζωικής προέλευσης).
- Το οργανικό κλάσμα των αστικών αποβλήτων και των υπολειμμάτων εστίασης (φυτικής και ζωικής προέλευσης).
- Λυματολάσπη.
- Ενεργειακές καλλιέργειες (π.χ. αραβόσιτος, μίσχανθος, σόργος, τριφύλλι).

Πιο συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Ένωση, και κατ' επέκταση και το Ελληνικό κράτος, έχουν εκδώσει σχετικές οδηγίες, κατηγοριοποιώντας εν γένη τα απόβλητα, κάποια από τα οποία δύνανται να χρησιμοποιηθούν και για τον σκοπό της παραγωγής βιοαερίου/βιομεθανίου. Στον Πίνακα 5 φαίνονται τα απόβλητα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βιολογική επεξεργασία, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων [57].

Πίνακας 6: Απόβλητα, κατάλληλα για βιολογική επεξεργασία, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων [57]

| Κωδικός αποβλήτων | Περιγραφή αποβλήτων | |
|-------------------|--|---|
| | Απόβλητα από γεωργία, κηπευτική, υδατοκαλλιέργεια, δασοκομία, θήρα | Απόβλητα από γεωργία, κηπευτική, υδατοκαλλιέργεια, δασοκομία, θήρα και αλιεία |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

| | | |
|------------------------------|---|---|
| 02 00 00¹³ | και αλιεία, προετοιμασία και επεξεργασία τροφίμων | Απόβλητα από την προπαρασκευή και επεξεργασία κρέατος, ψαριού και άλλων τροφίμων ζωικής προέλευσης |
| | | Απόβλητα από την προπαρασκευή και κατεργασία φρούτων, λαχανικών, δημητριακών, βρωσίμων ελαίων, κακάο, καφέ, τσαγιού και καπνού, παραγωγή κονσερβών, παραγωγή ζύμης και εκχυλισμάτων ζύμης, προπαρασκευή και ζύμωση μελάσσας |
| | | Απόβλητα από τη διεργασία παραγωγής ζάχαρης |
| | | Απόβλητα από τη βιομηχανία γαλακτοκομικών προϊόντων |
| | | Απόβλητα από τη βιομηχανία αρτοποιίας και ζαχαροπλαστικής |
| | | Απόβλητα από την παραγωγή αλκοολούχων και μη αλκοολούχων ποτών (εξααιρουμένων των καφέ, κακάο και τσαγιού) |
| 03 00 00 | Απόβλητα από την κατεργασία ξύλου και την παραγωγή ταμπλάδων και επίπλων, καθώς και πολτού, χαρτιού και χαρτονιού | Απόβλητα από την κατεργασία ξύλου και την παραγωγή ταμπλάδων και επίπλων |
| | | Απόβλητα από την παραγωγή και κατεργασία πολτού, χαρτιού και χαρτονιών |
| 04 00 00 | Απόβλητα από τις βιομηχανίες δέρματος, γούνας και υφαντουργίας | Απόβλητα από τη βιομηχανία δέρματος και γούνας |
| | | Απόβλητα από τη βιομηχανία υφαντουργίας |
| 15 00 00 | Απόβλητα από συσκευασίες – απορροφητικά υλικά, υφάσματα σκουπίσματος, υλικά φίλτρων και προστατευτικός ρουχισμός μη προδιαγραφόμενα αλλιώς | Συσκευασία (περιλαμβανομένων ιδιαίτερος συλλεγμένων δημοτικών αποβλήτων συσκευασίας) |
| 19 00 00 | Απόβλητα από τις μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων, εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων εκτός σημείου παραγωγής και την προετοιμασία ύδατος προοριζόμενου για κατανάλωση από τον άνθρωπο και ύδατος για βιομηχανική χρήση | Απόβλητα από την αναερόβια επεξεργασία αποβλήτων |
| | | Απόβλητα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μη προδιαγραφόμενα αλλιώς |
| | | Απόβλητα από την προπαρασκευή νερού που προορίζεται για κατανάλωση από τον άνθρωπο ή νερού για βιομηχανική χρήση |
| 20 00 00 | Δημοτικά απόβλητα (οικιακά απόβλητα και παρόμοια απόβλητα από εμπορικές δραστηριότητες, βιομηχανίες και ιδρύματα), περιλαμβανομένων μερών χωριστά συλλεγμένων | Χωριστά συλλεγμένα μέρη (εκτός από το σημείο 15 01) |
| | | Απόβλητα κήπων και πάρκων (περιλαμβάνονται απόβλητα νεκροταφείων) |
| | | Άλλα δημοτικά απόβλητα |

Στη συνέχεια θα γίνει μια αναφορά στις διάφορες πρώτες ύλες, με βάση τη σύστασή τους, έτσι ώστε να εξακριβωθεί ποιες από αυτές έχουν την δυνατότητα μεγαλύτερης απόδοσης μεθανίου [Κυβικά αερίου ανά μονάδα βάρους m³/kg]. Σε γενικές γραμμές, είναι επιθυμητό οι πρώτες ύλες να έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε σάκχαρα, άμυλο, πρωτεΐνες ή λιπίδια έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η εύκολη αποσύνθεση τους μέσω της αναερόβιας χώνευσης. Επίσης σημαντική είναι και η ύπαρξη της ξηρής ουσίας (ΞΟ), η οποία είναι αυτή που περιέχει τις πτητικές ενώσεις, οι οποίες με τη σειρά τους αποτελούν το βιοαποδομήσιμο κλάσμα της πρώτης ύλης. Σχεδόν αναγκαία καθίσταται η ύπαρξη της κοπριάς στο μίγμα, διότι περιέχει απαραίτητα συστατικά για την ανάπτυξη των αναερόβιων μικροοργανισμών, τους οποίους συγχρόνως περιέχει. Επίσης, λειτουργεί ως σταθεροποιητής κατά την αναερόβια χώνευση, δηλαδή διατηρεί το pH στα επιθυμητά επίπεδα. Αντιθέτως, εξαιτίας της χαμηλής ξηρής ουσίας που περιέχει η κοπριά (περίπου 10%), αποδίδει χαμηλή παραγωγή βιοαερίου (μεθανίου) ανά μονάδα βάρους. Έτσι, αν και είναι

¹³ Ο εξαψήφιος κωδικός αναφέρεται στην αντίστοιχη καταχώρηση στον ευρωπαϊκό κατάλογο αποβλήτων (EKA) που υιοθετήθηκε με απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

άφθονη και φθηνή, δεν είναι κερδοφόρο να αποτελέσει το μοναδικό προϊόν της χώνευσης, αλλά πρέπει να αναμειχθεί και με άλλες πρώτες ύλες, με υψηλότερη απόδοση μεθανίου. Κατά τη συνύπαρξη της κοπριάς, λοιπόν, μαζί με άλλα οργανικά απόβλητα, επιτυγχάνεται σταθερή αναερόβια χώνευση, τόσο λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης ενεργής βιομάζας μέσα στον Χωνευτή, όσο και λόγω της ύπαρξης ανόργανης ύλης, (όπως άργιλος και σίδηρος) που κάνει το μίγμα ανθεκτικότερο σε ανασταλτικά στοιχεία όπως η αμμωνία και τα σουλφίδια. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα φυτικά υπολείμματα που χρησιμοποιούνται για την αναερόβια χώνευση χρειάζονται προ-επεξεργασία πριν τροφοδοτηθούν στη δεξαμενή. Είτε μηχανικά για τη μείωση του μεγέθους τους, είτε με πιο πολύπλοκες διαδικασίες για την διάσπαση των λιγνοκυτταρινούχων μορίων, για να είναι προσβάσιμα στους αναερόβιους μικροοργανισμούς. Τα απόβλητα των βιομηχανιών που επεξεργάζονται γεωργοκτηνοτροφικές πρώτες ύλες έχουν πολύ μεγαλύτερη απόδοση μεθανίου από την κοπριά και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται ως βελτιωτικά του μίγματος προς ΑΧ αυξάνοντας και τις οικονομικές αποδόσεις της εκάστοτε μονάδας. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός πίνακας που περιέχει τα χαρακτηριστικά των διαφόρων πρώτων υλών που αναφέρθηκαν παραπάνω (Πίνακας 7).

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά πρώτων υλών, κατάλληλων για βιολογική επεξεργασία, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κατάλογο Αποβλήτων (ΕΚΑ 2007)

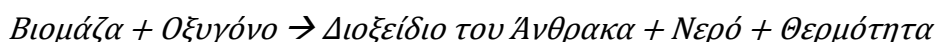
| Τύπος πρώτης ύλης | Οργανικό περιεχόμενο | Αναλογία C:N | ΞΟ % | VS % της ΞΟ | Παραγωγή βιοαερίου [m ³ kg ⁻¹ VS] | Ανεπιθύμητες φυσικές ακαθαρσίες | Άλλα ανεπιθύμητα υλικά |
|-------------------------------|----------------------------------|--------------|-------|-------------|---|--|--|
| Υδαρής κοπριά χοίρων | Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια | 3-10 | 3-8 | 70-80 | 0.25-0.5 | Ξύσματα ξύλου, σκληρές τρίχες, νερό, άμμος, σχοινιά, άχυρο | Αντιβιοτικά, απολυμαντικά |
| Υδαρής κοπριά βοοειδών | Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια | 6-20 | 5-12 | 80 | 0.2-0.3 | Σκληρές τρίχες, χώμα, νερό, άχυρα, ξύλα | Αντιβιοτικά, απολυμαντικά, NH ⁺ |
| Υδαρής κοπριά πουλερικών | Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια | 3-10 | 10-30 | 80 | 0.35-0.6 | Αμμοχάλικο, άμμος, φτερά | Αντιβιοτικά, απολυμαντικά, NH ⁺ |
| Περιεχόμενα στομαχιών εντέρων | Υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, λιπίδια | 3-5 | 15 | 80 | 0.4-0.68 | Ζωικοί ιστοί | Αντιβιοτικά, απολυμαντικά |
| Τυρόγαλο | 75-80% λακτόζη, 20-25% πρωτεΐνες | n/a | 8-12 | 90 | 0.35-0.8 | Ακαθαρσίες μεταφοράς | |
| Συμπυκνωμένος ορός γάλακτος | 75-80% λακτόζη, 20-25% πρωτεΐνες | n/a | 20-25 | 90 | 0.8-0.95 | Ακαθαρσίες μεταφοράς | |
| Ιλύς επίπλευσης | 65-70% πρωτεΐνες, 30-35% λιπίδια | | | | | Ζωικοί ιστοί | Βαριά μέταλλα, απολυμαντικά, οργανικοί ρύποι |
| Αποπλύματα ζύμωσης | Υδατάνθρακες | 4-10 | 1-5 | 80-95 | 0.35-0.78 | Μη διασπώμενα υπολείμματα φρούτων | |
| Άχυρο | Υδατάνθρακες, λιπίδια | 80-100 | 70-90 | 80-90 | 0.15-0.35 | Άμμος, αμμοχάλικο | |
| Απόβλητα από κήπους | | 100-150 | 60-70 | 90 | 0.2-0.5 | Χώμα, κυτταρινούχα, συστατικά | Φυτοφάρμακα |
| Χλόη | | 12-25 | 20-25 | 90 | 0.55 | Αμμοχάλικο | Φυτοφάρμακα |
| Σωρός χλόης | | 10-25 | 15-25 | 90 | 0.56 | Αμμοχάλικο | |
| Απόβλητα από φρούτα | | 35 | 15-20 | 75 | 0.25-0.5 | | |
| Ιχθυέλαια | 30-35% λιπίδια | n/a | | | | | |
| Έλαια σόγιας/ μαργαρίνη | 90% φυτικά έλαια | n/a | | | | | |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

| | | | | | | | |
|---------------------------|------------|-----|----|----|---------|--|--------------------------------|
| Αλκοόλ | 40% αλκοόλ | n/a | | | | | |
| Υπολείμματα τροφίμων | | | 10 | 80 | 0.5-0.6 | Κόκκαλα, πλαστικό | Απολυμαντικά |
| Οργανικά οικιακά απόβλητα | | | | | | Πλαστικό, μέταλλο, πέτρες, ξύλο, γυαλί | Βαρέα μέταλλα, οργανικοί ρύποι |
| Λυματολόαση | | | | | | | Βαρέα μέταλλα, οργανικοί ρύποι |

Αφού σχηματιστεί, η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια ανεξάντλητη, φιλική προς το περιβάλλον, μορφή ενέργειας, η οποία συμβάλλει στην καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, ενώ αυξάνει και την ενεργειακή επάρκεια και αυτονομία του κάθε κράτους, αφού προέρχεται από τοπικά απόβλητα-υπολείμματα. Αναλόγως με το είδος και την κατηγορία της βιομάζας (π.χ. αν είναι ή όχι ξυλώδης), ενδείκνυται διαφορετικός τρόπος επεξεργασίας της για την παραγωγή ενέργειας. Οι κύριοι τρόποι παραγωγής ενέργειας μέσω βιομάζας είναι οι παρακάτω:

- **Καύση:** Η απευθείας καύση της βιομάζας αποτελεί τον πιο απλό και κοινό τρόπο παραγωγής ενέργειας από αυτή. Με μια απλοϊκή περιγραφή θα μπορούσαμε να περιγράψουμε την εξώθερμη αυτή διαδικασία ως εξής:



Κατά την πιο απλή μορφή της, μια μονάδα καύσης βιομάζας παραλαμβάνει τη βιομάζα, την καίει σε έναν κλίβανο παράγοντας ατμό, ο οποίος με τη σειρά του διοχετεύεται σε έναν ατμοστρόβιλο και έναν συμπυκνωτή (Κύκλος Rankine). Ο ατμοστρόβιλος βρίσκεται σε σύζευξη με τον άξονα μιας γεννήτριας και έτσι επιτυγχάνεται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε γενικές γραμμές τα συστήματα αυτά έχουν χαμηλούς βαθμούς απόδοσης, της τάξης του 15% – 35%, ανάλογα με το μέγεθος τους [26].

- **Πυρόλυση:** Η πυρόλυση αποτελεί διαδικασία θερμικής διάσπασης των οργανικών υλικών, απουσία οξυγόνου και σε θερμοκρασία 400 °C – 600 °C. Τα προϊόντα της είναι στερεό εξανθράκωμα, μη συμπυκνώσιμα αέρια και συμπυκνώσιμοι ατμοί. Οι τελευταίοι σχηματίζουν το υγρό προϊόν της πυρόλυσης το έλαιο πυρόλυσης ή βιοέλαιο το οποίο μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα σε διάφορες εφαρμογές όπως καυστήρες, φούρνους, MEK και αεριοστρόβιλους για την παραγωγή ενέργειας, ενώ χρησιμοποιείται και σε μίξη με το πετρέλαιο και τη βενζίνη για την παραγωγή βελτιωμένων καυσίμων. Επίσης χρησιμοποιείται και στη χημική βιομηχανία για την παραγωγή ρητινών και άλλων ουσιών. Ένα πλεονέκτημα της πυρόλυσης είναι ότι μέσω αυτής, κάθε μορφή βιομάζας μπορεί να μετατραπεί σε καθαρό και ομοιογενές καύσιμο [27].
- **Αεριοποίηση:** Η αεριοποίηση αποτελεί μια ενδόθερμη διεργασία παραγωγής συνθετικού αερίου από οργανικά υλικά ή και ορυκτά καύσιμα με βάση τον άνθρακα, σε περιβάλλον με χαμηλή περιεκτικότητα οξυγόνου. Είναι το αποτέλεσμα της μερικής οξειδωσης στερεής καύσιμης ύλης, σε κάποιο οξειδωτικό μέσο όπως ο αέρας ή ο ατμός. Το παραγόμενο αέριο αποτελείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα(CO), υδρογόνο(H₂), μεθάνιο(CH₄), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), καθώς και από άλλες ενώσεις υδρογονανθράκων [28]. Η κύρια εφαρμογή του αερίου είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, ενώ αποτελεί και ενδιάμεσο πόρο για την παραγωγή υδρογόνου, αμμωνίας, μεθανόλης και

άλλων συνθετικών καυσίμων. Αποτελεί κύρια εναλλακτική μέθοδο παραγωγής ενέργειας αντί της καύσης και βασικό της πλεονέκτημα είναι πως μπορεί να πετύχει αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, της τάξης του 40% και άνω. Από την άλλη, χαρακτηρίζεται από θερμογόνο δύναμη περίπου ίση με το ένα δεύτερο αυτής του φυσικού αερίου [26].

- **Αναερόβια Χώνευση:** Η Αναερόβια Χώνευση (ΑΧ) αποτελεί μια βιοχημική διεργασία, κατά την οποία γίνεται αποσύνθεση των οργανικών στοιχείων κάποιας πρώτης ύλης, απουσία οξυγόνου. Υπεύθυνοι για την αποσύνθεση αυτή είναι οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί οι οποίοι τρέφονται με οργανική ύλη, διασπώντας την σε απλούστερα στοιχεία με ταυτόχρονη έκλυση μεθανίου, διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και κάποιων άλλων στοιχείων. Η ΑΧ γίνεται αυθόρμητα στο περιβάλλον, όπως σε ιζήματα θαλάσσιου ύδατος, στο στομάχι των φυτοφάγων ζώων ή και στα έλη τύρφης [32]. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται επίσης ελεγχόμενα και σε ειδικές εγκαταστάσεις για την παραγωγή του βιοαερίου, ενός αερίου που αποτελείται κατά βάση από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα σε ποσοστά 50-70% και 50-30% αντίστοιχα, καθώς και από άλλα στοιχεία όπως οξυγόνο, άζωτο και υδρόθειο (<2%).

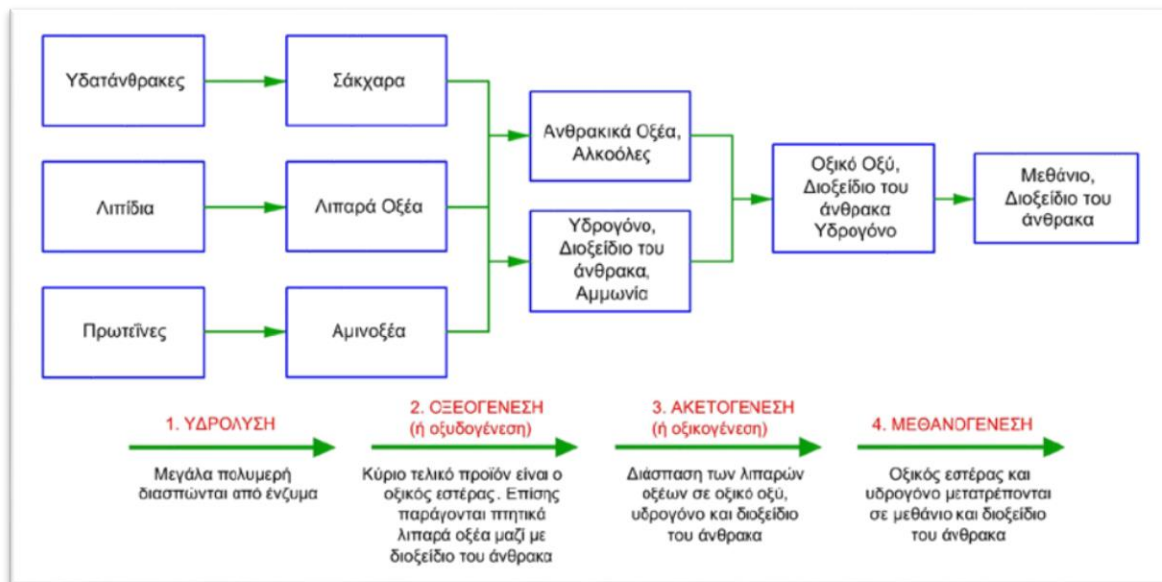
5.4. Αναερόβια χώνευση

Πιο συγκεκριμένα, η αναερόβια χώνευση είναι η μικροβιολογική διαδικασία αποσύνθεσης της οργανικής ύλης, απουσία οξυγόνου και τα βασικά της προϊόντα είναι το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα. Το μεν βιοαέριο είναι ένα αέριο καύσιμο που αποτελείται κατά κύριο λόγο από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, το δε χωνεμένο υπόλειμμα είναι το αποσυντεθειμένο υπόστρωμα που προκύπτει από την παραγωγή του βιοαερίου. Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται πολύ λίγη θερμότητα, με την πρώτη ύλη να διασπάται συνεχώς σε μικρότερα στοιχεία. Επιπλέον, σε κάθε στάδιο υπάρχει εμπλοκή διαφορετικών κάθε φορά μικροοργανισμών, οι οποίοι αποσυνθέτουν τα προϊόντα των προηγούμενων σταδίων [32]. Αυτοί, κατά κύριο λόγο αποτελούνται από βακτήρια, αλλά και από κάποια είδη πρωτόζωων και άλλων αναερόβιων μυκήτων [30]. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί πως η αναερόβια χώνευση πραγματοποιείται και σε πολλά φυσικά περιβάλλοντα όπως τα ιζήματα θαλάσσιου ύδατος, το στομάχι των φυτοφάγων ζώων, σε έλη, κ.α. [58]. Ακολουθώς, στο Σχήμα 24, φαίνονται τα 4 βασικά στάδια της αναερόβιας χώνευσης, η υδρόλυση, η οξεογένεση, η οξικογένεση και η μεθανογένεση, τα οποία αναλύονται και παρακάτω.

- **Υδρόλυση:** Αν και οι παραπάνω διεργασίες λαμβάνουν χώρα παράλληλα στο χώρο και στο χρόνο μέσα στην δεξαμενή χώνευσης, η υδρόλυση αποτελεί το πρώτο βήμα της ΑΧ, κατά την οποία η σύνθετη οργανική ύλη(πολυμερή) αποσυντίθεται σε μικρότερα στοιχεία. Στο στάδιο αυτό έχουμε μικρή παραγωγή βιοαερίου.
- **Οξεογένεση:** Σε αυτό το στάδιο αποσυντίθενται περαιτέρω τα προϊόντα της υδρόλυσης από οξεογενή βακτήρια και μετατρέπονται σε οξικό άλας, διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (70%), όπως επίσης και σε πτητικά λιπαρά οξέα(VFA) και αλκοόλες(30%).
- **Οξικογένεση:** Κατά το στάδιο αυτό, τα προϊόντα της οξεογένεσης που δεν μπορούν να μετατραπούν άμεσα σε μεθάνιο από τα μεθανογενή βακτήρια, μετατρέπονται σε μεθανογενή υποστρώματα. Έτσι, τα πτητικά λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες οξειδώνονται σε μεθανογενή υποστρώματα όπως οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Ως υπόλειμμα του σταδίου αυτού μπορεί να θεωρηθεί το υδρογόνο.
- **Μεθανογένεση:** Το στάδιο αυτό είναι το κρισιμότερο της διαδικασίας, δεδομένου ότι είναι η πιο αργή βιοχημική αντίδραση της διεργασίας και επηρεάζεται σοβαρά από τις συνθήκες

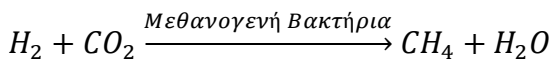
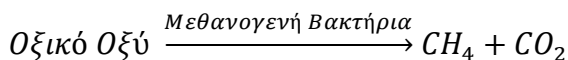
Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

λειτουργίας. Επιπλέον, στο στάδιο αυτό τα μεθανογενή βακτήρια καταναλώνουν τα οξικά άλατα και απελευθερώνουν μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Το παραγόμενο μεθάνιο προέρχεται κατά κύριο λόγο από τα οξικά άλατα (70%) και το υπόλοιπο από την μετατροπή του υδρογόνου και του διοξειδίου του άνθρακα (30%).



Σχήμα 24: Στάδια Αναερόβιας Χώνευσης [58]

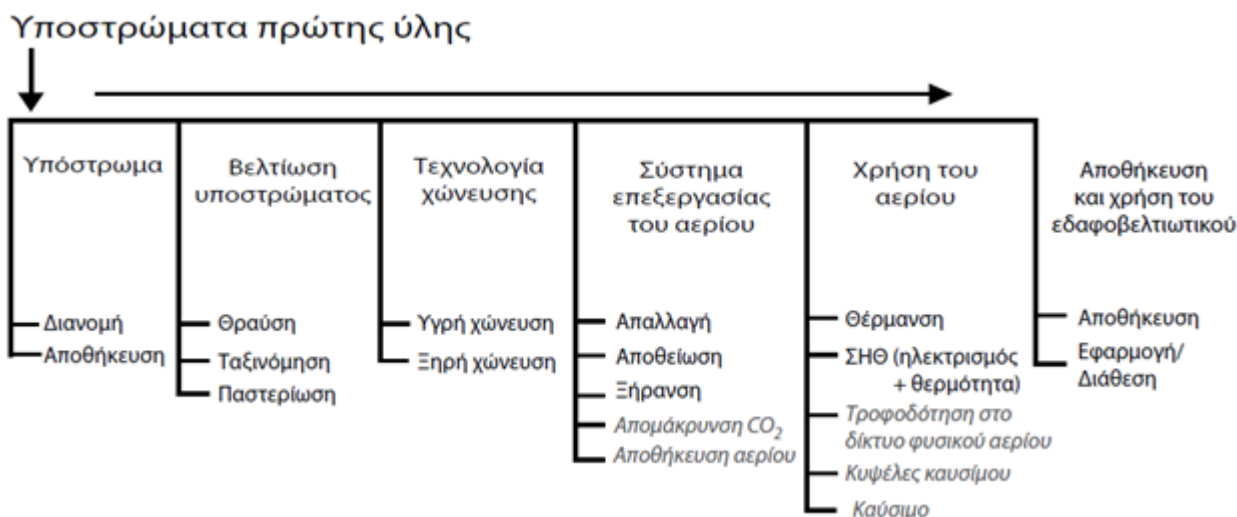
Η αναερόβια χώνευση περιγράφεται και από τις ακόλουθες διεργασίες:



Όπως φαίνεται κι από τις παραπάνω διεργασίες, η αναερόβια χώνευση είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία και η αποδοτικότητα της εξαρτάται από διάφορους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την δράση των αναερόβιων μικροοργανισμών. Μερικοί από αυτούς είναι η αναλογία των πρώτων υλών, η θερμοκρασία και το pH του μίγματος, η συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών όπως τα πτητικά λιπαρά οξέα, καθώς και η παρουσία ανασταλτικών παραγόντων, όπως η αμμωνία. Η περαιτέρω ανάλυση των παραγόντων αυτών αφορά τη διαδικασία μελέτης και κατασκευής μονάδων παραγωγής βιοαερίου και ξεφεύγει από τα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

5.5. Διαδικασία παραγωγής (bioLNG)

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται τα στάδια παραγωγής του βιοαερίου, με παράλληλη χρήση του παραδείγματος μιας μονάδας η οποία χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη αγροτικά υπολείμματα και κοπριά. Ο τύπος της μονάδας αυτής επιλέγεται καθώς και στις περιπτώσεις όπου διαφέρει η πρώτη ύλη (π.χ. λύματα, βιομηχανικά απόβλητα) οι βασικές αρχές της παραγωγικής διαδικασίας παραμένουν οι ίδιες. Στο Σχήμα 25 φαίνονται τα κύρια στάδια για την παραγωγή του βιοαερίου.



Σχήμα 25: Στάδια παραγωγής βιοαερίου

Πίνακας 8: Τυπική σύσταση βιοαερίου μετά τον Χωνευτή

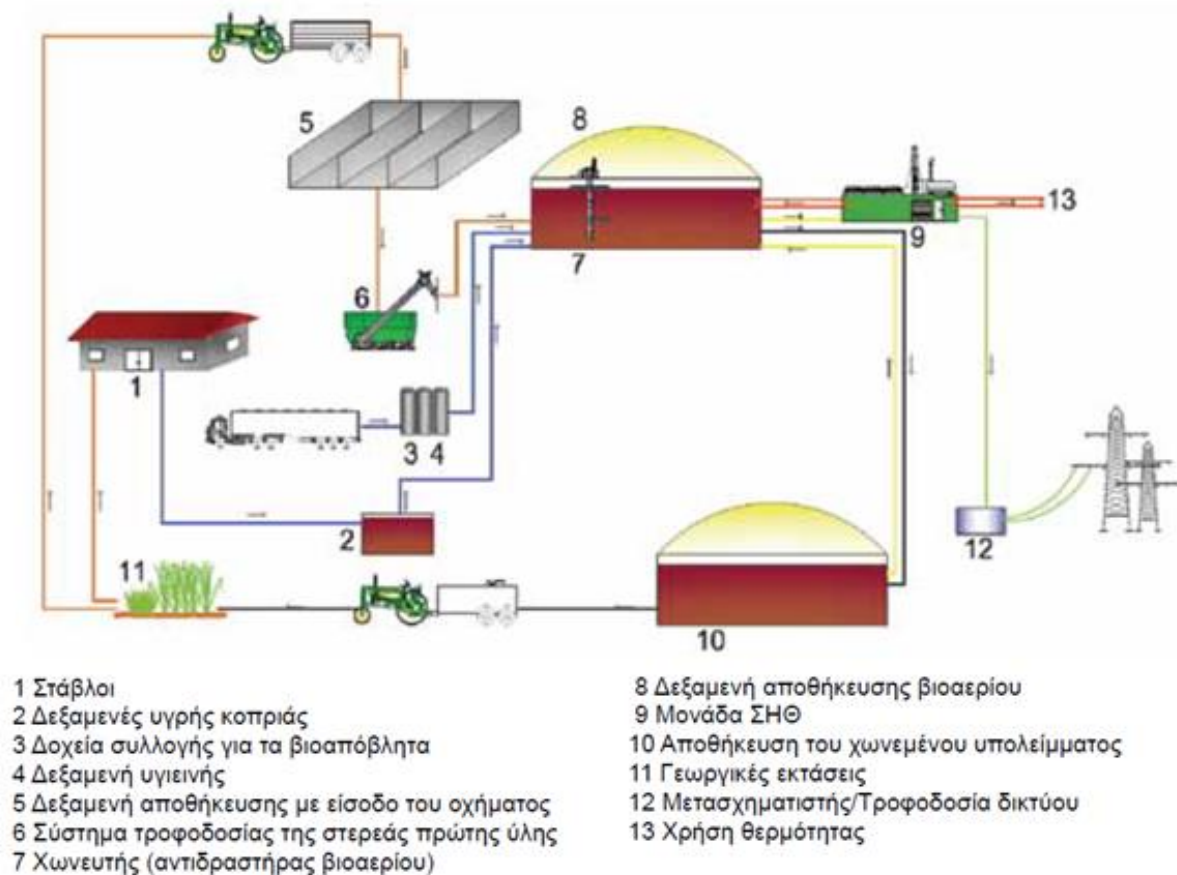
| Στοιχείο | Περιεκτικότητα | Μονάδα Μέτρησης |
|------------------------------|----------------|-------------------|
| Μεθάνιο | 50 – 80 | mol (%) |
| Διοξείδιο του άνθρακα | 15 – 50 | mol (%) |
| Άζωτο | 0 – 5 | mol (%) |
| Οξυγόνο | 0 – 1 | mol (%) |
| Υδρόθειο | 100 – 10000 | mg/m ³ |
| Αμμωνία | 0 – 100 | mg/m ³ |
| Χλώριο | 0 – 100 | mg/m ³ |
| Φθόριο | 0 – 100 | mg/m ³ |

Στο πρώτο στάδιο της διεργασίας εντάσσεται η μεταφορά, η παράδοση, η αποθήκευση και η προεπεξεργασία του υποστρώματος, η πρώτη ύλη δηλαδή, για την οποία γίνεται εκτενής αναφορά στην ενότητα 5.3. Σε ό,τι αφορά το κομμάτι της παράδοσης, είναι αναγκαίος ο συνεχής εφοδιασμός της μονάδας με υπόστρωμα για την εξασφάλιση κατά συνέπεια και της συνεχούς παραγωγής βιοαερίου. Για το σκοπό αυτό στις περισσότερες μονάδες γίνεται αποθήκευση του υποστρώματος σε κατάλληλους χώρους και δεξαμενές, προκειμένου να μην έχει επιπτώσεις στην παραγωγή η όποια καθυστέρηση στην παράδοση. Συγχρόνως συντελεί και στην ευκολότερη ανάμειξη των πρώτων υλών και άρα και στη βελτίωση του πριν την είσοδο στον χωνευτή. Η βελτίωση του υποστρώματος, η οποία αποτελεί την αρχική του επεξεργασία, αποσκοπεί τόσο στην εξασφάλιση της συνεχούς ροής στο χωνευτή όσο και στην βελτιστοποίηση της αναερόβιας χώνευσης και άρα την αποδοτικότερη παραγωγή βιοαερίου ανά μονάδα βάρους του χωνεμένου υπολείμματος [32].

Το δεύτερο στάδιο αποτελεί και το κυριότερο της διεργασίας, αφού μέσα στον Χωνευτή πραγματοποιείται η παραγωγή του βιοαερίου, με τη διεργασία της αναερόβιας χώνευσης που περιγράφηκε παραπάνω στην ενότητα 5.4. Μια τυπική σύσταση του βιοαερίου μετά τον Χωνευτή φαίνεται στον Πίνακας 8.

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Στο τρίτο στάδιο εντάσσεται η αποθήκευση και επεξεργασία του χωνεμένου υπολείμματος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό πολύ καλής ποιότητας, ενώ συμβάλλει και στην μείωση της χρήσης και των συνθετικών λιπασμάτων.



Σχήμα 26: Τα βασικά μέρη μίας αγροτικής μονάδας παραγωγής βιοαερίου [32]

Στο τέταρτο στάδιο, γίνεται ο καθαρισμός και η χρήση του βιοαερίου. Οι βασικές ακαθαρσίες που συναντώνται στο βιοαέριο είναι το υδρόθειο, η αμμωνία, το οξυγόνο και το άζωτο και η περιεκτικότητά τους εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο υπόστρωμα και την μέθοδο και αποτελεσματικότητα της διαδικασίας παραγωγής [31]. Αναλόγως με την τελική του χρήση, αλλάζουν και οι απαιτήσεις σε καθαρότητα, αλλά και οι προδιαγραφές ως προς τη σύσταση του. Σε κάθε περίπτωση γίνεται αποθείωση, αφού το θείο μετατρέπεται σε υδρόθειο, το οποίο προκαλεί προβλήματα διάβρωσης στις σωληνώσεις και τις δεξαμενές, ή και στις μηχανές εσωτερικής καύσης των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, όταν η τελική χρήση αποσκοπεί στην καύση του αερίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για του ίδιους λόγους, πραγματοποιείται ξήρανση του βιοαερίου, αφαιρώντας μεγάλο μέρος της ποσότητας νερού (υδρατμοί αρχικά) που περιέχεται σε αυτό. Ένα άλλο πρόβλημα που δημιουργεί η ύπαρξη του νερού είναι η υποβάθμιση της ενεργειακής ποιότητας του αερίου, αφού μειώνει την θερμογόνο δύναμη του. Οι τεχνολογίες και οι τεχνικές αποθείωσης και ξήρανσης ποικίλουν και η κατάλληλη επιλογή εξαρτάται τόσο από την πρώτη ύλη, όσο και από την τελική χρήση του αερίου, το μέγεθος της μονάδας κ.α. Η περαιτέρω ανάλυση του ζητήματος αυτού, αφορά την σχεδίαση μονάδων παραγωγής βιοαερίου και ξεφεύγει από τα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται διαγραμματικά τα δομικά μέρη μιας αγροτικής μονάδας παραγωγής βιοαερίου. (Σχήμα 2)

Προκειμένου να αυξηθεί η ποιότητα του αερίου ώστε να χρησιμοποιηθεί είτε για έκχυση στο δίκτυο του φυσικού αερίου, είτε ως καύσιμο των μεταφορών, απαιτείται η αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα και των λοιπών ακαθαρσιών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επίσης, για τη μετατροπή του σε καύσιμο για τον τομέα των μεταφορών και πιο συγκεκριμένα για την μετατροπή του σε ανάλογο καύσιμο με το LNG (BioLNG) είναι επίσης αναγκαία και η υγροποίηση/ψύξη του.

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες τόσο για την αναβάθμιση, όσο και για την υγροποίηση είναι πολλές και επιδεικνύουν διαφορές τόσο στην αρχή λειτουργία τους, όσο και στην αποδοτικότητα, το κόστος, την κατανάλωση, τις διαρροές μεθανίου, κ.α. Η επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών και του συνδυασμού τους, είναι αντικείμενο της σχεδίασης της εκάστοτε μονάδας. Για την περίπτωση του BioLNG, ενδιαφέρον παρουσιάζει η κρυογενική μέθοδος, κατά την οποία γίνεται ταυτόχρονα η αναβάθμιση και η υγροποίηση του βιοαερίου, με αποτέλεσμα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους, η μετάβαση από το βιοαέριο στο υγροποιημένο βιομεθάνιο να γίνεται σε ένα και όχι σε δύο στάδια. Το βιοαέριο, διαχωρίζεται από το διοξείδιο του άνθρακα μέσω της ψύξης του σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ ταυτόχρονα απομονώνονται και οι υπόλοιπες ακαθαρσίες (νερό, υδρόθειο κλπ.) [33]. Επίσης ένα επιπλέον όφελος που υπάρχει με τη χρήση κρυογενικών τεχνολογιών είναι η απευθείας υγροποίηση του CO₂, το οποίο είναι άμεσα διαθέσιμο προς μεταφορά και διάθεση/πώληση [34].

6. Προσεγγίσεις κύκλου ζωής

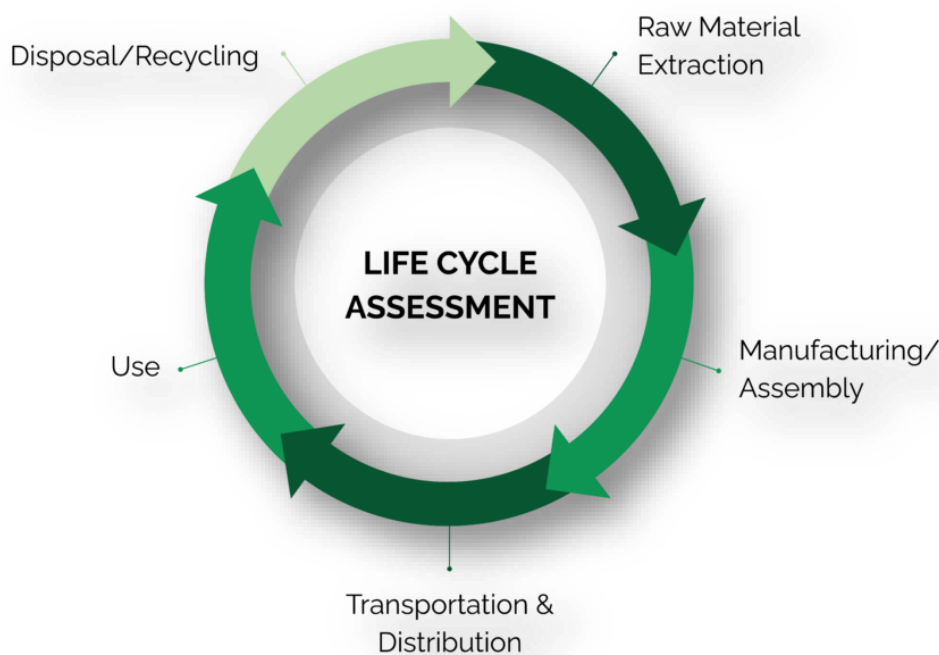
Ο σχεδιασμός προϊόντων αποτελεί διαχρονικά μία πρόκληση για τη βιομηχανία, καθώς επιχειρείται σε όλα τα επίπεδα ο περιορισμός του κόστους, αλλά και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Σε αυτή την πρόκληση δεν αρκεί, φυσικά, ο συνυπολογισμός των παραμέτρων για την ανάπτυξη του τελικού προϊόντος, αλλά είναι απαραίτητη μία ολιστική προσέγγιση που αγγίζει όλα τα στάδια ζωής του, από το σχεδιασμό και την ανάπτυξη, μέχρι την διάλυση και την ανακύκλωση του. Άλλωστε, όπως κάθε ζωντανός οργανισμός, έτσι και τα προϊόντα έχουν έναν κύκλο ζωής. Αυτή ακριβώς την προσέγγιση καλύπτουν και οι μεθοδολογίες κύκλου ζωής [59]. Τα στάδια του κύκλου ζωής συνήθως είναι έξι, αλλά κάθε προσέγγιση διαφέρει ανάλογα με το προϊόν και τη βιομηχανία στην οποία αυτό απευθύνεται. Ενδεικτικά, λοιπόν, συναντώνται τα εξής:

- i. Σχεδιασμός προϊόντος
- ii. Προμήθεια πρώτων υλών
- iii. Κατασκευή προϊόντος
- iv. Μεταφορά και διανομή
- v. Χρήση και συντήρηση
- vi. Διάλυση, ανακύκλωση ή και επανάχρηση

Στο Σχήμα 27 αποτυπώνονται τα παραπάνω βασικά στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, όπου δεν εμπεριέχεται το πρώτο στάδιο, το οποίο συνήθως εννοείται στη διαδικασία και συνεπώς παραλείπεται. Η κυκλική έννοια παραπέμπει φυσικά στην ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση μερών ενός συστήματος/προϊόντος ως πρώτη ύλη για την ανάπτυξη και κατασκευή νέων. Σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, το προϊόν αλληλοεπιδρά με άλλα συστήματα, όπως η ενέργεια που καταναλώνεται ή εκλύεται, η εργασία για την παραγωγή, η διαθέσιμη τεχνολογία, τα χρηματοδοτικά εργαλεία, το φυσικό περιβάλλον, αλλά και η ίδια η κοινωνία. Συνήθως ξεχωρίζουν το περιβάλλον, η οικονομία και η κοινωνία, καθώς πρέπει να υπάρχει ισορροπία μεταξύ αυτών [59]. Για παράδειγμα, δύναται κάποια τεχνολογική καινοτομία να μπορεί να μειώσει τους εκλυόμενους ρύπους, το οποίο φαινομενικά θα επιφέρει και κοινωνική ανάταση, αλλά μπορεί το κόστος αυτής να είναι τεράστιο, με αποτέλεσμα να μην προχωρήσει η ανάπτυξη της. Σε μία κυκλική οικονομία, όλες οι αποφάσεις θα πρέπει να λαμβάνονται με γνώμονα την ανάλυση των συνεπειών στο σύνολο του κύκλου ζωής, και όχι μόνο για παράδειγμα στην κατασκευή, εν αντιθέσει με όσα μπορεί να συνέβαιναν μερικές δεκαετίες πριν, όπου η εξέταση των συνεπειών σε όλο τον κύκλο ζωής ήταν περιορισμένη στις περιπτώσεις μεγάλου ρίσκου (πχ. πυρηνικά εργοστάσια).

Σήμερα, το σκεπτικό (life-cycle thinking) και συνεπώς οι προσεγγίσεις κύκλου ζωής έχουν γίνει αρκετά δημοφιλείς κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης ανησυχίας της κοινωνίας αναφορικά με τις μακροπρόθεσμες επιδράσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας [43]. Επιπλέον, η δημοφιλία τους στηρίζεται και στο γεγονός πως μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Αποτελούν εργαλεία, προγράμματα και διαδικασίες για ακριβώς αυτό το σκοπό, να βοηθήσουν δηλαδή, στην λήψη αποφάσεων με γνώμονα όλο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος [59]. Ενδεικτικά, μία επιχείρηση σχεδιάζει ένα νέο προϊόν διαλέγοντας μεταξύ πολλών εναλλακτικών κατά τη σχεδίαση βάσει της ανάλυσης που έχει προηγηθεί για τις συνέπειες στο περιβάλλον, για τα έξοδα και τα έσοδα της επιχείρησης, για τα πλεονεκτήματα στην τοπική κοινωνία, για τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και ασφάλεια, για τα δικαιώματα των εργαζομένων, και πολλά ακόμα. Έτσι, ένα από τα

σημαντικότερα πλεονεκτήματα τους είναι πως με βάση τις προσεγγίσεις κύκλου ζωής καθίσταται δυνατή η βελτιστοποίηση κατά τη σχεδίαση του προϊόντος ώστε να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη που προσφέρει το συγκεκριμένο προϊόν. Επιπλέον, με αυτή την ολιστική προσέγγιση, αποφεύγεται κατά το δυνατόν η μετακύλιση ενός προβλήματος από τα πρώτα στάδια του κύκλου ζωής στα επόμενα. Οι ευκαιρίες, λοιπόν, που δίνονται μέσω των προσεγγίσεων κύκλου ζωής, καθώς και η προοπτική τους, μπορεί να βοηθούν αποτελεσματικά κάποια επιχείρηση που θα επιλέξει να τις χρησιμοποιήσει, αλλά κατά βάση συνεισφέρουν σε κοινωνικό επίπεδο, αφού περιορίζονται οι συνέπειες στο εξωγενές περιβάλλον του κύκλου ζωής ενός προϊόντος.



Σχήμα 27: Βασικά στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος

Παρά το γεγονός πως οι προσεγγίσεις κύκλου ζωής αφορούν και τον επιχειρηματικό κόσμο, δεν σημαίνει απαραίτητα πως οι παραπάνω λόγοι υιοθέτησης τους οδηγούν τις επιχειρήσεις στο να τις χρησιμοποιήσουν. Έτσι, λοιπόν, σε ορισμένες βιομηχανίες και ορισμένα προϊόντα/συστήματα, η χρήση κάποιας ανάλυσης του κύκλου ζωής μπορεί ή και πρέπει να προβλέπεται από το νόμο, όπως η διαχείριση των απορριμμάτων ή το κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τη συσκευασία προϊόντων [59]. Άλλωστε, η εφαρμογή τους μπορεί να καταλήξει σε βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος, όπου με τους ίδιους πόρους εξασφαλίζεται καλύτερο αποτέλεσμα, με θετική επίδραση σε οικονομικό επίπεδο για την εκάστοτε επιχείρηση. Παράλληλα, μία τέτοια εξέλιξη μπορεί να βοηθήσει κατά πολύ και το προφίλ της εταιρίας, όπως πχ. λόγω της συνεισφοράς της στην επίτευξη στόχων βιωσιμότητας για την κοινότητα.

Οι προσεγγίσεις κύκλου ζωής, όντας εργαλεία που υποστηρίζουν την λήψη αποφάσεων, αποτελούνται κατά βάση από δύο υποκατηγορίες: τις αναλυτικές προσεγγίσεις και τις πρακτικές προσεγγίσεις. Οι πρώτες αξιοποιούνται για να αξιολογηθεί η επίδραση των αποφάσεων που παίρνονται, ενώ οι δεύτερες μεταφέρουν τη θεωρία στην πράξη, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των πρώτων. Ως αναλυτικές μέθοδοι λαμβάνονται υπόψη η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής – Life-Cycle Assessment (LCA), που αφορά στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών συνεπειών, και η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής – Life-Cycle Cost Analysis ή Life-Cycle Costing, όπου

επικεντρώνεται στο κόστος καθ' όλο τον κύκλο ζωής του εκάστοτε συστήματος. Στις πρακτικές εφαρμογές συμπεριλαμβάνονται κανονιστικά πλαίσια, επιχειρηματικά προγράμματα, κ.α.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, αναλύονται τόσο η μεθοδολογίες της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής – Life-cycle Assessment (LCA) και η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής, αλλά δίνονται επίσης συγκεκριμένα παραδείγματα από τη ναυτιλία, λαμβάνοντας υπόψη της διαφορετικές προσεγγίσεις που μπορεί να υπάρχουν ανά τύπο προϊόντων/συστημάτων. Η εισαγωγή σε αυτές τις μεθόδους θα διευκολύνει και την μετέπειτα εφαρμογή τους στο πλαίσιο της μελέτης περίπτωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

6.1. Αξιολόγηση κύκλου ζωής – Life-cycle Assessment (LCA)

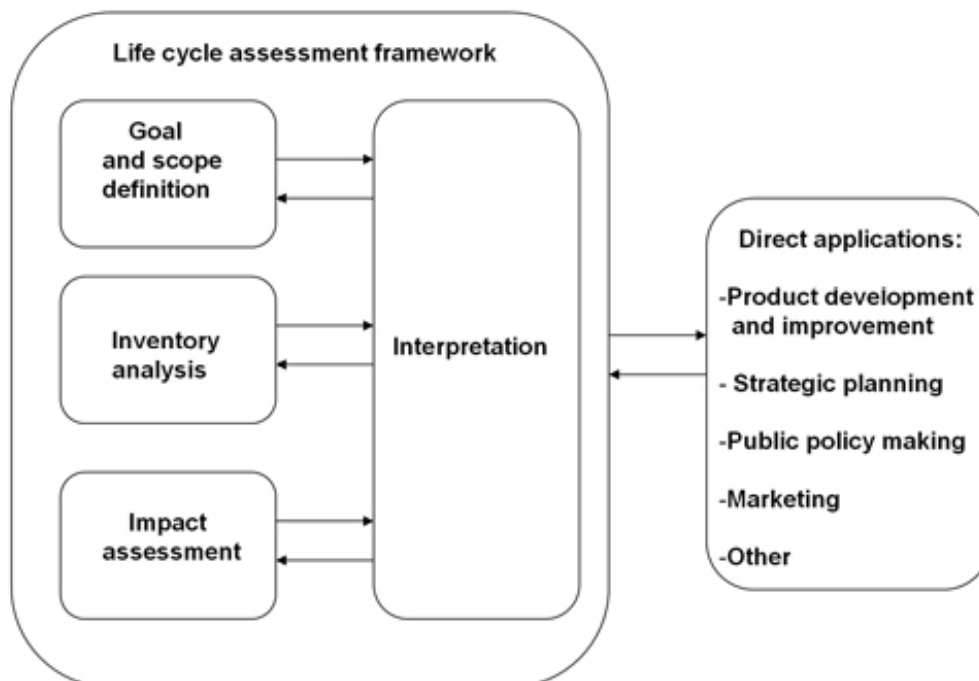
Σήμερα, είναι πραγματικότητα η ολοένα και αυξανόμενη ανησυχία γύρω από την προστασία του περιβάλλοντος, και άρα της καταπολέμησης της Κλιματικής Αλλαγής, λόγω των συνεπειών της που είναι ολοένα και περισσότερο ορατές. Συνεπώς, τόσο σε επιχειρηματικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο κανονιστικού πλαισίου, υιοθετούνται όλο και περισσότερο μέθοδοι για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την παραγωγή ενός προϊόντος ή υπηρεσίας ή το σχεδιασμό κάποιας δραστηριότητας. Στο πλαίσιο των αναλυτικών προσεγγίσεων κύκλου ζωής, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω, η πιο γνωστή και δημοφιλής μεθοδολογία είναι αυτή της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής – Life-Cycle Assessment (LCA) [43], η οποία ορίζεται επαρκώς από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης [35]. Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, η LCA είναι η συλλογή και αξιολόγηση των εισροών, των εκροών και των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος, προϊόντος ή υπηρεσίας σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε διαφορετικές βιομηχανίες για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ ξεκίνησε να υιοθετείται και στη ναυτιλιακή βιομηχανία από την προηγούμενη δεκαετία, με ολοένα και αυξανόμενο ρυθμό [60]. Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για σταδιακή απανθρακοποίηση της ναυτιλίας, με νέους κανονισμούς για τις εκπομπές ρύπων και την ενεργειακή απόδοση των πλοίων, έχει οδηγήσει τη βιομηχανία ακόμα περισσότερο στην υιοθέτηση τέτοιων μεθοδολογιών. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η LCA εστιάζει αποκλειστικά και μόνο στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Υπάρχουν και άλλες πλευρές που πρέπει να εξετάζονται κατά το σχεδιασμό ενός προϊόντος ή συστήματος, όπως η οικονομική, η κοινωνική και φυσικά η τεχνική [36]. Ιδιαίτερα από οικονομικής πλευράς, όπου είναι συνήθως αρκετά σημαντική για τον επιχειρηματικό κόσμο, είναι σημαντικό η LCA να συνδυάζεται και με την Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής – Life-Cycle Cost Analysis (LCCA), ή αλλιώς Life-Cycle Costing (LCC), η οποία αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Αναλυτικότερα, η LCA μπορεί να βοηθήσει στα εξής [35]:

- Βελτίωση ή και βελτιστοποίηση της περιβαλλοντικής απόδοσης συστημάτων.
- Υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων στη βιομηχανία, σε κυβερνητικούς και μη κυβερνητικούς οργανισμούς, όπως ο στρατηγικός σχεδιασμός, η προτεραιοποίηση ή ο σχεδιασμός ή επανασχεδιασμός προϊόντων ή υπηρεσιών.
- Αποτελεσματική επιλογή δεικτών περιβαλλοντικής απόδοσης, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών μετρήσεων.
- Ενίσχυση του μάρκετινγκ, μέσω της εφαρμογής ενός συστήματος οικολογικής σήμανσης.

Τα παραπάνω είναι ενδεικτικά, αλλά παρόλα αυτά αποτυπώνουν σε γενικές γραμμές την συνεισφορά της LCA. Απευθείας εφαρμογές αυτής είναι η ανάπτυξη ή βελτίωση προϊόντων και

υπηρεσιών, ο στρατηγικός σχεδιασμός, η δημιουργία κανονιστικού πλαισίου και η ενίσχυση του μάρκετινγκ.



Σχήμα 28: Γραφική αποτύπωση της δομής της LCA κατά ISO

Στο Σχήμα 28 αποτυπώνεται γραφικά μία συνήθως δομή εφαρμογής της LCA κατά ISO [35]. Σε αυτό φαίνονται επίσης οι προαναφερθείσες εφαρμογές μίας LCA. Τα βήματα ή οι φάσεις της LCA, όπως αποτυπώνονται στο σχήμα, αναλύονται παρακάτω:

- Ο καθορισμός του στόχου και του πλαισίου της LCA – Goal and scope definition
- Η ανάλυση εισροών και εκροών του υπό μελέτη συστήματος – Inventory analysis
- Η εκτίμηση των επιπτώσεων – Impact assessment
- Η αξιολόγηση και η ερμηνεία – Interpretation

Αναλυτικότερα, βάσει του [59], στην πρώτη φάση της LCA, ο στόχος και το πλαίσιο της μελέτης πρέπει να καθοριστούν. Αυτό περιλαμβάνει ένα σαφή ορισμό για το τι ακριβώς θα διερευνηθεί, ποιο είναι το αντικείμενο δηλαδή, το πως θα διερευνηθεί, καθώς επίσης και τα όρια της μελέτης. Η δεύτερη φάση καθορίζει επακριβώς τις εισροές και εκροές που συνοδεύουν το προϊόν καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Το πρώτο βήμα για τον καθορισμό αυτό αποτελεί η καταγραφή όλων των διαδικασιών που αφορούν στον κύκλο ζωής του προϊόντος, και συνεπώς η καταγραφή όλων των στοιχείων που συναποτελούν το προϊόν. Το επόμενο βήμα αφορά τη συλλογή δεδομένων για όλες τις διαδικασίες και όλα τα στοιχεία που αναγνωρίστηκαν νωρίτερα, με πηγές τόσο τη επιστημονική βιβλιογραφία και τις διαθέσιμες βάσεις δεδομένων, όσο και τους ειδικούς στο σχετικό αντικείμενο. Το βήμα αυτό είναι το πιο δύσκολο και το πιο χρονοβόρο, καθώς η διαθεσιμότητα των δεδομένων είναι συνήθως περιορισμένη. Το τρίτο βήμα αφορά στην προτεραιοποίηση της ανάλυσης στις διαδικασίες και τα στοιχεία του συστήματος, αναλόγως με την σημαντικότητα τους και τη συνεισφορά τους σε όλο τον κύκλο ζωής. Το πλαίσιο της LCA μπορεί να μειωθεί, αν κρίνεται απαραίτητο, προκειμένου να μειωθεί και ο όγκος της μελέτης. Ωστόσο, δεν συνιστάται, καθώς αυξάνεται το ρίσκο όπου μία τέτοια μείωση θα επιδράσει σημαντικά στο αποτέλεσμα της LCA. Τέλος, ακολουθεί η επεξεργασία των δεδομένων και η

δόμηση τους σε εισροές και εκροές καθ' όλο τον κύκλο ζωής. Στην τρίτη φάση της LCA γίνεται η αξιολόγηση των συνεπειών που έχουν οι ποσοτικοποιημένες εισροές και εκροές στο περιβάλλον. Καταρχάς, κατηγοριοποιούνται βάσει της επίδρασης που έχουν στο περιβάλλον, όπως πχ. η επίδραση μέσω αέριων ρύπων, η επίδραση σε στερεά απόβλητα, η επίδραση στην πανίδα κλπ. Συνήθως, κάποια εισροή ή εκροή συμβάλει σε παραπάνω από μία κατηγορία επιπτώσεων. Τέλος, οι επιδράσεις αυτές ποσοτικοποιούνται, ολοκληρώνοντας την εικόνα της LCA. Με βάση αυτή την εικόνα, στην τέταρτη και τελευταία φάση της LCA, γίνεται η επικύρωση των αποτελεσμάτων, ενώ η ερμηνεία τους γίνεται βάσει των ενοποιημένων αποτελεσμάτων, είτε σε κάποια διάγραμμα, είτε σε κάποιο συνολικό δείκτη, που αποτυπώνουν τη συνολική επίδραση στο περιβάλλον. Η παραπάνω διαδικασία είναι αρκετά γενική ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί σε όλες τις βιομηχανίες και σε όλα τα υπό μελέτη συστήματα. Συνεπώς, κάθε βήμα μπορεί να τροποποιηθεί για τις ανάγκες της ανάλυσης, κρατώντας όμως το γενικό πλαίσιο της LCA, κατά ISO.

6.2. Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής – Life-cycle cost Analysis (LCCA)

Το κόστος είναι ένα κριτήριο που διαχρονικά προβληματίζει και απασχολεί τον επιχειρηματικό κόσμο, και συχνά εμποδίζει την ανάπτυξη συστημάτων, προϊόντων ή υπηρεσιών. Επιπρόσθετο εμπόδιο αποτελεί και περιορισμένη γνώση σε σχέση με τις εναλλακτικές που μπορεί να υπάρχουν στη σχεδίαση του συστήματος, και συνεπώς των διαφόρων επιδράσεων στο κόστος. Είναι σαφές, λοιπόν, η ανάγκη εκτίμησης του κόστους από τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού, με στόχο την βελτιστοποίηση, τόσο σε ό,τι αφορά στη μείωση του κόστους σε όλο τον κύκλο ζωής, αλλά και στην απόδοση του συστήματος με δεδομένους πόρους. Όπως και προηγουμένως, στο πλαίσιο των αναλυτικών προσεγγίσεων κύκλου ζωής, η πιο γνωστή και δημοφιλής πρακτική σε όλες τις βιομηχανίες για την εκτίμηση του κόστους καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός προϊόντος, είναι η Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής – Life-Cycle Cost Analysis (LCCA) ή απλά Life-Cycle Costing (LCC) [38]. Όπως αναφέρθηκε, η LCCA συνήθως διεξάγεται μαζί με την LCA, προκειμένου να διαπιστωθεί, μαζί με τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, το κόστος που συνοδεύει το προϊόν σε όλο τον κύκλο ζωής του. Η LCC ως προσέγγιση προηγείται χρονικά της LCA, με τη θεμελίωση της και τις μεθοδολογικές της προσεγγίσεις να έχουν τις ρίζες τους στη Μηχανική Συστημάτων (Systems Engineering) [39]. Παραδοσιακά η LCC ορίζεται ως η μεθοδολογία που επιτρέπει την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών εναλλακτικών στη σχεδίαση ενός συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη όλο τον κύκλο ζωής του, από το σχεδιασμό και την κατασκευή, στη λειτουργία και τη συντήρηση, και από εκεί στη διάλυση, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση [61]. Με βάση τα παραπάνω που αφορούν στην LCA, η LCC μπορεί να συμβάλει στα εξής:

- Βελτίωση και βελτιστοποίηση την οικονομικής απόδοσης προϊόντων και υπηρεσιών.
- Υποστήριξη στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, κυρίως στη βιομηχανία, αλλά φυσικά και σε επίπεδο κυβερνητικών και μη-κυβερνητικών οργανισμών.
- Αποτελεσματική επιλογή δεικτών για την αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης.

Τα παραπάνω είναι ενδεικτικά, και σε αυτά μπορούν να προστεθούν πολλά ακόμα, ανάλογα με τη βιομηχανία και το αντικείμενο της μελέτης. Κύρια εφαρμογή, ωστόσο, αφορά τη βιομηχανία, και την ανάγκη να υπάρχει διορατικότητα σε ότι αφορά το κόστος και τις διάφορες εναλλακτικές στη σχεδίαση, ιδιαίτερα σε μεγάλες κατασκευές από τα πρώτα κιόλας στάδια της σχεδίασης. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της LCC, εγκαταλείπεται το παραδοσιακό μοντέλο που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους κτήσης, το οποίο είναι και ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα από την εισαγωγή των μεθόδων κύκλου ζωής [37]. Αντί, λοιπόν, ο σχεδιαστής να

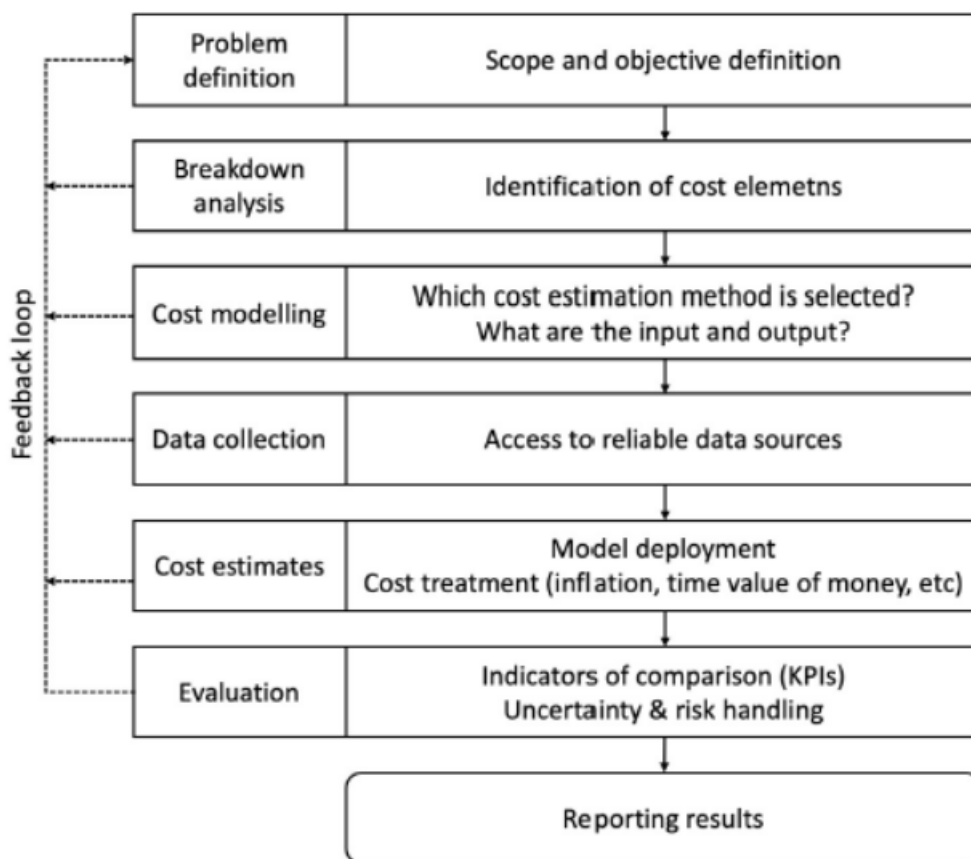
επικεντρώνεται στα βραχυπρόθεσμα οφέλη από τη μείωση του κόστους όπου αυτό είναι δυνατό, η LCC του υποδεικνύει να λάβει υπόψη του ολόκληρο τον κύκλο ζωής, και συνεπώς όλα τα κόστη και όλα τα κέρδη που απορρέουν από τη λειτουργία του συστήματος, κοιτώντας πάντα τα μακροπρόθεσμα οφέλη. Η σπουδαιότητα της LCC φαίνεται από τα ακόλουθα [37]:

- (1) Συμβαδίζει με τους στρατηγικούς στόχους για βιώσιμη ανάπτυξη.
- (2) Αποφεύγει περιττά κόστη λόγω τυχαίων επιλογών κατά το σχεδιασμό, και επιστρατεύει επιστημονικές και αποτελεσματικές μεθόδους εκτίμησης κόστους για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων.
- (3) Συμβάλλει στον αποδοτικό καταμερισμό των διαθέσιμων πόρων.

Η εφαρμογή της LCC βασίζεται στις τέσσερις φάσεις που προβλέπει και η LCA [35], βάσει ISO, όπως αυτές αναλύθηκαν παραπάνω, δηλαδή i) τον καθορισμό του στόχου και του πλαισίου της μελέτης, ii) την ανάλυση εισροών και εκροών του υπό μελέτη συστήματος, iii) την εκτίμηση των οικονομικών, πλέον, επιπτώσεων, ή καλύτερα της οικονομικής απόδοσης, και τέλος, iv) την αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αναλυτικότερα, ο ορισμός της πρώτης φάσης διαφέρει ελάχιστα, με μοναδική διαφορά το ότι ο στόχος θα πρέπει να εστιάζει στο κόστος αντί των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η δεύτερη φάση αφορά περισσότερο τον καθορισμό των επιμέρους στοιχείων κόστους που συναποτελούν το συνολικό κόστος, και εν συνεχεία τη συλλογή δεδομένων, που παραμένει ως το πιο δύσκολο και χρονοβόρο βήμα της διαδικασίας. Μετά την επεξεργασία των δεδομένων, ακολουθεί η τρίτη φάση που αφορά στην εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων των διαφορετικών εναλλακτικών που λαμβάνονται υπόψη στο πλαίσιο της μελέτης, και τέλος, στην τέταρτη φάση, επικυρώνονται τα αποτελέσματα και αξιολογούνται, βάσει διαφόρων εργαλείων αξιολόγησης επενδύσεων.

Όπως είναι φυσικό, η παραπάνω δομή της LCC μεθοδολογίας μπορεί να διαφοροποιηθεί ανάλογα με τις ανάγκες και το αντικείμενο της μελέτης, αντίστοιχα με την LCA. Πιο συγκεκριμένα, όμως, επειδή κάποια βήματα αποκτούν πολύ μεγαλύτερη σημασία από αυτά της LCA, έχει μεγαλύτερη αξία για προσαρμογή των βημάτων στην διαδικασία της LCC αυτής καθ' αυτής. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 29 αποτυπώνεται μία δομή της LCCA/LCC μεθοδολογίας, όπως αυτή προσαρμόστηκε από την τυποποίηση κατά ISO [35] και τη μελέτη της Utne [44]. Το πρώτο βήμα είναι εφάμιλλο με αυτό της προηγούμενης προσέγγισης και αφορά στον καθορισμό του στόχου και του πλαισίου της μελέτης. Πέραν του πλαισίου, συνήθης στόχος είναι η επιλογή μεταξύ διαφορετικών εναλλακτικών στη σχεδίαση ενός συστήματος, με κριτήριο το κόστος (και τα κέρδη) καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής. Το δεύτερο βήμα αποτελεί μέρος της δεύτερης φάσης της προηγούμενης προσέγγισης, και συμπεριλαμβάνει την ανάλυση και αναγνώριση όλων των στοιχείων κόστους που συναποτελούν το σύστημα/προϊόν της μελέτης. Το πρώτο επίπεδο ανάλυσης αφορά τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής (πχ. σχεδιασμός, κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση, διάλυση και ανακύκλωση). Κάθε ένα από αυτά αποτελεί μία ξεχωριστή κατηγορία από στοιχεία κόστους, τα οποία πρέπει να αναλυθούν περαιτέρω. Σε αυτό το δεύτερο επίπεδο ανάλυσης θα πρέπει να αναγνωριστούν όλα τα υποσυστήματα και επιμέρους εξαρτήματα που συναποτελούν το σύστημα, ή όλα τα κόστη λειτουργίας ή αναλώσιμα κλπ. Η ανάλυση αυτή μπορεί να επεκταθεί σε πολλά ακόμα επίπεδα. Το τρίτο βήμα αποτελεί τον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο θα γίνει η προσέγγιση του κόστους για κάθε στοιχείο. Υπάρχουν πολλά μοντέλα που μπορούν να κάνουν αυτή την προσέγγιση, το καθένα με διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετική ακρίβεια στην τελική εκτίμηση. Είναι φυσικό πως όσο περισσότερα και πιο ποιοτικά δεδομένα υπάρχουν, τόσο καλύτερη εκτίμηση μπορεί να γίνει. Έτσι λοιπόν, η εκλογή μοντέλου βασίζεται στην διαθεσιμότητα ποιοτικών δεδομένων, στις απαιτήσεις για συγκεκριμένα επίπεδα

ακρίβειας και, φυσικά, σε οποιοδήποτε περιορισμό στο χρόνο διεκπεραίωσης της μελέτης. Το επόμενο βήμα αφορά στη συλλογή των δεδομένων από όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστες πηγές. Αυτές μπορεί να είναι κάποια βιβλιογραφική επισκόπηση, κάποια προσβάσιμη βάση δεδομένων ή η συμβολή ειδικών για την ποσοτικοποίηση, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που εκλείπουν τα δύο πρώτα. Αφού ολοκληρωθεί ο υπολογισμός του κόστους των επιμέρους στοιχείων, ακολουθεί το πέμπτο βήμα, το οποίο αφορά στον υπολογισμό του κόστους στο επίπεδο μίας επένδυσης, όπου πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως ο πληθωρισμός ή η αξία του χρήματος συναρτήσει χρόνου, ώστε να υπολογιστεί το συνολικό κόστος από ολόκληρο τον κύκλο ζωής σε παρούσα αξία. Τέλος, στο τελευταίο βήμα γίνεται η αξιολόγηση όλων των επιμέρους εναλλακτικών, ενώ γίνεται, εφόσον κρίνεται απαραίτητο, ανάλυση αβεβαιότητας και η διαχείριση του οποιοδήποτε ρίσκου μπορεί να περιλαμβάνει η μελέτη.



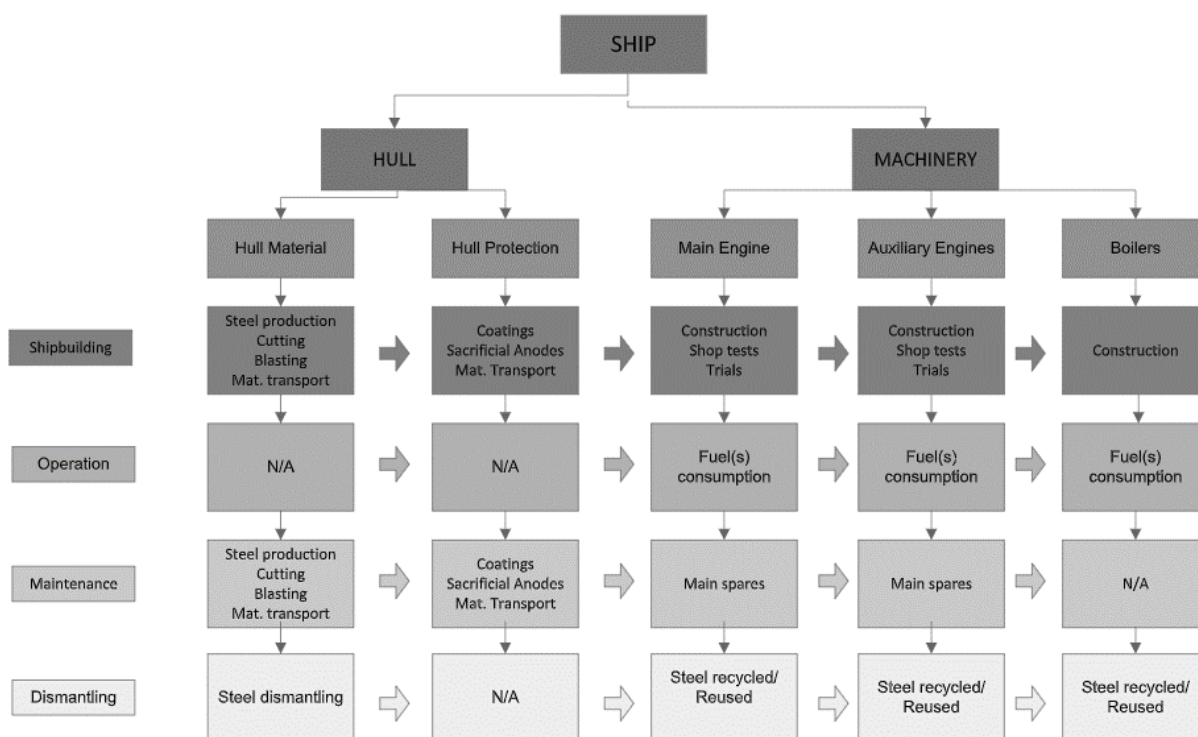
Σχήμα 29: Ενδεικτική δομή των βημάτων της LCCA/LCC μεθοδολογίας

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης δομής για την LCCA/LCC μέθοδο είναι η επαναληπτική διαδικασία που φαίνεται από το βρόγχο ανατροφοδότησης (feedback loop) στο Σχήμα 29. Η επαναληπτική διαδικασία είναι άκρως απαραίτητη, ίσως και περισσότερο σε σύγκριση με την LCA, καθώς η διαθεσιμότητα των δεδομένων αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου λόγω λεπτομερούς σχεδίασης, ανάπτυξης σχετικών προϊόντων ή συστημάτων κλπ., προσφέροντας δυνατότητες μεγαλύτερης ακρίβειας στην LCC σε σχέση με μία αρχική προσέγγιση [44]. Συνεπώς, με λίγες εξαιρέσεις, σχεδόν όλα τα βήματα της LCC βελτιώνονται με κάθε επανάληψη, οδηγώντας σε ένα πιο ακριβές αποτέλεσμα για το εκτιμώμενο κόστος.

6.3. Εφαρμογές στη ναυτιλία και στα καύσιμα

Με την πάροδο των χρόνων αλλά και κυρίως λόγω της αναγκαιότητας που παρουσιάζεται στην κατεύθυνση της απανθρακοποίησης ώστε να αντιμετωπισθεί η κλιματική κρίση, οι εφαρμογές της LCA είναι αρκετές και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Όταν μάλιστα υπάρχει συγκεκριμένο κανονιστικό πλαίσιο για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τότε η LCA γίνεται υποχρεωτική, και για αυτό το λόγο εφαρμόζεται σήμερα σε μεγάλο εύρος περιπτώσεων. Αντίθετα, η LCCA/LCC, παρότι η μείωση του κόστους αποτελεί σημαντικό κίνητρο για την βιομηχανία, έχει μικρότερη εφαρμογή στο σήμερα από την LCA, ενώ παράλληλα η έλλειψη κανονιστικού πλαισίου επιτρέπει την προσαρμογή της ανάλογα με τη βιομηχανία και το αντικείμενο της μελέτης. Η βιομηχανία που αφορά στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η ναυτιλία, αποτελεί μία από τις πιο συντηρητικές βιομηχανίες. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται αρκετά οι μέθοδοι κύκλου ζωής, τόσο για λόγους περιβαλλοντικούς, με κυρίαρχη την εκτίμηση και τον περιορισμό των εκπομπών αέριων ρύπων, όσο και για λόγους εκτίμησης και περιορισμού του κόστους σε όλο τον κύκλο ζωής ενός πλοίου ή ενός συστήματος του.

Πιο συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφική επισκόπηση έχουν αναφερθεί συγκεκριμένες περιπτώσεις εφαρμογής των LCA και LCCA/LCC που αφορούν στη ναυτιλία. Μερικές από αυτές είναι η μελέτη των Βεντίκου και Χατζηνικολάου [43] σχετικά με την ανάπτυξη ενός ολιστικού πλαισίου για την εκτίμηση των αέριων εκπομπών ενός πλοίου, από την οπτική ολόκληρου του κύκλου ζωής του, η μελέτη της Utne [44] σχετικά με την εφαρμογή της LCC για την ενίσχυση της βιωσιμότητας στο νορβηγικό στόλο αλιευτικών σκαφών, και η μελέτη του Jeong κ.α. [45] που περιγράφουν ένα πλαίσιο εφαρμογής των LCA και LCC για την βέλτιστη επιλογή εγκατάστασης πρόωσης.

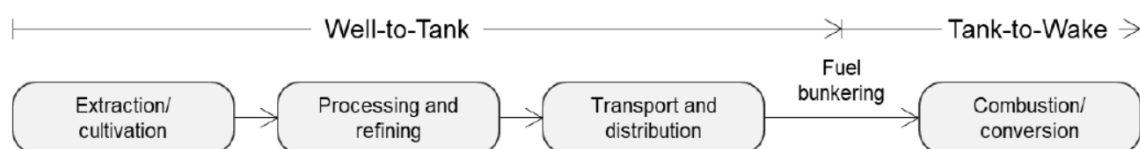


Σχήμα 30: Ανάλυση συστημάτων πλοίου σε τέσσερα στάδια του κύκλου ζωής για ολιστική μελέτη των εκπομπών αέριων ρύπων ενός πλοίου [43]

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Από τη σκοπιά της μεθοδολογικής προσέγγισης, η πρώτη μελέτη εισάγει ένα μοντέλο LCA το οποίο αποτελείται από τέσσερα στάδια, την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση και την διάλυση, για τις δύο βασικές κατηγορίες συστημάτων ενός πλοίου, το κατασκευαστικό μέρος, δηλαδή τη γάστρα, και το μηχανολογικό μέρος, συναποτελούμενο από την κύρια μηχανή, τις γεννήτριες και τους ατμολέβητες (boiler). Το Σχήμα 30 αποτυπώνει αυτόν τον καταμερισμό. Για κάθε στάδιο και για κάθε σύστημα, λοιπόν, το μοντέλο περιλαμβάνει αναλυτικούς υπολογισμούς των ρύπων, βάσει συγκεκριμένου προφίλ λειτουργίας του πλοίου. Εν συνεχεία, η δεύτερη μελέτη εισάγει ένα αντίστοιχο μοντέλο, αυτή τη φορά όμως για τον υπολογισμό του κόστους, δηλαδή ένα μοντέλο LCC. Για τα ίδια στάδια, κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση και διάλυση, αλλά με υπολογισμούς που εστιάζουν στο κόστος, το μοντέλο υποστηρίζει την διαδικασία λήψης αποφάσεων αναφορικά με την κατασκευή και διαχείριση ενός στόλου αλιευτικών σκαφών. Τέλος, η τρίτη μελέτη συνδυάζει και τα δύο, και την εκτίμηση των εκπομπών αέριων ρύπων, βασιζόμενη στην πρώτη μελέτη, καθώς επίσης και το κόστος, χρησιμοποιώντας μία συγκεκριμένη περίπτωση πλοίου. Ο σκελετός της μεθοδολογίας είναι ίδιος και στην περίπτωση του LCA, και στην περίπτωση του LCCA [45], τουλάχιστον σε ότι αφορά την κατηγοριοποίηση των επιμέρους στοιχείων, καθώς το υπολογιστικό σκέλος διαφοροποιείται μεταξύ ρύπων και κόστους. Φυσικά, πολλές φορές ο συνδυασμός των δύο κρίνεται απαραίτητος, καθώς οι ρύποι μπορεί να επηρεάσουν το κόστος, ιδιαίτερα στο μέλλον.

Μία ειδική περίπτωση, σε σχέση με τη ναυτιλία, που διαφέρει σε ένα βαθμό από τις παραπάνω προσεγγίσεις, είναι αυτή των καυσίμων, και συνεπώς των μελετών που αφορούν στο κύκλο ζωής τους. Το ενδιαφέρον συγκεντρώνουν φυσικά οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και όχι η εκτίμηση του κόστους στη συνολική διαδρομή του καυσίμου όπου διαφοροποιείται η σκοπιά από την οποία μελετάται το κόστος (παραγωγή, επεξεργασία, χρήση). Μία γενική αποτύπωση της διαδρομής ενός καυσίμου, βάσει των οδηγιών του IMO για υπολογισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [41], αποτυπώνεται στο Σχήμα 31. Στη διαδρομή αυτή περιλαμβάνονται η εξόρυξη για τα ορυκτά και η καλλιέργεια για τα βιοκαύσιμα, η επεξεργασία, μεταφορά και ο εφοδιασμός του καυσίμου, που συναποτελούν την Well-to-Tank (WtT) φάση (από την εξόρυξη/καλλιέργεια μέχρι και τη δεξαμενή του πλοίου) του κύκλου ζωής, καθώς επίσης και τη χρήση, δηλαδή την καύση, που αποτελεί μονομερώς την Tank-to-Wake (TtW) φάση (από τη δεξαμενή στο «ίχνος» του πλοίου, δηλαδή στην ατμόσφαιρα) του κύκλου ζωής. Συνδυαστικά και οι δύο φάσεις περιγράφουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός καυσίμου, όπου αναφέρεται ως Well-to-Wake (WtW) ή αλλιώς Well-to-propeller φάση. Στο σχήμα αποτυπώνονται με τρόπο σαφή και οι δύο φάσεις, καθώς και τα επιμέρους στάδια που περιέχουν..

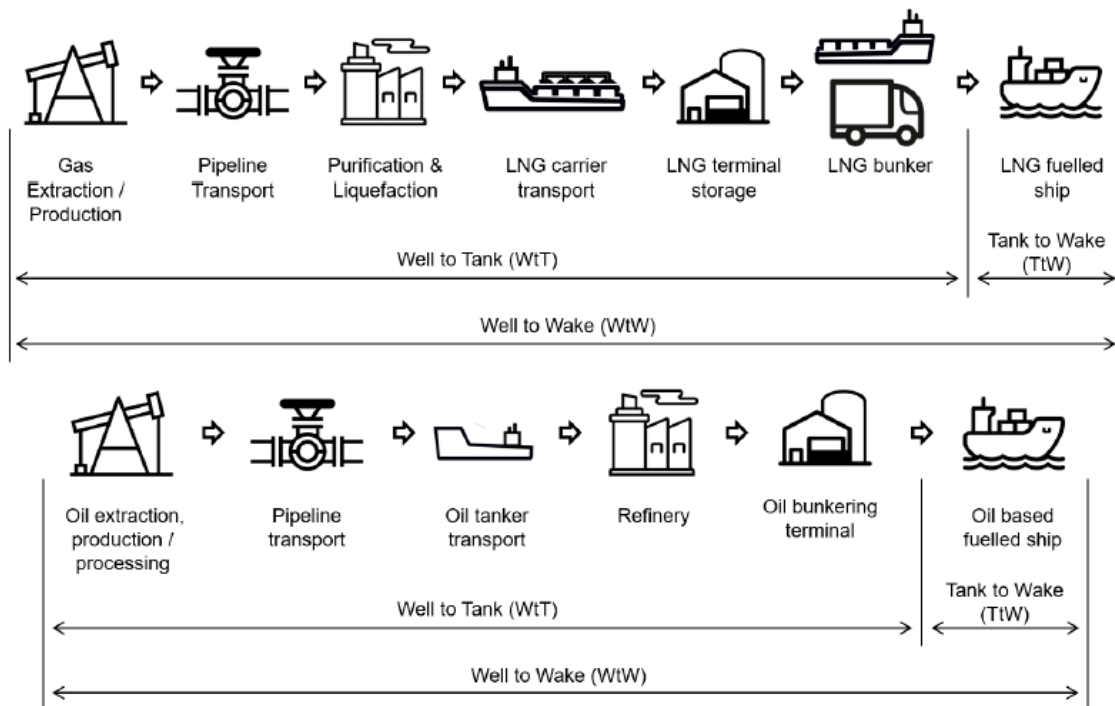


Σχήμα 31: Γενικό διάγραμμα διαδρομής ενός καυσίμου [41]

Οι περισσότερες μελέτες που αφορούν στη μελέτη των εκπομπών αέριων ρύπων/αερίων του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα στη ναυτιλία, χρησιμοποιούν την παραπάνω ανάλυση για την διεξαγωγή μίας LCA. Όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφική επισκόπηση, δύο σημαντικά παραδείγματα που δείχνουν ακριβώς αυτή την προσέγγιση είναι η μελέτη των sphera, SEA-LNG και SGMF [18], όπου μελετάται η περίπτωση του ορυκτού LNG ως ναυτιλιακό καύσιμο, και η

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

περίπτωση της μελέτης του Sangsoo κ.α. [46], όπου εστιάζει σε μία συγκριτική ανάλυση μεταξύ της χρήσης ορυκτού LNG και συμβατικού MGO καυσίμου, από την περιβαλλοντική σκοπιά, για τη μελέτη περίπτωσης ενός πλοίου που εκτελεί εθνικά δρομολόγια στη Νότια Κορέα. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, το Σχήμα 32 αποτυπώνει αναλυτικά τον κύκλο ζωής του ορυκτού LNG και ενός συμβατικού καυσίμου πετρελαίου.



Σχήμα 32: Ο κύκλος ζωής για το ορυκτό LNG και για συμβατικά καύσιμα πετρελαίου [46]

Το ευρύτερο πλαίσιο για τη μελέτη τέτοιων περιπτώσεων το δίνει πλέον ο IMO βάσει της προαναφερθέντων οδηγιών που έχει εκδώσει, και περιγράφουν με λεπτομέρεια τη διαδικασία υπολογισμού των ρύπων και για τη WtT φάση και για την TtW φάση [41]. Οι παρακάτω εξισώσεις¹⁴ συνοψίζουν τη διαδικασία υπολογισμού. Ο παράγοντας GHG_{WtT} αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά μονάδα ενέργειας του καυσίμου που παρέχεται στο πλοίο, κατά την παραγωγή, επεξεργασία και μεταφορά του, ενώ ο παράγοντας GHG_{TtW} αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά μονάδα ενέργειας του καυσίμου, από την καύση του στο πλοίο που το καταναλώνει. Ο παράγοντας GHG_{WtW} είναι οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά μονάδα ενέργειας που αφορούν το καύσιμο [41].

$$GHG_{WtW} [gCO_{2eq}/MJ] = GHG_{WtT} + GHG_{TtW} \quad (1)$$

$$GHG_{WtT} [gCO_{2eq}/MJ] = e_{ec} + e_l + e_p + e_{td} - e_c - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccu} \quad (2)$$

$$GHG_{TtW} [gCO_{2eq}/MJ] = [(1 - C_{slip}) \times (S_f \times C_{fCO_2} + C_{fCH_4} \times GWP_{CH_4} + C_{fN_2O} \times GWP_{N_2O}) + (C_{slip} \times GWP_{CH_4}) - e_{occs}] / LCV \quad (3)$$

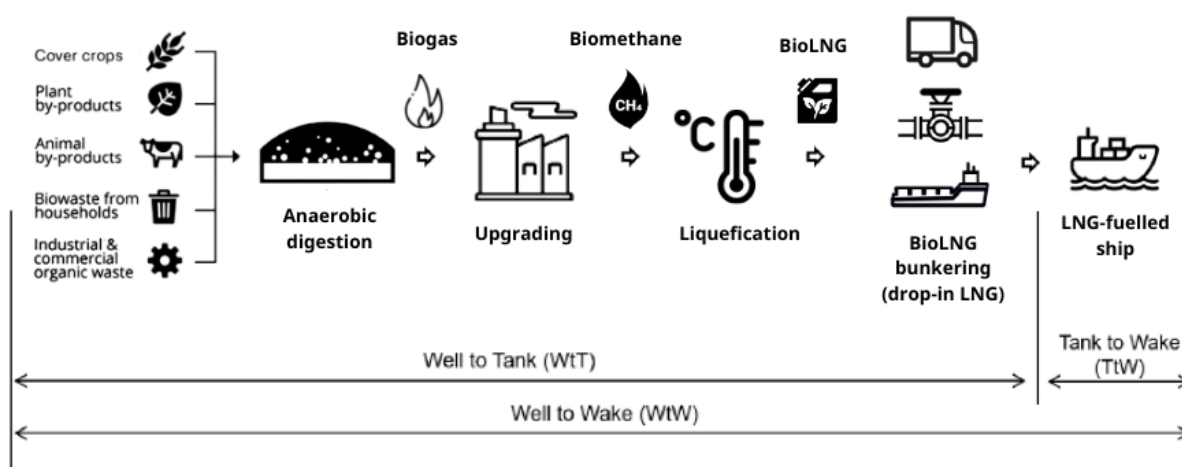
¹⁴ Ο υπολογισμός αυτός λαμβάνει υπόψη του μόνο της εκπομπές CO₂ και τα ισοδύναμα από CH₄ και N₂O. Δεν λαμβάνει υπόψη του HFC, PFC, SFG, SO_x, NO_x και PM.

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Πίνακας 9: Επεξήγηση όρων στις εξισώσεις υπολογισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά IMO [41]

| Term | Units | Explanation |
|--------------|-------------------|--|
| e_{ec} | gCO_{2eq}/MJ | emissions from the extraction or from the cultivation of raw materials |
| e_l | gCO_{2eq}/MJ | annualized emissions from carbon stock changes caused by land-use change (over 20 years) |
| e_p | gCO_{2eq}/MJ | emissions from processing, including electricity generation |
| e_{td} | gCO_{2eq}/MJ | emissions from transport and distribution |
| e_c | gCO_{2eq}/MJ | emissions credits generated by biomass growth |
| e_{sca} | gCO_{2eq}/MJ | emission savings from soil carbon accumulation via improved agricultural management |
| e_{ccs} | gCO_{2eq}/MJ | emission savings from CO ₂ capture and geological storage |
| e_{ccu} | gCO_{2eq}/MJ | emission savings from CO ₂ capture and utilization |
| LCV | MJ/g fuel | Lower Calorific Value of the fuel (MJ/g fuel) |
| S_F | 0 or 1 | Carbon source factor |
| C_{slip} | % of fuel mass | Coefficient accounting for fuel (methane) slip (share of the total fuel in use) |
| C_{fCO_2} | gCO_2/g fuel | CO ₂ emission conversion factor (g CO ₂ / g fuel) |
| C_{fCH_4} | gCH_4/g fuel | CH ₄ emission conversion factor (g CH ₄ / g fuel) |
| C_{fN_2O} | gN_2O/g fuel | N ₂ O emission conversion factor (g N ₂ O/ g fuel) |
| GWP_{CH_4} | gCO_{2eq}/gCH_4 | Global Warming Potential of methane over 100 set at 29.8 for fossil and at 27.5 for non-fossil methane (IPPC AR 6) |
| GWP_{N_2O} | gCO_{2eq}/gN_2O | Global Warming Potential of N ₂ O over 100 set at 273 (IPCC AR 6) |
| e_{occs} | gCO_{2eq}/MJ | emission savings from on-board CO ₂ capture and geological storage |
| LCV | MJ/g fuel | Lower Calorific Value of the fuel (MJ/g fuel) |

Επιπλέον, υπάρχουν μελέτες οι οποίες υλοποιούν μία LCA, αλλά εστιάζοντας στο πρώτο σκέλος του κύκλου ζωής του καυσίμου, δηλαδή στην WtT φάση, που εμπεριέχει κρίσιμα σημεία κατά την παραγωγή του καυσίμου. Ο λόγος, φυσικά, για το βιοαέριο/βιομεθάνιο, όπως αναλύεται στα προηγούμενα κεφάλαια. Ενδεικτικά, όπως περιγράφεται και στην βιβλιογραφική επισκόπηση, οι μελέτες αυτές συγκρίνουν διαφορετικά σενάρια για την παραγωγή βιομεθανίου και τους ρύπους που τη συνοδεύουν [62]–[65]. Από τις εν λόγω μελέτες, καθώς και από την ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων, το Σχήμα 33 αποτυπώνει τον κύκλο ζωής του βιομεθανίου (bioLNG), όπου θα χρησιμοποιηθεί και στα επόμενα κεφάλαια της μελέτης περίπτωσης, σε σύγκριση και με τον κύκλο ζωής του πετρελαίου και του ορυκτού υγροποιημένου φυσικού αερίου, όπως αποτυπώνεται στο προηγούμενο σχήμα (Σχήμα 32).



Σχήμα 33: Ο κύκλος ζωής του βιομεθανίου (bioLNG)

7. Μελέτη περίπτωσης και δεδομένα

Πέραν της θεωρητικής ανάλυσης που αφορά στην διαδικασία παραγωγής του υγροποιημένου βιομεθανίου (bioLNG), τα δεδομένα της αγοράς, την προοπτική του ως ναυτιλιακό καύσιμο βάσει διαθεσιμότητας και τις υπάρχουσες υποδομές λόγω LNG, προκειμένου να μελετηθεί στην πράξη η προοπτική του στη ναυτιλία, η παρούσα διπλωματική θα διεξάγει μία μελέτη περίπτωσης ενός οχηματαγωγού πλοίου (Ro-Ro). Η μελέτη θα εξετάσει ταυτόχρονα και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και το κόστος. Για τις εκπομπές αερίων ρύπων, η μελέτη θα εστιάζει και στις δύο φάσεις (WtT και TtW) του κύκλου ζωής των καυσίμων (LCA), και η οποία σε ότι αφορά στην TtW φάση, θα εστιάζει στο συγκεκριμένο το πλοίο της περίπτωσης που εξετάζεται. Για το κόστος, η περίπτωση θα μελετηθεί από τη σκοπιά του πλοιοκτήτη, δηλαδή του κόστους προμήθειας του καυσίμου και των οικονομικών συνεπειών των αερίων ρύπων, στα πρότυπα της μελέτης του κόστους κύκλου ζωής (LCCA/LCC) ενός πλοίου. Για την μελέτη περίπτωσης, θεωρούνται **τρία σενάρια λειτουργίας**:

1. Συμβατικές κύρια μηχανή και γεννήτριες, με χρήση συμβατικών καυσίμων πετρελαίου.
2. Κύρια μηχανή και γεννήτριες διπλού καυσίμου, με χρήση LNG ως κύριο καύσιμο.
3. Κύρια μηχανή και γεννήτριες διπλού καυσίμου, με χρήση LNG, μαζί με bioLNG.

Το πρώτο σενάριο αποτελεί τη βάση της μελέτης για την οποία σύγκριση ακολουθήσει, ενώ αρχικά θα επαληθεύσει τη μεθοδολογία των υπολογισμών βάσει των διαθέσιμων δεδομένων του πλοίου της περίπτωσης μελέτης. Το δεύτερο σενάριο εξυπηρετεί σε μία πρώτη σύγκριση του LNG με παραδοσιακά καύσιμα πετρελαίου, συμπεριλαμβανομένης και της αξιολόγησης μίας επένδυσης μετασκευής βάσει της LCCA, ενώ επεκτείνει τη βάση για το κύριο μέρος της μελέτης, δηλαδή την αξιολόγηση της εναλλακτικής του bioLNG σε πλοίο με τη σχετική υποδομή (κύρια μηχανή, γεννήτριες, δεξαμενές, κλπ.). Επιπλέον, το δεύτερο σενάριο θα χρησιμοποιηθεί για να αποτυπωθούν η μεγάλη αύξηση των τιμών του LNG κατά το τελευταίο διάστημα και η νέα πραγματικότητα που εισάγει η απόφαση για συμπερίληψη της ναυτιλίας στο ευρωπαϊκό χρηματιστήριο ρύπων – European Emission Trading System (ETS)¹⁵. Το τρίτο και τελευταίο σενάριο, ως το κύριο αντικείμενο της μελέτης περίπτωσης, θα εστιάζει στην σύγκριση με το δεύτερο σενάριο, απαντώντας στο ερώτημα για το αν και πότε συμφέρει η χρήση του bioLNG, συνδυαστικά πάντα με το LNG, σε πλοίο με τη σχετική υποδομή. Πιο συγκεκριμένα, η περίπτωση μελέτης, στη βάση των τριών σεναρίων, περιλαμβάνει:

- LCA για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην φάση TtW.
- LCCA για τον υπολογισμό του κόστους σε σχέση με την επιλογή καυσίμου, λαμβάνοντας υπόψη μία σειρά μεταβλητών, μεταξύ των οποίων κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι τιμές των καυσίμων.

Μέθοδοι ανάλυσης αβεβαιότητας και ευαισθησίας θα συμπεριληφθούν, προκειμένου να αντιμετωπισθεί η αβεβαιότητα και το ρίσκο γύρω από το bioLNG και τους παράγοντες που επηρεάζουν την προοπτική του. Επιπλέον, θα χρησιμοποιηθούν οικονομοτεχνικά εργαλεία για την αξιολόγηση επενδύσεων εντός της LCCA.

Η μελέτη περίπτωσης αξιοποιεί μία σειρά από δεδομένα, στο πλαίσιο των LCA και LCCA που εμπεριέχει. Τα βασικότερα εξ' αυτών παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 10, μαζί με τις πηγές τους.

¹⁵ European Parliament passes ETS shipping changes – June 23, 2022 – G. Howard – <https://www.seatrade-maritime.com/regulation/european-parliament-passes-ets-shipping-changes>

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Πίνακας 10: Διαθέσιμα δεδομένα

| # | Περιγραφή δεδομένων | Πηγή |
|---|--|-------------------------------------|
| 1 | Χαρακτηριστικά πλοίου και μηχανών (M/E & D/G) | Ναυτιλιακή Εταιρία Neptune Lines |
| 2 | Προφίλ λειτουργίας πλοίου και μηχανών (M/E & D/G) | Ναυτιλιακή Εταιρία Neptune Lines |
| 3 | Δεδομένα για τη λειτουργία των μηχανών (M/E & D/G) | Κατασκευαστής [66]–[69] |
| 4 | Τιμές καυσίμων (HFO, LSFO, MGO, LNG) | Διαδικτυακά [49] |
| 5 | Δεδομένα για τον υπολογισμό ρύπων | Βιβλιογραφία [18], [41], [70], [71] |

Τα αρχικά δεδομένα για τη μελέτη περίπτωσης, καθώς επίσης και η επεξεργασία τους, αναλύονται στην επόμενη παράγραφο. Οι υπολογισμοί και τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στο επόμενο κεφάλαιο, μαζί με τον σχολιασμό τους, ενώ τέλος ακολουθούν τα συμπεράσματα.

7.1. Πλοίο, κύρια μηχανή, ηλεκτρογεννήτριες & προφίλ λειτουργίας

Το πρώτο σύνολο δεδομένων αφορά τα χαρακτηριστικά του πλοίου για την μελέτη περίπτωσης, καθώς επίσης και της κύριας μηχανής και των γεννητριών του. Όπως αναφέρθηκε, πρόκειται για ένα οχηματαγωγό πλοίο (Ro-Ro), με μία δίχρονη, αργόστροφη κύρια μηχανή (Main Engine – M/E) και δύο ηλεκτρογεννήτριες (Diesel Generators – D/Gs). Τα βασικά του χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 11).

Πίνακας 11: Βασικά χαρακτηριστικά πλοίου, κύριας μηχανής και ηλεκτρογεννητριών

| Βασικές διαστάσεις | |
|---------------------|--------------------------------|
| Ολικό μήκος | 170.00 m |
| Πλάτος | 28.00 m |
| Βύθισμα | 8.70 m |
| DWT | 11,260 tons |
| Τύπος πλοίου | Ro-Ro |
| Εγκατάσταση πρόωσης | |
| Κύρια μηχανή | B&W 7S50ME-C8.2 |
| Ισχύς MCR | 9,330 kW @ 119 rpm |
| Τύπος μηχανής | δίχρονη (2X) |
| Τύπος καυσίμου | HFO, open loop scrubber fitted |
| Ταχύτητα υπηρεσίας | 18.7 knots |
| Μέση ταχύτητα | 15.0 knots |
| Ηλεκτρογεννήτριες | |
| Τύπος | 2 x B&W 7L23/30H |
| Ισχύς | 2 x 1,100 kW @ 900 rpm |
| Τύπος καυσίμου | MGO |

Το δεύτερο σύνολο δεδομένων αποτελεί μία συνολική καταγραφή του προφίλ λειτουργίας του πλοίου κατά την περίοδο 1/1/2021 έως και 20/6/2022. Πρόκειται για ένα σύνολο 51,242 καταγραφών, οι οποίες έχουν ληφθεί ανά 15 λεπτά για τον ενάμιση περίπου αυτό χρόνο. Τα δεδομένα αφορούν την κύρια μηχανή, τις ηλεκτρογεννήτριες, την ταχύτητα, τον καιρό, την πλοήγηση και τις καταναλώσεις. Στο πλαίσιο της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σειρές δεδομένων, αφού έγινε μία πρώτη επεξεργασία, είτε για απευθείας υπολογισμούς, είτε για επαλήθευση – επικύρωση:

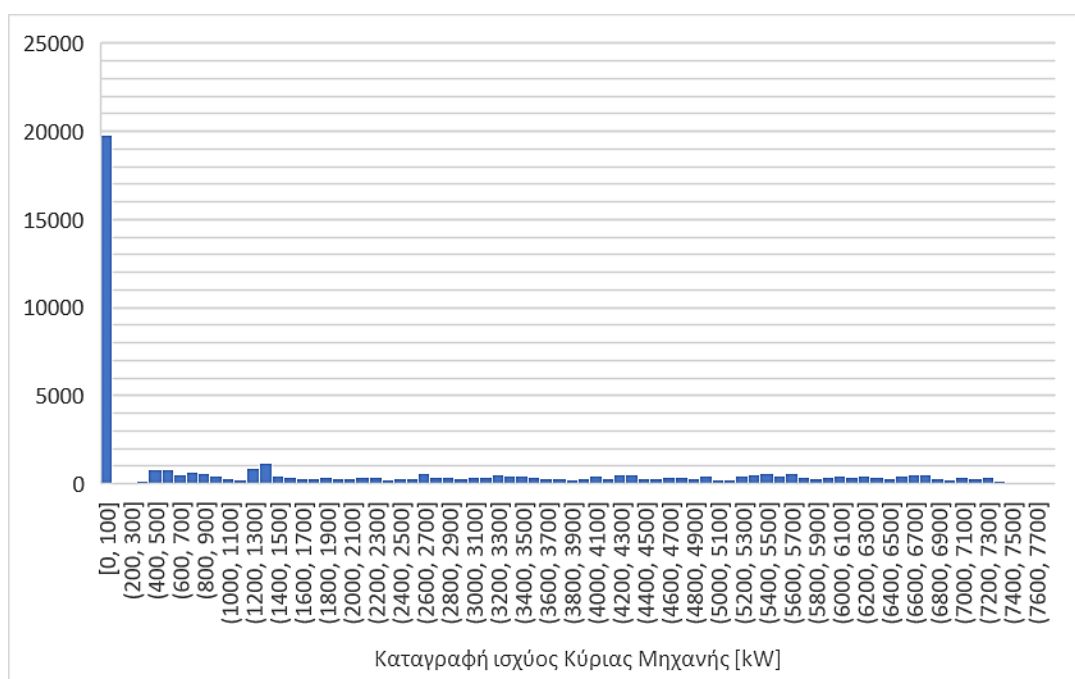
Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

- Καταγραφή μέρας και ώρας – Date & Time
- Καταγραφή κατάστασης – State of operation
- Ισχύς κύριας μηχανής – M/E power [kW]
- Ισχύς ηλεκτρογεννητριών – D/G power [kW] (DG1 & DG2)
- Κατανάλωση καυσίμου κύριας μηχανής – M/E Consumption [mt]
- Κατανάλωση καυσίμου ηλεκτρογεννητριών – D/G Consumption [mt]

Οι δύο πρώτες καταγραφές χρησιμεύουν για να ομαδοποιηθούν κατάλληλα τα δεδομένα της ισχύς της κύριας μηχανής, όπως θα περιγραφεί παρακάτω, οι ισχύς χρησιμοποιούνται απευθείας στους υπολογισμούς, ενώ οι καταναλώσεις θα βοηθήσουν στην επαλήθευση και επικύρωση των υπολογισμών. Μία πρώτη επεξεργασία των δεδομένων ήταν απαραίτητη πριν αξιοποιηθούν περαιτέρω. Χρησιμοποιώντας κατάλληλα υπολογιστικά φύλλα excel, εντοπίστηκαν τα κενά στις καταγραφές και αφαιρέθηκαν για κάθε καταγραφή ισχύος και κατανάλωσης, προκειμένου το δείγμα να είναι επεξεργάσιμο. Από τα 51,242 σημεία λειτουργίας του αρχικού δείγματος, έμειναν 49,064 τα οποία και παρουσιάζονται από τα σχήματα και τα στατιστικά μεγέθη που ακολουθούν.

Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά δείγματος και καταστάσεις πλοίου/κύριας μηχανής

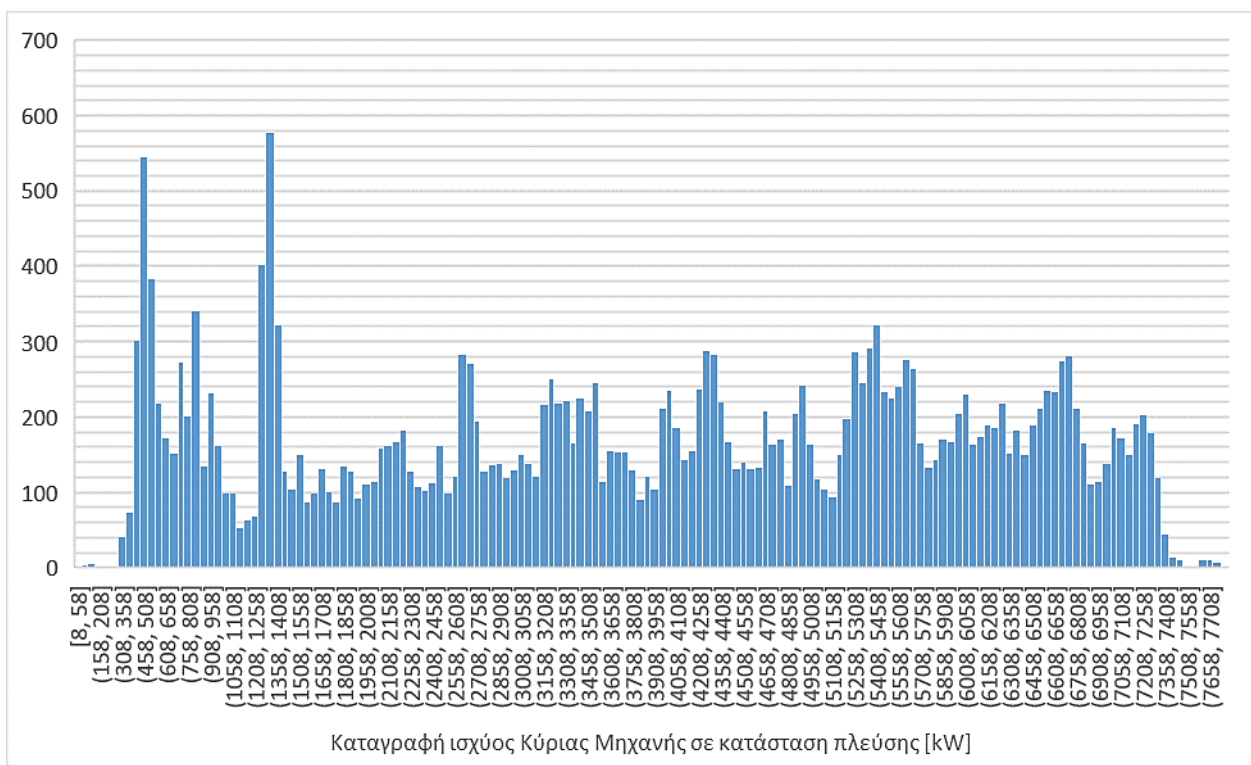
| | | |
|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Τελικό δείγμα | 49,064 | |
| Αρχικό δείγμα | 51,242 | |
| Ελλιπή δεδομένα | 2,178 | |
| Ποσοστό τελικού δείγματος | 95.75% | |
| Κατάσταση πλοίου/μηχανής | Σύνολο σημείων | Ποσοστό δείγματος |
| Αγκυροβολημένο | 6,174 | 12.58% |
| Στο λιμάνι | 13,792 | 28.11% |
| Κατάσταση ελιγμών | 3,365 | 6.86% |
| Κατάσταση πλεύσης | 25,733 | 52.45% |
| Σύνολο | 49,064 | 100.00% |



Σχήμα 34: Ιστόγραμμα καταγραφών ισχύος της Κύριας Μηχανής στο σύνολο του δείγματος

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Αρχικά, στον Πίνακα 12 φαίνονται τα χαρακτηριστικά του δείγματος συνολικά, καθώς επίσης και ο επιμερισμός των δεδομένων σε καταστάσεις που χαρακτηρίζουν τόσο το πλοίο, όσο και τη λειτουργία της μηχανής ως συνέπεια. Με βάση αυτό τον χαρακτηρισμό γίνεται και η περιγραφή του προφίλ της κύριας μηχανής στη συνέχεια. Στο Σχήμα 34 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα της καταγραφής ισχύος της κύριας μηχανής για όλο το δείγμα, ανεξαρτήτου κατάστασης. Όπως φαίνεται, η συγκέντρωση μεγάλης συχνότητας στο μηδέν, ή και λίγο παραπάνω, μαρτυρούν την ανάγκη για επιμέρους θεώρησης των τεσσάρων καταστάσεων, για καλύτερη αποτύπωση της συμπεριφοράς του δείγματος, και καλύτερη περιγραφή των μεγεθών που χρειάζεται. Συνεπώς, για την περιγραφή της κατάστασης πλεύσης, αφαιρέθηκαν οι μηδενικές τιμές και όσες ήταν πολύ κοντά στο μηδέν, προκειμένου να αποτυπωθεί η πραγματική εικόνα του δείγματος, η οποία και παρουσιάζεται στο ιστόγραμμα στο Σχήμα 35. Το αντίστοιχο ιστόγραμμα για την κατάσταση ελιγμών, όπου και εκεί υπάρχει ένα εύρος τιμών που λαμβάνουν οι καταγραφές της ισχύος της κύριας μηχανής, φαίνεται στο Σχήμα 36. Βάσει των δύο αυτών ιστογραμμάτων είναι φανερό πως για να εξαχθούν ασφαλή στατιστικά συμπεράσματα χρειάζεται μία πιο λεπτομερής επεξεργασία των δεδομένων. Για τις άλλες δύο καταστάσεις, όπου το πλοίο είναι θεωρητικά ακίνητο (αγκυροβόλιο ή λιμάνι), τα περισσότερα δεδομένα για την κύρια μηχανή είναι μηδενικά, είτε αφορά την ταχύτητα του πλοίου, είτε την ισχύ και την ταχύτητα του κινητήρα, και συνεπώς δεν συνεισφέρουν αργότερα στους υπολογισμούς εκπομπών ή κόστους, παρά μόνο διαμορφώνουν το ετήσιο προφίλ λειτουργίας του πλοίου, και συνεπώς, της κύριας μηχανής.

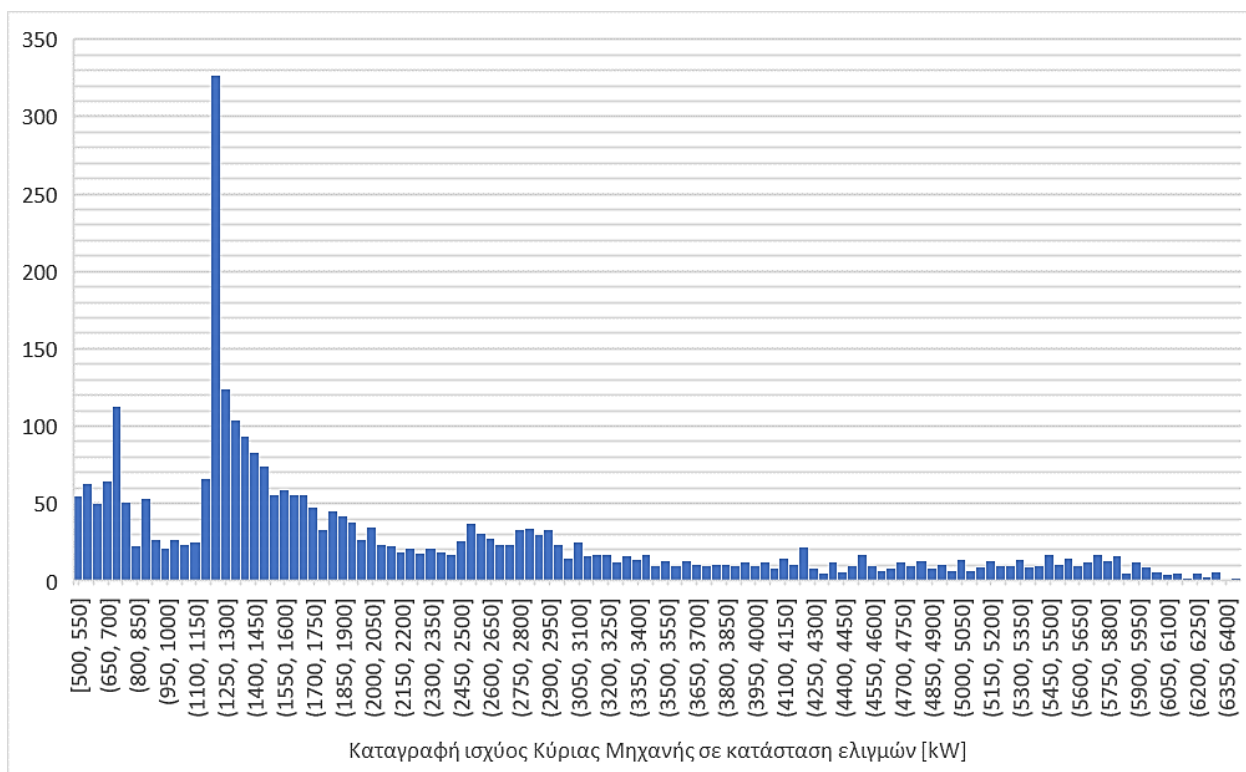


Σχήμα 35: Ιστόγραμμα καταγραφών Κύριας Μηχανής για την κατάσταση πλεύσης

Για την περαιτέρω στατιστική επεξεργασία του δείγματος για την ισχύ στην κατάσταση πλεύσης, τα δεδομένα διακριτοποιήθηκαν αρχικώς σε υποσύνολα του δείγματος, ανά 50kW ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια, και με το νέο δείγμα που δημιουργήθηκε, μέσω του υπολογισμού του σταθμισμένου μέσου όρου βάσει του πλήθους του εκάστοτε υποσυνόλου, υπολογίσθηκε η ισχύς για τα εύρη ισχύος που παρουσιάζονται στον Πίνακα 13. Τα εύρη επιλέχθηκαν με ίσες αποστάσεις, λόγω της ομοιόμορφης κατανομής του δείγματος (δεν

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

αναγνωρίστηκαν επιμέρους περιοχές λειτουργίας). Στον πίνακα φαίνονται τόσο ο υπολογισμός του μέσου όρου, όσο και του σταθμισμένου μέσου όρου, μαζί με το πλήθος των σημείων και το ποσοστό τους επί του συνόλου των σημείων της κατάστασης πλεύσης και της λειτουργίας του πλοίου συνολικά. Η διαφορά του απλού μέσου όρου ανά εύρος ισχύος, με τον σταθμισμένο μέσο όρο είναι προφανής. Ο δεύτερος είναι αυτός που επιλέγεται για τον υπολογισμό του προφίλ λειτουργίας της κύριας μηχανής, ώστε να αξιοποιηθεί στους υπολογισμούς των καταναλώσεων στη συνέχεια.



Σχήμα 36: Ιστόγραμμα καταγραφών Κύριας Μηχανής για την κατάσταση ελιγμών

Πίνακας 13: Προφίλ λειτουργίας Κύριας Μηχανής για την κατάσταση πλεύσης

| Εύρος ισχύος [kW] | ΜΟ Ισχύος [kW] | Σταθμισμένος ΜΟ Ισχύος [kW] | Αριθμός σημείων στο δείγμα | Σημεία σε σχέση με την κατάσταση πλεύσης | Σημεία στο σύνολο της λειτουργίας |
|-------------------|----------------|-----------------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|
| 0-1,000 | 499.19 | 650.90 | 3,230 | 12.62% | 6.62% |
| 1,000-2,000 | 1,499.62 | 1,462.66 | 3,049 | 11.91% | 6.25% |
| 2,000-3,000 | 2,499.78 | 2,508.20 | 3,015 | 11.78% | 6.18% |
| 3,000-4,000 | 3,499.88 | 3,467.58 | 3,369 | 13.16% | 6.90% |
| 4,000-5,000 | 4,499.88 | 4,476.87 | 3,755 | 14.67% | 7.69% |
| 5,000-6,000 | 5,500.00 | 5,512.18 | 4,024 | 15.72% | 8.24% |
| 6,000-7,000 | 6,499.92 | 6,489.45 | 3,819 | 14.92% | 7.82% |
| 7,000-8,000 | 7,397.27 | 7,197.68 | 1,337 | 5.22% | 2.74% |
| Total: | | | 25,733 | 100.00% | 52.45% |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται και η ισχύς για την κατάσταση ελιγμών, όπου εκεί αναγνωρίστηκαν οι περιοχές που φαίνονται στον Πίνακα 14. Τα εύρη ισχύος προέκυψαν από την κατανομή του αντίστοιχου ιστογράμματος (Σχήμα 36). Όπως και παραπάνω, στον πίνακα φαίνεται το πλήθος των σημείων και το ποσοστό τους επί του συνόλου των σημείων της κατάστασης ελιγμών και της λειτουργίας του πλοίου συνολικά.

Πίνακας 14: Προφίλ λειτουργίας Κύριας Μηχανής για την κατάσταση ελιγμών

| Εύρος ισχύος [kW] | Σταθμισμένος ΜΟ Ισχύος [kW] | Αριθμός σημείων στο δείγμα | Σημεία σε σχέση με την κατ. πλευσης | Σημεία στο σύνολο της λειτουργίας |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 0-1,000 | 714.12 | 521 | 16.29% | 1.12% |
| 1,000-2,300 | 1,487.13 | 1,548 | 48.39% | 3.32% |
| 2,300-3,800 | 2,927.70 | 608 | 19.01% | 1.30% |
| 3,800-6,500 | 5,000.32 | 522 | 16.32% | 1.12% |
| Total: | | 3,365 | 100.00% | 6.86% |

Όσον αφορά στο προφίλ λειτουργίας των ηλεκτρογεννητριών, από το σύνολο των 51,242 δεδομένων του δείγματος, εκ των οποίων τα 50,918 ήταν αξιοποιήσιμα (τα υπόλοιπα έλλειπαν και συνεπώς αφαιρέθηκαν από το δείγμα), προέκυψε ο χρόνος που η κάθε μία εκ των δύο λειτουργούσε, καθώς επίσης και η καταγραφή της ισχύος τους. Από την καταγραφή αυτή, ο μέσος όρος της ισχύος υπολογίστηκε ώστε να χρησιμοποιηθεί στους μετέπειτα υπολογισμούς. Τα προφίλ λειτουργίας για τις δύο ηλεκτρογεννήτριες παρουσιάζονται ακολούθως, στον Πίνακα 15. Στον πίνακα φαίνονται οι μέσοι όροι της ισχύος στο σύνολο του δείγματος και στην περίοδο λειτουργίας αντίστοιχα, καθώς επίσης και το πλήθος των σημείων λειτουργίας και το ποσοστό τους επί του συνόλου των σημείων του δείγματος που λαμβάνεται υπόψη.

Πίνακας 15: Προφίλ λειτουργίας ηλεκτρογεννητριών

| D/G | Πλήθος σημείων λειτουργίας | Ποσοστό λειτουργίας | ΜΟ ισχύος (διαχρονικά) [kW] | ΜΟ ισχύος (λειτουργίας) [kW] |
|-------|----------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|
| D/G 1 | 19,833 | 38.70% | 278.10 | 489.12 |
| D/G 2 | 31,085 | 60.66% | 592.84 | 684.13 |

Τέλος, η επεξεργασία των δεδομένων αναφορικά με τις καταναλώσεις, τόσο της κύριας μηχανής, όσο και των ηλεκτρογεννητριών, μπορεί να δώσει τη συνολική κατανάλωση καυσίμου, προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι μετέπειτα υπολογισμοί, σχετικά με την κατανάλωση, σε όλα τα σενάρια. Έτσι, η μέση ετήσια κατανάλωση καυσίμου φαίνεται στον Πίνακα 16, και για την κύρια μηχανή, και για τις γεννήτριες. Αυτή υπολογίστηκε από το άθροισμα των επιμέρους καταναλώσεων από τα δεδομένα, προσαρμοσμένο κατ' αναλογία στον ένα χρόνο λειτουργίας.

Πίνακας 16: Κατανάλωση καυσίμου κύριας μηχανής και ηλεκτρογεννητριών

| Καταναλώσεις | Κύρια μηχανή | Ηλεκτρογεννήτριες |
|----------------------------|--------------|-------------------|
| Ετήσια κατανάλωση [t/year] | 3,529.95 | 1,060.55 |

7.2. Επιλογή και χαρακτηριστικά κύριων μηχανών και ηλεκτρογεννητριών

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, στο πλοίο της μελέτης περίπτωσης αντιστοιχεί μία δίχρονη, αργόστροφη κύρια μηχανή των 9,330kW (μέγιστη συνεχόμενη ισχύς) και δύο ηλεκτρογεννήτριες των 1,100kW, οι οποίες φαίνονται και στον Πίνακα 11. Για τις ανάγκες της μελέτης περίπτωσης, όπως φαίνεται και παρακάτω, πρέπει να υπολογιστούν οι καταναλώσεις των μηχανών αυτών, βάσει του προφίλ λειτουργίας τους. Οι προαναφερθείσες κύρια μηχανή και ηλεκτρογεννήτριες, όμως, αφορούν μόνο το πρώτο σενάριο της μελέτης περίπτωσης, για την διεξαγωγή των LCA και LCCA. Στα άλλα δύο σενάρια, επειδή αναφέρονται στα καύσιμα LNG και bioLNG, χρειάζεται να θεωρήσουμε μετασκευή του πλοίου της μελέτης, σε πλοίο που μπορεί να τα χρησιμοποιήσει. Συνεπώς, θεωρούμε μετασκευή του πλοίου (τα οικονομικά στοιχεία της οποίας θα αναλυθούν στην ενότητα 948.2), η οποία περιλαμβάνει την μετασκευή της κύριας μηχανής σε μηχανή διπλού καυσίμου (DF – dual fuel), καυσίμων πετρελαίου και LNG, την μετασκευή των ηλεκτρογεννητριών σε διπλού καυσίμου επίσης, την εγκατάσταση δεξαμενών, και φυσικά όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό. Η νέα κύρια μηχανή και οι νέες ηλεκτρογεννήτριες που επιλέγονται είναι αντίστοιχες με τις υπάρχουσες, σε έκδοση διπλού καυσίμου, προκειμένου να υπάρχει αντιστοιχία στα χαρακτηριστικά και στην απόδοση. Όλες μαζί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 17).

Πίνακας 17: Κύρια μηχανή και ηλεκτρογεννήτριες - υπάρχων πλοίο & μετασκευή

| Μηχανές | Σενάριο 1 (υπάρχων πλοίο) | Σενάρια 2 & 3 (μετασκευή) |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Κύρια Μηχανή (M/E) | B&W 7S50ME-C8.2 | B&W 7S50ME-C8.2-GI |
| | 9,330 kW @ 119 rpm | 9,330 kW @ 119 rpm |
| | Diesel (single fuel) | Dual fuel (diesel & LNG) |
| Ηλεκτρογεννήτριες (D/Gs) | 7L23/30H Mk.2 | 7L23/30DF Mk.2 |
| | 1,100 kW @ 900 rpm | 1,100 kW @ 900 rpm |
| | Diesel (single fuel) | Dual fuel (diesel & LNG) |

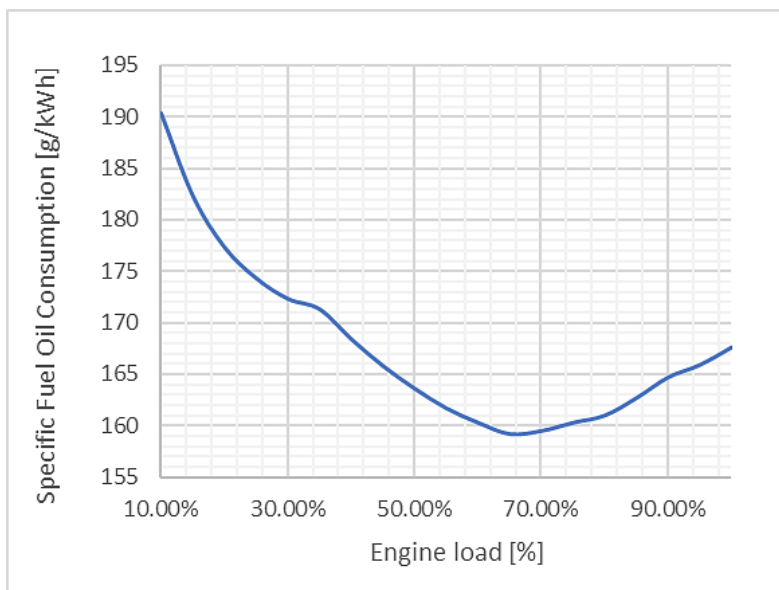
Με βάση εγχειρίδια των μηχανών [66]–[69], καθώς επίσης και το online σχετικό εργαλείο της MAN Energy Solutions (CEAS engine calculations¹⁶) για τις κύριες μηχανές, είναι δυνατό να υπολογισθούν όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό της απόδοσης των μηχανών, και κατ' επέκταση των καταναλώσεων, που είναι αυτό που αφορά στην παρούσα μελέτη, ώστε να υπολογισθούν εκπομπές και κόστη. Το μέγεθος που πρωτίστως αφορά στον υπολογισμό των καταναλώσεων είναι οι ειδικές καταναλώσεις καυσίμου και λαδιού κάθε μηχανής (και ηλεκτρογεννήτριας), συναρτήσει του φορτίου της μηχανής. Οι ειδικές καταναλώσεις φαίνονται στους πίνακες (Πίνακας 18 έως Πίνακας 21) και στα σχήματα (Σχήμα 37 έως Σχήμα 41) που ακολουθούν. Στις μηχανές μονού καυσίμου πετρελαίου φαίνεται μόνο η ειδική κατανάλωση του καυσίμου πετρελαίου (specific fuel oil consumption – SFOC), ενώ στη κύρια μηχανή διπλού καυσίμου φαίνονται οι ειδικές καταναλώσεις πιλοτικού (για την ανάφλεξη) και αέριου καυσίμου (specific pilot oil consumption – SPOC, specific fuel gas consumption – SFGC). Για την αντίστοιχη ηλεκτρογεννήτρια, φαίνεται μόνο η ειδική κατανάλωση αέριου καυσίμου, καθώς δεν χρησιμοποιείται πιλοτικό καύσιμο.

¹⁶ CEAS engine calculations, MAN Energy Solutions – <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations>

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Πίνακας 18: Φόρτιση κύριας μηχανής 7S50ME-C8.2 και ειδική κατανάλωση καυσίμου πετρελαίου

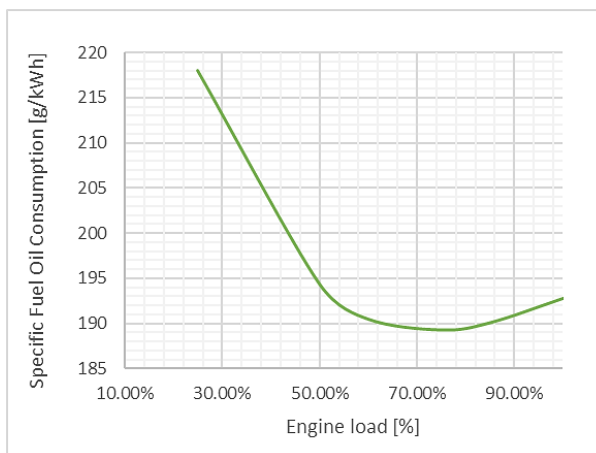
| Load %SMCR | Power kW | Speed r/min | SFOC g/kWh |
|------------|----------|-------------|------------|
| 100 | 9330 | 119 | 167.6 |
| 95 | 8864 | 119 | 165.9 |
| 90 | 8397 | 119 | 164.7 |
| 85 | 7931 | 119 | 162.7 |
| 80 | 7464 | 119 | 161 |
| 75 | 6998 | 119 | 160.3 |
| 70 | 6531 | 119 | 159.5 |
| 65 | 6065 | 119 | 159.2 |
| 60 | 5598 | 119 | 160.3 |
| 55 | 5132 | 119 | 161.7 |
| 50 | 4665 | 119 | 163.6 |
| 45 | 4199 | 119 | 165.8 |
| 40 | 3732 | 119 | 168.4 |
| 35 | 3266 | 119 | 171.3 |
| 30 | 2799 | 119 | 172.3 |
| 25 | 2333 | 119 | 174.3 |
| 20 | 1866 | 119 | 177.3 |
| 15 | 1400 | 119 | 182.3 |
| 10 | 933 | 119 | 190.3 |



Σχήμα 37: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου πετρελαίου της 7S50ME-C8.2

Πίνακας 19: Φόρτιση ηλεκτρογεννήτριας 7L23/30H και ειδική κατανάλωση καυσίμου πετρελαίου

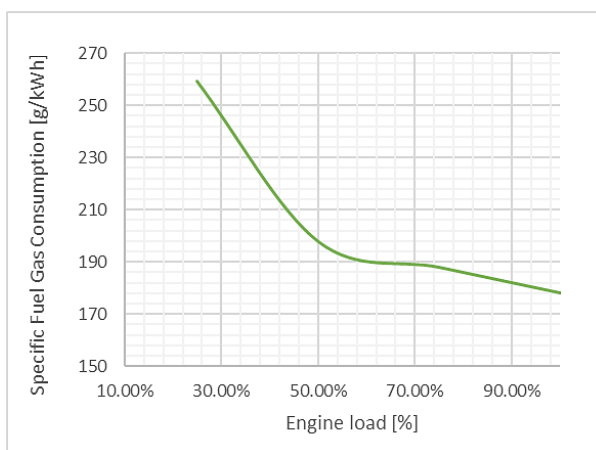
| Load [%] | Power [kW] | Speed [rpm] | SFOC [g/kWh] |
|----------|------------|-------------|--------------|
| 100 | 1100 | 900 | 192.8 |
| 85 | 935 | 900 | 190.1 |
| 75 | 825 | 900 | 189.3 |
| 60 | 660 | 900 | 190.5 |
| 50 | 550 | 900 | 194.4 |
| 25 | 275 | 900 | 218.0 |



Σχήμα 38: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου πετρελαίου της 7L23/30H

Πίνακας 20: Φόρτιση ηλεκτρογεννήτριας 7L23/30DF και ειδική κατανάλωση αέριου καυσίμου

| Load [%] | Power [kW] | Speed [rpm] | SFGC [g/kWh] |
|----------|------------|-------------|--------------|
| 100 | 1100 | 900 | 178.26 |
| 75 | 825 | 900 | 188.04 |
| 50 | 550 | 900 | 197.9 |
| 25 | 275 | 900 | 259.1 |

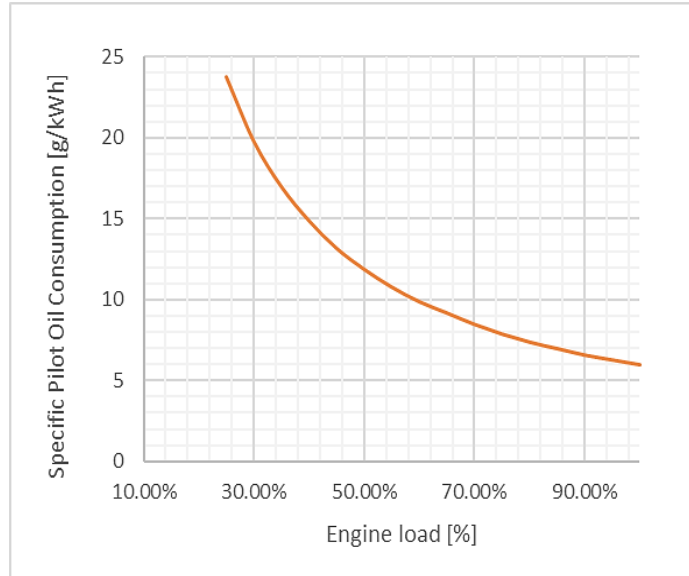


Σχήμα 39: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου πετρελαίου της 7L23/30DF

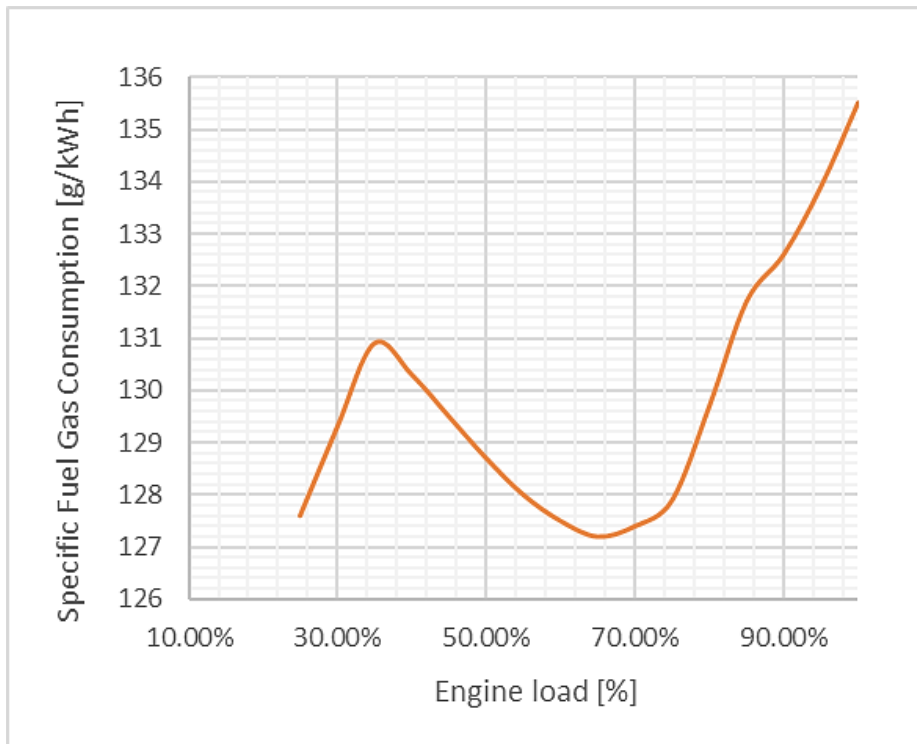
Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Πίνακας 21: Φόρτιση κύριας μηχανής 7S50ME-C8.2-GI και ειδική κατανάλωση αέριου καυσίμου

| Load %SMCR | Power kW | Speed r/min | SPOC g/kWh | SGC g/kWh |
|---------------|-------------|----------------|---------------|--------------|
| 100 | 9330 | 119 | 6.0 | 135.5 |
| 95 | 8864 | 119 | 6.3 | 133.9 |
| 90 | 8397 | 119 | 6.6 | 132.6 |
| 85 | 7931 | 119 | 7.0 | 131.7 |
| 80 | 7464 | 119 | 7.4 | 129.7 |
| 75 | 6998 | 119 | 7.9 | 127.9 |
| 70 | 6531 | 119 | 8.5 | 127.4 |
| 65 | 6065 | 119 | 9.2 | 127.2 |
| 60 | 5598 | 119 | 9.9 | 127.5 |
| 55 | 5132 | 119 | 10.8 | 128.0 |
| 50 | 4665 | 119 | 11.9 | 128.7 |
| 45 | 4199 | 119 | 13.2 | 129.5 |
| 40 | 3732 | 119 | 14.9 | 130.3 |
| 35 | 3266 | 119 | 17.0 | 130.9 |
| 30 | 2799 | 119 | 19.8 | 129.3 |
| 25 | 2333 | 119 | 23.8 | 127.6 |



Σχήμα 40: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης πιλοτικού καυσίμου της 7S50ME-C8.2-GI



Σχήμα 41: Γράφημα ειδικής κατανάλωσης αέριου καυσίμου της 7S50ME-C8.2-GI

Η ειδική κατανάλωση λαδιού (specific lubrication oil consumption – SLOC) θεωρείται σταθερή και για τις περιπτώσεις των κύριων μηχανών, και των ηλεκτρογεννητριών. Για τις κύριες μηχανές θεωρείται ίση με 0.1 g/kWh, ενώ για τις ηλεκτρογεννήτριες 0.8 g/kWh.

Με βάση τις τιμές αυτές, τους παραπάνω πίνακες και τα σχήματα, όπως θα δούμε στη συνέχεια, υπολογίζεται η κατανάλωση για κάθε μία από τις παραπάνω μηχανές, με βάση το αντίστοιχο προφίλ λειτουργίας τους.

7.3. Δεδομένα για το κόστος καυσίμων και εκπομπών άνθρακα

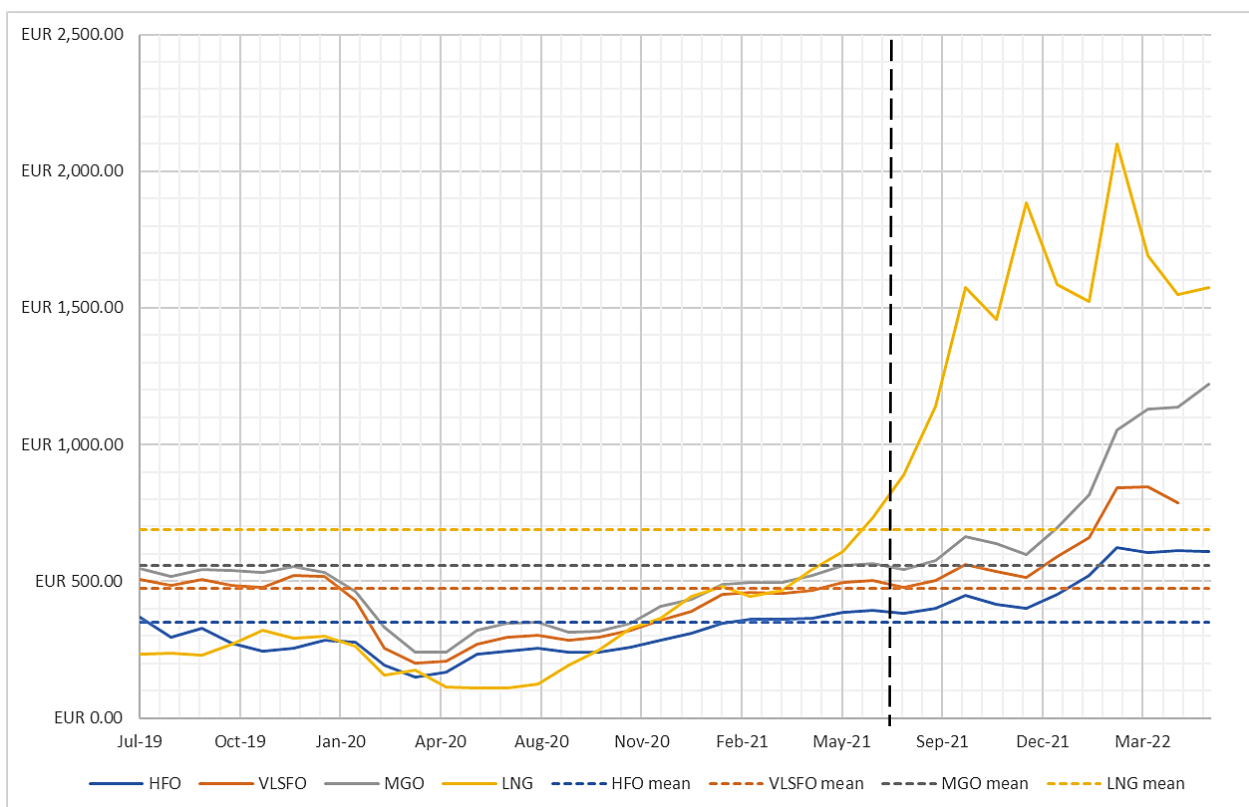
Με δεδομένη την κατανάλωση καυσίμου για κάθε σενάριο της μελέτης περίπτωσης, προκειμένου να βρούμε το κόστος που αναλογεί στην λειτουργία του πλοίου, χρειάζεται το κόστος του καυσίμου. Δυστυχώς, οι τιμές του καυσίμου χαρακτηρίζονται από μεγάλη διακύμανση, ιδιαίτερα τα τελευταία 2 χρόνια όπου οι αλληπάλληλες κρίσεις κορονοϊού, ενέργειας και εσχάτως πολέμου στην Ουκρανία, έχουν οδηγήσει σε μεγάλη αύξηση των τιμών. Από την άλλη, ωστόσο, το μεγάλο εύρος τιμών που δίνει αυτή η διακύμανση εξυπηρετεί στο να διερευνηθεί με μεγαλύτερη πληρότητα η συμπεριφορά του κόστους στην περίπτωση μελέτης. Μεγαλύτερη αύξηση για την Ευρώπη, και συνεπώς τα λιμάνια της, εμφανίζει το φυσικό αέριο, όπως φαίνεται και παρακάτω.

Πίνακας 22: Κόστος ανεφοδιασμού καυσίμων (bunkering prices) για το λιμάνι του Rotterdam [49] και κόστος δικαιωμάτων εκπομπών άνθρακα από το EU Emission Trading System [50]

| date | HFO | VLSFO | LNG | MGO | CO ₂ permits |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|
| month | price [€/mt] | price [€/mt] | price [€/mt] | price [€/mt] | price [€/mt] |
| Jul-19 | 366.70 € | 507.78 € | 234.53 € | 546.73 € | 25.75 € |
| Aug-19 | 294.50 € | 486.40 € | 236.13 € | 517.28 € | 26.71 € |
| Sep-19 | 327.28 € | 504.93 € | 228.70 € | 544.83 € | 20.98 € |
| Oct-19 | 273.13 € | 483.08 € | 270.08 € | 538.65 € | 24.80 € |
| Nov-19 | 244.63 € | 476.43 € | 321.52 € | 533.43 € | 23.84 € |
| Dec-19 | 256.50 € | 519.65 € | 291.55 € | 553.85 € | 25.27 € |
| Jan-20 | 284.05 € | 516.33 € | 297.80 € | 533.43 € | 19.31 € |
| Feb-20 | 276.45 € | 430.83 € | 262.54 € | 464.08 € | 25.04 € |
| Mar-20 | 191.43 € | 256.50 € | 156.04 € | 331.08 € | 20.26 € |
| Apr-20 | 151.05 € | 199.50 € | 175.20 € | 240.35 € | 20.50 € |
| May-20 | 168.63 € | 207.10 € | 113.61 € | 239.88 € | 23.84 € |
| Jun-20 | 232.75 € | 269.33 € | 108.59 € | 322.05 € | 24.80 € |
| Jul-20 | 243.20 € | 294.50 € | 109.56 € | 347.70 € | 26.71 € |
| Aug-20 | 255.55 € | 302.58 € | 122.20 € | 349.13 € | 28.62 € |
| Sep-20 | 242.25 € | 283.10 € | 193.72 € | 314.45 € | 31.48 € |
| Oct-20 | 241.78 € | 294.03 € | 246.31 € | 317.78 € | 27.42 € |
| Nov-20 | 258.88 € | 320.15 € | 327.09 € | 344.85 € | 29.09 € |
| Dec-20 | 285.00 € | 355.78 € | 364.52 € | 407.55 € | 31.72 € |
| Jan-21 | 309.23 € | 390.45 € | 445.55 € | 433.68 € | 33.39 € |
| Feb-21 | 347.23 € | 450.30 € | 480.23 € | 490.20 € | 35.06 € |
| Mar-21 | 362.43 € | 457.43 € | 443.65 € | 497.33 € | 36.73 € |
| Apr-21 | 359.58 € | 454.10 € | 465.03 € | 494.48 € | 41.03 € |
| May-21 | 364.33 € | 466.45 € | 544.83 € | 522.03 € | 48.19 € |
| Jun-21 | 388.08 € | 494.95 € | 607.05 € | 557.18 € | 54.39 € |
| Jul-21 | 392.35 € | 502.55 € | 734.35 € | 563.83 € | 54.87 € |
| Aug-21 | 383.33 € | 478.33 € | 889.20 € | 544.35 € | 55.11 € |
| Sep-21 | 401.85 € | 502.08 € | 1,142.38 € | 576.65 € | 59.64 € |
| Oct-21 | 448.88 € | 560.03 € | 1,576.05 € | 665.00 € | 60.12 € |
| Nov-21 | 413.73 € | 534.38 € | 1,457.30 € | 637.93 € | 61.31 € |
| Dec-21 | 399.95 € | 514.90 € | 1,882.90 € | 598.98 € | 62.98 € |
| Jan-22 | 451.73 € | 590.43 € | 1,584.60 € | 696.35 € | 65.85 € |
| Feb-22 | 521.08 € | 657.88 € | 1,524.28 € | 815.58 € | 67.52 € |
| Mar-22 | 622.73 € | 843.60 € | 2,097.60 € | 1,053.55 € | 69.43 € |
| Apr-22 | 605.15 € | 845.03 € | 1,690.53 € | 1,128.60 € | 70.62 € |
| May-22 | 611.80 € | 788.98 € | 1,548.98 € | 1,136.20 € | 71.81 € |
| Jun-22 | 608.95 € | 876.85 € | 1,573.68 € | 1,221.70 € | 84.94 € |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Η μελέτη επικεντρώνεται στην Ευρώπη, και συγκεκριμένα στο λιμάνι του Rotterdam, όπου υπήρχε πληρότητα δεδομένων για όλων των ειδών τα καύσιμα που ενδιαφέρουν στη μελέτη. Το πλοίο της μελέτης περίπτωσης, αν και λειτουργεί σε παρακείμενη περιοχή, τα δρομολόγια που εκτελεί δεν εξυπηρετούν τον ανεφοδιασμό από το εν λόγω λιμάνι, αλλά η μελέτη περιορίζεται από την διαθεσιμότητα των δεδομένων. Έτσι, λοιπόν, το κόστος εφοδιασμού καυσίμου (bunkering fuel) για το Rotterdam είναι άμεσα διαθέσιμα από το ship & bunkering [49]. Ο Πίνακας 22 παρουσιάζει τα κόστη για τα καύσιμα που ενδιαφέρουν στην μελέτη για τα τρία τελευταία χρόνια, από τον Ιούλιο του 2019 έως και σήμερα, όπως επίσης και την εξέλιξη της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπής CO₂. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα των τριών χρόνων αποτελεί πρόβλημα για τη στατιστική ανάλυση των τιμών, ώστε να εισαχθούν σωστές προσεγγίσεις κόστους στους υπολογισμούς. Ένα εύρος 15 και πλέον ετών θα μπορούσε να δώσει πλήρη εικόνα για την εξέλιξη των τιμών, και άρα, μεσοσταθμικά, θα μπορούσαν να εξαχθούν τιμές ώστε να αξιοποιηθούν στο μοντέλο υπολογισμών. Όπως προαναφέρθηκε, όμως, τα δεδομένα εξυπηρετούν από την σκοπιά του μεγάλου εύρους που παρουσιάζεται λόγω ραγδαίας αύξησης των τιμών από την ενεργειακή κρίση. Συνεπώς, όπως φαίνεται και παρακάτω, θα εξεταστούν διαφορετικά σενάρια χρονικών περιόδων σε ότι αφορά μέσους όρους, με και χωρίς την περίοδο της ενεργειακής κρίσης, ενώ παράλληλα το κόστος θα μελετηθεί και για κάθε μήνα, με τα παραπάνω πραγματικά δεδομένα.



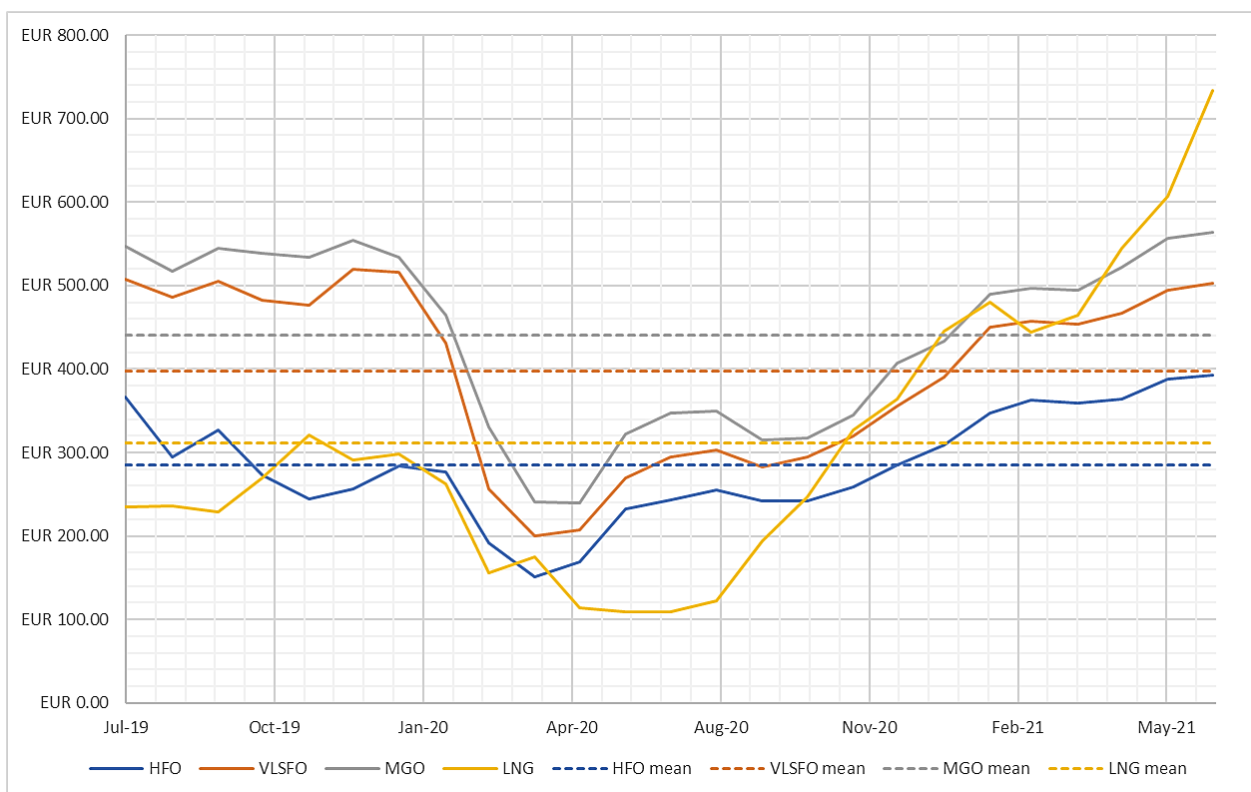
Σχήμα 42: Διάγραμμα εξέλιξης κόστους ανεφοδιασμού καυσίμων [€/mt] στο λιμάνι του Rotterdam τα τελευταία 3 χρόνια

Πίνακας 23: Ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή του κόστους των καυσίμων για το διάστημα αναφοράς

| Καύσιμο | HFO | VLSFO | LNG | MGO |
|---------------|----------|----------|------------|------------|
| Ελάχιστη τιμή | 151.05 € | 199.50 € | 108.59 € | 239.88 € |
| Μέση τιμή | 349.61 € | 475.46 € | 687.44 € | 557.80 € |
| Μέγιστη τιμή | 622.73 € | 876.85 € | 2,097.60 € | 1,221.70 € |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Τα καύσιμα αυτά είναι καταρχάς το Heavy Fuel Oil (HFO) που χρησιμοποιεί το υπάρχον πλοίο για την 7S50ME-C8.2, το Very-Low Sulphur Fuel Oil (VLSFO) που χρησιμοποιεί η μηχανή διπλού καυσίμου για πιλοτικό καύσιμο, το LNG που είναι το κύριο καύσιμο για κύρια μηχανή και ηλεκτρογεννήτριες στα σενάρια 1 και 2, και τέλος το Marine Gas Oil (MGO) που είναι το καύσιμο για τις υπάρχουσες ηλεκτρογεννήτριες. Στο Σχήμα 42 αποτυπώνεται η εξέλιξη των τιμών για τα τρία αυτά χρόνια. Με οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές σημειώνεται το μέσο κόστος για κάθε καύσιμο, για το διάστημα αναφοράς. Παρατηρείται πως οι τιμές έχουν μία συγκεκριμένη συμπεριφορά και εύρος έως και τον Ιούνιο του 2021, όπου αρχίζει μία απότομη αύξηση, ιδίως για το φυσικό αέριο, λόγω της ενεργειακής κρίσης, και αργότερα λόγω του πολέμου στην Ουκρανία. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή δείχνει εκείνο ακριβώς το σημείο όπου παρατηρείται αυτή η απότομη κλιμάκωση. Στο Σχήμα 43 αποτυπώνεται η εξέλιξη των τιμών για το διάστημα έως και τον Ιούνιο του 2021, μαζί με τους αντίστοιχους μέσους όρους. Οι μέσοι όροι, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή, και για τα δύο διαστήματα, αποτυπώνονται στους παρακάτω πίνακες, Πίνακας 23 και Πίνακας 24, αντίστοιχα.



Σχήμα 43: Διάγραμμα εξέλιξης κόστους ανεφοδιασμού καυσίμων [€/mt] στο λιμάνι του Rotterdam για τελευταία 3 χρόνια, έως και πριν την απότομη αύξηση των τιμών

Πίνακας 24: Ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή του κόστους των καυσίμων για το διάστημα αναφοράς, πριν την αύξηση των τιμών

| Καύσιμο | HFO | VLSFO | LNG | MGO |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| Ελάχιστη τιμή | 151.05 € | 199.50 € | 108.59 € | 239.88 € |
| Μέση τιμή | 280.19 € | 392.57 € | 293.58 € | 435.08 € |
| Μέγιστη τιμή | 388.08 € | 519.65 € | 607.05 € | 557.18 € |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Η τιμή που λείπει από την παραπάνω ανάλυση είναι αυτή του bioLNG, και αυτό γιατί δεν είναι ακόμα διαθέσιμο σε ευρεία κλίμακα ώστε να αποτυπώνεται συγκεκριμένο εύρος τιμών, αλλά αντίθετα η τιμή του εξαρτάται από την παραγωγή του κατά περίπτωση. Έτσι γίνεται και η προμήθεια του, κατά περίπτωση, και με ιδιωτικά συμφωνητικά με τους πλοιοκτήτες, ώστε ο παραγωγός να έχει εξασφαλισμένο αγοραστή. Αυτή η πραγματικότητα θα ανατραπεί με την ανάπτυξη του bioLNG σε ευρεία κλίμακα. Για την προσέγγιση του κόστους του bioLNG, ώστε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς, η παρούσα μελέτη βασίστηκε σε σχετικές πηγές της βιβλιογραφίας που εκτιμούν αυτό το κόστος, βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα. Η μελέτη του CE Delft, για λόγο της SEA-LNG LTD [25] κάνει μία σαφή καταγραφή του εύρους του κόστους για το bioLNG, λαμβάνοντας ξεχωριστά το κόστος για την παραγωγή βιομεθανίου μέσω αναερόβιας χώνευσης, υγροποίησης του, μεταφοράς και τέλος της διάθεσης του στη ναυτιλιακή αγορά. Τα κόστη αυτά παρουσιάζονται ως εύρη τιμών στον Πίνακα 25, τόσο για την βραχυπρόθεσμη (2030), όσο και για την μακροπρόθεσμη (2050) εκτίμηση. Είναι προφανές πως το βραχυπρόθεσμο κόστος είναι σχετικά υψηλό, περίπου 2,000 €/mt κατά μέσο όρο. Παρόλα αυτά, φαίνεται πως η τιμή του μπορεί να γίνει αρκετά προσιτή, ιδιαίτερα αν ληφθούν υπόψη οι σημερινές τιμές του LNG, όπως φαίνεται παραπάνω. Παράλληλα, επιμέρους συμβάσεις μεταξύ παραγωγών και αγοραστών μπορεί να προβλέπουν μικρότερες τιμές κατά περίπτωση. Για την μελέτη περίπτωσης και τους υπολογισμούς του κόστους θα χρησιμοποιηθούν οι μέσοι όροι και των δύο περιπτώσεων, βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης εκτίμησης, ενώ για την διερεύνηση της προοπτικής του bioLNG, η μελέτη θα αξιολογήσει ένα εύρος με συνδυασμό των δύο περιπτώσεων.

Πίνακας 25: Περιγραφή κόστους παραγωγής και διάθεσης του bioLNG [25]

| Περιγραφή κόστους | Εκτίμηση 2030 | Εκτίμηση 2030 | Μονάδες |
|---|-------------------|-------------------|------------|
| Κόστος παραγωγής (αναερόβια χώνευση) | 20 – 50 | 15 – 21 | [\$/MMBtu] |
| Κόστος υγροποίησης – παραγωγή LNG | 3 – 5 | 2 – 3 | [\$/MMBtu] |
| Κόστος μεταφοράς | 4 | 2 | [\$/MMBtu] |
| Κόστος προμήθειας (bunkering) | 1 – 4 | 3 | [\$/MMBtu] |
| Συνολικό κόστος (εύρος)¹⁷ | 28 – 63 | 23 – 30 | [\$/MMBtu] |
| | 1,224.9 – 2,755.9 | 1,006.1 – 1,312.4 | [€/mt] |
| Συνολικό κόστος (μέσος όρος) | 1,990.4 | 1,159.3 | [€/mt] |

Τέλος, στο Σχήμα 44 αποτυπώνεται γραφικά η εξέλιξη του κόστους των δικαιωμάτων εκπομπών άνθρακα, από το 2013 έως και σήμερα, βάσει του Ευρωπαϊκού Χρηματιστηρίου Ρύπων – EU Emission Trading System (ETS) [50]. Είναι προφανές πως με την σταδιακή ένταξη βιομηχανιών στο χρηματιστήριο ρύπων, η τιμή των εκπομπών άνθρακα αγγίζει και τον δεκαπλασιασμό κατά τα 10 τελευταία χρόνια. Θεωρείται, λοιπόν, βέβαιο πως η τιμή τους θα συνεχίζει να αυξάνει, ξεπερνώντας τα 180 €/tCO₂ [48], ή ακόμα, όπως εξηγεί η μελέτη του CE Delft [25], για να επιτευχθεί η αποτροπή της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας στον πλανήτη στους 2° C, θα πρέπει να αυξηθεί η τιμή των δικαιωμάτων άνθρακα έως και 400 \$/tCO₂.

¹⁷ Η μετατροπή από MMBtu σε MJ βασίζεται στην σχέση 1 MMBtu = 1055.056 MJ, στη θερμογόνο δύναμη του LNG, η οποία είναι LCV_{LNG} = 48 MJ/kg, και στην σημερινή ισοτιμία του δολαρίου με το ευρώ, δηλαδή 1\$=0.96€.

EU Carbon Permits (UTC+3)



source: tradingeconomics.com

Σχήμα 44: Εξέλιξη των δικαιωμάτων εκπομπών άνθρακα από το 2013 έως και σήμερα [50]

7.4. Δεδομένα για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου

Ο υπολογισμός των ρύπων συνολικά για τη λειτουργία του πλοίου, με δεδομένο το προφίλ λειτουργίας του, προϋποθέτει τόσο τον υπολογισμό της κατανάλωσης για κάθε καύσιμο που αφορά στη μελέτη, σε κάθε ένα από τα σενάρια της, όσο και τον υπολογισμό του ισοδύναμου σε CO₂ για κάθε ένα από τα καύσιμα. Το ισοδύναμο αυτό υπολογίζεται βάσει των εξισώσεων (1), (2) και ((3), όπως αναλύθηκε παραπάνω, σύμφωνα με τις σχετικές οδηγίες του IMO [41]. Τα επιμέρους στοιχεία για τον υπολογισμό του κάθε ισοδύναμου ξεχωριστά για τις φάσεις WtT και TtW υπολογίζονται βάσει ενδεικτικών τιμών που εμπεριέχονται τόσο στις οδηγίες του IMO που προαναφέρθηκαν, αλλά και σε προϋπάρχουσα σχετική πρόταση της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στα εναλλακτικά ναυτιλιακά καύσιμα [42], η οποία βασίζεται και στη σχετική μελέτη της Sphera [18]. Για την φάση WtT, συντελεστές GHG_{WtT} δίνονται απευθείας για κάθε καύσιμο ξεχωριστά, ενώ για την φάση TtW του κύκλου ζωής των καυσίμων απαιτούνται υπολογισμοί. Τα στοιχεία για τους υπολογισμούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 26, ενώ τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 27 και για τις δύο φάσεις, αλλά και αθροιστικά για όλο τον κύκλο ζωής των καυσίμων.

Ο παράγοντας S_f , για την TtW φάση του κύκλου ζωής, θεωρήθηκε μονάδα για όλα τα καύσιμα πλην του bioLNG, το οποίο είναι ανανεώσιμο καύσιμο, και γι' αυτό το λόγο παίρνει την τιμή μηδέν, βάσει των οδηγιών του IMO [41]. Αυτό έχει ως σκοπό την φαινομενική μείωση των ρύπων για τον πλοιοκτήτη από τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων μικρού ή και μηδενικού άνθρακα. Ωστόσο, για τον υπολογισμό των ρύπων στο σύνολο του κύκλου ζωής, ο παράγοντας S_f παίρνει την τιμή 1, ακόμα και στην περίπτωση του bioLNG, καθώς οι εκπομπές της TtW φάσης αντισταθμίζονται από την WtT φάση.

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Πίνακας 26: Δεδομένα για τον υπολογισμό του ισοδύναμου CO₂ κατά IMO

| Καύσιμα: | HFO | VLSFO | MGO | LNG | bioLNG |
|-------------------------------------|------------|--------------|------------|------------|---------------|
| LCV [MJ/g] | 0.0402 | 0.0412 | 0.0427 | 0.048 | 0.048 |
| C_{fCO₂} | 3.114 | 3.114 | 3.206 | 2.75 | 2.75 |
| C_{fCH₄} | 0.00005 | 0.00005 | 0.00005 | 0 | 0 |
| C_{fN₂O} | 0.00018 | 0.00018 | 0.00018 | 0.00011 | 0.00011 |
| C_{slip} | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.2% | 0.2% |
| S_f | 1 | 1 | 1 | 1 | 0/1 |
| GWP_{CO₂} | 0 | | | | |
| GWP_{CH₄} | 29.8 | | | | 27.5 |
| GWP_{N₂O} | 273 | | | | |
| e_{occs} | 0 | | | | |

Επιπλέον, ο παράγοντας e_{occs}, που αφορά μείωση εκπομπών από αποθήκες CO₂ πάνω στο πλοίο, ή γεωλογική ταφή CO₂, θεωρείται ίσως με μηδέν. Ο παράγοντας C_{slip} (methane slip), ο οποίος θεωρείται κρίσιμος για το LNG, και συνεπώς για το bioLNG αφού έχει τις ίδιες ιδιότητες, προσεγγίζεται και βάσει βιβλιογραφίας ίσως με 0.20%, καθώς πρόκειται για σχετικά καινούργιο πλοίο με αργόστροφη μηχανή.

Πίνακας 27: Υπολογισμός ισοδύναμου CO₂ για κάθε ένα από τα καύσιμα ενδιαφέροντος για κάθε φάση, και συνολικά

| | GHG_{WT} [gCO₂eq/MJ] | GHG_{TtW} [gCO₂eq/MJ] | GHG_{WTW} [gCO₂eq/MJ] |
|---------------|--|---|---|
| HFO | 14.100 | 78.722 | 92.822 |
| VLSFO | 14.000 | 76.811 | 90.811 |
| MGO | 14.900 | 76.268 | 91.168 |
| LNG | 17.700 | 59.043 | 76.743 |
| bioLNG | -38.900 | 1.866 | 20.143 |

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, γίνεται σαφές πως το αποτύπωμα του bioLNG είναι σαφώς μικρότερο από του LNG (και προφανώς των υπολοίπων), περίπου 73%, ενώ παράλληλα, οι εκπομπές από bioLNG βάσει και των οποίων υπολογίζεται το κόστος των δικαιωμάτων άνθρακα που καλείται να επωμισθεί ο πλοιοκτήτης, είναι ελάχιστο σε σχέση με την περίπτωση του LNG.

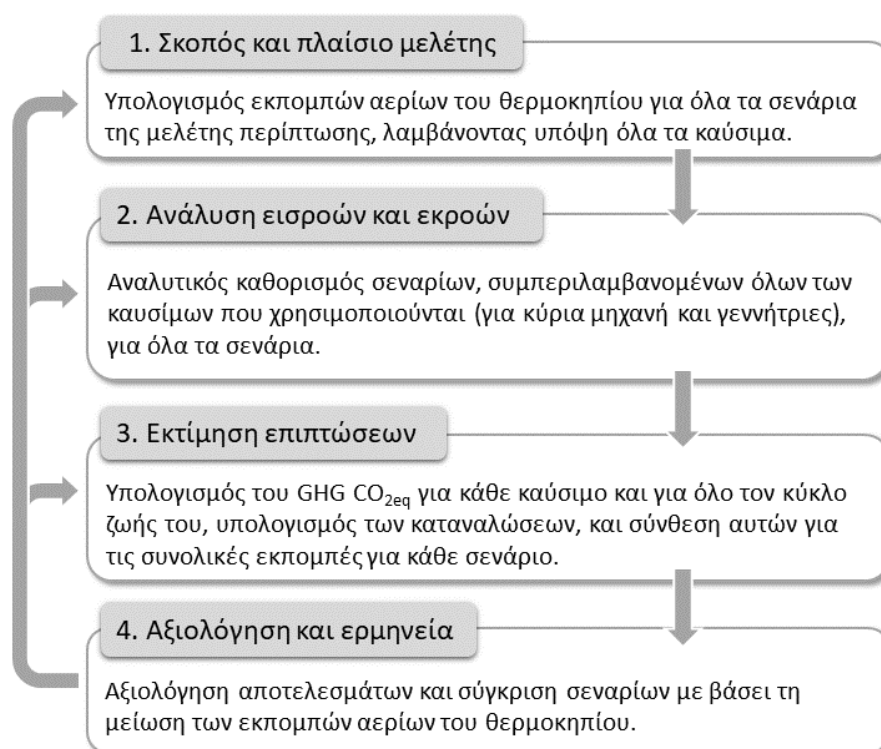
Ο παραπάνω υπολογισμός των εκπομπών άνθρακα, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται βάσει των οδηγιών του IMO. Οι τιμές που έχουν αξιοποιηθεί έχουν αντληθεί από τη βιβλιογραφία, και συγκεκριμένα από τις εν λόγω οδηγίες. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί πως κάθε καύσιμο, ιδιαίτερα όταν η μελέτη εστιάζει στο bioLNG, μπορεί να έχει διαφορετική σύσταση και να χαρακτηρίζεται από διαφορετικές τιμές, πχ. σε ότι αφορά τα ισοδύναμα άνθρακα κατά την παραγωγή του καυσίμου. Για αυτό το λόγο, το κάθε bioLNG καύσιμο που μπορεί να χαρακτηριστεί από καλύτερες τιμές σε ότι αφορά την ποσότητα των ρύπων ανά θερμική μονάδα καυσίμου (μεγαλύτερο αρνητικό αποτύπωμα), είναι δυνατόν να πιστοποιηθεί από τον IMO στον παραγωγό και να χρησιμοποιηθεί από πλοία, επιτυγχάνοντας μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα [41].

8. Υπολογισμοί και αποτελέσματα

Όπως προαναφέρθηκε, η μελέτη περίπτωσης εστιάζει στην ταυτόχρονη εφαρμογή μίας LCA και LCCA προκειμένου να διαπιστωθούν τόσο οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, όσο και το κόστος που συνοδεύει κάθε ένα από τα τρία σενάρια που θεωρεί η μελέτη:

1. Καύσιμο πετρελαίου ως καύσιμο.
2. LNG ως καύσιμο.
3. Μείγμα LNG και bioLNG ως καύσιμο.

Για την LCA, στη βάση του εκάστοτε καυσίμου, διαπιστώθηκαν παραπάνω τα ισοδύναμα CO₂ τόσο για την κάθε φάση του κύκλου ζωής ξεχωριστά, TtW και WtT, όσο και αθροιστικά. Συνεπώς, για να διαπιστωθούν στο σύνολο τους οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε όλο τον κύκλο ζωής του καυσίμου, χρειάζεται ο υπολογισμός της κατανάλωσης για το εκάστοτε καύσιμο σε ετήσια βάση, ανάλογα πάντα με το προφίλ λειτουργίας του πλοίου. Η μεθοδολογία για τον υπολογισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, στη βάση της LCA μεθοδολογίας, όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6, αποτυπώνεται για την περίπτωση μελέτης στο Σχήμα 45. Ορισμένα βήματα που φαίνονται στο σχήμα έχουν προηγηθεί, κυρίως αναφορικά με το σκοπό, το πλαίσιο αλλά και τα δεδομένα για τους υπολογισμούς που ακολουθούν.

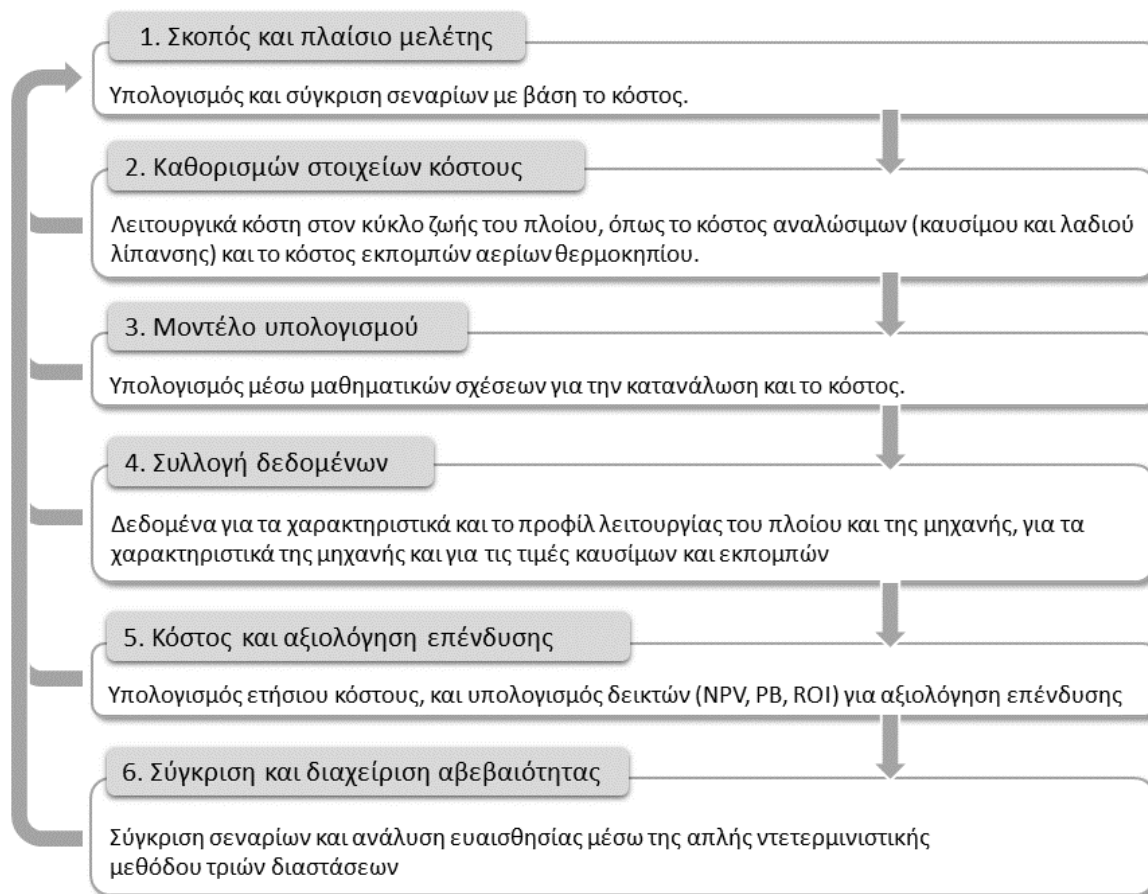


Σχήμα 45: Μεθοδολογία υπολογισμών εκπομπών – Αξιολόγηση κύκλου ζωής (LCA)

Για την LCCA, ως προς αυτόν που λαμβάνει τις αποφάσεις σε σχέση με το καύσιμο που θα χρησιμοποιεί το πλοίο, δηλαδή τον πλοιοκτήτη στην συγκεκριμένη περίπτωση, υπάρχουν τρία βασικά κόστη που πρέπει να ληφθούν υπόψη: το κόστος του καυσίμου και των δικαιωμάτων άνθρακα, ανάλογα με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, και φυσικά το κόστος μίας μετασκευής στην περίπτωση που θα πρέπει να γίνουν αλλαγές για να υποδεχθούν το νέο καύσιμο, όπως στην περίπτωση του LNG. Η σύγκριση όλων των σεναρίων μεταξύ τους σε επίπεδο ρύπων και λειτουργικού κόστους μπορεί να παρέχει σημαντικά συμπεράσματα για την μετέπειτα λήψη

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

αποφάσεων. Αντίθετα, για την αξιολόγηση της επένδυσης σε μία μετασκευή αφορά μόνο τη σύγκριση του 1^{ου} με το 2^ο σενάριο, γι' αυτό και εκεί θα περιοριστεί. Η μεθοδολογία υπολογισμού του κόστους, βάσει της Ανάλυσης Κόστους Κύκλου Ζωής (LCCA/LCC), όπως αυτή περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6, αποτυπώνεται στο Σχήμα 46, με όλα τα βήματα για την τελική σύγκριση και την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Πολλά από τα βήματα που φαίνονται στο σχήμα έχουν προηγηθεί σε προηγούμενη ενότητα, όπως ο σκοπός και το πλαίσιο της μελέτης, τα στοιχεία κόστους και τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν.



Σχήμα 46: Μεθοδολογία υπολογισμών κόστους – Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής (LCCA/LCC)

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα γίνει περιγραφή των υπολογισμών για τις καταναλώσεις, για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και του κόστους, βάσει των παραπάνω LCA και LCCA/LCC, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Όπως φαίνεται ακολούθως, θα γίνει και μία επαλήθευση των υπολογισμών βάσει των καταναλώσεων, όπως αυτές προκύπτουν από τα πραγματικά δεδομένα του πλοίου. Στους υπολογισμούς του κόστους θα συμπεριληφθούν τόσο το λειτουργικό κόστος του πλοίου μεμονωμένα, όσο και συνδυαστικά με μία επένδυση σε κινητήρα και γεννήτριες διπλού καυσίμου. Τέλος, παρουσιάζεται μία ανάλυση ευαισθησίας για να διερευνηθεί η προοπτική του bioLNG, με βάση μεταβλητές που χαρακτηρίζονται από μεγάλη αβεβαιότητα, όπως οι τιμές του ίδιου του bioLNG, του LNG, αλλά και το κόστος των δικαιωμάτων CO₂.

8.1. Υπολογισμός καταναλώσεων και εκπομπών

Το πρώτο βήμα, λοιπόν, και για τις δύο μελέτες, αξιολόγησης εκπομπών και κόστους, αφορά τον υπολογισμό των καταναλώσεων, βάσει του προφίλ λειτουργίας πλοίων και μηχανών. Με δεδομένα τις ώρες λειτουργίας, και την ισχύ με φόρτιση των μηχανών, και συνεπώς των ειδικών καταναλώσεων, είναι δυνατό να υπολογισθούν οι καταναλώσεις βάσει των ακόλουθων εξισώσεων (4) και (5) [43].

$$FC = \sum_{i=1}^N P_i \cdot SFOC_i \cdot H_i \quad (4)$$

$$LOC = \sum_{i=1}^N P_i \cdot SLOC_i \cdot H_i \quad (5)$$

όπου

FC [tons] είναι η ζητούμενη κατανάλωση καυσίμου, για τα καύσιμα που ενδιαφέρου στην μελέτη, i οι διάφορες καταστάσεις φόρτισης της μηχανής, ή των ηλεκτρογεννητριών αντίστοιχα, P_i [kW] η ισχύς στην αντίστοιχα κατάσταση i της μηχανής ή της ηλεκτρογεννήτριας, $SFOC_i$ [g/kWh] η ειδική κατανάλωση καυσίμου σε δεδομένη φόρτιση της μηχανής ή της ηλεκτρογεννήτριας, ανάλογα και με τον τύπο του καυσίμου, $SLOC_i$ [g/kWh] είναι η ειδική κατανάλωση λαδιού σε δεδομένη φόρτιση της μηχανής, H_i [h] οι ετήσιες ώρες λειτουργίας στην κατάσταση φόρτισης i .

Πίνακας 28: Προφίλ λειτουργίας πλοίου και κύριας μηχανής

| Κατάσταση λειτουργίας | Ώρες λειτουργίας [h] | Ώρες λειτουργίας [%] | Ισχύς KM [kW] | Φόρτιση KM [%] |
|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------|
| Κατάσταση πλεύσης 1 | 580 | 6.62% | 650.90 | 6.98% |
| Κατάσταση πλεύσης 2 | 547 | 6.24% | 1,462.66 | 15.68% |
| Κατάσταση πλεύσης 3 | 541 | 6.18% | 2,508.20 | 26.88% |
| Κατάσταση πλεύσης 4 | 605 | 6.91% | 3,467.58 | 37.17% |
| Κατάσταση πλεύσης 5 | 674 | 7.69% | 4,476.87 | 47.98% |
| Κατάσταση πλεύσης 6 | 722 | 8.24% | 5,512.18 | 59.08% |
| Κατάσταση πλεύσης 7 | 685 | 7.82% | 6,489.45 | 69.55% |
| Κατάσταση πλεύσης 8 | 240 | 2.74% | 7,197.68 | 77.15% |
| Κατάσταση ελιγμών 1 | 98 | 1.12% | 714.11 | 7.65% |
| Κατάσταση ελιγμών 2 | 291 | 3.32% | 1,487.13 | 15.94% |
| Κατάσταση ελιγμών 3 | 114 | 1.30% | 2,927.70 | 31.38% |
| Κατάσταση ελιγμών 4 | 98 | 1.12% | 5,000.32 | 53.59% |
| Αγκυροβόλιο | 1,102 | 12.58% | 0.00 | 0.00% |
| Σε λιμάνι | 2,463 | 28.12% | 0.00 | 0.00% |

Το προφίλ λειτουργίας του πλοίων και των μηχανών εξαρτάται από την υπόθεση των συνολικών ωρών λειτουργίας ενός πλοίου μέσα σε ένα έτος. Για την παρούσα μελέτη, γίνεται η υπόθεση για 8,760 ώρες λειτουργίας ετησίως, δηλαδή ολόκληρο το χρόνο. Στον Πίνακας 28 παρουσιάζεται το προφίλ λειτουργίας, βάσει των δεδομένων που αναλύθηκαν στην ενότητα 7.1. Επιπλέον, στον Πίνακας 29 παρουσιάζεται το προφίλ λειτουργίας των γεννητριών, λαμβάνοντας υπόψη τα αντίστοιχα δεδομένα, και με βάση την υπόθεση των ετήσιων ωρών λειτουργίας.

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Πίνακας 29: Προφίλ λειτουργίας ηλεκτρογεννητριών

| Ηλεκτρογεννήτρια | Ώρες λειτουργίας [h] | Ώρες λειτουργίας [%] | Ισχύς [kW] | Φόρτιση [%] |
|------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|----------------|
| <i>DG1</i> | 3,634 | 41.48% | 489.12 | 44.47% |
| <i>DG2</i> | 5,899 | 67.33% | 684.13 | 62.19% |

Ακολουθώς, με βάση τις ειδικές καταναλώσεις που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 30 και Πίνακας 31) μπορούν να υπολογιστούν οι επιμέρους καταναλώσεις για κάθε κατάσταση λειτουργίας, όπου το άθροισμα τους θα δώσει την συνολική ετήσια κατανάλωση για όλα τα σενάρια της μελέτης περίπτωσης. Έτσι, λοιπόν, στον Πίνακας 32 παρουσιάζονται οι επιμέρους καταναλώσεις για την κύρια μηχανή, ανά κατάσταση λειτουργίας, ενώ στον Πίνακας 33 παρουσιάζονται οι επιμέρους καταναλώσεις των δύο ηλεκτρογεννητριών. Τέλος στον Πίνακας 34 φαίνονται οι συνολικές καταναλώσεις ανά σενάριο, ανά καύσιμο. Το τρίτο σενάριο αναλύεται παραπάνω, καθώς υπάρχουν πολλές εναλλακτικές στην ποσότητα του bioLNG που θα αναμιχθεί με το LNG. Συνεπώς, παρουσιάζονται διαφορετικές περιπτώσεις ανάμιξης, ξεκινώντας από το 5% bioLNG ως προς τη συνολική απαίτηση για αέριο καύσιμο (FGC), έως και ενδεικτικά το 50%, συμπεριλαμβάνοντας και το σενάριο της 100% χρήσης του bioLNG, που αποτελεί θεωρητικό σενάριο και μόνο.

Πίνακας 30: Ειδικές καταναλώσεις κύριας μηχανής συναρτήσει της φόρτισης σε κάθε κατάσταση λειτουργίας

| Κατάσταση λειτουργίας | Φόρτιση [%] | SFOC [g/kWh] | SPOC [g/kWh] | SFGC [g/kWh] | SLOC [g/kWh] |
|----------------------------|----------------|-----------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| | | 7S50ME - C8.5 | 7S50ME - C8.5 - GI | | - |
| <i>Κατάσταση πλεύσης 1</i> | 6.98% | 195.14 | 38.22 | 121.47 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση πλεύσης 2</i> | 15.68% | 181.62 | 31.26 | 124.43 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση πλεύσης 3</i> | 26.88% | 173.55 | 22.29 | 128.24 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση πλεύσης 4</i> | 37.17% | 170.04 | 16.09 | 130.64 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση πλεύσης 5</i> | 47.98% | 164.49 | 12.42 | 129.02 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση πλεύσης 6</i> | 59.08% | 160.56 | 10.07 | 127.59 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση πλεύσης 7</i> | 69.55% | 159.47 | 8.56 | 127.38 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση πλεύσης 8</i> | 77.15% | 160.60 | 7.69 | 128.67 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση ελιγμών 1</i> | 7.65% | 194.05 | 37.68 | 121.70 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση ελιγμών 2</i> | 15.94% | 181.36 | 31.05 | 124.52 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση ελιγμών 3</i> | 31.38% | 172.02 | 19.03 | 129.74 | 0.10 |
| <i>Κατάσταση ελιγμών 4</i> | 53.59% | 162.23 | 11.11 | 128.20 | 0.10 |
| <i>Αγκυροβόλιο</i> | 0.00% | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| <i>Σε λιμάνι</i> | 0.00% | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Πίνακας 31: Ειδικές καταναλώσεις ηλεκτρογεννητριών συναρτήσει της φόρτισης τους

| Κατάσταση λειτουργίας | Φόρτιση [%] | SFOC [g/kWh] | SFGC [g/kWh] | SLOC [g/kWh] |
|--------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | 7L23/30H | 7L23/30DF | - |
| <i>D/G 1</i> | 44.47% | 199.62 | 200.08 | 0.80 |
| <i>D/G 2</i> | 62.19% | 190.32 | 254.29 | 0.80 |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Πίνακας 32: Υπολογισμός επιμέρους καταναλώσεων κύριας μηχανής

| Κατάσταση λειτουργίας | FOC | POC | FGC | LOC |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-----------------|-------------|
| | [tons] | [tons] | [tons] | [tons] |
| | 7S50ME - C8.5 | 7S50ME - C8.5 - GI | | - |
| Κατάσταση πλεύσης 1 | 73.67 | 14.43 | 45.86 | 0.04 |
| Κατάσταση πλεύσης 2 | 145.31 | 25.01 | 99.55 | 0.08 |
| Κατάσταση πλεύσης 3 | 235.49 | 30.25 | 174.01 | 0.14 |
| Κατάσταση πλεύσης 4 | 356.73 | 33.76 | 274.07 | 0.21 |
| Κατάσταση πλεύσης 5 | 496.33 | 37.49 | 389.31 | 0.30 |
| Κατάσταση πλεύσης 6 | 638.99 | 40.06 | 507.79 | 0.40 |
| Κατάσταση πλεύσης 7 | 708.90 | 38.06 | 566.25 | 0.44 |
| Κατάσταση πλεύσης 8 | 277.43 | 13.28 | 222.27 | 0.17 |
| Κατάσταση ελιγμών 1 | 13.58 | 2.64 | 8.52 | 0.01 |
| Κατάσταση ελιγμών 2 | 78.48 | 13.44 | 53.89 | 0.04 |
| Κατάσταση ελιγμών 3 | 57.41 | 6.35 | 43.30 | 0.03 |
| Κατάσταση ελιγμών 4 | 79.50 | 5.44 | 62.82 | 0.05 |
| Αγκυροβόλιο | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Σε λιμάνι | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Σύνολο | 3,161.83 | 260.20 | 2,447.65 | 1.91 |

Πίνακας 33: Υπολογισμός επιμέρους καταναλώσεων ηλεκτρογεννητριών

| Κατάσταση λειτουργίας | FOC | FGC | LOC |
|-----------------------|-----------------|---------------|-------------|
| | [tons] | [tons] | [tons] |
| | 7L23/30H | 7L23/30DF | - |
| D/G 1 | 354.81 | 355.63 | 1.42 |
| D/G 2 | 768.03 | 272.42 | 3.23 |
| Σύνολο | 1,122.84 | 628.05 | 4.65 |

Πίνακας 34: Ετήσιες συνολικές καταναλώσεις ανά σενάριο

| Σενάριο | bioLNG [%FGC] | HFO [tons] | VLSFO [tons] | LNG [tons] | bioLNG [tons] | MGO [tons] | LOC [tons] |
|---------|---------------|------------|--------------|------------|---------------|------------|------------|
| #1 | - | 3,161.83 | - | - | - | 1,122.84 | 6.56 |
| #2 | - | - | 260.20 | 2,447.65 | 0 | - | 6.56 |
| #3 | 5% | - | 260.20 | 2,325.27 | 122.3825 | - | 6.56 |
| | 10% | - | 260.20 | 2,202.89 | 244.765 | - | 6.56 |
| | 15% | - | 260.20 | 2,080.50 | 367.1475 | - | 6.56 |
| | 20% | - | 260.20 | 1,958.12 | 489.53 | - | 6.56 |
| | 25% | - | 260.20 | 1,835.74 | 611.9125 | - | 6.56 |
| | 30% | - | 260.20 | 1,713.36 | 734.295 | - | 6.56 |
| | 35% | - | 260.20 | 1,590.97 | 856.6775 | - | 6.56 |
| | 40% | - | 260.20 | 1,468.59 | 979.06 | - | 6.56 |
| | 45% | - | 260.20 | 1,346.21 | 1101.4425 | - | 6.56 |
| | 50% | - | 260.20 | 1,223.83 | 1223.825 | - | 6.56 |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Οι ανωτέρω υπολογισμοί επιβεβαιώνονται από το αποτέλεσμα κατανάλωσης HFO και MGO, αν συγκριθούν με την ετήσια κατανάλωση που παρουσιάστηκε νωρίτερα στην ενότητα 7.1, στον Πίνακα 16. Η κατανάλωση HFO από την κύρια μηχανή, 3,529.95 τόνοι, έχει μία μικρή απόκλιση 9% από την πραγματική, η οποία είναι 3,161.83 τόνοι. Αυτό βέβαια δικαιολογείται αφού η πρώτη αποτελεί θεωρητική τιμή, ενώ στην πράξη, και λόγω μη ιδανικών συνθηκών, η μηχανή παρουσιάζει μεγαλύτερη κατανάλωση. Η κατανάλωση MGO στους υπολογισμούς, 1,122.84 τόνοι, είναι αυξημένη κατά 5.5% σε σχέση με την πραγματική κατανάλωση, 1,060.55 τόνοι, η οποία όμως είναι σε φυσιολογικά πλαίσια. Πιθανότητα αυτή η υπερεκτίμηση να οφείλεται στον υπολογισμό της ισχύος μέσω του απλού μέσου όρου του δείγματος.

Με βάση τις παραπάνω καταναλώσεις, καθώς επίσης και του υπολογισμού για το ισοδύναμο του CO₂ από την ενότητα 7.4, γίνεται ο υπολογισμός των εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου, με χρήση της παρακάτω σχέσης (6). Η εν λόγω σχέση μπορεί να εστιάζει σε όποια από τις τρεις φάσεις, WtT, TtW, WtW. Ενδεικτικά, αποτυπώνεται για τη φάση TtW.

$$emissions_{TtW} = GHG_{TtW} \cdot LCV \cdot cons_{fuel} \quad (6)$$

όπου

$emissions_{TtW}$ είναι οι συνολικές εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου άνθρακα σε τόνους, GHG_{WtW} είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά μονάδα ενέργειας του καυσίμου, LCV είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου και $cons_{fuel}$ η κατανάλωση για κάθε καύσιμο σε τόνους καυσίμου.

Πίνακας 35: Υπολογισμός εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ανά σενάριο

| Σενάριο | bioLNG [%FGC] | WtT [tCO _{2eq}] | TtW [tCO _{2eq}] | WtW [tCO _{2eq}] |
|---------|------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| #1 | - | 2,506.57 | 13,662.67 | 16,169.24 |
| #2 | - | 2,763.19 | 9,540.17 | 12 303.36 |
| | 5% | 2 345.39 | 9,118.10 | 11 885.56 |
| | 10% | 1 927.59 | 8,696.04 | 11 467.75 |
| | 15% | 1 509.79 | 8,273.98 | 11 049.95 |
| | 20% | 1 091.98 | 7,851.92 | 10 632.15 |
| | 25% | 674.18 | 7,429.85 | 10 214.35 |
| #3 | 30% | 256.38 | 7,007.79 | 9 796.54 |
| | 35% | -161.42 | 6,585.73 | 9 378.74 |
| | 40% | -579.23 | 6,163.67 | 8 960.94 |
| | 45% | -997.03 | 5,741.60 | 8 543.14 |
| | 50% | -1 414.83 | 5,319.54 | 8 125.33 |
| | 100% | -5 592.86 | 1,098.92 | 3 947.31 |

Στον Πίνακα 35 υπολογίζονται οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ανά τόνο ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα, βάσει του Πίνακα 27, τόσο για την φάση WtT, όσο και για τη φάση TtW, και άρα των συνολικών ρύπων στον κύκλο ζωής του καυσίμου WtW, για κάθε σενάριο της μελέτης ξεχωριστά. Υπενθυμίζεται ότι ο υπολογισμός για WtW, που αφορά στον κύκλο ζωής του καυσίμου, είναι διαφορετικός από τον υπολογισμό αποκλειστικά της TtW φάσης του κύκλου ζωής, που αφορά στον υπολογισμό των εκπομπών ενός πλοίου, και άρα των δικαιωμάτων άνθρακα που καλείται να επωμισθεί. Στη μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο μεν υπολογισμός του WtW εξυπηρετεί στον υπολογισμό των εκπομπών σε όλο τον κύκλο ζωής του καυσίμου, ώστε να

καταστεί σαφές τι ποια είναι η πραγματική έκλυση ρύπων σε κάθε σενάριο, ενώ ο δε υπολογισμός του TtW εξυπηρετεί στον υπολογισμό των εκπομπών που αναλογούν σε πλοίο και πλοιοκτήτη, ώστε να υπολογισθούν το κόστος των δικαιωμάτων άνθρακα που καλούνται να επωμισθούν.

Είναι προφανές πως όσο περισσότερο χρησιμοποιείται το bioLNG, τόσο περισσότερο μειώνονται οι ρύποι και για τον πλοιοκτήτη (TtW φάση του κύκλου ζωής), αλλά και συνολικά στον κύκλο ζωής του καυσίμου (WtW) όπου το αρνητικό αποτύπωμα της WtT φάσης συνεισφέρει στο συνολικό μειωμένο αποτύπωμα άνθρακα.

8.2. Υπολογισμός κόστους

Με δεδομένα τις καταναλώσεις και το σύνολο των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου, βάσει των δεδομένων για το κόστος των καυσίμων και των δικαιωμάτων άνθρακα, μπορούν να γίνουν οι υπολογισμοί για το συνολικό κόστος και την ανάλυση του. Το συνολικό κόστος ανά σενάριο υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση (7).

$$C_O = \left(C_{FCM/E} + C_{FCD/Gs} + C_{LOCM/E \& D/Gs} \right) + C_{emissions} \quad (7)$$

όπου

$C_{FCM/E}$ είναι το κόστος του καυσίμου της κύριας μηχανής,

$C_{FCD/Gs}$ είναι το κόστος του καυσίμου των ηλεκτρογεννητριών,

$C_{LOCM/E \& D/Gs}$ είναι το κόστος του λαδιού για κύρια μηχανή και ηλεκτρογεννήτριες,

$C_{emissions}$ είναι το κόστος των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω δικαιωμάτων άνθρακα.

Είτε πρόκειται για καύσιμο, είτε για λάδι λίπανση, ο υπολογισμός γίνεται απευθείας, πολλαπλασιάζοντας την κατανάλωση με την τιμή του αντίστοιχου καυσίμου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση (8) για τον υπολογισμό του κόστους καυσίμου. Αντίστοιχα, με δεδομένες τις εκπομπές ισοδύναμου CO₂ για κάθε σενάριο, όπως φαίνεται στον Πίνακα 35, το κόστος υπολογίζεται απευθείας, πολλαπλασιάζοντας με την τιμή των δικαιωμάτων ανά τόνο CO_{2eq} και το ποσοστό των εκπομπών που υπόκειται σε αγορά δικαιωμάτων, σύμφωνα με την εξίσωση (9). Με βάση την πρόσφατη απόφαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης που συμπεριλαμβάνει τη ναυτιλία στο χρηματιστήριο εκπομπών άνθρακα, το ποσοστό συνυπολογισμού θα αφορά το 100% μετά την τετραετία προσαρμογής, γι' αυτό και στην παρούσα μελέτη, στους υπολογισμούς λαμβάνεται ως 100%, θεωρώντας το σύνολο των εκπομπών στην αγορά δικαιωμάτων.

$$C_{LOC} = e_{LOC} \cdot LOC \quad (8)$$

$$C_{emissions} = e_{CO_{2eq}} \cdot ETS \% \cdot WtT \quad (9)$$

Για αυτούς τους πρώτους υπολογισμούς του κόστους, έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

- Έχει θεωρηθεί σταθερό ποσοστό ανάμιξης του LNG με bioLNG στο 10%.
- Έχουν θεωρηθεί δύο περιπτώσεις για την τιμή του bioLNG στο μέσο του εύρους της βραχυπρόθεσμης και της μακροπρόθεσμης εκτίμησης, όπως φαίνονται στον Πίνακα 25.

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις και τις παραδοχές, υλοποιούνται οι υπολογισμοί του κόστους, καταρχάς για ολόκληρη την περίοδο αναφοράς, όπως φαίνεται στον Πίνακα 36 και στον Πίνακα 37. Στους πίνακες είναι εμφανές το κέρδος που υπάρχει στον πλοιοκτήτη με την επιλογή

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

του LNG ετησίως έναντι του συμβατικού HFO καυσίμου, έως και την έναρξη της ενεργειακής κρίσης και της εκτόξευσης της τιμής του LNG, περίπου τον Ιούνιο του 2021, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Αντίστοιχα, κέρδος υπάρχει και με την χρήση του bioLNG έναντι του συμβατικού HFO στην περίοδο πριν την ενεργειακή κρίση, σημαντικά χαμηλότερο όμως σε σχέση με την περίπτωση αποκλειστικά του LNG. Αυτό φυσικά οφείλεται στην σχετικά υψηλή τιμή που του bioLNG σε σχέση με την προ κρίσης τιμή του LNG, το οποίο παρά την μείωση που υπάρχει στο κόστος των εκπομπών για τον πλοιοκτήτη, έχει πολύ μεγάλη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα.

Πίνακας 36: Υπολογισμός συνολικού κόστους ανά μήνα, συμπεριλαμβανομένων και των δικαιωμάτων άνθρακα, για όλα τα σενάρια της μελέτης, και σύγκριση σεναρίων, για την βραχυπρόθεσμη εκτίμηση της τιμής του bioLNG

| Date | Scenario #1 | Scenario #2 | Scenario #3 | Scenario 2vs1 | Scenario 3vs2 | Scenario 3vs1 |
|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| Jul-19 | 2 140 266.10 € | 1 114 239.51 € | 1 632 558.67 € | -1 026 026.59 € | 518 319.16 € | -507 707.43 € |
| Aug-19 | 1 891 948.94 € | 1 122 698.92 € | 1 639 720.67 € | -769 250.03 € | 517 021.75 € | -252 228.27 € |
| Sep-19 | 1 948 265.81 € | 1 050 031.43 € | 1 574 172.73 € | -898 234.37 € | 524 141.30 € | -374 093.08 € |
| Oct-19 | 1 822 277.90 € | 1 208 042.75 € | 1 716 233.95 € | -614 235.15 € | 508 191.20 € | -106 043.95 € |
| Nov-19 | 1 713 270.47 € | 1 355 424.89 € | 1 848 600.01 € | -357 845.58 € | 493 175.12 € | 135 329.53 € |
| Dec-19 | 1 793 296.76 € | 1 288 144.02 € | 1 789 329.05 € | -505 152.74 € | 501 185.03 € | -3 967.70 € |
| Jan-20 | 1 775 965.23 € | 1 249 586.63 € | 1 753 885.40 € | -526 378.60 € | 504 298.77 € | -22 079.83 € |
| Feb-20 | 1 752 326.42 € | 1 173 536.77 € | 1 683 845.30 € | -578 789.65 € | 510 308.53 € | -68 481.12 € |
| Mar-20 | 1 268 929.34 € | 755 070.17 € | 1 302 164.71 € | -513 859.17 € | 547 094.54 € | 33 235.37 € |
| Apr-20 | 1 042 661.05 € | 801 449.33 € | 1 342 449.09 € | -241 211.72 € | 540 999.76 € | 299 788.04 € |
| May-20 | 1 143 363.05 € | 645 877.98 € | 1 202 999.88 € | -497 485.07 € | 557 121.90 € | 59 636.84 € |
| Jun-20 | 1 451 412.78 € | 655 731.41 € | 1 213 592.02 € | -795 681.37 € | 557 860.61 € | -237 820.77 € |
| Jul-20 | 1 539 336.66 € | 683 476.19 € | 1 239 427.02 € | -855 860.47 € | 555 950.83 € | -299 909.64 € |
| Aug-20 | 1 606 086.56 € | 742 677.09 € | 1 293 127.97 € | -863 409.47 € | 550 450.87 € | -312 958.60 € |
| Sep-20 | 1 564 224.20 € | 984 905.22 € | 1 510 941.15 € | -579 318.98 € | 526 035.93 € | -53 283.06 € |
| Oct-20 | 1 511 018.26 € | 1 110 786.02 € | 1 624 072.32 € | -400 232.24 € | 513 286.30 € | 113 054.06 € |
| Nov-20 | 1 618 310.99 € | 1 381 978.68 € | 1 869 008.98 € | -236 332.31 € | 487 030.30 € | 250 697.99 € |
| Dec-20 | 1 807 180.05 € | 1 531 415.75 € | 2 004 717.89 € | -275 764.30 € | 473 302.14 € | 197 537.84 € |
| Jan-21 | 1 935 945.32 € | 1 805 602.03 € | 2 252 571.28 € | -130 343.29 € | 446 969.25 € | 316 625.96 € |
| Feb-21 | 2 142 387.74 € | 1 943 781.60 € | 2 378 673.81 € | -198 606.14 € | 434 892.21 € | 236 286.07 € |
| Mar-21 | 2 221 269.98 € | 1 849 059.95 € | 2 293 793.36 € | -372 210.03 € | 444 733.41 € | 72 523.38 € |
| Apr-21 | 2 267 753.53 € | 1 954 936.41 € | 2 389 467.63 € | -312 817.12 € | 434 531.22 € | 121 714.10 € |
| May-21 | 2 411 531.07 € | 2 271 897.94 € | 2 675 841.18 € | -139 633.13 € | 403 943.23 € | 264 310.10 € |
| Jun-21 | 2 610 869.01 € | 2 529 880.08 € | 2 909 448.54 € | -80 988.93 € | 379 568.46 € | 298 579.53 € |
| Jul-21 | 2 638 383.44 € | 2 927 953.82 € | 3 267 965.19 € | 289 570.38 € | 340 011.37 € | 629 581.75 € |
| Aug-21 | 2 591 226.82 € | 3 400 193.84 € | 3 692 377.17 € | 808 967.02 € | 292 183.32 € | 1 101 150.34 € |
| Sep-21 | 2 748 027.48 € | 4 228 342.78 € | 4 438 827.54 € | 1 480 315.31 € | 210 484.76 € | 1 690 800.06 € |
| Oct-21 | 3 002 432.03 € | 5 581 808.78 € | 5 658 507.20 € | 2 579 376.75 € | 76 698.42 € | 2 656 075.17 € |
| Nov-21 | 2 877 211.91 € | 5 221 286.82 € | 5 333 501.24 € | 2 344 074.91 € | 112 214.42 € | 2 456 289.34 € |
| Dec-21 | 2 812 739.94 € | 6 541 166.26 € | 6 521 069.39 € | 3 728 426.32 € | -20 096.87 € | 3 708 329.46 € |
| Jan-22 | 3 124 903.95 € | 5 670 662.06 € | 5 739 895.61 € | 2 545 758.11 € | 69 233.56 € | 2 614 991.67 € |
| Feb-22 | 3 500 882.68 € | 5 518 628.06 € | 5 605 003.68 € | 2 017 745.37 € | 86 375.62 € | 2 104 120.99 € |
| Mar-22 | 4 115 565.72 € | 7 348 521.92 € | 7 256 950.32 € | 3 232 956.19 € | -91 571.59 € | 3 141 384.60 € |
| Apr-22 | 4 160 578.75 € | 6 108 261.58 € | 6 140 884.44 € | 1 947 682.83 € | 32 622.86 € | 1 980 305.69 € |
| May-22 | 4 206 438.02 € | 5 669 694.21 € | 5 744 846.51 € | 1 463 256.20 € | 75 152.29 € | 1 538 408.49 € |
| Jun-22 | 4 472 765.57 € | 5 893 751.69 € | 5 950 227.03 € | 1 420 986.11 € | 56 475.34 € | 1 477 461.46 € |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

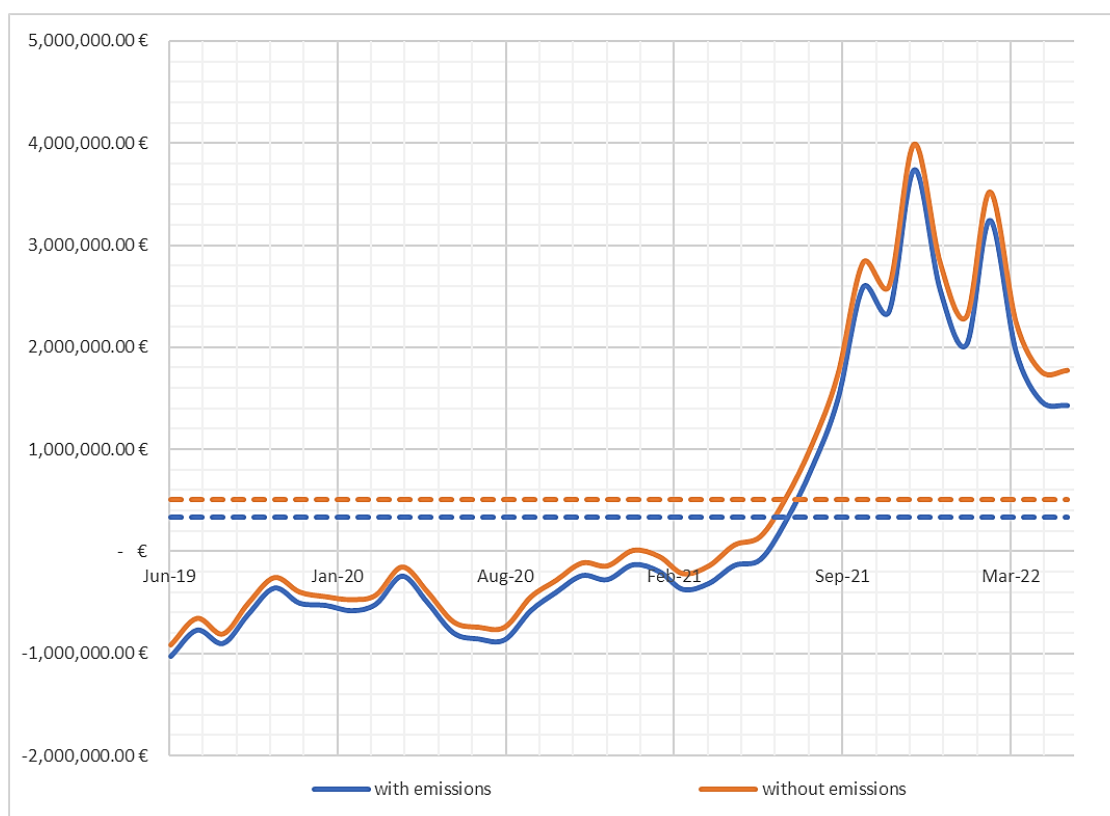
Μεγάλο ενδιαφέρον κρύβει η σύγκριση μεταξύ του 2^{ου} και του 3^{ου} σεναρίου στους τελευταίους μήνες, όπου η τιμή του LNG είναι αρκετά υψηλή, και παρουσιάζεται κέρδος με τη χρήση του bioLNG, ιδιαίτερα στην μακροπρόθεσμη εκτίμηση της τιμής του bioLNG.

Πίνακας 37: Υπολογισμός συνολικού κόστους ανά μήνα, συμπεριλαμβανομένων και των δικαιωμάτων άνθρακα, για όλα τα σεναρία της μελέτης, και σύγκριση σεναρίων, για την μακροπρόθεσμη εκτίμηση της τιμής του bioLNG

| Date | Scenario #1 | Scenario #2 | Scenario #3 | Scenario 2vs1 | Scenario 3vs2 | Scenario 3vs1 |
|--------|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|
| Jul-19 | 2 140 266.10 € | 1 114 239.51 € | 1 376 918.33 € | -1 026 026.59 € | 262 678.82 € | -763 347.77 € |
| Aug-19 | 1 891 948.94 € | 1 122 698.92 € | 1 384 080.33 € | -769 250.03 € | 261 381.41 € | -507 868.61 € |
| Sep-19 | 1 948 265.81 € | 1 050 031.43 € | 1 318 532.39 € | -898 234.37 € | 268 500.95 € | -629 733.42 € |
| Oct-19 | 1 822 277.90 € | 1 208 042.75 € | 1 460 593.61 € | -614 235.15 € | 252 550.86 € | -361 684.29 € |
| Nov-19 | 1 713 270.47 € | 1 355 424.89 € | 1 592 959.67 € | -357 845.58 € | 237 534.78 € | -120 310.81 € |
| Dec-19 | 1 793 296.76 € | 1 288 144.02 € | 1 533 688.71 € | -505 152.74 € | 245 544.69 € | -259 608.05 € |
| Jan-20 | 1 775 965.23 € | 1 249 586.63 € | 1 498 245.06 € | -526 378.60 € | 248 658.43 € | -277 720.17 € |
| Feb-20 | 1 752 326.42 € | 1 173 536.77 € | 1 428 204.96 € | -578 789.65 € | 254 668.19 € | -324 121.46 € |
| Mar-20 | 1 268 929.34 € | 755 070.17 € | 1 046 524.37 € | -513 859.17 € | 291 454.20 € | -222 404.97 € |
| Apr-20 | 1 042 661.05 € | 801 449.33 € | 1 086 808.75 € | -241 211.72 € | 285 359.42 € | 44 147.70 € |
| May-20 | 1 143 363.05 € | 645 877.98 € | 947 359.54 € | -497 485.07 € | 301 481.56 € | -196 003.51 € |
| Jun-20 | 1 451 412.78 € | 655 731.41 € | 957 951.68 € | -795 681.37 € | 302 220.27 € | -493 461.11 € |
| Jul-20 | 1 539 336.66 € | 683 476.19 € | 983 786.68 € | -855 860.47 € | 300 310.49 € | -555 549.98 € |
| Aug-20 | 1 606 086.56 € | 742 677.09 € | 1 037 487.63 € | -863 409.47 € | 294 810.53 € | -568 598.94 € |
| Sep-20 | 1 564 224.20 € | 984 905.22 € | 1 255 300.81 € | -579 318.98 € | 270 395.58 € | -308 923.40 € |
| Oct-20 | 1 511 018.26 € | 1 110 786.02 € | 1 368 431.98 € | -400 232.24 € | 257 645.96 € | -142 586.28 € |
| Nov-20 | 1 618 310.99 € | 1 381 978.68 € | 1 613 368.64 € | -236 332.31 € | 231 389.96 € | -4 942.35 € |
| Dec-20 | 1 807 180.05 € | 1 531 415.75 € | 1 749 077.55 € | -275 764.30 € | 217 661.80 € | -58 102.50 € |
| Jan-21 | 1 935 945.32 € | 1 805 602.03 € | 1 996 930.94 € | -130 343.29 € | 191 328.91 € | 60 985.62 € |
| Feb-21 | 2 142 387.74 € | 1 943 781.60 € | 2 123 033.47 € | -198 606.14 € | 179 251.87 € | -19 354.27 € |
| Mar-21 | 2 221 269.98 € | 1 849 059.95 € | 2 038 153.02 € | -372 210.03 € | 189 093.07 € | -183 116.96 € |
| Apr-21 | 2 267 753.53 € | 1 954 936.41 € | 2 133 827.29 € | -312 817.12 € | 178 890.88 € | -133 926.24 € |
| May-21 | 2 411 531.07 € | 2 271 897.94 € | 2 420 200.83 € | -139 633.13 € | 148 302.89 € | 8 669.76 € |
| Jun-21 | 2 610 869.01 € | 2 529 880.08 € | 2 653 808.20 € | -80 988.93 € | 123 928.12 € | 42 939.19 € |
| Jul-21 | 2 638 383.44 € | 2 927 953.82 € | 3 012 324.85 € | 289 570.38 € | 84 371.03 € | 373 941.41 € |
| Aug-21 | 2 591 226.82 € | 3 400 193.84 € | 3 436 736.82 € | 808 967.02 € | 36 542.98 € | 845 510.00 € |
| Sep-21 | 2 748 027.48 € | 4 228 342.78 € | 4 183 187.20 € | 1 480 315.31 € | -45 155.58 € | 1 435 159.72 € |
| Oct-21 | 3 002 432.03 € | 5 581 808.78 € | 5 402 866.86 € | 2 579 376.75 € | -178 941.92 € | 2 400 434.83 € |
| Nov-21 | 2 877 211.91 € | 5 221 286.82 € | 5 077 860.90 € | 2 344 074.91 € | -143 425.92 € | 2 200 648.99 € |
| Dec-21 | 2 812 739.94 € | 6 541 166.26 € | 6 265 429.05 € | 3 728 426.32 € | -275 737.21 € | 3 452 689.11 € |
| Jan-22 | 3 124 903.95 € | 5 670 662.06 € | 5 484 255.27 € | 2 545 758.11 € | -186 406.79 € | 2 359 351.32 € |
| Feb-22 | 3 500 882.68 € | 5 518 628.06 € | 5 349 363.34 € | 2 017 745.37 € | -169 264.72 € | 1 848 480.65 € |
| Mar-22 | 4 115 565.72 € | 7 348 521.92 € | 7 001 309.98 € | 3 232 956.19 € | -347 211.93 € | 2 885 744.26 € |
| Apr-22 | 4 160 578.75 € | 6 108 261.58 € | 5 885 244.10 € | 1 947 682.83 € | -223 017.48 € | 1 724 665.35 € |
| May-22 | 4 206 438.02 € | 5 669 694.21 € | 5 489 206.16 € | 1 463 256.20 € | -180 488.05 € | 1 282 768.15 € |
| Jun-22 | 4 472 765.57 € | 5 893 751.69 € | 5 694 586.69 € | 1 420 986.11 € | -199 165.00 € | 1 221 821.12 € |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Αναφορικά με την τελευταία παρατήρηση, μπορεί να μην υπάρχει πραγματική αντιστοιχία των δεδομένων, καθώς οι τιμές σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα (2050) για τα συμβατικά καύσιμα δεν μπορούν να εκτιμηθούν, και άρα γίνεται ο υπολογισμός και η σύγκριση με τα έως τώρα δεδομένα. Ωστόσο, είναι μία σημαντική παρατήρηση η οποία μπορεί να δώσει μία αίσθηση της προοπτικής που έχει το bioLNG, ίσως και σε μεγαλύτερες ποσότητες ανάμιξης, να αποτελέσει ουσιαστική λύση στην κατεύθυνση της απανθρακοποίησης. Τέλος, στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 47), αποτυπώνεται η εξέλιξη της διαφοράς μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} σεναρίου, μεταξύ δηλαδή του συμβατικού HFO και της περίπτωσης του LNG, τόσο συνυπολογίζοντας το κόστος των δικαιωμάτων άνθρακα, όσο και χωρίς να συνυπολογίζεται. Είναι σαφής η τεράστια διαφορά που παρατηρείται με την έναρξη της ενεργειακής κρίσης, και γι' αυτό δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.



Σχήμα 47: Χρονική εξέλιξη της διαφοράς κόστους μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} σεναρίου, με και χωρίς το κόστος δικαιωμάτων άνθρακα

Συνεπώς, θεωρώντας την περίοδο και μέχρι πριν την ενεργειακή κρίση, όπως και προηγουμένως, υπολογίσθηκαν οι μέσοι όροι της διαφοράς μεταξύ των τριών σεναρίων για βραχυπρόθεσμο (2030) και μακροπρόθεσμο ορίζοντα (2050):

- Σενάριο 2 έναντι 1 (LNG έναντι HFO): + 490,402.77 € / + 490,402.77 €
- Σενάριο 3 έναντι 1 (LNG + bioLNG έναντι HFO): - 6,697.72 € / + 248,942.62 €
- Σενάριο 3 έναντι 2 (LNG + bioLNG έναντι LNG): - 497,100.49 € / - 241,460.15 €

Γίνεται σαφές πως για τα προ κρίσης επίπεδα η επένδυση στο LNG έναντι του συμβατικού LNG είναι σημαντικά επικερδής. Η χρήση του bioLNG είναι οριακά ζημιογόνα έναντι του HFO στα βραχυπρόθεσμο σενάριο, ενώ στο μακροπρόθεσμο υπάρχει ένα σημαντικό όφελος λόγω της αύξησης των τιμών των καυσίμων. Παράλληλα, αυτή τη στιγμή δεν υπάρχει κάποιο ιδιαίτερο κίνητρο υιοθέτησης του πέραν του περιορισμού των ρύπων σε μεγαλύτερες ποσότητες έναντι του LNG, το οποίο αποτυπώνεται και από τη μεταξύ τους σύγκριση. Η διαφορά δε, μεγαλώνει, όταν

αυξηθεί η ποσότητα μίξης του bioLNG στο LNG, όπως είναι φυσικό, αφού η τιμή του είναι αρκετά υψηλή. Το ζήτημα της σύγκρισης της περίπτωσης του bioLNG και του LNG αναλύεται και σε επόμενη ενότητα, στο πλαίσιο μίας ανάλυσης ευαισθησίας, προκειμένου να διαπιστωθεί η προοπτική του bioLNG έναντι της αποκλειστικής χρήσης του LNG.

8.3. Αξιολόγηση επένδυσης

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας της LCCA, η θεωρηθείσα επένδυση στη μετασκευή του πλοίου της μελέτης περίπτωσης, ώστε αυτό να καίει LNG τόσο για την κύρια μηχανή, όσο και για τις γεννήτριες, θα ποσοτικοποιηθεί και θα αξιολογηθεί βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων αναφορικά με το λειτουργικό κόστος. Προκειμένου για την εν λόγω αξιολόγηση, χρειάζονται οικονομοτεχνικά εργαλεία όπως η Καθαρή Παρούσα Αξία (net present value – NPV), η περίοδος αποπληρωμής (payback time) και η απόδοση της επένδυσης (return of investment – ROI). Η μέθοδος της καθαρής παρούσας αξίας είναι από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους. Εμπεριέχει την έννοια της χρονικής αξίας του χρήματος, και στην πράξη υπολογίζει την παρούσα αξία όλων των μελλοντικών χρηματοροών που αφορούν σε μία επένδυση, ώστε να αξιολογηθεί εν τέλει με όρους παρούσας αξίας. Η εξίσωση (10) περιγράφει τη μεθοδολογία.

$$NPV = \sum_{i=0}^{LS} \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (10)$$

όπου

C_i [€] είναι η μελλοντική χρηματοροή στο χρόνο i ,

r [%] είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο,

LS [έτη] είναι το η διάρκεια ζωής της επένδυσης,

i αναφέρεται στα διαφορετικά έτη της διάρκειας ζωής της επένδυσης.

Πριν τον υπολογισμό, ωστόσο, της καθαρής παρούσας αξίας, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη και ο πληθωρισμός, βάσει του οποίου η χρηματοροή θα αυξηθεί. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (11), υπολογίζονται όλες οι μελλοντικές χρηματοροές, λαμβάνοντας υπόψη τον πληθωρισμό, ώστε έπειτα να υπολογιστεί και η συνολική καθαρή παρούσα αξία.

$$FV_{infl} = FV \cdot (1 + r_{infl})^i \quad (11)$$

όπου

FV_{infl} [€] είναι η μελλοντική χρηματοροή, λαμβάνοντας υπόψη τον πληθωρισμό,

FV [€] είναι η μελλοντική χρηματοροή, δίχως να ληφθεί υπόψη ο πληθωρισμός,

r_{infl} [%] είναι ο ρυθμός πληθωρισμού,

i αναφέρεται στα διαφορετικά έτη της διάρκειας ζωής της επένδυσης.

Επιπλέον κριτήριο, πέραν της καθαρής παρούσας αξίας, για την αξιολόγηση μία επένδυσης, είναι η περίοδος αποπληρωμής, δηλαδή πότε θα γίνει απόσβεση της αρχικής επένδυσης. Η μέθοδος αυτή στην συνολική καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης, προκειμένου να είναι ρεαλιστική, βάσει ρυθμού πληθωρισμού και προεξοφλητικού επιτοκίου. Επίσης, σημαντική είναι και η απόδοση της επένδυσης (ROI), που επίσης βασίζεται στον υπολογισμό της συνολικής καθαρής παρούσας αξίας, δείχνει πόσο καλά αποδίδει μία επένδυση, το τι επιστρέφει, δηλαδή, στον επενδυτή, ενώ υπολογίζεται από την εξίσωση (12).

$$ROI = NPV/C_{investment} \quad (12)$$

όπου $C_{investment}$ το αρχικό κόστος επένδυσης.

Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να γίνει η αξιολόγηση της εν λόγω επένδυσης. Η αρχική επένδυση για την μετασκευή συμπεριλαμβάνει την μετασκευή της κύριας μηχανής και των ηλεκτρογεννητριών σε διπλού καυσίμου, καθώς επίσης και την εγκατάσταση δεξαμενών και όποιου άλλου απαραίτητου εξοπλισμού. Ο υπολογισμός του κόστους μίας τέτοιας επένδυσης προέκυψε από βιβλιογραφικές αναφορές. Συγκεκριμένα, το συμβόλαιο πρόσφατης μετασκευής ενός μεγάλου πλοίου κοντέινερ (15,000 TEU) της γερμανικής εταιρίας Hapag-Lloyd κόστισε μεταξύ \$25 και \$30 εκατομμύρια^{18 19} (χωρίς μετασκευή ηλεκτρογεννητριών). Σύμφωνα με την MAN Energy Solutions [72], ένα πλοίο κοντέινερ αυτού του μεγέθους αντιστοιχεί σε εγκατεστημένη ισχύ περίπου στα 52,500 kW, και συνεπώς, μία αναλογία σε παρόμοιου είδους πλοία, καταλήγει σε ένα κόστος μετασκευής για το πλοίο της παρούσας μελέτης €4.2 με €5.0 εκατομμύρια. Το ύψος του κόστους επιβεβαιώνεται και από μία ακόμα μελέτη της MAN για τα κόστη και τα οφέλη του LNG [16]. Με μία αντίστοιχη αναλογία της ισχύος, υπολογίζεται και το επιπρόσθετο κόστος για τις ηλεκτρογεννήτριες, από 400,000 € έως 500,000 €. Λαμβάνοντας τα άνω όρια, ως κόστος επένδυσης θεωρείται το 6,000,000 €, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 38) που εμπεριέχει τους υπολογισμούς για την αξιολόγηση της επένδυσης. Ως ρυθμός πληθωρισμού και προεξοφλητικό επιτόκιο έχουν ληφθεί ενδεικτικά 3.10% και 1.30% αντίστοιχα, ενώ η διάρκεια ζωής της επένδυσης θεωρείται τα 17 έτη, καθώς το υπό μελέτη πλοίο έχει διανύσει ήδη 8 χρόνια λειτουργίας, και τα 25 έτη θεωρούνται ως το άνω όριο για τη διάρκεια ζωής ενός αντίστοιχου πλοίου.

Πίνακας 38: Αξιολόγηση επένδυσης

| Σενάρια | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Διάρκεια ζωής | 17 έτη | |
| Ρυθμός πληθωρισμού | 3.10% | |
| Προεξοφλητικό επιτόκιο | 1.30% | |
| Κόστος επένδυσης | 0.00 € | 6,000,000.00 € |
| Ετήσιο λειτουργικό κόστος | 1,790,829.05 € | 1,300,426.28 € |
| Καθαρή παρούσα αξία | 35,806,471.65 € | 32,001,184.65 € |
| Σύγκριση σεναρίων | 3,805,287.01 € | |
| Περίοδος αποπληρωμής | περίπου 11 έτη | |
| Απόδοση επένδυσης | 63.4% | |

Όπως φαίνεται και στον πίνακα, το αναμενόμενο όφελος ανέρχεται στα 3,805,287.01 €, με μία απόδοση της επένδυσης στο 63.4%. Η περίοδος αποπληρωμής υπολογίζεται περίπου στα 11 έτη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 48. Αν θεωρήσουμε τα σημερινά δεδομένα για τον πληθωρισμό και το προεξοφλητικό επιτόκιο για τη μελέτη μας, δηλαδή 7.5%²⁰ και 1.5%²¹ αντίστοιχα, τότε το

¹⁸ American Shipper, Hapag-Lloyd to retrofit 15,000-TEU ship for LNG, Φεβρουάριος 2019 –

<https://www.freightwaves.com/news/hapag-lloyd-to-retrofit-15000-teu-ship-for-lng>

¹⁹ Hapag-Lloyd, World's first large container ship converted to LNG to arrive in Hamburg - <https://www.hapag-lloyd.com/en/company/press/releases/2021/06/world-s-first-large-container-ship-converted-to-lng-to-arrive-in.html>

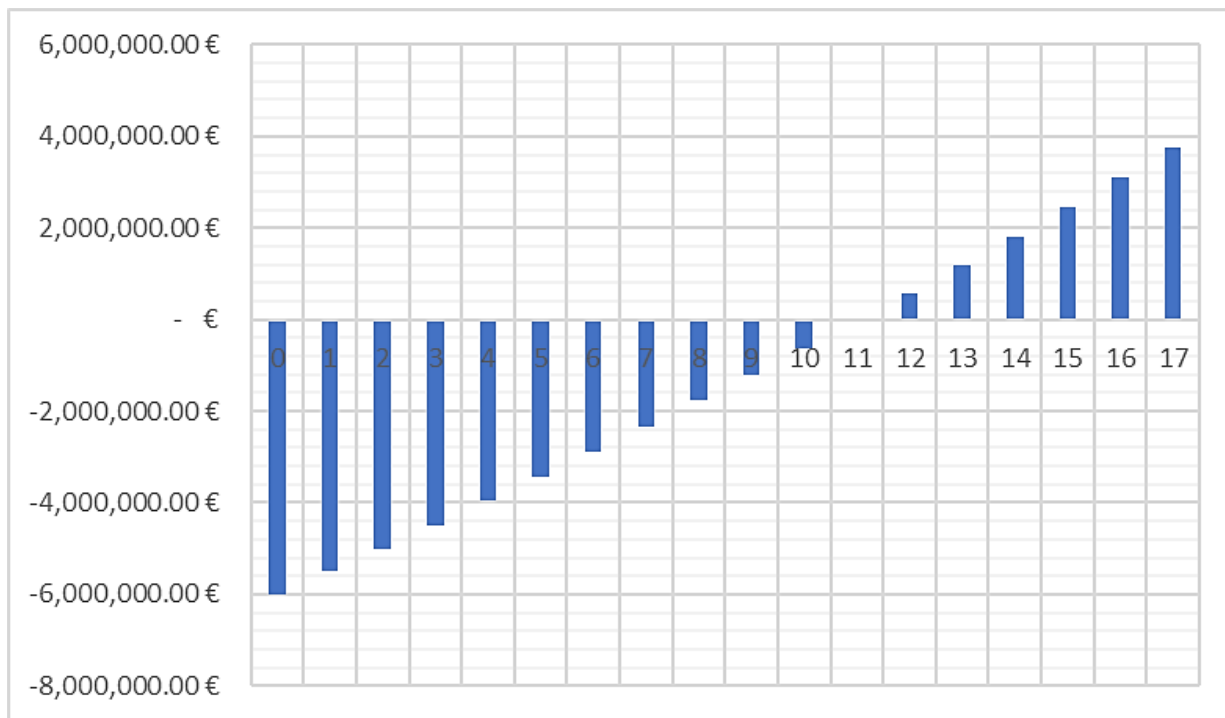
²⁰ Πού οδεύει ο παγκόσμιος πληθωρισμός;, Ιούνιος 2022 – <https://www.liberal.gr/think-tanks/pou-odeuei-o-pagkosmios-plithorismos/452980>

²¹ Euro area bank interest rate statistics, March 2022 –

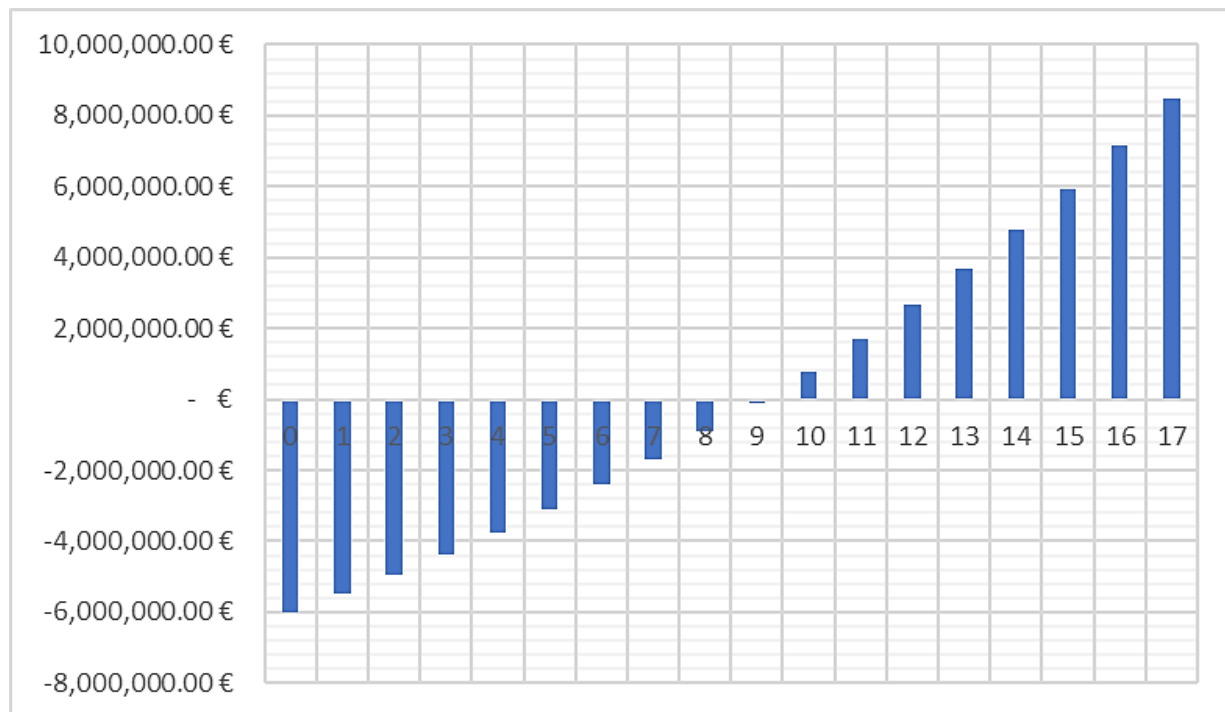
<https://www.ecb.europa.eu/press/pr/stats/mfi/html/ecb.mir2203~7b0b861feb.en.html>

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

αναμενόμενο όφελος σε καθαρή παρούσα αξία είναι 8,539,135.28 €, η απόδοση της επένδυσης είναι στο 142.3%, ενώ η περίοδος αποπληρωμής είναι περίπου τα 9 έτη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 49.



Σχήμα 48: Εξέλιξη επένδυσης και αξιολόγηση, με πληθωρισμό στο 3.1% και επιτόκιο 1.8%



Σχήμα 49: Εξέλιξη της επένδυσης και αξιολόγηση, με πληθωρισμό στο 7,5 και επιτόκιο στο 1.5%

Παρατηρούμε, λοιπόν, πως μία τέτοια επένδυση είναι θετική με τα δεδομένα της περιόδου έως και πριν την ενεργειακή κρίση. Ωστόσο, με τα σημερινά δεδομένα, δεν ενδείκνυται λόγω της τεράστια αύξησης της τιμής του LNG, ιδιαίτερα για τα λιμάνια της Ευρώπης.

8.4. Ανάλυση ευαισθησίας & προοπτική του bioLNG

Η παραπάνω εκτιμήσεις του κόστους, και ιδιαίτερα αυτές που αφορούν στο bioLNG και τη σύγκριση του με το LNG (σύγκριση σεναρίων 2 και 3), εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες – εισροές στο μοντέλο υπολογισμού. Τέτοιοι παράγοντες είναι η τιμή του LNG, η τιμή του bioLNG, η τιμή των δικαιωμάτων άνθρακα, το ποσοστό των εκπομπών που υπόκειται στην αγορά δικαιωμάτων άνθρακα και το ποσοστό ανάμιξης του LNG με bioLNG. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν διαφορετικά το αποτέλεσμα της σύγκρισης μεταξύ των δύο σεναρίων σε επίπεδο οικονομικό (σε επίπεδο ρύπων, η περίπτωση του bioLNG είναι σαφώς καλύτερη). Για να εκτιμηθεί αυτή η επίδραση των παραγόντων αυτών, καθώς επίσης και για να προσδιοριστεί η προοπτική του bioLNG και με οικονομικούς όρους, παρουσιάζεται παρακάτω μία ανάλυση ευαισθησίας με ορισμένες από τις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Η ανάλυση ευαισθησίας στοχεύει να περιγράψει το πώς και πόσο επηρεάζονται οι εκροές, το αποτέλεσμα, ενός μοντέλου από τις αλλαγές στις εισροές, τα δεδομένα, του μοντέλου [73]. Με άλλα λόγια, είναι η διερεύνηση της σημασίας που αποκτά η αβεβαιότητα στις εισροές του μοντέλου όσον αφορά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων ή τη διαδικασία μοντελοποίησης. Ο τρόπος εφαρμογής αυτής διαφέρει από αντικείμενο σε αντικείμενο και από μελέτη σε μελέτη. Για παράδειγμα, η παραπάνω αλλαγή στους χρηματοοικονομικούς δείκτες του πληθωρισμού και του επιτοκίου, αποτελεί κλασσική εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας, όπου δίνει διαφορετικές εκροές, συνήθως κάποιο κριτήριο απόδοσης (της επένδυσης σε αυτή την περίπτωση), για διαφορετικές εισροές. Αυτή η περίπτωση, η οποία και θα εφαρμοστεί παρακάτω, αναφέρεται ως απλή ντετερμινιστική ανάλυση ευαισθησίας (simple deterministic sensitivity analysis). Υπάρχουν κι άλλες προσεγγίσεις όπως η first-order sensitivity analysis, η fractional factorial design method, ή η πιο γνωστή Monte Carlo sampling method, η ανάλυση και η εφαρμογή των οποίων ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το αποτέλεσμα, η εκροή του μοντέλου για τη μελέτη ευαισθησίας, είναι η ζημία ή το κέρδος από την υιοθέτηση του bioLNG. Οι παράγοντες οι οποίου θα θεωρηθούν ως μεταβλητές εισροές στην ανάλυση ευαισθησίας είναι οι παρακάτω. Δεν συμπεριλαμβάνονται το ποσοστό των εκπομπών που υπόκειται στην αγορά δικαιωμάτων (θεωρείται στο 100% στο πλαίσιο της μελέτης όπως προαναφέρθηκε), και το ποσοστό ανάμιξης του LNG με bioLNG, το οποίο διατηρείται σταθερό στο 10%.

- Τιμή του bioLNG [€/mt καυσίμου]
- Τιμή των δικαιωμάτων άνθρακα [€/mt CO_{2eq}]
- Τιμή του LNG [€/mt καυσίμου]

Πίνακας 39: Εισροές στην ανάλυση ευαισθησίας

| Εισροές στην ανάλυση ευαισθησίας | Εύρος τιμών |
|--|---------------|
| Τιμή του bioLNG [€/mt καυσίμου] | 1,000 – 2,000 |
| Τιμή των δικαιωμάτων άνθρακα [€/mt CO _{2eq}] | 80 – 400 |
| Τιμή του LNG [€/mt καυσίμου] | 200 – 1,600 |

Το εύρος των παραπάνω εισροών καθορίζεται σε γενικές γραμμές από τις αναλύσεις των προηγούμενων κεφαλαίων. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή του bioLNG, βάσει του Πίνακα 25, έχει ένα εύρος 1,000 έως 2,700 €/mt περίπου. Καθώς, όμως, οι τιμές άνω των 2,000 €/mt καθιστούν απαγορευτική την υιοθέτηση του bioLNG στο μέλλον, όπως φαίνεται και από τις συγκρίσεις των σεναρίων στις προηγούμενες ενότητες, το εύρος που εισάγεται στη μελέτη ευαισθησίας είναι έως

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

2,000 €/mt. Για την τιμή των δικαιωμάτων άνθρακα, βάσει της ενότητας 7.3, θα θεωρηθεί ένα εύρος από τα 80 έως και τα 400 €/mt CO_{2eq}, καθώς υπολογίζεται ότι μπορεί να αυξηθεί αρκετά η τιμή τους, βάσει όσων αναφέρθηκαν στην ενότητα 7.3. Τέλος, η τιμή του LNG θα έχει εύρος από 200 έως και 1,600 €/mt, όπως προκύπτει από την ενότητα 7.3 και την ανάλυση των δεδομένων. Πρόκειται άρα για μία ανάλυση ευαισθησίας τριών διαστάσεων, όπου τα παραπάνω εύρη συνοψίζονται στον Πίνακα 39. Η σχέση για την ανάλυση ευαισθησίας, που περιλαμβάνει τις τρεις μεταβλητές, προκύπτει από τις εξισώσεις (4), (5), (6), (7), (8) και (9), και είναι η παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 C_{SA} &= C_{scenario3} - C_{scenario2} = \\
 &= (C_{FO} + C_{LO} + C_{emissions})_{scenario3} - (C_{FO} + C_{LO} + C_{emissions})_{scenario2} = \\
 &= (cons_{LNG} \cdot cost_{LNG} + cons_{bioLNG} \cdot cost_{bioLNG} + e_{total} \cdot cost_{carbon})_{scenario3} \\
 &- (cons_{LNG} \cdot cost_{LNG} + e_{total} \cdot cost_{carbon})_{scenario2}
 \end{aligned}$$

Πίνακας 40: Αποτέλεσμα ανάλυσης ευαισθησίας για τιμή του LNG στα 400 €/mt, για 10% πρόσμιξης bioLNG

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | | |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 | |
| 400 | 1000 | - 117 011.76 € | - 83 246.77 € | - 49 481.79 € | - 15 716.80 € | 18 048.18 € | 51 813.17 € | 85 578.15 € | 119 343.14 € | 153 108.12 € |
| | 1050 | - 132 390.24 € | - 98 625.25 € | - 64 860.27 € | - 31 095.28 € | 2 669.70 € | 36 434.69 € | 70 199.67 € | 103 964.66 € | 137 729.65 € |
| | 1100 | - 147 768.72 € | - 114 003.73 € | - 80 238.74 € | - 46 473.76 € | - 12 708.77 € | 21 056.21 € | 54 821.20 € | 88 586.18 € | 122 351.17 € |
| | 1150 | - 163 147.19 € | - 129 382.21 € | - 95 617.22 € | - 61 852.24 € | - 28 087.25 € | 5 677.73 € | 39 442.72 € | 73 207.70 € | 106 972.69 € |
| | 1200 | - 178 525.67 € | - 144 760.69 € | - 110 995.70 € | - 77 230.71 € | - 43 465.73 € | 9 700.74 € | 24 064.24 € | 57 829.23 € | 91 594.21 € |
| | 1250 | - 193 904.15 € | - 160 139.16 € | - 126 374.18 € | - 92 609.19 € | - 58 844.21 € | 25 079.22 € | 8 685.76 € | 42 450.75 € | 76 215.73 € |
| | 1300 | - 209 282.63 € | - 175 517.64 € | - 141 752.66 € | - 107 987.67 € | - 74 222.68 € | 40 457.70 € | 6 692.71 € | 27 072.27 € | 60 837.26 € |
| | 1350 | - 224 661.10 € | - 190 896.12 € | - 157 131.13 € | - 123 366.15 € | - 89 601.16 € | 55 836.18 € | 22 071.19 € | 11 693.79 € | 45 458.78 € |
| | 1400 | - 240 039.58 € | - 206 274.60 € | - 172 509.61 € | - 138 744.62 € | - 104 979.64 € | 71 214.65 € | 37 449.67 € | 3 684.68 € | 30 080.30 € |
| | 1450 | - 255 418.06 € | - 221 653.07 € | - 187 888.09 € | - 154 123.10 € | - 120 358.12 € | 86 593.13 € | 52 828.15 € | - 19 063.16 € | 14 701.82 € |
| | 1500 | - 270 796.54 € | - 237 031.55 € | - 203 266.57 € | - 169 501.58 € | - 135 736.59 € | 101 971.61 € | 68 206.62 € | 34 441.64 € | 676.65 € |
| | 1550 | - 286 175.01 € | - 252 410.03 € | - 218 645.04 € | - 184 880.06 € | - 151 115.07 € | 117 350.09 € | 83 585.10 € | 49 820.12 € | 16 055.13 € |
| | 1600 | - 301 553.49 € | - 267 788.51 € | - 234 023.52 € | - 200 258.54 € | - 166 493.55 € | 132 728.56 € | 98 963.58 € | 65 198.59 € | 31 433.61 € |
| | 1650 | - 316 931.97 € | - 283 166.98 € | - 249 402.00 € | - 215 637.01 € | - 181 872.03 € | 148 107.04 € | 114 342.06 € | 80 577.07 € | 46 812.09 € |
| | 1700 | - 332 310.45 € | - 298 545.46 € | - 264 780.48 € | - 231 015.49 € | - 197 250.51 € | 163 485.52 € | 129 720.53 € | 95 955.55 € | 62 190.56 € |
| | 1750 | - 347 688.92 € | - 313 923.94 € | - 280 158.95 € | - 246 393.97 € | - 212 628.98 € | 178 864.00 € | 145 099.01 € | 111 334.03 € | 77 569.04 € |
| | 1800 | - 363 067.40 € | - 329 302.42 € | - 295 537.43 € | - 261 772.45 € | - 228 007.46 € | 194 242.47 € | 160 477.49 € | 126 712.50 € | 92 947.52 € |
| | 1850 | - 378 445.88 € | - 344 680.89 € | - 310 915.91 € | - 277 150.92 € | - 243 385.94 € | 209 620.95 € | 175 855.97 € | 142 090.98 € | 108 326.00 € |
| | 1900 | - 393 824.36 € | - 360 059.37 € | - 326 294.39 € | - 292 529.40 € | - 258 764.42 € | 224 999.43 € | 191 234.44 € | 157 469.46 € | 123 704.47 € |
| | 1950 | - 409 202.83 € | - 375 437.85 € | - 341 672.86 € | - 307 907.88 € | - 274 142.89 € | 240 377.91 € | 206 612.92 € | 172 847.94 € | 139 082.95 € |
| | 2000 | - 424 581.31 € | - 390 816.33 € | - 357 051.34 € | - 323 286.36 € | - 289 521.37 € | 255 756.39 € | 221 991.40 € | 188 226.41 € | 154 461.43 € |

Πίνακας 41: Αποτέλεσμα ανάλυσης ευαισθησίας για τιμή του LNG στα 1400 €/mt, για 10% πρόσμιξης bioLNG

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | | |
|------|----------------|----------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 | |
| 1400 | 1000 | 190 557.79 € | 224 322.78 € | 258 087.76 € | 291 852.75 € | 325 617.73 € | 359 382.72 € | 393 147.70 € | 426 912.69 € | 460 677.68 € |
| | 1050 | 175 179.31 € | 208 944.30 € | 242 709.28 € | 276 474.27 € | 310 239.26 € | 344 004.24 € | 377 769.23 € | 411 534.21 € | 445 299.20 € |
| | 1100 | 159 800.84 € | 193 565.82 € | 227 330.81 € | 261 095.79 € | 294 860.78 € | 328 625.76 € | 362 390.75 € | 396 155.73 € | 429 920.72 € |
| | 1150 | 144 422.36 € | 178 187.34 € | 211 952.33 € | 245 717.32 € | 279 482.30 € | 313 247.29 € | 347 012.27 € | 380 777.26 € | 414 542.24 € |
| | 1200 | 129 043.88 € | 162 808.87 € | 196 573.85 € | 230 338.84 € | 264 103.82 € | 297 868.81 € | 331 633.79 € | 365 398.78 € | 399 163.76 € |
| | 1250 | 113 665.40 € | 147 430.39 € | 181 195.37 € | 214 960.36 € | 248 725.35 € | 282 490.33 € | 316 255.32 € | 350 020.30 € | 383 785.29 € |
| | 1300 | 98 286.93 € | 132 051.91 € | 165 816.90 € | 199 581.88 € | 233 346.87 € | 267 111.85 € | 300 876.84 € | 334 641.82 € | 368 406.81 € |
| | 1350 | 82 908.45 € | 116 673.43 € | 150 438.42 € | 184 203.40 € | 217 968.39 € | 251 733.38 € | 285 498.36 € | 319 263.35 € | 353 028.33 € |
| | 1400 | 67 529.97 € | 101 294.96 € | 135 059.94 € | 168 824.93 € | 202 589.91 € | 236 354.90 € | 270 119.88 € | 303 884.87 € | 337 649.85 € |
| | 1450 | 52 151.49 € | 85 916.48 € | 119 681.46 € | 153 446.45 € | 187 211.43 € | 220 976.42 € | 254 741.41 € | 288 506.39 € | 322 271.38 € |
| | 1500 | 36 773.02 € | 70 538.00 € | 104 302.99 € | 138 067.97 € | 171 832.96 € | 205 597.94 € | 239 362.93 € | 273 127.91 € | 306 892.90 € |
| | 1550 | 21 394.54 € | 55 159.52 € | 88 924.51 € | 122 689.49 € | 156 454.48 € | 190 219.47 € | 223 984.45 € | 257 749.44 € | 291 514.42 € |
| | 1600 | 6 016.06 € | 39 781.05 € | 73 546.03 € | 107 311.02 € | 141 076.00 € | 174 840.99 € | 208 605.97 € | 242 370.96 € | 276 135.94 € |
| | 1650 | - 9 362.42 € | 24 402.57 € | 58 167.55 € | 91 932.54 € | 125 697.52 € | 159 462.51 € | 193 227.50 € | 226 992.48 € | 260 757.47 € |
| | 1700 | - 24 740.89 € | 9 024.09 € | 42 789.08 € | 76 554.06 € | 110 319.05 € | 144 084.03 € | 177 849.02 € | 211 614.00 € | 245 378.99 € |
| | 1750 | - 40 119.37 € | 6 354.39 € | 27 410.60 € | 61 175.58 € | 94 940.57 € | 128 705.55 € | 162 470.54 € | 196 235.53 € | 230 000.51 € |
| | 1800 | - 55 497.85 € | 21 732.86 € | 12 032.12 € | 45 797.11 € | 79 562.09 € | 113 327.08 € | 147 092.06 € | 180 857.05 € | 214 622.03 € |
| | 1850 | - 70 876.33 € | 37 111.34 € | 3 346.36 € | 30 418.63 € | 64 183.61 € | 97 948.60 € | 131 713.58 € | 165 478.57 € | 199 243.56 € |
| | 1900 | - 86 254.81 € | 52 489.82 € | - 18 724.83 € | 15 040.15 € | 48 805.14 € | 82 570.12 € | 116 335.11 € | 150 100.09 € | 183 865.08 € |
| | 1950 | - 101 633.28 € | 67 868.30 € | - 34 103.31 € | 338.33 € | 33 426.66 € | 67 191.64 € | 100 956.63 € | 134 721.62 € | 168 486.60 € |
| | 2000 | - 117 011.76 € | 83 246.77 € | - 49 481.79 € | - 15 716.80 € | 18 048.18 € | 51 813.17 € | 85 578.15 € | 119 343.14 € | 153 108.12 € |

Από την παραπάνω σχέση απαλείφονται οι όροι που είναι ίδιοι (π.χ., η κατανάλωση και το κόστους του λαδιού λίπανσης, ή η κατανάλωση και το κόστους του πιλοτικού καυσίμου), και παραμένουν μόνο οι όροι που επηρεάζονται από το σενάριο ή αποτελούν τις μεταβλητές της

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υδροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

ανάλυσης ευαισθησίας. Στους παραπάνω πίνακες (Πίνακας 40 και Πίνακας 41) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τιμή του LNG στα 400 €/mt και 1,400 €/mt αντίστοιχα. Αναλυτικά τα αποτελέσματα για περισσότερες τιμές του LNG, και πιο αναλυτικό εύρος στις άλλες δύο μεταβλητές, παρουσιάζονται στο Παράρτημα. Με πράσινο χρώμα σημειώνονται τα κελιά όπου υπάρχει όφελος από τη χρήση του bioLNG. Υπενθυμίζεται ότι η πρόσμιξη με bioLNG στο υπάρχον LNG, γίνεται κατά 10%, ενώ τα δικαιώματα άνθρακα αφορούν στο 100% των εκπομπών του πλοίου. Για περαιτέρω διερεύνηση, παρουσιάζονται παρακάτω οι αντίστοιχοι πίνακες (Πίνακας 42 και Πίνακας 43) για πρόσμιξη 30%. Παρατηρούνται διαφορετικές τάξεις μεγέθους, αλλά οι το σενάριο του bioLNG έχει όφελος έναντι του σεναρίου του LNG για τις ίδιες περιοχές τιμών. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λόγω της γραμμικότητας που συνδέει τα μεγέθη.

Πίνακας 42: Αποτέλεσμα ανάλυσης ευαισθησίας για τιμή του LNG στα 400 €/mt, για 30% πρόσμιξης bioLNG

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 400 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 | |
| bioLNG | 1000 | 351 035.28 € | 249 740.32 € | 148 445.37 € | 47 150.41 € | 54 144.54 € | 155 439.50 € | 256 734.46 € | 358 029.41 € | 459 324.37 € |
| | 1050 | 397 170.71 € | 295 875.76 € | 194 580.80 € | 93 285.85 € | 8 009.11 € | 109 304.07 € | 210 599.02 € | 311 893.98 € | 413 188.94 € |
| | 1100 | 443 306.15 € | 342 011.19 € | 240 716.23 € | 139 421.28 € | 38 126.32 € | 63 168.63 € | 164 463.59 € | 265 758.55 € | 367 053.50 € |
| | 1150 | 489 441.58 € | 388 146.62 € | 286 851.67 € | 185 556.71 € | 84 261.75 € | 17 033.20 € | 118 328.16 € | 219 623.11 € | 320 918.07 € |
| | 1200 | 535 577.01 € | 434 282.06 € | 332 987.10 € | 231 692.14 € | 130 397.19 € | 29 102.23 € | 72 192.73 € | 173 487.68 € | 274 782.64 € |
| | 1250 | 581 712.45 € | 480 417.49 € | 379 122.53 € | 277 827.58 € | 176 532.62 € | 75 237.66 € | 26 057.29 € | 127 352.25 € | 228 647.20 € |
| | 1300 | 627 847.88 € | 526 552.92 € | 425 257.97 € | 323 963.01 € | 222 668.05 € | 121 373.10 € | 20 078.14 € | 81 216.82 € | 182 511.77 € |
| | 1350 | 673 983.31 € | 572 688.35 € | 471 393.40 € | 370 098.44 € | 268 803.49 € | 167 508.53 € | 66 213.57 € | 35 081.38 € | 136 376.34 € |
| | 1400 | 720 118.74 € | 618 823.79 € | 517 528.83 € | 416 233.87 € | 314 938.92 € | 213 643.96 € | 112 349.01 € | 11 054.05 € | 90 240.91 € |
| | 1450 | 766 254.18 € | 664 959.22 € | 563 664.26 € | 462 369.31 € | 361 074.35 € | 259 779.40 € | 158 484.44 € | 57 189.48 € | 44 105.47 € |
| | 1500 | 812 389.61 € | 711 094.65 € | 609 799.70 € | 508 504.74 € | 407 209.78 € | 305 914.83 € | 204 619.87 € | 103 324.92 € | 2 029.96 € |
| | 1550 | 858 525.04 € | 757 230.09 € | 655 935.13 € | 554 640.17 € | 453 345.22 € | 352 050.26 € | 250 755.30 € | 149 460.35 € | 48 165.39 € |
| | 1600 | 904 660.47 € | 803 365.52 € | 702 070.56 € | 600 775.61 € | 499 480.65 € | 398 185.69 € | 296 890.74 € | 195 595.78 € | 94 300.82 € |
| | 1650 | 950 795.91 € | 849 500.95 € | 748 206.00 € | 646 911.04 € | 545 616.08 € | 444 321.13 € | 343 026.17 € | 241 731.21 € | 140 436.26 € |
| | 1700 | 996 931.34 € | 895 636.38 € | 794 341.43 € | 693 046.47 € | 591 751.52 € | 490 456.56 € | 389 161.60 € | 287 866.65 € | 186 571.69 € |
| | 1750 | 1 043 066.77 € | 941 771.82 € | 840 476.86 € | 739 181.90 € | 637 886.95 € | 536 591.99 € | 435 297.04 € | 334 002.08 € | 232 707.12 € |
| | 1800 | 1 089 202.21 € | 987 907.25 € | 886 612.29 € | 785 317.34 € | 684 022.38 € | 582 727.42 € | 481 432.47 € | 380 137.51 € | 278 842.56 € |
| | 1850 | 1 135 337.64 € | 1 034 042.68 € | 932 747.73 € | 831 452.77 € | 730 157.81 € | 628 862.86 € | 527 567.90 € | 426 272.94 € | 324 977.99 € |
| | 1900 | 1 181 473.07 € | 1 080 178.12 € | 978 883.16 € | 877 588.20 € | 776 293.25 € | 674 998.29 € | 573 703.33 € | 472 408.38 € | 371 113.42 € |
| | 1950 | 1 227 608.50 € | 1 126 313.55 € | 1 025 018.59 € | 923 723.64 € | 822 428.68 € | 721 133.72 € | 619 838.77 € | 518 543.81 € | 417 248.85 € |
| 2000 | 1 273 743.94 € | 1 172 448.98 € | 1 071 154.02 € | 969 859.07 € | 868 564.11 € | 767 269.16 € | 665 974.20 € | 564 679.24 € | 463 384.29 € | |

Πίνακας 43: Αποτέλεσμα ανάλυσης ευαισθησίας για τιμή του LNG στα 1400 €/mt, για 30% πρόσμιξης bioLNG

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | | |
|--------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1400 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 | |
| bioLNG | 1000 | 571 673.38 € | 672 968.33 € | 774 263.29 € | 875 558.24 € | 976 853.20 € | 1 078 148.16 € | 1 179 443.11 € | 1 280 738.07 € | 1 382 033.03 € |
| | 1050 | 525 537.94 € | 626 832.90 € | 728 127.85 € | 829 422.81 € | 930 717.77 € | 1 032 012.72 € | 1 133 307.68 € | 1 234 602.64 € | 1 335 897.59 € |
| | 1100 | 479 402.51 € | 580 697.47 € | 681 992.42 € | 783 287.38 € | 884 582.33 € | 985 877.29 € | 1 087 172.25 € | 1 188 467.20 € | 1 289 762.16 € |
| | 1150 | 433 267.08 € | 534 562.03 € | 635 856.99 € | 737 151.95 € | 838 446.90 € | 939 741.86 € | 1 041 036.81 € | 1 142 331.77 € | 1 243 626.73 € |
| | 1200 | 387 131.64 € | 488 426.60 € | 589 721.56 € | 691 016.51 € | 792 311.47 € | 893 606.43 € | 994 901.38 € | 1 096 196.34 € | 1 197 491.29 € |
| | 1250 | 340 996.21 € | 442 291.17 € | 543 586.12 € | 644 881.08 € | 746 176.04 € | 847 470.99 € | 948 765.95 € | 1 050 060.90 € | 1 151 355.86 € |
| | 1300 | 294 860.78 € | 396 155.73 € | 497 450.69 € | 598 745.65 € | 700 040.60 € | 801 335.56 € | 902 630.52 € | 1 003 925.47 € | 1 105 220.43 € |
| | 1350 | 248 725.35 € | 350 020.30 € | 451 315.26 € | 552 610.21 € | 653 905.17 € | 755 200.13 € | 856 495.08 € | 957 790.04 € | 1 059 085.00 € |
| | 1400 | 202 589.91 € | 303 884.87 € | 405 179.83 € | 506 474.78 € | 607 769.74 € | 709 064.69 € | 810 359.65 € | 911 654.61 € | 1 012 949.56 € |
| | 1450 | 156 454.48 € | 257 749.44 € | 359 044.39 € | 460 339.35 € | 561 634.30 € | 662 929.26 € | 764 224.22 € | 865 519.17 € | 966 814.13 € |
| | 1500 | 110 319.05 € | 211 614.00 € | 312 908.96 € | 414 203.92 € | 515 498.87 € | 616 793.83 € | 718 088.78 € | 819 383.74 € | 920 678.70 € |
| | 1550 | 64 183.61 € | 165 478.57 € | 266 773.53 € | 368 068.48 € | 469 363.44 € | 570 658.40 € | 671 953.35 € | 773 248.31 € | 874 543.26 € |
| | 1600 | 18 048.18 € | 119 343.14 € | 220 638.09 € | 321 933.05 € | 423 228.01 € | 524 522.96 € | 625 817.92 € | 727 112.88 € | 828 407.83 € |
| | 1650 | 28 087.25 € | 73 207.70 € | 174 502.66 € | 275 797.62 € | 377 092.57 € | 478 387.53 € | 579 682.49 € | 680 977.44 € | 782 272.40 € |
| | 1700 | 74 222.68 € | 27 072.27 € | 128 367.23 € | 229 662.18 € | 330 957.14 € | 432 252.10 € | 533 547.05 € | 634 842.01 € | 736 136.97 € |
| | 1750 | 120 358.12 € | 19 063.16 € | 82 231.80 € | 183 526.75 € | 284 821.71 € | 386 116.66 € | 487 411.62 € | 588 706.58 € | 690 001.53 € |
| | 1800 | 166 493.55 € | 65 198.59 € | 36 096.36 € | 137 391.32 € | 238 686.28 € | 339 981.23 € | 441 276.19 € | 542 571.14 € | 643 866.10 € |
| | 1850 | 212 628.98 € | 111 334.03 € | 10 039.07 € | 91 255.89 € | 192 550.84 € | 293 845.80 € | 395 140.75 € | 496 435.71 € | 597 730.67 € |
| | 1900 | 258 764.42 € | 157 469.46 € | 56 174.50 € | 45 120.45 € | 146 415.41 € | 247 710.37 € | 349 005.32 € | 450 300.28 € | 551 595.23 € |
| | 1950 | 304 899.85 € | 203 604.89 € | 102 309.94 € | 1 014.98 € | 100 279.98 € | 201 574.93 € | 302 869.89 € | 404 164.85 € | 505 459.80 € |
| 2000 | 351 035.28 € | 249 740.32 € | 148 445.37 € | 47 150.41 € | 54 144.54 € | 155 439.50 € | 256 734.46 € | 358 029.41 € | 459 324.37 € | |

Είναι σαφές πως για την τιμή του LNG σε προ ενεργειακής κρίσης επίπεδα, χρειάζεται συνδυαστικά να αυξηθεί αρκετά η τιμή των δικαιωμάτων άνθρακα, και να μειωθεί σημαντικά η τιμή του bioLNG, γεγονός που βάζει εμπόδια στην προοπτική του bioLNG. Ωστόσο, στον δεύτερο πίνακα, όπου οι υπολογισμοί γίνονται για τη σημερινή τιμή του LNG, βλέπουμε μία σαφή υπεροχή της περίπτωσης της χρήσης bioLNG, σε μία λογική άνοδο της τιμής των δικαιωμάτων άνθρακα,

και σε ένα εύρος που το bioLNG είναι εφικτό να πωλείται. Συνεπώς, αναλόγως με το πως η αγορά του LNG θα διαμορφωθεί τους επόμενους μήνες και χρόνια, συναρτήσει της εξέλιξης της ναυτιλίας συνολικά λόγω της απανθρακοποίησης, το bioLNG μπορεί να αποτελέσει λύση για τους πλοιοκτήτες, όχι μόνο σε επίπεδο ρύπων, αλλά και σε οικονομικό επίπεδο, έναντι της απλής χρήσης του ορυκτού LNG. Ιδιαίτερα αν υπάρξει σημαντική μείωση του κόστους για να είναι ανταγωνιστικό έναντι του ορυκτού LNG, τότε τα οικονομικά οφέλη μπορεί να είναι μεγάλα.

Αν θεωρήσουμε ως σημείο κλειδί την τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών άνθρακα, η οποία θεωρείται ότι θα παίζει και καίριο ρόλο συνολικά στην απανθρακοποίηση, καθιστώντας σταδιακά τα ορυκτά καύσιμα σαφώς πιο κοστοβόρα από τα εναλλακτικά καύσιμα χαμηλού ή και μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα, τότε μπορούν να βγουν χρήσιμα συμπεράσματα, όπως βγάζει αντίστοιχα και η μελέτη του CE Delft [25]. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω μελέτη αναφέρει πως μία τιμή μεταξύ 50 και 100 €/mt CO_{2eq} σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να καταστήσει ανταγωνιστικό το bioLNG, έστω και σε μικρές ποσότητες. Αυτός ο ισχυρισμός επιβεβαιώνεται από την παρούσα μελέτη, αν και, λόγω της διαφορετικής περιόδου, οι υψηλές τιμές στο LNG, αν υποθέσουμε ότι τιμή του bioLNG μπορεί να κυμανθεί κάτω των 1,600 – 1,700 €/mt, τότε γίνεται πράγματι επικερδής μία αλλαγή στο bioLNG. Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή της σταδιακής πτώσης της τιμής του LNG και στην Ευρώπη και παγκοσμίως σε προ κρίσης επίπεδα, τότε πράγματι χρειάζεται μία σημαντική αύξηση της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπής άνθρακα. Η μελέτη του Delft αναφέρει τα 270 – 290 €/mt CO_{2eq} ως το οριακό σημείο όπου το LNG μπορεί να γίνει όσο ακριβό είναι το bioLNG, ενώ προβλέπει πως η τιμή των 380 €/mt CO_{2eq} θα καταστήσει εφικτούς τους στόχους της απανθρακοποίησης. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται και αυτά από την παρούσα μελέτη, καθώς είναι σαφές από τον Πίνακα 40, που προβλέπει μία αρκετά χαμηλή τιμή για το LNG κοντά στα προ κρίσης επίπεδα, ότι με την τιμή των δικαιωμάτων στα 380 και 400 €/mt CO_{2eq} το bioLNG έχει σαφές οικονομικό όφελος, το οποίο φυσικά θα αυξηθεί σε ένα βαθμό, χωρίς να αλλάζει άρδην η εικόνα της σύγκρισης, αν αυξηθεί το ποσοστό πρόσμιξης του bioLNG στο LNG. Περαιτέρω ανάλυση των συμπερασμάτων γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

9. Συμπεράσματα και επόμενες μελέτες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην περίπτωση του υγροποιημένου βιομεθανίου (bioLNG) ως εναλλακτικό ναυτιλιακό καύσιμο, το οποίο δύναται να συμβάλει στην κατεύθυνση της απανθρακοποίησης, όπως αυτή καθίσταται αναγκαία λόγω της κλιματικής αλλαγής. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζει την υπάρχουσα κατάσταση και την προοπτική του bioLNG από πλευράς των υποδομών, της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που προσφέρεται από τη χρήση του στη βάση μελέτης ολόκληρου του κύκλου ζωής του, και τέλος, από πλευράς κόστους για τον πλοιοκτήτη. Για την υλοποίηση της μελέτης, πέραν της σχετικής βιβλιογραφικής επισκόπησης, χρησιμοποιήθηκαν δύο μεθοδολογίες κύκλου ζωής, μία σειρά πραγματικών δεδομένων από την ναυτιλιακή εταιρία Neptune Lines, καθώς επίσης και εργαλεία για την αξιολόγηση επενδύσεων και διαχείριση της αβεβαιότητας στα αποτελέσματα. Οι μεθοδολογίες κύκλου ζωής αφορούν στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, άρα η γνωστή και ως Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Life-Cycle Assessment – LCA), και στην εκτίμηση του κόστους, άρα η γνωστή Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life-Cycle Cost Analysis / Life-Cycle Costing – LCCA/LCC). Από το σύνολο της μελέτης προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Το bioLNG, όπως και άλλα αντίστοιχα καύσιμα, έχει το προνόμιο πως δεν χρειάζεται επιπλέον υποδομές για την χρήση (καύση) του ή την μεταφορά και διανομή του, καθώς πρόκειται για το ίδιο σχεδόν καύσιμο με το ορυκτό LNG, το οποίο είναι αρκετά ανεπτυγμένο, τόσο στη ναυτιλία, όσο και σε άλλες βιομηχανίες (πχ. αυτοκινητοβιομηχανία). Συνεπώς, όσο αναπτύσσονται οι αντίστοιχες υποδομές για το LNG, το οποίο εν πολλοίς έχει αναδειχθεί στο πρώτο μεταβατικό καύσιμο στην κατεύθυνση προς την πράσινη μετάβαση και την κλιματική ουδετερότητα, το bioLNG θα έχει ολοένα και μεγαλύτερη βάση διείσδυσης στην ναυτιλιακή βιομηχανία.
2. Η παραγωγή του bioLNG κινείται ακόμα σε μικρά επίπεδα σε σχέση με το δυναμικό που μπορεί να αναπτυχθεί. Πρώτη ύλη υπάρχει αρκετή, η οποία όμως δεν αξιοποιείται, καθώς δεν υπάρχουν μονάδες παραγωγής λόγω έλλειψης κινήτρων και εξασφάλιση αγοράς που θα διοχετευθεί το καύσιμο. Συνεπώς, είναι απαραίτητη παροχή χρηματοδοτικών ευκαιριών για την παραγωγή βιομεθανίου. Το τεράστιο όφελος για τους περισσότερους τρόπους παραγωγής είναι το αρνητικό αποτύπωμα άνθρακα που δημιουργείται κατά την παραγωγή του, το οποίο, ωστόσο, θα πρέπει να μεταφραστεί και σε οικονομικό όφελος, ώστε να καταστεί βιώσιμη μία τέτοια επένδυση. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της τιμής των δικαιωμάτων άνθρακα, όπως αναλύεται και σε επόμενα συμπεράσματα.
3. Μελετώντας ολόκληρο τον κύκλο ζωής για κάθε καύσιμο, γίνεται σαφές πως το LNG έχει πράγματι χαμηλότερους ρύπους από τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα, ιδίως από το HFO με το οποίο συγκρίνεται, αλλά με μικρή διαφορά. Αντίθετα, το bioLNG, με βάσει πάντα τις σχετικές οδηγίες του IMO, έχει σαφές μικρότερο αποτύπωμα σε σχέση με το LNG, με μία διαφορά περίπου στο 73%. Αυτό οφείλεται, φυσικά, στον τρόπο παραγωγής του, αφού δεσμεύει ποσότητα άνθρακα που διαφορετικά θα εκλυόταν στο περιβάλλον. Το τελικό αποτύπωμα του bioLNG, αν και αισθητά μικρότερο των υπολοίπων, δεν προσεγγίζει το μηδέν, αφού η καύση του εκλύει συνολικά περισσότερο άνθρακα από όσο δεσμεύει η διαδικασία παραγωγής του.
4. Εστιάζοντας στο λειτουργικό ετήσιο κόστος για το πλοίο της μελέτης περίπτωσης, στο πλαίσιο του κύκλου ζωής του, βγαίνουν σημαντικά συμπεράσματα που απορρέουν από τη σύγκριση των τριών σεναρίων της μελέτης. Καταρχάς, είναι σαφές πως η περίπτωση της χρήσης αποκλειστικά LNG (2^ο σενάριο) υπερτερούσε αισθητά έναντι του συμβατικού HFO

(1^ο σενάριο) πριν την ενεργειακή κρίση. Ωστόσο, από τον Ιούλιο του 2021 και έπειτα, η αισθητή άνοδος της τιμής του LNG καθιστά ζημιογόνα την προτίμηση του έναντι του HFO, αλλά ίσως και άλλων καυσίμων πετρελαίου. Αντίστοιχα, η περίπτωση προσθήκης bioLNG στο μείγμα καυσίμου (3^ο σενάριο), μέχρι ένα ποσοστό πρόσμιξης περίπου 20%, έχει όφελος στην προ κρίσης περίοδο έναντι του συμβατικού HFO, ενώ στην μετέπειτα περίοδο, η κατάσταση αντιστρέφεται. Τέλος, στη σύγκριση μεταξύ της αποκλειστικής χρήσης LNG και της πρόσμιξης του με bioLNG, το δεύτερο υπερτερεί από τον Σεπτέμβρη του 2021 κι έπειτα, όπου η τιμή του LNG ανεβαίνει αρκετά ώστε να ισοσταθμίσει το μεγάλο κόστος του bioLNG.

5. Κατά τη αξιολόγηση κόστους κύκλου ζωής του πλοίου, εστιάζοντας στο λειτουργικό κόστος και στην σχετική επένδυση σε μετασκευή πλοίου που να καίει και LNG καύσιμο, διαπιστώθηκε και εδώ η εναλλαγή από τα προ κρίσης επίπεδα, στα μετά κρίσης επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, η επένδυση είναι συμφέρουσα με τα δεδομένα της περιόδου πριν την ενεργειακή κρίση, ενώ έπειτα, είναι ζημιογόνα. Αυτό, φυσικά, εξηγείται από την τεράστια αύξηση της τιμής του LNG, όπως προαναφέρθηκε. Θυμίζεται πως η αξιολόγηση μίας τέτοιας επένδυσης, και η διερεύνηση των διαφόρων σεναρίων είναι απαραίτητη για την μετάβαση στη χρήση του bioLNG, το οποίο χρησιμοποιεί στο ακέραιο τις υποδομές του LNG, είτε γίνεται λόγος για την εγκατάσταση πρόωσης, είτε για τις ηλεκτρογεννήτριες, είτε για τον εφοδιασμό (bunkering) του καυσίμου.
6. Με τη μελέτη ευαισθησίας εξάγονται πολλαπλά συμπεράσματα που αφορούν στην προοπτική του bioLNG έναντι του LNG. Η εν λόγω σύγκριση είναι μία εκ των πολλών κατά τα τελευταία χρόνια που προσπαθούν να διερευνήσουν τη στροφή σε εναλλακτικά καύσιμα, είτε αυτά αφορούν βιοκαύσιμα, είτε και καύσιμα μηδενικού άνθρακα (π.χ., αμμωνία, υδρογόνο, κλπ.). Ένα από τα πιο ασφαλή συμπεράσματα είναι πως για τιμές του LNG κοντά στα προ κρίσης επίπεδα, το κόστος των δικαιωμάτων άνθρακα πρέπει να αυξηθεί αρκετά ώστε να γίνει ανταγωνιστικό το bioLNG, και μάλιστα με αρκετά μειωμένο κόστος προμήθειας του. Αν, ωστόσο, θεωρήσουμε σημερινές τιμές του LNG, τότε η εικόνα είναι πολύ καλύτερα στη σύγκριση με την περίπτωση του LNG, καθώς ακόμα και με 100 ή 200 €/mt, μπορεί η περίπτωση πρόσμιξης με LNG να είναι αρκετά ωφέλιμη, ιδιαίτερα αν αυξηθεί σε ένα βαθμό το ποσοστό πρόσμιξης.

Η συγκεκριμένη μελέτη, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καλύπτει ένα εύρος ζητημάτων που αφορούν στο υγροποιημένο βιομεθάνιο (bioLNG) και την διερεύνηση του ως ναυτιλιακό καύσιμο. Παράλληλα, λοιπόν, με τα παραπάνω συμπεράσματα, εξάγονται και ορισμένα θέματα τα οποία δεν καλύπτει, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν μελλοντικά αντικείμενο μελέτης και έρευνας, βάσει της παρούσας εργασίας. Αυτά συμπυκνώνονται παρακάτω:

1. Για να υπάρχει ολοκληρωμένη εικόνα στην φάση TtW του κύκλου ζωής, η παρούσα μελέτη υπολογίζει αναλυτικά καταναλώσεις, και εν συνεχεία εκπομπές ρύπων και κόστος. Ωστόσο, η αναλυτική περιγραφή και ο υπολογισμός της WtT φάσης ξεφεύγει από τα όρια της. Ένα αντικείμενο, συνεπώς, θα μπορούσε να αποτελέσει η αναλυτική διερεύνηση του αποτυπώματος της WtT φάσης, με βάση τις διάφορες εναλλακτικές στον τρόπο παραγωγής του βιομεθανίου, ίσως εστιάζοντας σε κάποια μελέτη περίπτωσης (μέρος παραγωγής, διαθεσιμότητα πρώτης ύλης, κλπ). Τα αποτελέσματα θα μπορούσαν, τέλος, να συνδυαστούν με της παρούσας μελέτης, ώστε να διαμορφωθεί μία συνολική εικόνα.

2. Όπως, φυσικά, η παρούσα μελέτη εξετάζει συγκεκριμένα σενάρια συνδυασμού καυσίμων, έτσι, επόμενες μελέτες μπορούν να θεωρήσουν διαφορετικά σενάρια, τα οποία συμπεριλαμβάνουν διαφορετικά εναλλακτικά καύσιμα. Κάτι τέτοιο, πέραν του να αποτελέσει δείγμα γραφής και για υπόλοιπα ναυτιλιακά καύσιμα, εξυπηρετεί και στη μεταξύ τους σύγκριση, στη βάση κάποιας μελέτης περίπτωσης.
3. Η μεγάλη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του κόστους λόγω του μεγάλου εύρους των τιμών μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω, αν υπάρξει μεγαλύτερη διαθεσιμότητα δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, αν η περίοδος των ιστορικών στοιχείων για τις τιμές των καυσίμων ήταν αρκετά μεγαλύτερη ώστε να υπάρχει πλήρης εικόνα 15 και πλέον ετών, τότε, βάσει πιθανοθεωρητικών μοντέλων, θα μπορούσε να γίνει μία πρόβλεψη για το πως θα κινηθούν οι τιμές. Μία τέτοια μελέτη, συνδυαστικά με το εύρος τιμών που η παρούσα εργασία παρουσιάζει, θα έδιναν μία πιο σαφή εικόνα σε ότι αφορά το κόστος.

Βιβλιογραφία

- [1] United Nations, *United Nations Framework Convention on Climate Change*. 1992.
- [2] COP11, *Kyoto Protocol to the UNFCCC*. 1997.
- [3] COP21, *The Paris Agreement*. 2015.
- [4] COP26, *Glasgow Climate Pact*. 2022. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [5] European Council, *The European Green Deal*. 2019.
- [6] Marine Environmental Protection (MEPC) Committee, “MEPC72 - Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.” [Online]. Available: <http://www.imo.org>
- [7] Marine Environmental Protection (MEPC) Committee, *MEPC78 - Reduction of GHG Emissions from Ships - Revision of the Initial IMO GHG Strategy*. International Maritime Organization, 2022.
- [8] International Energy Agency (IEA), “World Energy Outlook 2017,” 2017. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [9] B. Dudley, “BP Energy Outlook 2019,” 2019.
- [10] Royal Dutch Shell, “Shell LNG Outlook 2021,” 2021. [Online]. Available: www.sec.gov
- [11] L. Plante and T. Nace, “Global LNG Terminal Update,” 2021.
- [12] American Bureau of Shipping (ABS), “Sustainability Whitepaper: LNG as a Marine Fuel,” 2020.
- [13] DNV, “LNG as marine fuel,” 2022. <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/index.html> (accessed Jun. 25, 2022).
- [14] J. P. Tuttüren, “LNG containment systems: Finding the way for Type A,” 2019.
- [15] T. Huan, F. Hongjun, L. Wei, and Z. Guoqiang, “Options and Evaluations on Propulsion Systems of LNG Carriers,” in *Propulsion Systems*, IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.82154.
- [16] P. Same, N. Clausen, and M. L. Andersen, “Costs and Benefits of LNG as Ship Fuel for Container Vessels Content,” 2011.
- [17] O. Schinas and M. Butler, “Feasibility and commercial considerations of LNG-fueled ships,” *Ocean Engineering*, vol. 122, pp. 84–96, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2016.04.031.
- [18] O. Schuller, S. Kupferschmid, J. Hengstler, and S. Whitehouse, “2nd Life Cycle GHG Emission Study on the Use of LNG as Marine Fuel (SPHERA),” 2021.
- [19] SEA-LNG, “LNG-A Fuel in Transition,” 2022.
- [20] European Biogas Association (EBA), Gas Infrastructure Europe (GIE), The Natural & bio Gas Vehicle Association (NGVA Europe), and SEA-LNG, “Fuelling clean mobility with bio-LNG: Market developments and policy implications of using bio-LNG in transport,” 2022.

- [21] J. Birman, J. Burdloff, H. de Peufelhous, G. Erbs, M. Feniou, and P.-L. Lucille, “Biomethane: potential and cost in 2050,” 2021.
- [22] International Energy Agency (IEA), “Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth - World Energy Outlook Special Report,” 2020.
- [23] J. Jens, D. Graf, and M. Schimmel, “A Gas for Climate report: Market state and trends in renewable and low-carbon gases in Europe,” Utrecht, 2021.
- [24] EC Innovation Fund, “First bioLNG production plant for marine shipping,” 2021.
- [25] D. Nelissen, J. Faber, R. van der Veen, A. van Grinsven, H. Shanthi, and E. van den Toorn, “Availability and costs of liquefied bio-and synthetic methane: The maritime shipping perspective (CE Delft),” 2020. [Online]. Available: www.cedelft.eu
- [26] F. Rosillo-Calle, P. de Groot, S. L. Hemstock, and J. Woods, “The Biomass Assessment Handbook,” 2007.
- [27] R. W. Nachenius, F. Ronsse, R. H. Venderbosch, and W. Prins, “Biomass Pyrolysis,” in *Advances in Chemical Engineering*, vol. 42, Academic Press, 2013, pp. 75–139. doi: 10.1016/B978-0-12-386505-2.00002-X.
- [28] M. la Villetta, M. Costa, and N. Massarotti, “Modelling approaches to biomass gasification: A review with emphasis on the stoichiometric method,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74. Elsevier Ltd, pp. 71–88, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.02.027.
- [29] A. Wellinger, J. Murphy, and D. Baxter, “The Biogas Handbook,” *The Biogas Handbook*, Jan. 2013, doi: 10.1533/9780857097415.FRONTMATTER.
- [30] J. D. Murphy and T. Thamsiriroj, “Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production,” *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*, pp. 104–130, Jan. 2013, doi: 10.1533/9780857097415.1.104.
- [31] A. Petersson, “Biogas cleaning,” in *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*, Elsevier Inc., 2013, pp. 329–341. doi: 10.1533/9780857097415.3.329.
- [32] T. al Seadi *et al.*, *Biogas handbook*. University of Southern Denmark Esbjerg, 2008.
- [33] I. Angelidaki *et al.*, “Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives,” *Biotechnology Advances*, vol. 36, no. 2. Elsevier Inc., pp. 452–466, Mar. 01, 2018. doi: 10.1016/j.biotechadv.2018.01.011.
- [34] L. A. Pellegrini, G. de Guido, and S. Langé, “Biogas to liquefied biomethane via cryogenic upgrading technologies,” *Renewable Energy*, vol. 124, pp. 75–83, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.RENENE.2017.08.007.
- [35] International Organization for Standardization (ISO), “ISO 14040:2006(en) Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework,” 2006.
- [36] K.-M. Lee and A. Inaba, “Life Cycle Assessment: Best Practices of ISO 14040 Series,” 2004.
- [37] S. Yang, K. Ma, Z. Liu, J. Ren, and Y. Man, “Development and applicability of life cycle impact assessment methodologies,” *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-*

- Making: Methodologies and Case Studies*, pp. 95–124, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-818355-7.00005-1.
- [38] Y. Asiedu and P. Gu, “Product life cycle cost analysis: State of the art review,” *International Journal of Production Research*, vol. 36, no. 4, pp. 883–908, 1998, doi: 10.1080/002075498193444.
- [39] T. E. Swarr *et al.*, “Environmental life-cycle costing: A code of practice,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, no. 5, pp. 389–391, Jun. 2011, doi: 10.1007/s11367-011-0287-5.
- [40] E. Carnevale and L. Lombardi, “Comparison of different possibilities for biogas use by Life Cycle Assessment,” in *Energy Procedia*, Dec. 2015, vol. 81, pp. 215–226. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.088.
- [41] International Maritime Organisation (IMO), “Development of Draft Lifecycle GHG and Carbon Intensity Guidelines for Maritime Fuels (Draft LCA Guidelines) - ISWG-GHG 11/2/3,” 2022.
- [42] European Parliament and European Council, *Promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*. 2018.
- [43] S. D. Chatzinikolaou and N. P. Ventikos, “Holistic framework for studying ship air emissions in a life cycle perspective,” *Ocean Engineering*, vol. 110, pp. 113–122, 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.05.042.
- [44] I. B. Utne, “Life cycle cost (LCC) as a tool for improving sustainability in the Norwegian fishing fleet,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, no. 3, pp. 335–344, 2009, doi: 10.1016/j.jclepro.2008.08.009.
- [45] B. Jeong, H. Wang, E. Oguz, and P. Zhou, “An effective framework for life cycle and cost assessment for marine vessels aiming to select optimal propulsion systems,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 187, pp. 111–130, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.184.
- [46] S. Hwang, B. Jeong, K. Jung, M. Kim, and P. Zhou, “Life cycle assessment of lng fueled vessel in domestic services,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.3390/jmse7100359.
- [47] Α.-Ι. Δημητριάδης, “Μελέτη σκοπιμότητας για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων στην ακτοπλοΐα,” 2021.
- [48] Δ. Μπέκος and Π. Κάπρος, “Μοντελοποίηση Αγοράς Δικαιωμάτων Εκπομπών Διοξειδίου του Άνθρακα,” 2016.
- [49] Ship & Bunker, “Ship & Bunker Prices,” <https://shipandbunker.com/prices/>, 2022.
- [50] Trading Economics, “EU Carbon Permits,” <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>.
- [51] H. Riebeek and R. Simmon, “The Carbon Cycle,” <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>, Jun. 16, 2011.
- [52] MAN B&W, “ME-GA Propulsion engine,” 2021. [Online]. Available: www.man-es.com
- [53] WinGD, “Low-pressure X-DF technology: the industry standard,” 2019.

- [54] European Maritime Safety Agency (EMSA), “European Maritime Transport Environmental Report 2021,” 2021. doi: 10.2800/3525.
- [55] Xclusiv Shipbrokers, “Xclusiv Weekly Report,” 2021. [Online]. Available: www.xclusiv.gr
- [56] Gas Infrastructure Europe (GIE) and European Biogas Association (EBA), “Biomethane Map 2021,” 2021.
- [57] Ministry of Rural Development and Food, “Κ.Δ.Π. 545/2020 - Οι περί αποβλήτων Νόμοι του 2011 έως του 2016,” 2020.
- [58] Χ. Μπουσκούτας and Π. Γεωργιάδης, “Τεχνο-οικονομική μελέτη μονάδας παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο σε κτηνοτροφική μονάδα,” Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2017.
- [59] UNEP, “Life Cycle Approaches: The road from analysis to practice,” 2005. [Online]. Available: <http://www.uneptie.org>
- [60] G. Finnveden *et al.*, “Recent developments in Life Cycle Assessment,” *Journal of Environmental Management*, vol. 91, no. 1, pp. 1–21, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2009.06.018.
- [61] E. Jacob-Lopes, L. Q. Zepka, and M. C. Deprá, “Assistant’s tools toward life cycle assessment,” *Sustainability Metrics and Indicators of Environmental Impact*, pp. 77–90, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-823411-2.00006-2.
- [62] M. Adelt, D. Wolf, and A. Vogel, “LCA of biomethane,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 646–650, 2011, doi: 10.1016/j.jngse.2011.07.003.
- [63] E. Carnevale and L. Lombardi, “Comparison of different possibilities for biogas use by Life Cycle Assessment,” in *Energy Procedia*, Dec. 2015, vol. 81, pp. 215–226. doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.088.
- [64] F. Ardolino and U. Arena, “Biowaste-to-Biomethane: An LCA study on biogas and syngas roads,” *Waste Management*, vol. 87, pp. 441–453, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.02.030.
- [65] F. Ardolino, G. F. Cardamone, F. Parrillo, and U. Arena, “Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110588.
- [66] MAN Diesel & Turbo, “MAN B&W S50ME-C8.2-TII Project Guide,” 2014. [Online]. Available: www.mandieselturbo.com
- [67] MAN Diesel & Turbo, “MAN B&W S50ME-C8.2-GI-TII Project Guide,” 2014. [Online]. Available: www.mandieselturbo.com
- [68] MAN Diesel & Turbo, “L23/30H Instruction Manual,” 2012.
- [69] MAN Diesel & Turbo, “L23/30DF Project Guide,” 2014.
- [70] MAN Energy Solutions, “Managing methane slip,” 2019.

- [71] US Environmental Protection Agency (EPA), “Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories,” 2014. [Online]. Available:
<http://www.epa.gov/ghgreporting/reporters/subpart/c.html>
- [72] MAN Energy Solutions, “Propulsion trends in container vessels,” 2019.
- [73] D. P. Loucks, E. van. Beek, J. R. Stedinger, J. P. M. Dijkman, and M. T. Villars, “Model Sensitivity and Uncertainty Analysis,” in *Water resources systems planning and management : an introduction to methods, models and applications*, UNESCO, 2005, pp. 255–290.

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Παράρτημα – Αναλυτικά αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Ποσοστό πρόσμιξης bioLNG 10%

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 200 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG 1000 | - 178 525.67 € | - 144 760.69 € | - 110 995.70 € | - 77 230.71 € | - 43 465.73 € | - 9 700.74 € | 24 064.24 € | 57 829.23 € | 91 594.21 € |
| 1050 | - 193 904.15 € | - 160 139.16 € | - 126 374.18 € | - 92 609.19 € | - 58 844.21 € | - 25 079.22 € | 8 685.76 € | 42 450.75 € | 76 215.73 € |
| 1100 | - 209 282.63 € | - 175 517.64 € | - 141 752.66 € | - 107 987.67 € | - 74 222.68 € | - 40 457.70 € | 6 692.71 € | 27 072.27 € | 60 837.26 € |
| 1150 | - 224 661.10 € | - 190 896.12 € | - 157 131.13 € | - 123 366.15 € | - 89 601.16 € | - 55 836.18 € | 22 071.19 € | 11 693.79 € | 45 458.78 € |
| 1200 | - 240 039.58 € | - 206 274.60 € | - 172 509.61 € | - 138 744.62 € | - 104 979.64 € | - 71 214.65 € | 37 449.67 € | 3 684.68 € | 30 080.30 € |
| 1250 | - 255 418.06 € | - 221 653.07 € | - 187 888.09 € | - 154 123.10 € | - 120 358.12 € | - 86 593.13 € | 52 828.15 € | - 19 063.16 € | 14 701.82 € |
| 1300 | - 270 796.54 € | - 237 031.55 € | - 203 266.57 € | - 169 501.58 € | - 135 736.59 € | - 101 971.61 € | 68 206.62 € | - 34 441.64 € | 676.65 € |
| 1350 | - 286 175.01 € | - 252 410.03 € | - 218 645.04 € | - 184 880.06 € | - 151 115.07 € | - 117 350.09 € | 83 585.10 € | - 49 820.12 € | 16 055.13 € |
| 1400 | - 301 553.49 € | - 267 788.51 € | - 234 023.52 € | - 200 258.54 € | - 166 493.55 € | - 132 728.56 € | 98 963.58 € | - 65 198.59 € | 31 433.61 € |
| 1450 | - 316 931.97 € | - 283 166.98 € | - 249 402.00 € | - 215 637.01 € | - 181 872.03 € | - 148 107.04 € | 114 342.06 € | - 80 577.07 € | 46 812.09 € |
| 1500 | - 332 310.45 € | - 298 545.46 € | - 264 780.48 € | - 231 015.49 € | - 197 250.51 € | - 163 485.52 € | 129 720.53 € | - 95 955.55 € | 62 190.56 € |
| 1550 | - 347 688.92 € | - 313 923.94 € | - 280 158.95 € | - 246 393.97 € | - 212 628.98 € | - 178 864.00 € | 145 099.01 € | - 111 334.03 € | 77 569.04 € |
| 1600 | - 363 067.40 € | - 329 302.42 € | - 295 537.43 € | - 261 772.45 € | - 228 007.46 € | - 194 242.47 € | 160 477.49 € | - 126 712.50 € | 92 947.52 € |
| 1650 | - 378 445.88 € | - 344 680.89 € | - 310 915.91 € | - 277 150.92 € | - 243 385.94 € | - 209 620.95 € | 175 855.97 € | - 142 090.98 € | 108 326.00 € |
| 1700 | - 393 824.36 € | - 360 059.37 € | - 326 294.39 € | - 292 529.40 € | - 258 764.42 € | - 224 999.43 € | 191 234.44 € | - 157 469.46 € | 123 704.47 € |
| 1750 | - 409 202.83 € | - 375 437.85 € | - 341 672.86 € | - 307 907.88 € | - 274 142.89 € | - 240 377.91 € | 206 612.92 € | - 172 847.94 € | 139 082.95 € |
| 1800 | - 424 581.31 € | - 390 816.33 € | - 357 051.34 € | - 323 286.36 € | - 289 521.37 € | - 255 756.39 € | 221 991.40 € | - 188 226.41 € | 154 461.43 € |
| 1850 | - 439 959.79 € | - 406 194.80 € | - 372 429.82 € | - 338 664.83 € | - 304 899.85 € | - 271 134.86 € | 237 369.88 € | - 203 604.89 € | 169 839.91 € |
| 1900 | - 455 338.27 € | - 421 573.28 € | - 387 808.30 € | - 354 043.31 € | - 320 278.33 € | - 286 513.34 € | 252 748.36 € | - 218 983.37 € | 185 218.38 € |
| 1950 | - 470 716.75 € | - 436 951.76 € | - 403 186.77 € | - 369 421.79 € | - 335 656.80 € | - 301 891.82 € | 268 126.83 € | - 234 361.85 € | 200 596.86 € |
| 2000 | - 486 095.22 € | - 452 330.24 € | - 418 565.25 € | - 384 800.27 € | - 351 035.28 € | - 317 270.30 € | 283 505.31 € | - 249 740.32 € | 215 975.34 € |

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 400 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG 1000 | - 117 011.76 € | - 83 246.77 € | - 49 481.79 € | - 15 716.80 € | 18 048.18 € | 51 813.17 € | 85 578.15 € | 119 343.14 € | 153 108.12 € |
| 1050 | - 132 390.24 € | - 98 625.25 € | - 64 860.27 € | - 31 095.28 € | 2 669.70 € | 36 434.69 € | 70 199.67 € | 103 964.66 € | 137 729.65 € |
| 1100 | - 147 768.72 € | - 114 003.73 € | - 80 238.74 € | - 46 473.76 € | - 12 708.77 € | 21 056.21 € | 54 821.20 € | 88 586.18 € | 122 351.17 € |
| 1150 | - 163 147.19 € | - 129 382.21 € | - 95 617.22 € | - 61 852.24 € | - 28 087.25 € | 5 677.73 € | 39 442.72 € | 73 207.70 € | 106 972.69 € |
| 1200 | - 178 525.67 € | - 144 760.69 € | - 110 995.70 € | - 77 230.71 € | - 43 465.73 € | - 9 700.74 € | 24 064.24 € | 57 829.23 € | 91 594.21 € |
| 1250 | - 193 904.15 € | - 160 139.16 € | - 126 374.18 € | - 92 609.19 € | - 58 844.21 € | - 25 079.22 € | 8 685.76 € | 42 450.75 € | 76 215.73 € |
| 1300 | - 209 282.63 € | - 175 517.64 € | - 141 752.66 € | - 107 987.67 € | - 74 222.68 € | - 40 457.70 € | 6 692.71 € | 27 072.27 € | 60 837.26 € |
| 1350 | - 224 661.10 € | - 190 896.12 € | - 157 131.13 € | - 123 366.15 € | - 89 601.16 € | - 55 836.18 € | 22 071.19 € | 11 693.79 € | 45 458.78 € |
| 1400 | - 240 039.58 € | - 206 274.60 € | - 172 509.61 € | - 138 744.62 € | - 104 979.64 € | - 71 214.65 € | 37 449.67 € | 3 684.68 € | 30 080.30 € |
| 1450 | - 255 418.06 € | - 221 653.07 € | - 187 888.09 € | - 154 123.10 € | - 120 358.12 € | - 86 593.13 € | 52 828.15 € | - 19 063.16 € | 14 701.82 € |
| 1500 | - 270 796.54 € | - 237 031.55 € | - 203 266.57 € | - 169 501.58 € | - 135 736.59 € | - 101 971.61 € | 68 206.62 € | - 34 441.64 € | 676.65 € |
| 1550 | - 286 175.01 € | - 252 410.03 € | - 218 645.04 € | - 184 880.06 € | - 151 115.07 € | - 117 350.09 € | 83 585.10 € | - 49 820.12 € | 16 055.13 € |
| 1600 | - 301 553.49 € | - 267 788.51 € | - 234 023.52 € | - 200 258.54 € | - 166 493.55 € | - 132 728.56 € | 98 963.58 € | - 65 198.59 € | 31 433.61 € |
| 1650 | - 316 931.97 € | - 283 166.98 € | - 249 402.00 € | - 215 637.01 € | - 181 872.03 € | - 148 107.04 € | 114 342.06 € | - 80 577.07 € | 46 812.09 € |
| 1700 | - 332 310.45 € | - 298 545.46 € | - 264 780.48 € | - 231 015.49 € | - 197 250.51 € | - 163 485.52 € | 129 720.53 € | - 95 955.55 € | 62 190.56 € |
| 1750 | - 347 688.92 € | - 313 923.94 € | - 280 158.95 € | - 246 393.97 € | - 212 628.98 € | - 178 864.00 € | 145 099.01 € | - 111 334.03 € | 77 569.04 € |
| 1800 | - 363 067.40 € | - 329 302.42 € | - 295 537.43 € | - 261 772.45 € | - 228 007.46 € | - 194 242.47 € | 160 477.49 € | - 126 712.50 € | 92 947.52 € |
| 1850 | - 378 445.88 € | - 344 680.89 € | - 310 915.91 € | - 277 150.92 € | - 243 385.94 € | - 209 620.95 € | 175 855.97 € | - 142 090.98 € | 108 326.00 € |
| 1900 | - 393 824.36 € | - 360 059.37 € | - 326 294.39 € | - 292 529.40 € | - 258 764.42 € | - 224 999.43 € | 191 234.44 € | - 157 469.46 € | 123 704.47 € |
| 1950 | - 409 202.83 € | - 375 437.85 € | - 341 672.86 € | - 307 907.88 € | - 274 142.89 € | - 240 377.91 € | 206 612.92 € | - 172 847.94 € | 139 082.95 € |
| 2000 | - 424 581.31 € | - 390 816.33 € | - 357 051.34 € | - 323 286.36 € | - 289 521.37 € | - 255 756.39 € | 221 991.40 € | - 188 226.41 € | 154 461.43 € |

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 600 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG 1000 | - 55 497.85 € | - 21 732.86 € | 12 032.12 € | 45 797.11 € | 79 562.09 € | 113 327.08 € | 147 092.06 € | 180 857.05 € | 214 622.03 € |
| 1050 | - 70 876.33 € | - 37 111.34 € | 3 346.36 € | 30 418.63 € | 64 183.61 € | 97 948.60 € | 131 713.58 € | 165 478.57 € | 199 243.56 € |
| 1100 | - 86 254.81 € | - 52 489.82 € | - 18 724.83 € | 15 040.15 € | 48 805.14 € | 82 570.12 € | 116 335.11 € | 150 100.09 € | 183 865.08 € |
| 1150 | - 101 633.28 € | - 67 868.30 € | - 34 103.31 € | 338.33 € | 33 426.66 € | 67 191.64 € | 100 956.63 € | 134 721.62 € | 168 486.60 € |
| 1200 | - 117 011.76 € | - 83 246.77 € | - 49 481.79 € | - 15 716.80 € | 18 048.18 € | 51 813.17 € | 85 578.15 € | 119 343.14 € | 153 108.12 € |
| 1250 | - 132 390.24 € | - 98 625.25 € | - 64 860.27 € | - 31 095.28 € | 2 669.70 € | 36 434.69 € | 70 199.67 € | 103 964.66 € | 137 729.65 € |
| 1300 | - 147 768.72 € | - 114 003.73 € | - 80 238.74 € | - 46 473.76 € | - 12 708.77 € | 21 056.21 € | 54 821.20 € | 88 586.18 € | 122 351.17 € |
| 1350 | - 163 147.19 € | - 129 382.21 € | - 95 617.22 € | - 61 852.24 € | - 28 087.25 € | 5 677.73 € | 39 442.72 € | 73 207.70 € | 106 972.69 € |
| 1400 | - 178 525.67 € | - 144 760.69 € | - 110 995.70 € | - 77 230.71 € | - 43 465.73 € | - 9 700.74 € | 24 064.24 € | 57 829.23 € | 91 594.21 € |
| 1450 | - 193 904.15 € | - 160 139.16 € | - 126 374.18 € | - 92 609.19 € | - 58 844.21 € | - 25 079.22 € | 8 685.76 € | 42 450.75 € | 76 215.73 € |
| 1500 | - 209 282.63 € | - 175 517.64 € | - 141 752.66 € | - 107 987.67 € | - 74 222.68 € | - 40 457.70 € | 6 692.71 € | 27 072.27 € | 60 837.26 € |
| 1550 | - 224 661.10 € | - 190 896.12 € | - 157 131.13 € | - 123 366.15 € | - 89 601.16 € | - 55 836.18 € | 22 071.19 € | 11 693.79 € | 45 458.78 € |
| 1600 | - 240 039.58 € | - 206 274.60 € | - 172 509.61 € | - 138 744.62 € | - 104 979.64 € | - 71 214.65 € | 37 449.67 € | 3 684.68 € | 30 080.30 € |
| 1650 | - 255 418.06 € | - 221 653.07 € | - 187 888.09 € | - 154 123.10 € | - 120 358.12 € | - 86 593.13 € | 52 828.15 € | - 19 063.16 € | 14 701.82 € |
| 1700 | - 270 796.54 € | - 237 031.55 € | - 203 266.57 € | - 169 501.58 € | - 135 736.59 € | - 101 971.61 € | 68 206.62 € | - 34 441.64 € | 676.65 € |
| 1750 | - 286 175.01 € | - 252 410.03 € | - 218 645.04 € | - 184 880.06 € | - 151 115.07 € | - 117 350.09 € | 83 585.10 € | - 49 820.12 € | 16 055.13 € |
| 1800 | - 301 553.49 € | - 267 788.51 € | - 234 023.52 € | - 200 258.54 € | - 166 493.55 € | - 132 728.56 € | 98 963.58 € | - 65 198.59 € | 31 433.61 € |
| 1850 | - 316 931.97 € | - 283 166.98 € | - 249 402.00 € | - 215 637.01 € | - 181 872.03 € | - 148 107.04 € | 114 342.06 € | - 80 577.07 € | 46 812.09 € |
| 1900 | - 332 310.45 € | - 298 545.46 € | - 264 780.48 € | - 231 015.49 € | - 197 250.51 € | - 163 485.52 € | 129 720.53 € | - 95 955.55 € | 62 190.56 € |
| 1950 | - 347 688.92 € | - 313 923.94 € | - 280 158.95 € | - 246 393.97 € | - 212 628.98 € | - 178 864.00 € | 145 099.01 € | - 111 334.03 € | 77 569.04 € |
| 2000 | - 363 067.40 € | - 329 302.42 € | - 295 537.43 € | - 261 772.45 € | - 228 007.46 € | - 194 242.47 € | 160 477.49 € | - 126 712.50 € | 92 947.52 € |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υδροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| 800 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 6 016.06 € | 39 781.05 € | 73 546.03 € | 107 311.02 € | 141 076.00 € | 174 840.99 € | 208 605.97 € | 242 370.96 € | 276 135.94 € |
| | 1050 | - 9 362.42 € | 24 402.57 € | 58 167.55 € | 91 932.54 € | 125 697.52 € | 159 462.51 € | 193 227.50 € | 226 992.48 € | 260 757.47 € |
| | 1100 | - 24 740.89 € | 9 024.09 € | 42 789.08 € | 76 554.06 € | 110 319.05 € | 144 084.03 € | 177 849.02 € | 211 614.00 € | 245 378.99 € |
| | 1150 | - 40 119.37 € | - 6 354.39 € | 27 410.60 € | 61 175.58 € | 94 940.57 € | 128 705.55 € | 162 470.54 € | 196 235.53 € | 230 000.51 € |
| | 1200 | - 55 497.85 € | - 21 732.86 € | 12 032.12 € | 45 797.11 € | 79 562.09 € | 113 327.08 € | 147 092.06 € | 180 857.05 € | 214 622.03 € |
| | 1250 | - 70 876.33 € | - 37 111.34 € | 3 346.36 € | 30 418.63 € | 64 183.61 € | 97 948.60 € | 131 713.58 € | 165 478.57 € | 199 243.56 € |
| | 1300 | - 86 254.81 € | - 52 489.82 € | 18 724.83 € | 15 040.15 € | 48 805.14 € | 82 570.12 € | 116 335.11 € | 150 100.09 € | 183 865.08 € |
| | 1350 | - 101 633.28 € | - 67 868.30 € | 34 103.31 € | 338.33 € | 33 426.66 € | 67 191.64 € | 100 956.63 € | 134 721.62 € | 168 486.60 € |
| | 1400 | - 117 011.76 € | - 83 246.77 € | 49 481.79 € | 15 716.80 € | 18 048.18 € | 51 813.17 € | 85 578.15 € | 119 343.14 € | 153 108.12 € |
| | 1450 | - 132 390.24 € | - 98 625.25 € | 64 860.27 € | 31 095.28 € | 2 669.70 € | 36 434.69 € | 70 199.67 € | 103 964.66 € | 137 729.65 € |
| | 1500 | - 147 768.72 € | - 114 003.73 € | 80 238.74 € | 46 473.76 € | - 12 708.77 € | 21 056.21 € | 54 821.20 € | 88 586.18 € | 122 351.17 € |
| | 1550 | - 163 147.19 € | - 129 382.21 € | 95 617.22 € | 61 852.24 € | - 28 087.25 € | 5 677.73 € | 39 442.72 € | 73 207.70 € | 106 972.69 € |
| | 1600 | - 178 525.67 € | - 144 760.69 € | 110 995.70 € | 77 230.71 € | - 43 465.73 € | - 9 700.74 € | 24 064.24 € | 57 829.23 € | 91 594.21 € |
| | 1650 | - 193 904.15 € | - 160 139.16 € | 126 374.18 € | 92 609.19 € | - 58 844.21 € | - 25 079.22 € | 8 685.76 € | 42 450.75 € | 76 215.73 € |
| | 1700 | - 209 282.63 € | - 175 517.64 € | 141 752.66 € | 107 987.67 € | - 74 222.68 € | - 40 457.70 € | - 6 692.71 € | 27 072.27 € | 60 837.26 € |
| | 1750 | - 224 661.10 € | - 190 896.12 € | 157 131.13 € | 123 366.15 € | - 89 601.16 € | - 55 836.18 € | - 22 071.19 € | 11 693.79 € | 45 458.78 € |
| | 1800 | - 240 039.58 € | - 206 274.60 € | 172 509.61 € | 138 744.62 € | - 104 979.64 € | - 71 214.65 € | - 37 449.67 € | 3 684.68 € | 30 080.30 € |
| | 1850 | - 255 418.06 € | - 221 653.07 € | 187 888.09 € | 154 123.10 € | - 120 358.12 € | - 86 593.13 € | - 52 828.15 € | - 19 063.16 € | 14 701.82 € |
| | 1900 | - 270 796.54 € | - 237 031.55 € | 203 266.57 € | 169 501.58 € | - 135 736.59 € | - 101 971.61 € | - 68 206.62 € | - 34 441.64 € | 67.65 € |
| | 1950 | - 286 175.01 € | - 252 410.03 € | 218 645.04 € | 184 880.06 € | - 151 115.07 € | - 117 350.09 € | - 83 585.10 € | - 49 820.12 € | - 16 055.13 € |
| 2000 | - 301 553.49 € | - 267 788.51 € | 234 023.52 € | 200 258.54 € | - 166 493.55 € | - 132 728.56 € | - 98 963.58 € | - 65 198.59 € | - 31 433.61 € | |

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| 1000 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 67 529.97 € | 101 294.96 € | 135 059.94 € | 168 824.93 € | 202 589.91 € | 236 354.90 € | 270 119.88 € | 303 884.87 € | 337 649.85 € |
| | 1050 | 52 151.49 € | 85 916.48 € | 119 681.46 € | 153 446.45 € | 187 211.43 € | 220 976.42 € | 254 741.41 € | 288 506.39 € | 322 271.38 € |
| | 1100 | 36 773.02 € | 70 538.00 € | 104 302.99 € | 138 067.97 € | 171 832.96 € | 205 597.94 € | 239 362.93 € | 273 127.91 € | 306 892.90 € |
| | 1150 | 21 394.54 € | 55 159.52 € | 88 924.51 € | 122 689.49 € | 156 454.48 € | 190 219.47 € | 223 984.45 € | 257 749.44 € | 291 514.42 € |
| | 1200 | 6 016.06 € | 39 781.05 € | 73 546.03 € | 107 311.02 € | 141 076.00 € | 174 840.99 € | 208 605.97 € | 242 370.96 € | 276 135.94 € |
| | 1250 | - 9 362.42 € | 24 402.57 € | 58 167.55 € | 91 932.54 € | 125 697.52 € | 159 462.51 € | 193 227.50 € | 226 992.48 € | 260 757.47 € |
| | 1300 | - 24 740.89 € | 9 024.09 € | 42 789.08 € | 76 554.06 € | 110 319.05 € | 144 084.03 € | 177 849.02 € | 211 614.00 € | 245 378.99 € |
| | 1350 | - 40 119.37 € | - 6 354.39 € | 27 410.60 € | 61 175.58 € | 94 940.57 € | 128 705.55 € | 162 470.54 € | 196 235.53 € | 230 000.51 € |
| | 1400 | - 55 497.85 € | - 21 732.86 € | 12 032.12 € | 45 797.11 € | 79 562.09 € | 113 327.08 € | 147 092.06 € | 180 857.05 € | 214 622.03 € |
| | 1450 | - 70 876.33 € | - 37 111.34 € | 3 346.36 € | 30 418.63 € | 64 183.61 € | 97 948.60 € | 131 713.58 € | 165 478.57 € | 199 243.56 € |
| | 1500 | - 86 254.81 € | - 52 489.82 € | 18 724.83 € | 15 040.15 € | 48 805.14 € | 82 570.12 € | 116 335.11 € | 150 100.09 € | 183 865.08 € |
| | 1550 | - 101 633.28 € | - 67 868.30 € | 34 103.31 € | 338.33 € | 33 426.66 € | 67 191.64 € | 100 956.63 € | 134 721.62 € | 168 486.60 € |
| | 1600 | - 117 011.76 € | - 83 246.77 € | 49 481.79 € | 15 716.80 € | 18 048.18 € | 51 813.17 € | 85 578.15 € | 119 343.14 € | 153 108.12 € |
| | 1650 | - 132 390.24 € | - 98 625.25 € | 64 860.27 € | 31 095.28 € | 2 669.70 € | 36 434.69 € | 70 199.67 € | 103 964.66 € | 137 729.65 € |
| | 1700 | - 147 768.72 € | - 114 003.73 € | 80 238.74 € | 46 473.76 € | - 12 708.77 € | 21 056.21 € | 54 821.20 € | 88 586.18 € | 122 351.17 € |
| | 1750 | - 163 147.19 € | - 129 382.21 € | 95 617.22 € | 61 852.24 € | - 28 087.25 € | 5 677.73 € | 39 442.72 € | 73 207.70 € | 106 972.69 € |
| | 1800 | - 178 525.67 € | - 144 760.69 € | 110 995.70 € | 77 230.71 € | - 43 465.73 € | - 9 700.74 € | 24 064.24 € | 57 829.23 € | 91 594.21 € |
| | 1850 | - 193 904.15 € | - 160 139.16 € | 126 374.18 € | 92 609.19 € | - 58 844.21 € | - 25 079.22 € | 8 685.76 € | 42 450.75 € | 76 215.73 € |
| | 1900 | - 209 282.63 € | - 175 517.64 € | 141 752.66 € | 107 987.67 € | - 74 222.68 € | - 40 457.70 € | - 6 692.71 € | 27 072.27 € | 60 837.26 € |
| | 1950 | - 224 661.10 € | - 190 896.12 € | 157 131.13 € | 123 366.15 € | - 89 601.16 € | - 55 836.18 € | - 22 071.19 € | 11 693.79 € | 45 458.78 € |
| 2000 | - 240 039.58 € | - 206 274.60 € | 172 509.61 € | 138 744.62 € | - 104 979.64 € | - 71 214.65 € | - 37 449.67 € | 3 684.68 € | 30 080.30 € | |

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1200 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 129 043.88 € | 162 808.87 € | 196 573.85 € | 230 338.84 € | 264 103.82 € | 297 868.81 € | 331 633.79 € | 365 398.78 € | 399 163.76 € |
| | 1050 | 113 665.40 € | 147 430.39 € | 181 195.37 € | 214 960.36 € | 248 725.35 € | 282 490.33 € | 316 255.32 € | 350 020.30 € | 383 785.29 € |
| | 1100 | 98 286.93 € | 132 051.91 € | 165 816.90 € | 199 581.88 € | 233 346.87 € | 267 111.85 € | 300 876.84 € | 334 641.82 € | 368 406.81 € |
| | 1150 | 82 908.45 € | 116 673.43 € | 150 438.42 € | 184 203.40 € | 217 968.39 € | 251 733.38 € | 285 498.36 € | 319 263.35 € | 353 028.33 € |
| | 1200 | 67 529.97 € | 101 294.96 € | 135 059.94 € | 168 824.93 € | 202 589.91 € | 236 354.90 € | 270 119.88 € | 303 884.87 € | 337 649.85 € |
| | 1250 | 52 151.49 € | 85 916.48 € | 119 681.46 € | 153 446.45 € | 187 211.43 € | 220 976.42 € | 254 741.41 € | 288 506.39 € | 322 271.38 € |
| | 1300 | 36 773.02 € | 70 538.00 € | 104 302.99 € | 138 067.97 € | 171 832.96 € | 205 597.94 € | 239 362.93 € | 273 127.91 € | 306 892.90 € |
| | 1350 | 21 394.54 € | 55 159.52 € | 88 924.51 € | 122 689.49 € | 156 454.48 € | 190 219.47 € | 223 984.45 € | 257 749.44 € | 291 514.42 € |
| | 1400 | 6 016.06 € | 39 781.05 € | 73 546.03 € | 107 311.02 € | 141 076.00 € | 174 840.99 € | 208 605.97 € | 242 370.96 € | 276 135.94 € |
| | 1450 | - 9 362.42 € | 24 402.57 € | 58 167.55 € | 91 932.54 € | 125 697.52 € | 159 462.51 € | 193 227.50 € | 226 992.48 € | 260 757.47 € |
| | 1500 | - 24 740.89 € | 9 024.09 € | 42 789.08 € | 76 554.06 € | 110 319.05 € | 144 084.03 € | 177 849.02 € | 211 614.00 € | 245 378.99 € |
| | 1550 | - 40 119.37 € | - 6 354.39 € | 27 410.60 € | 61 175.58 € | 94 940.57 € | 128 705.55 € | 162 470.54 € | 196 235.53 € | 230 000.51 € |
| | 1600 | - 55 497.85 € | - 21 732.86 € | 12 032.12 € | 45 797.11 € | 79 562.09 € | 113 327.08 € | 147 092.06 € | 180 857.05 € | 214 622.03 € |
| | 1650 | - 70 876.33 € | - 37 111.34 € | 3 346.36 € | 30 418.63 € | 64 183.61 € | 97 948.60 € | 131 713.58 € | 165 478.57 € | 199 243.56 € |
| | 1700 | - 86 254.81 € | - 52 489.82 € | 18 724.83 € | 15 040.15 € | 48 805.14 € | 82 570.12 € | 116 335.11 € | 150 100.09 € | 183 865.08 € |
| | 1750 | - 101 633.28 € | - 67 868.30 € | 34 103.31 € | 338.33 € | 33 426.66 € | 67 191.64 € | 100 956.63 € | 134 721.62 € | 168 486.60 € |
| | 1800 | - 117 011.76 € | - 83 246.77 € | 49 481.79 € | 15 716.80 € | 18 048.18 € | 51 813.17 € | 85 578.15 € | 119 343.14 € | 153 108.12 € |
| | 1850 | - 132 390.24 € | - 98 625.25 € | 64 860.27 € | 31 095.28 € | 2 669.70 € | 36 434.69 € | 70 199.67 € | 103 964.66 € | 137 729.65 € |
| | 1900 | - 147 768.72 € | - 114 003.73 € | 80 238.74 € | 46 473.76 € | - 12 708.77 € | 21 056.21 € | 54 821.20 € | 88 586.18 € | 122 351.17 € |
| | 1950 | - 163 147.19 € | - 129 382.21 € | 95 617.22 € | 61 852.24 € | - 28 087.25 € | 5 677.73 € | 39 442.72 € | 73 207.70 € | 106 972.69 € |
| 2000 | - 178 525.67 € | - 144 760.69 € | 110 995.70 € | 77 230.71 € | - 43 465.73 € | - 9 700.74 € | 24 064.24 € | 57 829.23 € | 91 594.21 € | |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1400 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 190 557.79 € | 224 322.78 € | 258 087.76 € | 291 852.75 € | 325 617.73 € | 359 382.72 € | 393 147.70 € | 426 912.69 € | 460 677.68 € |
| | 1050 | 175 179.31 € | 208 944.30 € | 242 709.28 € | 276 474.27 € | 310 239.26 € | 344 004.24 € | 377 769.23 € | 411 534.21 € | 445 299.20 € |
| | 1100 | 159 800.84 € | 193 565.82 € | 227 330.81 € | 261 095.79 € | 294 860.78 € | 328 625.76 € | 362 390.75 € | 396 155.73 € | 429 920.72 € |
| | 1150 | 144 422.36 € | 178 187.34 € | 211 952.33 € | 245 717.32 € | 279 482.30 € | 313 247.29 € | 347 012.27 € | 380 777.26 € | 414 542.24 € |
| | 1200 | 129 043.88 € | 162 808.87 € | 196 573.85 € | 230 338.84 € | 264 103.82 € | 297 868.81 € | 331 633.79 € | 365 398.78 € | 399 163.76 € |
| | 1250 | 113 665.40 € | 147 430.39 € | 181 195.37 € | 214 960.36 € | 248 725.35 € | 282 490.33 € | 316 255.32 € | 350 020.30 € | 383 785.29 € |
| | 1300 | 98 286.93 € | 132 051.91 € | 165 816.90 € | 199 581.88 € | 233 346.87 € | 267 111.85 € | 300 876.84 € | 334 641.82 € | 368 406.81 € |
| | 1350 | 82 908.45 € | 116 673.43 € | 150 438.42 € | 184 203.40 € | 217 968.39 € | 251 733.38 € | 285 498.36 € | 319 263.35 € | 353 028.33 € |
| | 1400 | 67 529.97 € | 101 294.96 € | 135 059.94 € | 168 824.93 € | 202 589.91 € | 236 354.90 € | 270 119.88 € | 303 884.87 € | 337 649.85 € |
| | 1450 | 52 151.49 € | 85 916.48 € | 119 681.46 € | 153 446.45 € | 187 211.43 € | 220 976.42 € | 254 741.41 € | 288 506.39 € | 322 271.38 € |
| | 1500 | 36 773.02 € | 70 538.00 € | 104 302.99 € | 138 067.97 € | 171 832.96 € | 205 597.94 € | 239 362.93 € | 273 127.91 € | 306 892.90 € |
| | 1550 | 21 394.54 € | 55 159.52 € | 88 924.51 € | 122 689.49 € | 156 454.48 € | 190 219.47 € | 223 984.45 € | 257 749.44 € | 291 514.42 € |
| | 1600 | 6 016.06 € | 39 781.05 € | 73 546.03 € | 107 311.02 € | 141 076.00 € | 174 840.99 € | 208 605.97 € | 242 370.96 € | 276 135.94 € |
| | 1650 | - 9 362.42 € | 24 402.57 € | 58 167.55 € | 91 932.54 € | 125 697.52 € | 159 462.51 € | 193 227.50 € | 226 992.48 € | 260 757.47 € |
| | 1700 | - 24 740.89 € | 9 024.09 € | 42 789.08 € | 76 554.06 € | 110 319.05 € | 144 084.03 € | 177 849.02 € | 211 614.00 € | 245 378.99 € |
| | 1750 | - 40 119.37 € | - 6 354.39 € | 27 410.60 € | 61 175.58 € | 94 940.57 € | 128 705.55 € | 162 470.54 € | 196 235.53 € | 230 000.51 € |
| | 1800 | - 55 497.85 € | - 21 732.86 € | 12 032.12 € | 45 797.11 € | 79 562.09 € | 113 327.08 € | 147 092.06 € | 180 857.05 € | 214 622.03 € |
| | 1850 | - 70 876.33 € | - 37 111.34 € | - 3 346.36 € | 30 418.63 € | 64 183.61 € | 97 948.60 € | 131 713.58 € | 165 478.57 € | 199 243.56 € |
| | 1900 | - 86 254.81 € | - 52 489.82 € | - 18 724.83 € | 15 040.15 € | 48 805.14 € | 82 570.12 € | 116 335.11 € | 150 100.09 € | 183 865.08 € |
| | 1950 | - 101 633.28 € | - 67 868.30 € | - 34 103.31 € | - 38.33 € | 33 426.66 € | 67 191.64 € | 100 956.63 € | 134 721.62 € | 168 486.60 € |
| 2000 | - 117 011.76 € | - 83 246.77 € | - 49 481.79 € | - 15 716.80 € | 18 048.18 € | 51 813.17 € | 85 578.15 € | 119 343.14 € | 153 108.12 € | |

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|---------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1600 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 252 071.70 € | 285 836.69 € | 319 601.67 € | 353 366.66 € | 387 131.64 € | 420 896.63 € | 454 661.61 € | 488 426.60 € | 522 191.59 € |
| | 1050 | 236 693.22 € | 270 458.21 € | 304 223.20 € | 337 988.18 € | 371 753.17 € | 405 518.15 € | 439 283.14 € | 473 048.12 € | 506 813.11 € |
| | 1100 | 221 314.75 € | 255 079.73 € | 288 844.72 € | 322 609.70 € | 356 374.69 € | 390 139.67 € | 423 904.66 € | 457 669.64 € | 491 434.63 € |
| | 1150 | 205 936.27 € | 239 701.25 € | 273 466.24 € | 307 231.23 € | 340 996.21 € | 374 761.20 € | 408 526.18 € | 442 291.17 € | 476 056.15 € |
| | 1200 | 190 557.79 € | 224 322.78 € | 258 087.76 € | 291 852.75 € | 325 617.73 € | 359 382.72 € | 393 147.70 € | 426 912.69 € | 460 677.68 € |
| | 1250 | 175 179.31 € | 208 944.30 € | 242 709.28 € | 276 474.27 € | 310 239.26 € | 344 004.24 € | 377 769.23 € | 411 534.21 € | 445 299.20 € |
| | 1300 | 159 800.84 € | 193 565.82 € | 227 330.81 € | 261 095.79 € | 294 860.78 € | 328 625.76 € | 362 390.75 € | 396 155.73 € | 429 920.72 € |
| | 1350 | 144 422.36 € | 178 187.34 € | 211 952.33 € | 245 717.32 € | 279 482.30 € | 313 247.29 € | 347 012.27 € | 380 777.26 € | 414 542.24 € |
| | 1400 | 129 043.88 € | 162 808.87 € | 196 573.85 € | 230 338.84 € | 264 103.82 € | 297 868.81 € | 331 633.79 € | 365 398.78 € | 399 163.76 € |
| | 1450 | 113 665.40 € | 147 430.39 € | 181 195.37 € | 214 960.36 € | 248 725.35 € | 282 490.33 € | 316 255.32 € | 350 020.30 € | 383 785.29 € |
| | 1500 | 98 286.93 € | 132 051.91 € | 165 816.90 € | 199 581.88 € | 233 346.87 € | 267 111.85 € | 300 876.84 € | 334 641.82 € | 368 406.81 € |
| | 1550 | 82 908.45 € | 116 673.43 € | 150 438.42 € | 184 203.40 € | 217 968.39 € | 251 733.38 € | 285 498.36 € | 319 263.35 € | 353 028.33 € |
| | 1600 | 67 529.97 € | 101 294.96 € | 135 059.94 € | 168 824.93 € | 202 589.91 € | 236 354.90 € | 270 119.88 € | 303 884.87 € | 337 649.85 € |
| | 1650 | 52 151.49 € | 85 916.48 € | 119 681.46 € | 153 446.45 € | 187 211.43 € | 220 976.42 € | 254 741.41 € | 288 506.39 € | 322 271.38 € |
| | 1700 | 36 773.02 € | 70 538.00 € | 104 302.99 € | 138 067.97 € | 171 832.96 € | 205 597.94 € | 239 362.93 € | 273 127.91 € | 306 892.90 € |
| | 1750 | 21 394.54 € | 55 159.52 € | 88 924.51 € | 122 689.49 € | 156 454.48 € | 190 219.47 € | 223 984.45 € | 257 749.44 € | 291 514.42 € |
| | 1800 | 6 016.06 € | 39 781.05 € | 73 546.03 € | 107 311.02 € | 141 076.00 € | 174 840.99 € | 208 605.97 € | 242 370.96 € | 276 135.94 € |
| | 1850 | - 9 362.42 € | 24 402.57 € | 58 167.55 € | 91 932.54 € | 125 697.52 € | 159 462.51 € | 193 227.50 € | 226 992.48 € | 260 757.47 € |
| | 1900 | - 24 740.89 € | 9 024.09 € | 42 789.08 € | 76 554.06 € | 110 319.05 € | 144 084.03 € | 177 849.02 € | 211 614.00 € | 245 378.99 € |
| | 1950 | - 40 119.37 € | - 6 354.39 € | 27 410.60 € | 61 175.58 € | 94 940.57 € | 128 705.55 € | 162 470.54 € | 196 235.53 € | 230 000.51 € |
| 2000 | - 55 497.85 € | - 21 732.86 € | 12 032.12 € | 45 797.11 € | 79 562.09 € | 113 327.08 € | 147 092.06 € | 180 857.05 € | 214 622.03 € | |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

Ποσοστό πρόσμιξης bioLNG 30%

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | | |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 | |
| bioLNG | 1000 | - 535 577.01 € | - 434 282.06 € | - 332 987.10 € | - 231 692.14 € | - 130 397.19 € | - 29 102.23 € | 72 192.73 € | 173 487.68 € | 274 782.64 € |
| | 1050 | - 581 712.45 € | - 480 417.49 € | - 379 122.53 € | - 277 827.58 € | - 176 532.62 € | - 75 237.66 € | 26 057.29 € | 127 352.25 € | 228 647.20 € |
| | 1100 | - 627 847.88 € | - 526 552.92 € | - 425 257.97 € | - 323 963.01 € | - 222 668.05 € | - 121 373.10 € | - 20 078.14 € | 81 216.82 € | 182 511.77 € |
| | 1150 | - 673 983.31 € | - 572 688.35 € | - 471 393.40 € | - 370 098.44 € | - 268 803.49 € | - 167 508.53 € | - 66 213.57 € | 35 081.38 € | 136 376.34 € |
| | 1200 | - 720 118.74 € | - 618 823.79 € | - 517 528.83 € | - 416 233.87 € | - 314 938.92 € | - 213 643.96 € | - 112 349.01 € | 11 054.05 € | 90 240.91 € |
| | 1250 | - 766 254.18 € | - 664 959.22 € | - 563 664.26 € | - 462 369.31 € | - 361 074.35 € | - 259 779.40 € | - 158 484.44 € | - 57 189.48 € | 44 105.47 € |
| | 1300 | - 812 389.61 € | - 711 094.65 € | - 609 799.70 € | - 508 504.74 € | - 407 209.78 € | - 305 914.83 € | - 204 619.87 € | - 103 324.92 € | 2 029.96 € |
| | 1350 | - 858 525.04 € | - 757 230.09 € | - 655 935.13 € | - 554 640.17 € | - 453 345.22 € | - 352 050.26 € | - 250 755.30 € | - 149 460.35 € | 48 165.39 € |
| | 1400 | - 904 660.47 € | - 803 365.52 € | - 702 070.56 € | - 600 775.61 € | - 499 480.65 € | - 398 185.69 € | - 296 890.74 € | - 195 595.78 € | 94 300.82 € |
| | 1450 | - 950 795.91 € | - 849 500.95 € | - 748 206.00 € | - 646 911.04 € | - 545 616.08 € | - 444 321.13 € | - 343 026.17 € | - 241 731.21 € | 140 436.26 € |
| | 1500 | - 996 931.34 € | - 895 636.38 € | - 794 341.43 € | - 693 046.47 € | - 591 751.52 € | - 490 456.56 € | - 389 161.60 € | - 287 866.65 € | 186 571.69 € |
| | 1550 | - 1 043 066.77 € | - 941 771.82 € | - 840 476.86 € | - 739 181.90 € | - 637 886.95 € | - 536 591.99 € | - 435 297.04 € | - 334 002.08 € | 232 707.12 € |
| | 1600 | - 1 089 202.21 € | - 987 907.25 € | - 886 612.29 € | - 785 317.34 € | - 684 022.38 € | - 582 727.42 € | - 481 432.47 € | - 380 137.51 € | 278 842.56 € |
| | 1650 | - 1 135 337.64 € | - 1 034 042.68 € | - 932 747.73 € | - 831 452.77 € | - 730 157.81 € | - 628 862.86 € | - 527 567.90 € | - 426 272.94 € | 324 977.99 € |
| | 1700 | - 1 181 473.07 € | - 1 080 178.12 € | - 978 883.16 € | - 877 588.20 € | - 776 293.25 € | - 674 998.29 € | - 573 703.33 € | - 472 408.38 € | 371 113.42 € |
| | 1750 | - 1 227 608.50 € | - 1 126 313.55 € | - 1 025 018.59 € | - 923 723.64 € | - 822 428.68 € | - 721 133.72 € | - 619 838.77 € | - 518 543.81 € | 417 248.85 € |
| | 1800 | - 1 273 743.94 € | - 1 172 448.98 € | - 1 071 154.02 € | - 969 859.07 € | - 868 564.11 € | - 767 269.16 € | - 665 974.20 € | - 564 679.24 € | 463 384.29 € |
| | 1850 | - 1 319 879.37 € | - 1 218 584.41 € | - 1 117 289.46 € | - 1 015 994.50 € | - 914 699.55 € | - 813 404.59 € | - 712 109.63 € | - 610 814.68 € | 509 519.72 € |
| | 1900 | - 1 366 014.80 € | - 1 264 719.85 € | - 1 163 424.89 € | - 1 062 129.93 € | - 960 834.98 € | - 859 540.02 € | - 758 245.07 € | - 656 950.11 € | 555 655.15 € |
| | 1950 | - 1 412 150.24 € | - 1 310 855.28 € | - 1 209 560.32 € | - 1 108 265.37 € | - 1 006 970.41 € | - 905 675.45 € | - 804 380.50 € | - 700 085.54 € | 601 790.59 € |
| 2000 | - 1 458 285.67 € | - 1 356 990.71 € | - 1 255 695.76 € | - 1 154 400.80 € | - 1 053 105.84 € | - 951 810.89 € | - 850 515.93 € | - 749 220.97 € | 647 926.02 € | |

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | | |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 | |
| bioLNG | 1000 | - 351 035.28 € | - 249 740.32 € | - 148 445.37 € | - 47 150.41 € | 54 144.54 € | 155 439.50 € | 256 734.46 € | 358 029.41 € | 459 324.37 € |
| | 1050 | - 397 170.71 € | - 295 875.76 € | - 194 580.80 € | - 93 285.85 € | 8 009.11 € | 109 304.07 € | 210 599.02 € | 311 893.98 € | 413 188.94 € |
| | 1100 | - 443 306.15 € | - 342 011.19 € | - 240 716.23 € | - 139 421.28 € | - 38 126.32 € | 63 168.63 € | 164 463.59 € | 265 758.55 € | 367 053.50 € |
| | 1150 | - 489 441.58 € | - 388 146.62 € | - 286 851.67 € | - 185 556.71 € | - 84 261.75 € | 17 033.20 € | 118 328.16 € | 219 623.11 € | 320 918.07 € |
| | 1200 | - 535 577.01 € | - 434 282.06 € | - 332 987.10 € | - 231 692.14 € | - 130 397.19 € | - 29 102.23 € | 72 192.73 € | 173 487.68 € | 274 782.64 € |
| | 1250 | - 581 712.45 € | - 480 417.49 € | - 379 122.53 € | - 277 827.58 € | - 176 532.62 € | - 75 237.66 € | 26 057.29 € | 127 352.25 € | 228 647.20 € |
| | 1300 | - 627 847.88 € | - 526 552.92 € | - 425 257.97 € | - 323 963.01 € | - 222 668.05 € | - 121 373.10 € | - 20 078.14 € | 81 216.82 € | 182 511.77 € |
| | 1350 | - 673 983.31 € | - 572 688.35 € | - 471 393.40 € | - 370 098.44 € | - 268 803.49 € | - 167 508.53 € | - 66 213.57 € | 35 081.38 € | 136 376.34 € |
| | 1400 | - 720 118.74 € | - 618 823.79 € | - 517 528.83 € | - 416 233.87 € | - 314 938.92 € | - 213 643.96 € | - 112 349.01 € | 11 054.05 € | 90 240.91 € |
| | 1450 | - 766 254.18 € | - 664 959.22 € | - 563 664.26 € | - 462 369.31 € | - 361 074.35 € | - 259 779.40 € | - 158 484.44 € | - 57 189.48 € | 44 105.47 € |
| | 1500 | - 812 389.61 € | - 711 094.65 € | - 609 799.70 € | - 508 504.74 € | - 407 209.78 € | - 305 914.83 € | - 204 619.87 € | - 103 324.92 € | 2 029.96 € |
| | 1550 | - 858 525.04 € | - 757 230.09 € | - 655 935.13 € | - 554 640.17 € | - 453 345.22 € | - 352 050.26 € | - 250 755.30 € | - 149 460.35 € | 48 165.39 € |
| | 1600 | - 904 660.47 € | - 803 365.52 € | - 702 070.56 € | - 600 775.61 € | - 499 480.65 € | - 398 185.69 € | - 296 890.74 € | - 195 595.78 € | 94 300.82 € |
| | 1650 | - 950 795.91 € | - 849 500.95 € | - 748 206.00 € | - 646 911.04 € | - 545 616.08 € | - 444 321.13 € | - 343 026.17 € | - 241 731.21 € | 140 436.26 € |
| | 1700 | - 996 931.34 € | - 895 636.38 € | - 794 341.43 € | - 693 046.47 € | - 591 751.52 € | - 490 456.56 € | - 389 161.60 € | - 287 866.65 € | 186 571.69 € |
| | 1750 | - 1 043 066.77 € | - 941 771.82 € | - 840 476.86 € | - 739 181.90 € | - 637 886.95 € | - 536 591.99 € | - 435 297.04 € | - 334 002.08 € | 232 707.12 € |
| | 1800 | - 1 089 202.21 € | - 987 907.25 € | - 886 612.29 € | - 785 317.34 € | - 684 022.38 € | - 582 727.42 € | - 481 432.47 € | - 380 137.51 € | 278 842.56 € |
| | 1850 | - 1 135 337.64 € | - 1 034 042.68 € | - 932 747.73 € | - 831 452.77 € | - 730 157.81 € | - 628 862.86 € | - 527 567.90 € | - 426 272.94 € | 324 977.99 € |
| | 1900 | - 1 181 473.07 € | - 1 080 178.12 € | - 978 883.16 € | - 877 588.20 € | - 776 293.25 € | - 674 998.29 € | - 573 703.33 € | - 472 408.38 € | 371 113.42 € |
| | 1950 | - 1 227 608.50 € | - 1 126 313.55 € | - 1 025 018.59 € | - 923 723.64 € | - 822 428.68 € | - 721 133.72 € | - 619 838.77 € | - 518 543.81 € | 417 248.85 € |
| 2000 | - 1 273 743.94 € | - 1 172 448.98 € | - 1 071 154.02 € | - 969 859.07 € | - 868 564.11 € | - 767 269.16 € | - 665 974.20 € | - 564 679.24 € | 463 384.29 € | |

| LNG | Carbon permits | | | | | | | | | |
|--------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 | |
| bioLNG | 1000 | - 166 493.55 € | - 65 198.59 € | 36 096.36 € | 137 391.32 € | 238 686.28 € | 339 981.23 € | 441 276.19 € | 542 571.14 € | 643 866.10 € |
| | 1050 | - 212 628.98 € | - 111 334.03 € | - 10 039.07 € | 91 255.89 € | 192 550.84 € | 293 845.80 € | 395 140.75 € | 496 435.71 € | 597 730.67 € |
| | 1100 | - 258 764.42 € | - 157 469.46 € | - 56 174.50 € | 45 120.45 € | 146 415.41 € | 247 710.37 € | 349 005.32 € | 450 300.28 € | 551 595.23 € |
| | 1150 | - 304 899.85 € | - 203 604.89 € | - 102 309.94 € | 1 014.98 € | 100 279.98 € | 201 574.93 € | 302 869.89 € | 404 164.85 € | 505 459.80 € |
| | 1200 | - 351 035.28 € | - 249 740.32 € | - 148 445.37 € | - 47 150.41 € | 54 144.54 € | 155 439.50 € | 256 734.46 € | 358 029.41 € | 459 324.37 € |
| | 1250 | - 397 170.71 € | - 295 875.76 € | - 194 580.80 € | - 93 285.85 € | 8 009.11 € | 109 304.07 € | 210 599.02 € | 311 893.98 € | 413 188.94 € |
| | 1300 | - 443 306.15 € | - 342 011.19 € | - 240 716.23 € | - 139 421.28 € | - 38 126.32 € | 63 168.63 € | 164 463.59 € | 265 758.55 € | 367 053.50 € |
| | 1350 | - 489 441.58 € | - 388 146.62 € | - 286 851.67 € | - 185 556.71 € | - 84 261.75 € | 17 033.20 € | 118 328.16 € | 219 623.11 € | 320 918.07 € |
| | 1400 | - 535 577.01 € | - 434 282.06 € | - 332 987.10 € | - 231 692.14 € | - 130 397.19 € | - 29 102.23 € | 72 192.73 € | 173 487.68 € | 274 782.64 € |
| | 1450 | - 581 712.45 € | - 480 417.49 € | - 379 122.53 € | - 277 827.58 € | - 176 532.62 € | - 75 237.66 € | 26 057.29 € | 127 352.25 € | 228 647.20 € |
| | 1500 | - 627 847.88 € | - 526 552.92 € | - 425 257.97 € | - 323 963.01 € | - 222 668.05 € | - 121 373.10 € | - 20 078.14 € | 81 216.82 € | 182 511.77 € |
| | 1550 | - 673 983.31 € | - 572 688.35 € | - 471 393.40 € | - 370 098.44 € | - 268 803.49 € | - 167 508.53 € | - 66 213.57 € | 35 081.38 € | 136 376.34 € |
| | 1600 | - 720 118.74 € | - 618 823.79 € | - 517 528.83 € | - 416 233.87 € | - 314 938.92 € | - 213 643.96 € | - 112 349.01 € | 11 054.05 € | 90 240.91 € |
| | 1650 | - 766 254.18 € | - 664 959.22 € | - 563 664.26 € | - 462 369.31 € | - 361 074.35 € | - 259 779.40 € | - 158 484.44 € | - 57 189.48 € | 44 105.47 € |
| | 1700 | - 812 389.61 € | - 711 094.65 € | - 609 799.70 € | - 508 504.74 € | - 407 209.78 € | - 305 914.83 € | - 204 619.87 € | - 103 324.92 € | 2 029.96 € |
| | 1750 | - 858 525.04 € | - 757 230.09 € | - 655 935.13 € | - 554 640.17 € | - 453 345.22 € | - 352 050.26 € | - 250 755.30 € | - 149 460.35 € | 48 165.39 € |
| | 1800 | - 904 660.47 € | - 803 365.52 € | - 702 070.56 € | - 600 775.61 € | - 499 480.65 € | - 398 185.69 € | - 296 890.74 € | - 195 595.78 € | 94 300.82 € |
| | 1850 | - 950 795.91 € | - 849 500.95 € | - 748 206.00 € | - 646 911.04 € | - 545 616.08 € | - 444 321.13 € | - 343 026.17 € | - 241 731.21 € | 140 436.26 € |
| | 1900 | - 996 931.34 € | - 895 636.38 € | - 794 341.43 € | - 693 046.47 € | - 591 751.52 € | - 490 456.56 € | - 389 161.60 € | - 287 866.65 € | 186 571.69 € |
| | 1950 | - 1 043 066.77 € | - 941 771.82 € | - 840 476.86 € | - 739 181.90 € | - 637 886.95 € | - 536 591.99 € | - 435 297.04 € | - 334 002.08 € | 232 707.12 € |
| 2000 | - 1 089 202.21 € | - 987 907.25 € | - 886 612.29 € | - 785 317.34 € | - 684 022.38 € | - 582 727.42 € | - 481 432.47 € | - 380 137.51 € | 278 842.56 € | |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 800 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 18 048.18 € | 119 343.14 € | 220 638.09 € | 321 933.05 € | 423 228.01 € | 524 522.96 € | 625 817.92 € | 727 112.88 € | 828 407.83 € |
| | 1050 | - 28 087.25 € | - 73 207.70 € | - 174 502.66 € | - 275 797.62 € | - 377 092.57 € | - 478 387.53 € | - 579 682.49 € | - 680 977.44 € | - 782 272.40 € |
| | 1100 | - 74 222.68 € | - 27 072.27 € | - 128 367.23 € | - 229 662.18 € | - 330 957.14 € | - 432 252.10 € | - 533 547.05 € | - 634 842.01 € | - 736 136.97 € |
| | 1150 | - 120 358.12 € | - 19 063.16 € | - 82 231.80 € | - 183 526.75 € | - 284 821.71 € | - 386 116.66 € | - 487 411.62 € | - 588 706.58 € | - 690 001.53 € |
| | 1200 | - 166 493.55 € | - 65 198.59 € | - 36 096.36 € | - 137 391.32 € | - 238 686.28 € | - 339 981.23 € | - 441 276.19 € | - 542 571.14 € | - 643 866.10 € |
| | 1250 | - 212 628.98 € | - 111 334.03 € | - 10 039.07 € | - 91 255.89 € | - 192 550.84 € | - 293 845.80 € | - 395 140.75 € | - 496 435.71 € | - 597 730.67 € |
| | 1300 | - 258 764.42 € | - 157 469.46 € | - 56 174.50 € | - 45 120.45 € | - 146 415.41 € | - 247 710.37 € | - 349 005.32 € | - 450 300.28 € | - 551 595.23 € |
| | 1350 | - 304 899.85 € | - 203 604.89 € | - 102 309.94 € | - 1 014.98 € | - 100 279.98 € | - 201 574.93 € | - 302 869.89 € | - 404 164.85 € | - 505 459.80 € |
| | 1400 | - 351 035.28 € | - 249 740.32 € | - 148 445.37 € | - 47 150.41 € | - 54 144.54 € | - 155 439.50 € | - 256 734.46 € | - 358 029.41 € | - 459 324.37 € |
| | 1450 | - 397 170.71 € | - 295 875.76 € | - 194 580.80 € | - 93 285.85 € | - 8 009.11 € | - 109 304.07 € | - 210 599.02 € | - 311 893.98 € | - 413 188.94 € |
| | 1500 | - 443 306.15 € | - 342 011.19 € | - 240 716.23 € | - 139 421.28 € | - 38 126.32 € | - 63 168.63 € | - 164 463.59 € | - 265 758.55 € | - 367 053.50 € |
| | 1550 | - 489 441.58 € | - 388 146.62 € | - 286 851.67 € | - 185 556.71 € | - 84 261.75 € | - 17 033.20 € | - 118 328.16 € | - 219 623.11 € | - 320 918.07 € |
| | 1600 | - 535 577.01 € | - 434 282.06 € | - 332 987.10 € | - 231 692.14 € | - 130 397.19 € | - 29 102.23 € | - 72 192.73 € | - 173 487.68 € | - 274 782.64 € |
| | 1650 | - 581 712.45 € | - 480 417.49 € | - 379 122.53 € | - 277 827.58 € | - 176 532.62 € | - 75 237.66 € | - 26 057.29 € | - 127 352.25 € | - 228 647.20 € |
| | 1700 | - 627 847.88 € | - 526 552.92 € | - 425 257.97 € | - 323 963.01 € | - 222 668.05 € | - 121 373.10 € | - 20 078.14 € | - 81 216.82 € | - 182 511.77 € |
| | 1750 | - 673 983.31 € | - 572 688.35 € | - 471 393.40 € | - 370 098.44 € | - 268 803.49 € | - 167 508.53 € | - 66 213.57 € | - 35 081.38 € | - 136 376.34 € |
| | 1800 | - 720 118.74 € | - 618 823.79 € | - 517 528.83 € | - 416 233.87 € | - 314 938.92 € | - 213 643.96 € | - 112 349.01 € | - 11 054.05 € | - 90 240.91 € |
| | 1850 | - 766 254.18 € | - 664 959.22 € | - 563 664.26 € | - 462 369.31 € | - 361 074.35 € | - 259 779.40 € | - 158 484.44 € | - 57 189.48 € | - 44 105.47 € |
| 1900 | - 812 389.61 € | - 711 094.65 € | - 609 799.70 € | - 508 504.74 € | - 407 209.78 € | - 305 914.83 € | - 204 619.87 € | - 103 329.92 € | - 2 029.96 € | |
| 1950 | - 858 525.04 € | - 757 230.09 € | - 655 935.13 € | - 554 640.17 € | - 453 345.22 € | - 352 050.26 € | - 250 755.30 € | - 149 460.35 € | - 48 165.39 € | |
| 2000 | - 904 660.47 € | - 803 365.52 € | - 702 070.56 € | - 600 775.61 € | - 499 480.65 € | - 398 185.69 € | - 296 890.74 € | - 195 595.78 € | - 94 300.82 € | |

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1000 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 202 589.91 € | 303 884.87 € | 405 179.83 € | 506 474.78 € | 607 769.74 € | 709 064.69 € | 810 359.65 € | 911 654.61 € | 1 012 949.56 € |
| | 1050 | 156 454.48 € | 257 749.44 € | 359 044.39 € | 460 339.35 € | 561 634.30 € | 662 929.26 € | 764 224.22 € | 865 519.17 € | 966 814.13 € |
| | 1100 | 110 319.05 € | 211 614.00 € | 312 908.96 € | 414 203.92 € | 515 498.87 € | 616 793.83 € | 718 088.78 € | 819 383.74 € | 920 678.70 € |
| | 1150 | 64 183.61 € | 165 478.57 € | 266 773.53 € | 368 068.48 € | 469 363.44 € | 570 658.40 € | 671 953.35 € | 773 248.31 € | 874 543.26 € |
| | 1200 | 18 048.18 € | 119 343.14 € | 220 638.09 € | 321 933.05 € | 423 228.01 € | 524 522.96 € | 625 817.92 € | 727 112.88 € | 828 407.83 € |
| | 1250 | - 28 087.25 € | - 73 207.70 € | - 174 502.66 € | - 275 797.62 € | - 377 092.57 € | - 478 387.53 € | - 579 682.49 € | - 680 977.44 € | - 782 272.40 € |
| | 1300 | - 74 222.68 € | - 27 072.27 € | - 128 367.23 € | - 229 662.18 € | - 330 957.14 € | - 432 252.10 € | - 533 547.05 € | - 634 842.01 € | - 736 136.97 € |
| | 1350 | - 120 358.12 € | - 19 063.16 € | - 82 231.80 € | - 183 526.75 € | - 284 821.71 € | - 386 116.66 € | - 487 411.62 € | - 588 706.58 € | - 690 001.53 € |
| | 1400 | - 166 493.55 € | - 65 198.59 € | - 36 096.36 € | - 137 391.32 € | - 238 686.28 € | - 339 981.23 € | - 441 276.19 € | - 542 571.14 € | - 643 866.10 € |
| | 1450 | - 212 628.98 € | - 111 334.03 € | - 10 039.07 € | - 91 255.89 € | - 192 550.84 € | - 293 845.80 € | - 395 140.75 € | - 496 435.71 € | - 597 730.67 € |
| | 1500 | - 258 764.42 € | - 157 469.46 € | - 56 174.50 € | - 45 120.45 € | - 146 415.41 € | - 247 710.37 € | - 349 005.32 € | - 450 300.28 € | - 551 595.23 € |
| | 1550 | - 304 899.85 € | - 203 604.89 € | - 102 309.94 € | - 1 014.98 € | - 100 279.98 € | - 201 574.93 € | - 302 869.89 € | - 404 164.85 € | - 505 459.80 € |
| | 1600 | - 351 035.28 € | - 249 740.32 € | - 148 445.37 € | - 47 150.41 € | - 54 144.54 € | - 155 439.50 € | - 256 734.46 € | - 358 029.41 € | - 459 324.37 € |
| | 1650 | - 397 170.71 € | - 295 875.76 € | - 194 580.80 € | - 93 285.85 € | - 8 009.11 € | - 109 304.07 € | - 210 599.02 € | - 311 893.98 € | - 413 188.94 € |
| | 1700 | - 443 306.15 € | - 342 011.19 € | - 240 716.23 € | - 139 421.28 € | - 38 126.32 € | - 63 168.63 € | - 164 463.59 € | - 265 758.55 € | - 367 053.50 € |
| | 1750 | - 489 441.58 € | - 388 146.62 € | - 286 851.67 € | - 185 556.71 € | - 84 261.75 € | - 17 033.20 € | - 118 328.16 € | - 219 623.11 € | - 320 918.07 € |
| | 1800 | - 535 577.01 € | - 434 282.06 € | - 332 987.10 € | - 231 692.14 € | - 130 397.19 € | - 29 102.23 € | - 72 192.73 € | - 173 487.68 € | - 274 782.64 € |
| | 1850 | - 581 712.45 € | - 480 417.49 € | - 379 122.53 € | - 277 827.58 € | - 176 532.62 € | - 75 237.66 € | - 26 057.29 € | - 127 352.25 € | - 228 647.20 € |
| 1900 | - 627 847.88 € | - 526 552.92 € | - 425 257.97 € | - 323 963.01 € | - 222 668.05 € | - 121 373.10 € | - 20 078.14 € | - 81 216.82 € | - 182 511.77 € | |
| 1950 | - 673 983.31 € | - 572 688.35 € | - 471 393.40 € | - 370 098.44 € | - 268 803.49 € | - 167 508.53 € | - 66 213.57 € | - 35 081.38 € | - 136 376.34 € | |
| 2000 | - 720 118.74 € | - 618 823.79 € | - 517 528.83 € | - 416 233.87 € | - 314 938.92 € | - 213 643.96 € | - 112 349.01 € | - 11 054.05 € | - 90 240.91 € | |

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1200 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 387 131.64 € | 488 426.60 € | 589 721.56 € | 691 016.51 € | 792 311.47 € | 893 606.43 € | 994 901.38 € | 1 096 196.34 € | 1 197 491.29 € |
| | 1050 | 340 996.21 € | 442 291.17 € | 543 586.12 € | 644 881.08 € | 746 176.04 € | 847 470.99 € | 948 765.95 € | 1 050 060.90 € | 1 151 355.86 € |
| | 1100 | 294 860.78 € | 396 155.73 € | 497 450.69 € | 598 745.65 € | 700 040.60 € | 801 335.56 € | 902 630.52 € | 1 003 925.47 € | 1 105 220.43 € |
| | 1150 | 248 725.35 € | 350 020.30 € | 451 315.26 € | 552 610.21 € | 653 905.17 € | 755 200.13 € | 856 495.08 € | 957 790.04 € | 1 059 085.00 € |
| | 1200 | 202 589.91 € | 303 884.87 € | 405 179.83 € | 506 474.78 € | 607 769.74 € | 709 064.69 € | 810 359.65 € | 911 654.61 € | 1 012 949.56 € |
| | 1250 | 156 454.48 € | 257 749.44 € | 359 044.39 € | 460 339.35 € | 561 634.30 € | 662 929.26 € | 764 224.22 € | 865 519.17 € | 966 814.13 € |
| | 1300 | 110 319.05 € | 211 614.00 € | 312 908.96 € | 414 203.92 € | 515 498.87 € | 616 793.83 € | 718 088.78 € | 819 383.74 € | 920 678.70 € |
| | 1350 | 64 183.61 € | 165 478.57 € | 266 773.53 € | 368 068.48 € | 469 363.44 € | 570 658.40 € | 671 953.35 € | 773 248.31 € | 874 543.26 € |
| | 1400 | 18 048.18 € | 119 343.14 € | 220 638.09 € | 321 933.05 € | 423 228.01 € | 524 522.96 € | 625 817.92 € | 727 112.88 € | 828 407.83 € |
| | 1450 | - 28 087.25 € | - 73 207.70 € | - 174 502.66 € | - 275 797.62 € | - 377 092.57 € | - 478 387.53 € | - 579 682.49 € | - 680 977.44 € | - 782 272.40 € |
| | 1500 | - 74 222.68 € | - 27 072.27 € | - 128 367.23 € | - 229 662.18 € | - 330 957.14 € | - 432 252.10 € | - 533 547.05 € | - 634 842.01 € | - 736 136.97 € |
| | 1550 | - 120 358.12 € | - 19 063.16 € | - 82 231.80 € | - 183 526.75 € | - 284 821.71 € | - 386 116.66 € | - 487 411.62 € | - 588 706.58 € | - 690 001.53 € |
| | 1600 | - 166 493.55 € | - 65 198.59 € | - 36 096.36 € | - 137 391.32 € | - 238 686.28 € | - 339 981.23 € | - 441 276.19 € | - 542 571.14 € | - 643 866.10 € |
| | 1650 | - 212 628.98 € | - 111 334.03 € | - 10 039.07 € | - 91 255.89 € | - 192 550.84 € | - 293 845.80 € | - 395 140.75 € | - 496 435.71 € | - 597 730.67 € |
| | 1700 | - 258 764.42 € | - 157 469.46 € | - 56 174.50 € | - 45 120.45 € | - 146 415.41 € | - 247 710.37 € | - 349 005.32 € | - 450 300.28 € | - 551 595.23 € |
| | 1750 | - 304 899.85 € | - 203 604.89 € | - 102 309.94 € | - 1 014.98 € | - 100 279.98 € | - 201 574.93 € | - 302 869.89 € | - 404 164.85 € | - 505 459.80 € |
| | 1800 | - 351 035.28 € | - 249 740.32 € | - 148 445.37 € | - 47 150.41 € | - 54 144.54 € | - 155 439.50 € | - 256 734.46 € | - 358 029.41 € | - 459 324.37 € |
| | 1850 | - 397 170.71 € | - 295 875.76 € | - 194 580.80 € | - 93 285.85 € | - 8 009.11 € | - 109 304.07 € | - 210 599.02 € | - 311 893.98 € | - 413 188.94 € |
| 1900 | - 443 306.15 € | - 342 011.19 € | - 240 716.23 € | - 139 421.28 € | - 38 126.32 € | - 63 168.63 € | - 164 463.59 € | - 265 758.55 € | - 367 053.50 € | |
| 1950 | - 489 441.58 € | - 388 146.62 € | - 286 851.67 € | - 185 556.71 € | - 84 261.75 € | - 17 033.20 € | - 118 328.16 € | - 219 623.11 € | - 320 918.07 € | |
| 2000 | - 535 577.01 € | - 434 282.06 € | - 332 987.10 € | - 231 692.14 € | - 130 397.19 € | - 29 102.23 € | - 72 192.73 € | - 173 487.68 € | - 274 782.64 € | |

Μελέτη Σκοπιμότητας Χρήσης Υγροποιημένου Βιομεθανίου (BioLNG) ως Ναυτιλιακού Καυσίμου

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|----------------|---------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1400 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 571 673.38 € | 672 968.33 € | 774 263.29 € | 875 558.24 € | 976 853.20 € | 1 078 148.16 € | 1 179 443.11 € | 1 280 738.07 € | 1 382 033.03 € |
| | 1050 | 525 537.94 € | 626 832.90 € | 728 127.85 € | 829 422.81 € | 930 717.77 € | 1 032 012.72 € | 1 133 307.68 € | 1 234 602.64 € | 1 335 897.59 € |
| | 1100 | 479 402.51 € | 580 697.47 € | 681 992.42 € | 783 287.38 € | 884 582.33 € | 985 877.29 € | 1 087 172.25 € | 1 188 467.20 € | 1 289 762.16 € |
| | 1150 | 433 267.08 € | 534 562.03 € | 635 856.99 € | 737 151.95 € | 838 446.90 € | 939 741.86 € | 1 041 036.81 € | 1 142 331.77 € | 1 243 626.73 € |
| | 1200 | 387 131.64 € | 488 426.60 € | 589 721.56 € | 691 016.51 € | 792 311.47 € | 893 606.43 € | 994 901.38 € | 1 096 196.34 € | 1 197 491.29 € |
| | 1250 | 340 996.21 € | 442 291.17 € | 543 586.12 € | 644 881.08 € | 746 176.04 € | 847 470.99 € | 948 765.95 € | 1 050 060.90 € | 1 151 355.86 € |
| | 1300 | 294 860.78 € | 396 155.73 € | 497 450.69 € | 598 745.65 € | 700 040.60 € | 801 335.56 € | 902 630.52 € | 1 003 925.47 € | 1 105 220.43 € |
| | 1350 | 248 725.35 € | 350 020.30 € | 451 315.26 € | 552 610.21 € | 653 905.17 € | 755 200.13 € | 856 495.08 € | 957 790.04 € | 1 059 085.00 € |
| | 1400 | 202 589.91 € | 303 884.87 € | 405 179.83 € | 506 474.78 € | 607 769.74 € | 709 064.69 € | 810 359.65 € | 911 654.61 € | 1 012 949.56 € |
| | 1450 | 156 454.48 € | 257 749.44 € | 359 044.39 € | 460 339.35 € | 561 634.30 € | 662 929.26 € | 764 224.22 € | 865 519.17 € | 966 814.13 € |
| | 1500 | 110 319.05 € | 211 614.00 € | 312 908.96 € | 414 203.92 € | 515 498.87 € | 616 793.83 € | 718 088.78 € | 819 383.74 € | 920 678.70 € |
| | 1550 | 64 183.61 € | 165 478.57 € | 266 773.53 € | 368 068.48 € | 469 363.44 € | 570 658.40 € | 671 953.35 € | 773 248.31 € | 874 543.26 € |
| | 1600 | 18 048.18 € | 119 343.14 € | 220 638.09 € | 321 933.05 € | 423 228.01 € | 524 522.96 € | 625 817.92 € | 727 112.88 € | 828 407.83 € |
| | 1650 | - 28 087.25 € | 73 207.70 € | 174 502.66 € | 275 797.62 € | 377 092.57 € | 478 387.53 € | 579 682.49 € | 680 977.44 € | 782 272.40 € |
| | 1700 | - 74 222.68 € | 27 072.27 € | 128 367.23 € | 229 662.18 € | 330 957.14 € | 432 252.10 € | 533 547.05 € | 634 842.01 € | 736 136.97 € |
| | 1750 | - 120 358.12 € | - 19 063.16 € | 82 231.80 € | 183 526.75 € | 284 821.71 € | 386 116.66 € | 487 411.62 € | 588 706.58 € | 690 001.53 € |
| 1800 | - 166 493.55 € | - 65 198.59 € | 36 096.36 € | 137 391.32 € | 238 686.28 € | 339 981.23 € | 441 276.19 € | 542 571.14 € | 643 866.10 € | |
| 1850 | - 212 628.98 € | - 111 334.03 € | - 10 039.07 € | 91 255.89 € | 192 550.84 € | 293 845.80 € | 395 140.75 € | 496 435.71 € | 597 730.67 € | |
| 1900 | - 258 764.42 € | - 157 469.46 € | - 56 174.50 € | 45 120.45 € | 146 415.41 € | 247 710.37 € | 349 005.32 € | 450 300.28 € | 551 595.23 € | |
| 1950 | - 304 899.85 € | - 203 604.89 € | - 102 309.94 € | - 1 014.98 € | 100 279.98 € | 201 574.93 € | 302 869.89 € | 404 164.85 € | 505 459.80 € | |
| 2000 | - 351 035.28 € | - 249 740.32 € | - 148 445.37 € | - 47 150.41 € | 54 144.54 € | 155 439.50 € | 256 734.46 € | 358 029.41 € | 459 324.37 € | |

| LNG | | Carbon permits | | | | | | | | |
|--------|----------------|----------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1600 | | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 | 400 |
| bioLNG | 1000 | 756 215.11 € | 857 510.06 € | 958 805.02 € | 1 060 099.98 € | 1 161 394.93 € | 1 262 689.89 € | 1 363 984.84 € | 1 465 279.80 € | 1 566 574.76 € |
| | 1050 | 710 079.67 € | 811 374.63 € | 912 669.59 € | 1 013 964.54 € | 1 115 259.50 € | 1 216 554.45 € | 1 317 849.41 € | 1 419 144.37 € | 1 520 439.32 € |
| | 1100 | 663 944.24 € | 765 239.20 € | 866 534.15 € | 967 829.11 € | 1 069 124.07 € | 1 170 419.02 € | 1 271 713.98 € | 1 373 008.93 € | 1 474 303.89 € |
| | 1150 | 617 808.81 € | 719 103.76 € | 820 398.72 € | 921 693.68 € | 1 022 988.63 € | 1 124 283.59 € | 1 225 578.55 € | 1 326 873.50 € | 1 428 168.46 € |
| | 1200 | 571 673.38 € | 672 968.33 € | 774 263.29 € | 875 558.24 € | 976 853.20 € | 1 078 148.16 € | 1 179 443.11 € | 1 280 738.07 € | 1 382 033.03 € |
| | 1250 | 525 537.94 € | 626 832.90 € | 728 127.85 € | 829 422.81 € | 930 717.77 € | 1 032 012.72 € | 1 133 307.68 € | 1 234 602.64 € | 1 335 897.59 € |
| | 1300 | 479 402.51 € | 580 697.47 € | 681 992.42 € | 783 287.38 € | 884 582.33 € | 985 877.29 € | 1 087 172.25 € | 1 188 467.20 € | 1 289 762.16 € |
| | 1350 | 433 267.08 € | 534 562.03 € | 635 856.99 € | 737 151.95 € | 838 446.90 € | 939 741.86 € | 1 041 036.81 € | 1 142 331.77 € | 1 243 626.73 € |
| | 1400 | 387 131.64 € | 488 426.60 € | 589 721.56 € | 691 016.51 € | 792 311.47 € | 893 606.43 € | 994 901.38 € | 1 096 196.34 € | 1 197 491.29 € |
| | 1450 | 340 996.21 € | 442 291.17 € | 543 586.12 € | 644 881.08 € | 746 176.04 € | 847 470.99 € | 948 765.95 € | 1 050 060.90 € | 1 151 355.86 € |
| | 1500 | 294 860.78 € | 396 155.73 € | 497 450.69 € | 598 745.65 € | 700 040.60 € | 801 335.56 € | 902 630.52 € | 1 003 925.47 € | 1 105 220.43 € |
| | 1550 | 248 725.35 € | 350 020.30 € | 451 315.26 € | 552 610.21 € | 653 905.17 € | 755 200.13 € | 856 495.08 € | 957 790.04 € | 1 059 085.00 € |
| | 1600 | 202 589.91 € | 303 884.87 € | 405 179.83 € | 506 474.78 € | 607 769.74 € | 709 064.69 € | 810 359.65 € | 911 654.61 € | 1 012 949.56 € |
| | 1650 | 156 454.48 € | 257 749.44 € | 359 044.39 € | 460 339.35 € | 561 634.30 € | 662 929.26 € | 764 224.22 € | 865 519.17 € | 966 814.13 € |
| | 1700 | 110 319.05 € | 211 614.00 € | 312 908.96 € | 414 203.92 € | 515 498.87 € | 616 793.83 € | 718 088.78 € | 819 383.74 € | 920 678.70 € |
| | 1750 | 64 183.61 € | 165 478.57 € | 266 773.53 € | 368 068.48 € | 469 363.44 € | 570 658.40 € | 671 953.35 € | 773 248.31 € | 874 543.26 € |
| 1800 | 18 048.18 € | 119 343.14 € | 220 638.09 € | 321 933.05 € | 423 228.01 € | 524 522.96 € | 625 817.92 € | 727 112.88 € | 828 407.83 € | |
| 1850 | - 28 087.25 € | 73 207.70 € | 174 502.66 € | 275 797.62 € | 377 092.57 € | 478 387.53 € | 579 682.49 € | 680 977.44 € | 782 272.40 € | |
| 1900 | - 74 222.68 € | 27 072.27 € | 128 367.23 € | 229 662.18 € | 330 957.14 € | 432 252.10 € | 533 547.05 € | 634 842.01 € | 736 136.97 € | |
| 1950 | - 120 358.12 € | - 19 063.16 € | 82 231.80 € | 183 526.75 € | 284 821.71 € | 386 116.66 € | 487 411.62 € | 588 706.58 € | 690 001.53 € | |
| 2000 | - 166 493.55 € | - 65 198.59 € | 36 096.36 € | 137 391.32 € | 238 686.28 € | 339 981.23 € | 441 276.19 € | 542 571.14 € | 643 866.10 € | |