

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**‘Σημασία του φαινομένου της διαφυγής μεθανίου (Methane Slip) στην
λειτουργία των ναυτικών κινητήρων φυσικού αερίου’**

**‘Significance of the Methane Slip phenomenon in the operation of marine
natural gas engines’**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΟΥΜΕΝΤΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

A.M. :51117032



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΤΖΗΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Αιγάλεω, 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Σημασία του φαινομένου της διαφυγής μεθανίου (Methane Slip) στην λειτουργία των ναυτικών κινητήρων φυσικού αερίου

Συγγραφέας

Κουμένης Σπυρίδων

A.M 51117032

Επιβλέπων

Χατζηαποστόλου Αντώνιος

Ημερομηνία εξέτασης

Τετάρτη 04/10/2023

Εξεταστική Επιτροπή

Χατζηαποστόλου Αντώνιος

Κουμπογιάννης Δημήτριος

Λιβανός Γεώργιος

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κουμέντης Σπυρίδων του Θεοδώρου , με αριθμό μητρώου 51117032 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών , δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών



Σπυρίδων Κουμέντης

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Χατζηαποστόλου, για την πολύτιμη βοήθεια και την αμέριστη στήριξη του κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στη σχολή Ναυπηγών Μηχανικών του ΠΑΔΑ.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια και ιδιαίτερα τον αγαπημένο μου πατέρα, Α' της σχολής Μηχανικών του Εμπορικού Ναυτικού, ο οποίος μου ενέπνευσε την αγάπη του για τη θάλασσα και τις ναυτικές μηχανές. Δεν θα μπορούσα να μην κάνω ειδική αναφορά στην πολύ αγαπημένη μου μητέρα, αρωγό και υποστηρικτή σε κάθε μου προσπάθεια. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεγάλο μου αδερφό απόφοιτο Χημικό Μηχανικού του ΕΜΠ για την καταλυτική βοήθεια σε όλο τον κύκλο των σπουδών μου. Την εργασία αυτή την αφιερώνω ολόψυχα στην οικογένεια μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ποιοτική μελέτη της διαφυγής μεθανίου κατά την καύση του στους ναυτικούς κινητήρες φυσικού αερίου . Στην αρχή , παρουσιάζονται οι βασικές εννοιές του φυσικού αερίου και ο ρόλος του στην εκπομπές ρύπων , έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και στην συνέχεια την υπερθέρμανση του πλανήτη. Επιπλέον παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι κινητήρων φυσικού αερίου και οι διάφορες τους κατά την καύση τους, καθώς και οι τρόποι διαφυγής μεθανίου από αυτούς. Στο τέλος της διπλωματικής παρουσιάζονται οι ρυθμιστικές διατάξεις για τη διαφυγή μεθανίου σήμερα καθώς και οι νέες λύσεις-τεχνολογίες που προτείνονται για την μείωση του φαινομένου αυτού

ABSTRACT

The purpose of thesis is the qualitative study of Methane Slip during combustion in marine natural gas engines. At the beginning, the basic concepts of natural gas and its role in emissions are presented, resulting in an increase in the greenhouse effect and subsequent global warming. In addition, the different types of natural gas engines and their various combustion processes contemporary, as well as the ways in which methane escapes from them. At the end of the diploma, the regulatory provisions for the escape of methane today as well as the new solutions-technologies proposed to reduce this phenomenon are presented..

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	8
1. Το LNG ως Καύσιμο και ο Ρόλος του στις Εκπομπές Ρύπων.....	11
1.1. Το Φυσικό Αέριο ως Καύσιμο.....	15
1.2. Τύποι και Κατηγορίες των Κινητήρων Φυσικού Αερίου.....	16
1.3. Διαφυγή Μεθανίου από Κινητήρες.....	18
1.4. Η Έννοια της Διαφυγής Μεθανίου.....	20
1.5. Κινητήρας LNG και Διαφυγή Μεθανίου.....	22
1.6. Επίπεδα Εκπομπών Διαφυγής Μεθανίου.....	27
2. Εκπομπές Αερίου Κινητήρα και Διαφυγή Μεθανίου.....	28
2.1. Διαφυγή Μεθανίου κατά τη Μεταφορά LNG.....	30
2.2. Διαρροή Μεθανίου κατά τον Ανεφοδιασμό με LNG.....	31
2.3. Λόγοι Διαφυγής Μεθανίου κατά τις Επιχειρήσεις Φορτίου.....	33
2.4. Δυνατότητες Μείωσης της Ατμοποίησης από Δεξαμενές Φορτίου.....	35
2.5. Διαρροές από Λειτουργίες Ανεφοδιασμού.....	36
2.6. Πρωτογενείς και Δευτερογενείς Πιθανότητες Μείωσης της Διαρροής Μεθανίου.....	38
2.7. Διαφυγή Μεθανίου σε Σχέση με το Φορτίο και τη Θερμοκρασία του Κινητήρα	38
3. Μείωση Εκπομπών Μεθανίου στα Πλοία.....	43
3.1. Ρυθμιστικές Διατάξεις για τη Μείωση Εκπομπών Μεθανίου.....	43
3.2. Μείωση των Εκπομπών Μεθανίου σε Επίπεδο Πλοίου.....	44
3.3. Μελλοντικές Μειώσεις Εκπομπών.....	52
3.4. Βελτίωση της Μέτρησης Μεθανίου στα Πλοία.....	55

3.4.1.	Τεχνολογίες και Λύσεις Μείωσης για τη Μείωση Εκπομπών Μεθανίου	57
3.4.2.	Τεχνολογίες Κινητήρα	58
3.4.3.	Τεχνολογίες Μετεπεξεργασίας (After Treatment).....	61
3.4.4.	Λύσεις Συστήματος για τη Μείωση των Εκπομπών Μεθανίου	68
4.	Συμπεράσματα	70
	Βιβλιογραφία	73

1. Το LNG ως Καύσιμο και ο Ρόλος του στις Εκπομπές Ρύπων

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse gases, GHG) από τις θαλάσσιες μεταφορές υπολογίζονται σε περίπου ένα δισεκατομμύριο ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (ισοδύναμα CO₂). Αυτό αντιπροσωπεύει περίπου το 3% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών GHG, ένα αρκετά σταθερό μερίδιο σύμφωνα με τις τρεις τελευταίες μελέτες GHG του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) (IMO, 2009; IMO, 2014; IMO, 2020). Αυτές οι εκπομπές θα πρέπει να μειωθούν κατά τουλάχιστον 50% έως το 2050, εάν επιτευχθεί ένας οδικός χάρτης που να αντικατοπτρίζει τις συμφωνίες του Παρισιού (UN 2015; IMO, 2015). Η κύρια πηγή εκπομπών από τα πλοία είναι τα καυσαέρια από τις μηχανές καύσης τους, ακολουθούμενα από τις εκπομπές από την παραγωγή των καυσίμων του πλοίου. Από αυτά τα καυσαέρια, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) επηρεάζει το κλίμα, ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του θείου (SO_x), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το μεθάνιο (CH₄) και τα σωματίδια, συμπεριλαμβανομένου του μαύρου άνθρακα (black carbon, BC) έχουν διπλή επίπτωση, αφενός στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή αλλά και στην περιφερειακή και τοπική περιβαλλοντική επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία και τη φύση.

Οι μετρήσεις που συγκρίνουν τα καυσαέρια με βάση το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (global warming potential, GWP), που αναφέρονται ως "ισοδύναμα CO₂", χρησιμοποιούνται για να δείξουν τη συμβολή τους στην κλιματική αλλαγή (Shine, 2009). Το GWP δίνει αρνητικά βάρη στα καυσαέρια και τα σωματίδια που έχουν αποτέλεσμα ψύξης και θετικά βάρη σε αυτά που έχουν επίδραση θέρμανσης. Οι τιμές GWP, όπως παρέχονται από τη Διεθνή Ομάδα για την Κλιματική Αλλαγή (International Panel on Climate Change, IPCC) στις Εκθέσεις Αξιολόγησης (Assessment Reports, AR), για τις οποίες η AR 5 είναι η πιο πρόσφατη (IPCC, 2014), βασίζονται στην πιο πρόσφατη επιστημονική εργασία και επομένως προτείνονται ως παράγοντας χαρακτηρισμού των επιπτώσεων του κλίματος σε μελέτες αξιολόγησης του κύκλου ζωής (life-cycle assessment, LCA) (Hauschild et al., 2013). Μετά τη δημοσίευση της πέμπτης έκθεσης αξιολόγησης (AR5) το 2014, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) δημοσίευσε αρκετές Ειδικές Εκθέσεις (SR) ξεκινώντας τον Οκτώβριο του 2018. Αυτές οι εκθέσεις περιλαμβάνουν την Ειδική

Έκθεση για την υπερθέρμανση του πλανήτη κατά 1,5 °C (SR15) τον Οκτώβριο του 2018, η βελτίωση του 2019 στις κατευθυντήριες γραμμές της IPCC 2006 για τις εθνικές απογραφές αερίων θερμοκηπίου τον Μάιο του 2019, η Ειδική Έκθεση για την Κλιματική Αλλαγή και τη Γη (SRCCL) τον Αύγουστο του 2019 και την Ειδική Έκθεση για τον Ωκεανό σε Μεταβαλλόμενο Κλίμα (SROCC) τον Σεπτέμβριο του 2019. Αυτές οι εκθέσεις παρέχουν εστιασμένες και έγκαιρες αξιολογήσεις σε συγκεκριμένες πτυχές της κλιματικής αλλαγής, με στόχο να ενημερώσουν τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και το κοινό σχετικά με τα τελευταία επιστημονικά ευρήματα και τις επιπτώσεις τους (Lynn & Peena, 2021).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των μετρήσεων μεταξύ GWP και μιας εναλλακτικής μετρικής, του δυναμικού παγκόσμιας αλλαγής θερμοκρασίας (Global Temperature change Potential, GTP), είναι ακόμα υπό συζήτηση (Ocko et al., 2017; Tanaka et al., 2019). Το GWP υπολογίζει τη θερμότητα που απορροφάται από το αέριο του θερμοκηπίου, ενώ το GTP υπολογίζει την προκύπτουσα αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας. Υπάρχει η άποψη ότι το GTP ευθυγραμμίζεται περισσότερο με τον στόχο θερμοκρασίας της Συμφωνίας του Παρισιού (Allen et al., 2016), και ορισμένες μελέτες από άλλους τομείς χρησιμοποιούν το GTP100 αντί για το GWP100 (Jordan et al., 2018). Ωστόσο, στον ναυτιλιακό τομέα ή στον τομέα των μεταφορών, η κύρια εστίαση είναι στο GWP και γίνονται λίγες συγκρίσεις που περιλαμβάνουν GTP, οπότε η υπόθεση είναι ότι το GTP 40 ισούται με GWP100 όταν το LNG συγκρίνεται με το ντίζελ MGO.

Για τις εκπομπές που συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση, σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, υπάρχει μια αποδεκτή συναίνεση ότι το υγροποιημένο φυσικό αέριο προσφέρει σημαντικές μειώσεις όταν το καύσιμο καίγεται στους κινητήρες του πλοίου (ή στους αεριοστροβίλους) σε σύγκριση με το ναυτιλιακό ντίζελ (marine gas oil, MGO) και τα παραδοσιακά καύσιμα ναυτιλίας όπως το βαρύ πετρέλαιο (Heavy Fuel Oil, HFO) (Ushakov et al., 2019). Το LNG δεν περιέχει θείο και επομένως δεν υπάρχουν εκπομπές οξειδίων του θείου (SO_x). Οι εκπομπές σωματιδίων (PM) είναι επίσης πολύ χαμηλότερες από την καύση LNG. Η εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO_x) διέπτεται από τις παραμέτρους της διαδικασίας καύσης, με κυρίαρχη παράμετρο τη

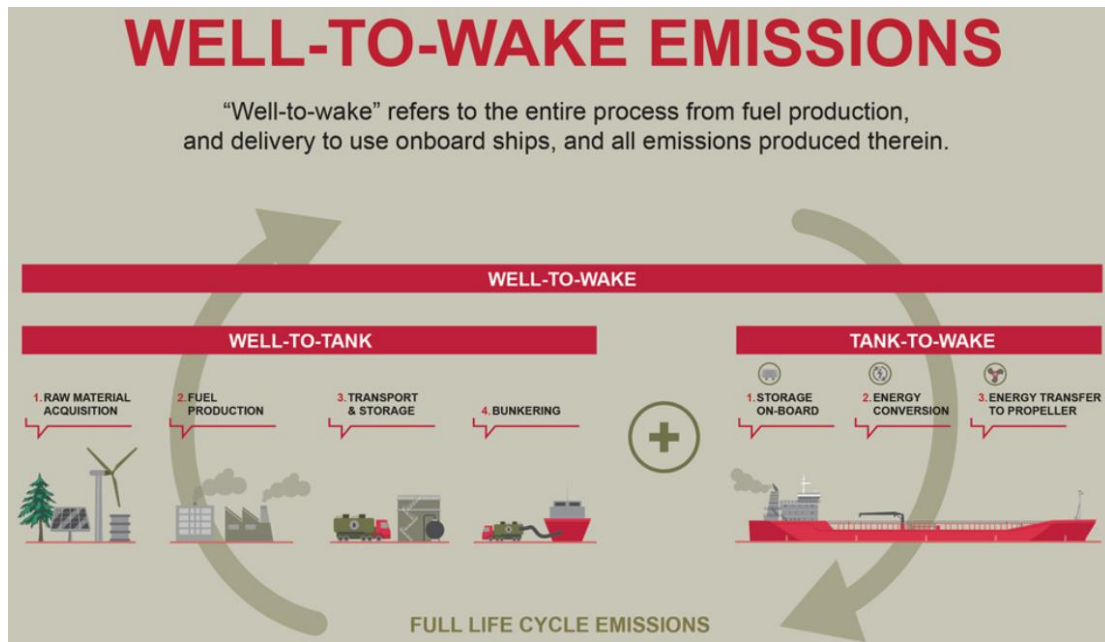
θερμοκρασία. Έτσι, οι εκπομπές NO_x ποικίλλουν ανάλογα με την τεχνολογία του κινητήρα και δεν σχετίζονται άμεσα με το καύσιμο. Η χρήση LNG σε κινητήρες χαμηλής πίεσης (διαδικασία καύσης Otto) συνήθως έχει ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλές εκπομπές NO_x. Αυτά τα πλεονεκτήματα πυροδότησαν τα πρώτα έργα ανάπτυξης LNG για ναυτιλιακές εφαρμογές στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Επιπλέον, με την υψηλή αναλογία υδρογόνου προς άνθρακα, το LNG θεωρείται συχνά ως μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στη θάλασσα. Εάν κάποιος εκτιμήσει τις εκπομπές και την ενέργεια με βάση μόνο το στάδιο της καύσης, το LNG έχει ως αποτέλεσμα περίπου 25% χαμηλότερες εκπομπές CO₂ από τα συμβατικά καύσιμα όπως το ντίζελ ή το βαρύ πετρέλαιο. Τέτοιες εκτιμήσεις ονομάζονται Tank-to-wake (TTW) (Schuller et al., 2019). Όταν κάποιος περιλαμβάνει εκτιμήσεις Well-to-tank (WTT) των εκπομπών για όλη την εφοδιαστική αλυσίδα LNG (από την εξόρυξη μέσω της εφοδιαστικής έως τις δεξαμενές του πλοίου) καθώς και το άκαυστο μεθάνιο (CH₄) από τον κινητήρα του πλοίου, αυτές οι πρόσθετες εκπομπές του διαρρέοντος μεθανίου θα μειώσουν και στη χειρότερη περίπτωση θα ακυρώσουν τα τυχόν κέρδη αερίων θερμοκηπίου (GHG) από τη χρήση LNG σε σχέση με τα HFO ή MGO, όπως τεκμηριώνεται σε πρόσφατες μελέτες εκπομπών του κύκλου ζωής από κινητήρες θαλάσσης (Lindstad & Riialand, 2020).

Το άκαυστο μεθάνιο από τον κινητήρα των πλοίων είναι μία από τις πολλές πηγές για τις αυξανόμενες παγκόσμιες εκπομπές μεθανίου στον κόσμο, όπου τα αυξανόμενα επίπεδα μεθανίου στην ατμόσφαιρα αντιπροσωπεύουν μια σημαντική πρόκληση στην προσπάθεια περιορισμού της υπερθέρμανσης του πλανήτη (Turner et al., 2019). Τα επίπεδα συγκέντρωσης του μεθανίου στην ατμόσφαιρα έχουν αυξηθεί δραστικά από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης και σχεδόν τριπλασιάστηκαν. Συγκριτικά, η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα, η οποία τείνει να εστιάζεται περισσότερο στη συζήτηση για την κλιματική αλλαγή, έχει αυξηθεί πολύ λιγότερο, δηλαδή κατά 50% την ίδια περίοδο.

Ενώ η κύρια πηγή ανθρωπογενών εκπομπών μεθανίου είναι ο γεωργικός τομέας, ο οποίος ευθύνεται για περισσότερες από τις μισές παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές CH₄ (Yusuf et al., 2012), ο τομέας των θαλάσσιων μεταφορών παρουσιάζει ταχεία

ανάπτυξη στις εκπομπές μεθανίου, χωρίς σημάδια σταθεροποίησης στο μέλλον. Η πιο πρόσφατη μελέτη GHG του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization, IMO) (IMO, 2020) αναφέρει αύξηση 150% στις εκπομπές μεθανίου από πλοία μεταξύ 2012 και 2018, κυρίως λόγω του αυξημένου αριθμού πλοίων με καύσιμο LNG και ισχυρίζεται ότι ο IMO χρειάζεται να ρυθμίσει τις εκπομπές μεθανίου.

Συνολικά στη δημόσια συζήτηση, το LNG φαίνεται να αντιμετωπίζεται ως διπολικό ζήτημα. Ορισμένες μελέτες υποστηρίζουν ότι όλη η χρήση LNG είναι ωφέλιμη τόσο όσον αφορά τα GHG όσο και την τοπική ποιότητα του αέρα. Αντίθετα, άλλες μελέτες τείνουν να διαφωνούν με τη χρήση του LNG λόγω της υψηλής διαφυγής (slip) του μεθανίου σε ολόκληρη την αλυσίδα Well-to-tank. Φαίνεται ότι είναι λίγοι, αν υπάρχουν, που προσπαθούν να περιγράψουν το θέμα του LNG από τη μέση της οπτικής γωνίας του δρόμου. Αν και το ίδιο το LNG ως καύσιμο δεν απανθρακοποιεί τις θαλάσσιες μεταφορές, σε αντίθεση με τα ουδέτερα από άνθρακα καύσιμα, η συμβολή του στη διαδικασία απανθρακοποίησης δεν είναι αμελητέα. Η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο το LNG μπορεί να χρησιμεύσει ως καύσιμο μετάβασης για την απαλλαγή των θαλάσσιων μεταφορών από άνθρακα είναι ακόμα ένα ανοιχτό πρόβλημα. Στην ιδανική περίπτωση, η λύση που αναμένεται θα πρέπει να αφορά τόσο την παροχή βραχυπρόθεσμων μειώσεων GHG όσο και λύσεων που σχετίζονται με τον κινητήρα και τις διατάξεις των δεξαμενών που θα μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν ώστε να λειτουργούν με καύσιμα πολύ χαμηλού ή μηδενικού άνθρακα όταν αυτά είναι διαθέσιμα, όπως π.χ. η αμμωνία που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές.



1.1. Το Φυσικό Αέριο ως Καύσιμο

Το φυσικό αέριο (NG) είναι ένα μείγμα διαφόρων αερίων υδρογονανθράκων μικρού βάρους όπως το μεθάνιο, το αιθάνιο και άλλα, αλλά μπορεί να περιέχει κάποιο ποσοστό διοξείδιο του άνθρακα, άζωτο και υδρατμούς. Η πραγματική σύνθεση μπορεί να ποικίλλει ελαφρώς ανάλογα με την προέλευση του αερίου και τις λεπτομέρειες της διαδικασίας παραγωγής με το μεθάνιο να αντιπροσωπεύει συνήθως το 87-96% του φυσικού αερίου (Demirbas, 2010). Ακόμη και παρά τη μικρή αυτή αλλαγή στη σύνθεση, η αλλαγή στο ποσοστό του μεθανίου, η οποία καθορίζει την αντίσταση κρούσης του καυσίμου (Feist et al., 2010) μπορεί να είναι σημαντική όπως προκύπτει από τη σύνοψη της σύνθεσης LNG από διαφορετικούς προμηθευτές αερίου σε όλη την Ευρώπη.

Η εφαρμογή του NG ως καυσίμου για κινητήρες εσωτερικής καύσης (internal combustion engines, ICEs) επιτρέπει τη μείωση των εκπομπών NO_x κατά 50–85%, CO₂ κατά 20–30%, CO κατά 70–95%, εκπομπές υδρογονανθράκων (hydrocarbons, HC) μη μεθανίου κατά περίπου 50% και ταυτόχρονα δεν παράγει σχεδόν καθόλου καπνό και σωματίδια (particulate matter, PM) (Semin, 2008). Για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα, το μεθάνιο δεν απαιτεί μεγάλες τροποποιήσεις του κινητήρα και η εξαιρετική αντικρουστική του ποιότητα (αριθμός οκτανίων > 120)

(Wei & Geng, 2016) επιτρέπει τη χρήση υψηλών αναλογιών συμπίεσης με αποτέλεσμα υψηλότερη θερμική απόδοση και αντίστοιχη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου (Cho & He, 2007). Σε ότι αφορά τους κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση, προκύπτει μια ορισμένη δυσκολία που σχετίζεται με τη μάλλον υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης του μεθανίου, επομένως απαιτείται μια πηγή ανάφλεξης υψηλής ενέργειας (Heywood, 2018).

Σε ισοδύναμη βάση ενέργειας, το φυσικό αέριο θα πρέπει να είναι φθηνότερο καύσιμο σε σύγκριση με τη βενζίνη και το ντίζελ (Bourbon, 2014), γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος λειτουργίας. Επιπλέον αναμένεται έλλειψη διυλισμένου ναυτιλιακού καυσίμου λόγω του αυστηρότερου παγκόσμιου ανώτατου ορίου θείου με την πλειονότητα των υπαρχόντων κινητήρων να έχουν μετατραπεί από HFO σε λειτουργία MGO.

Ενώ το φυσικό αέριο (natural gas, NG) χρησιμοποιείται συνήθως σε αέρια μορφή στη βιομηχανία και τις οικιακές εφαρμογές, το υγροποιημένο φυσικό αέριο (liquefied natural gas, LNG) είναι μια προτιμώμενη λύση στον ναυτιλιακό τομέα (Eide & Endresen, 2010). Το LNG είναι μια δοκιμασμένη τεχνολογία καθώς χρησιμοποιείται ως κύριο καύσιμο στα πλοία μεταφοράς LNG τα τελευταία 45 χρόνια (Dimopoulos G., & Frangopoulos, 2008), αρχικά σε παραδοσιακά συστήματα λέβητα και ατμοστροβίλων, αλλά σήμερα η εφαρμογή του σε ICE (Internal Combustion Engine) γίνεται όλο και πιο κοινή (Burel et al., 2013). Σήμερα, το LNG χρησιμοποιείται ως κύριο καύσιμο για διαφορετικούς τύπους πλοίων, με διάφορους τύπους κινητήρων αερίου που χρησιμοποιούνται με επιτυχία από τη ναυτιλιακή βιομηχανία.-

1.2. Τύποι και Κατηγορίες των Κινητήρων Φυσικού Αερίου

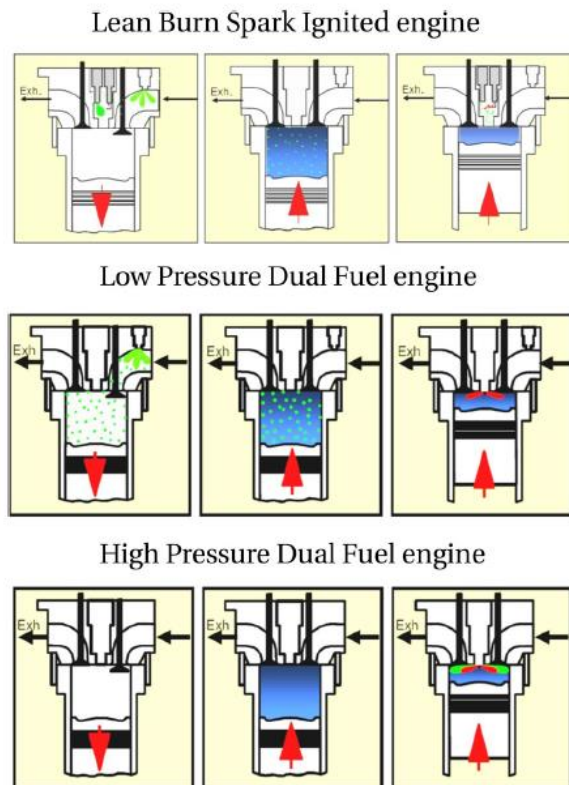
Υπάρχουν πέντε διαφορετικοί τύποι κινητήρων αερίου που χρησιμοποιούνται για ναυτιλιακή εφαρμογή. Κάθε τύπος έχει τα δικά του χαρακτηριστικά καύσης που έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετική απόδοση και προφίλ εκπομπών καυσαερίων (Nielsen & Stenersen, 2010). Με όλα αυτά φαίνεται αρκετά σαφές ότι η επιλογή της τεχνολογίας αερίου θα καθορίσει τον συνολικό οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο της λειτουργίας αερίου για ένα συγκεκριμένο σκάφος (Stenersen & Thonstad 2017). Αυτοί

οι πέντε βασικοί τύποι κινητήρων αερίου μπορούν να κατανεμηθούν σε τρεις κατηγορίες κινητήρων (συμπεριλαμβανομένης της αντίστοιχης περιοχής ισχύος που καλύπτουν):

- Μηχανές ανάφλεξης σπινθήρα με περίσσεια αέρα (lean burn).
 - Μέση και υψηλή ταχύτητα, 4χρονος κύκλος (LBSI): 0,5–8 MW.
- Μηχανές διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσης.
 - Μέση ταχύτητα, 4χρονος κύκλος (LPDF): 1–18 MW.
 - Χαμηλή ταχύτητα, δίχρονος κύκλος (LPLSDF): 5–63 MW.
- Μηχανές διπλού καυσίμου υψηλής πίεσης.
 - Μέση ταχύτητα, 4χρονος κύκλος (HPMSDF): 2–18 MW.
 - Χαμηλή ταχύτητα, δίχρονος κύκλος (HPLSDF): > 2,5 MW.

Καθώς υπάρχει επικάλυψη στο εύρος ισχύος μεταξύ των καθορισμένων τεχνολογιών αερίου, η σωστή επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων τύπων πρέπει να γίνει από τον πλοιοκτήτη ανάλογα με τις προσεκτικά αξιολογημένες απαιτήσεις όσον αφορά την ισχύ πρόωσης, τον πλεονασμό, το λειτουργικό προφίλ του σχεδιασμένου σκάφους, τη διαθεσιμότητα του φυσικού αερίου στην προγραμματισμένη διαδρομή μεταφοράς καθώς και άλλα πιθανά εμπορικά ζητήματα.

Με βάση την επιχειρησιακή εμπειρία, μόνο οι κινητήρες LBSI και LPDF μπορούν να θεωρηθούν ως δοκιμασμένη τεχνολογία αερίου, καθώς υπάρχουν πολλά πλοία με αντίστοιχους κινητήρες που βρίσκονται σε λειτουργία εδώ και αρκετά χρόνια. Οι κύριοι προμηθευτές τέτοιων κινητήρων είναι η Rolls-Royce Bergen Engines, Νορβηγία (LBSI, μεσαία ταχύτητα), η Mitsubishi, Ιαπωνία (LBSI, υψηλή ταχύτητα) και η Wärtsilä, Φινλανδία (LPDF). Οι κινητήρες LPLSDF (Winterthur Gas and Diesel (WinGD), Ελβετία) και ο HPLSDF (MAN Diesel and Turbo, Γερμανία) έχουν επίσης εγκατασταθεί σε πολλά πλοία μέχρι στιγμής και είναι εμπορικά διαθέσιμοι σε μεγάλη γκάμα ισχύος. Ο τύπος HPMSDF (Wärtsilä) λειτουργεί εδώ και πολλά χρόνια, αλλά μόνο σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής της FPSO που λειτουργούν στη Βόρεια Θάλασσα και σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ξηρά, αλλά δεν έχει χρησιμοποιηθεί για πρόωση πλοίων μέχρι στιγμής. Μια σχηματική αναπαράσταση και των τριών υπάρχοντων κατηγοριών των κινητήρων αερίου παρουσιάζεται στο Σχ. 1.



Σχ. 1. Τρεις βασικές κατηγορίες κινητήρα με αέριο για θαλάσσια εφαρμογή (Stenersen & Thonstad 2017).

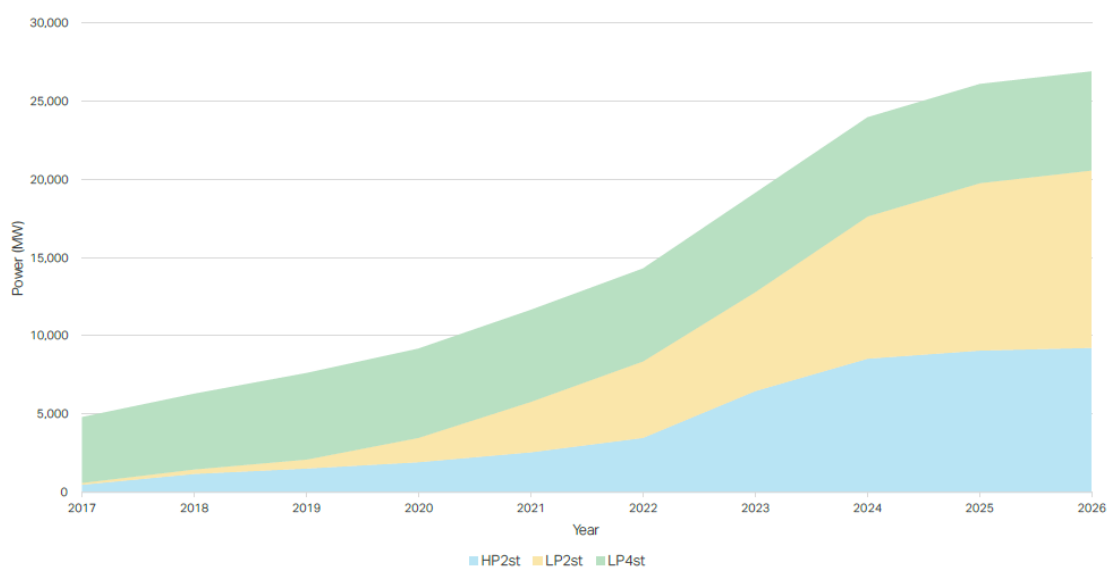
1.3. Διαφυγή Μεθανίου από Κινητήρες

Η αγορά κινητήρων διπλού καυσίμου (dual fuel, DF) αποτελείται κυρίως από τρεις βασικές τεχνολογίες κινητήρων:

- Ένας δίχρονος κινητήρας χαμηλής πίεσης (LP2st) που βασίζεται στην αρχή της καύσης κύκλου Otto, με εισαγωγή αερίου σε μέγιστη πίεση 13 bar. Το LP2st είναι μια επιλογή κύριας μηχανής (main engine, ME).
- Ένας δίχρονος κινητήρας υψηλής πίεσης (HP2st) βασισμένος στην αρχή της καύσης του κύκλου Diesel, με έγχυση αερίου σε πίεση με μέγιστο 300 bar. Το HP2st είναι μια επιλογή ME.
- Ένας τετράχρονος κινητήρας χαμηλής πίεσης (LP4st) βασισμένος στην αρχή της καύσης κύκλου Otto, με εισαγωγή αερίου σε μέγιστη πίεση 13 bar. Το LP4st μπορεί να είναι τόσο ME όσο και βοηθητική επιλογή.

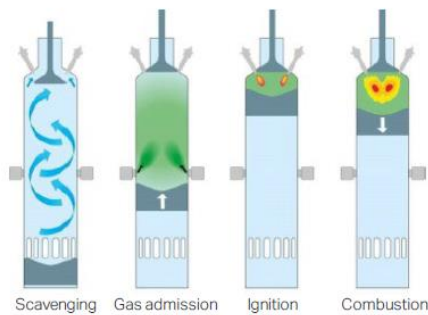
Ο κυρίαρχος κινητήρας στην αγορά είναι ο LP4st, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως βοηθητικός κινητήρας όσο και για κύρια πρόωση σε διάταξη diesel-electric. Η τεχνολογία κινητήρα LP4st ήταν επίσης η πρώτη που εισήχθη και χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα πλοία LNG. Από το 2021, περίπου το 42% όλων των ΜΕ διπλού καυσίμου μεθανίου είναι LP4st (με βάση την εγκατεστημένη ισχύ), 34% LP2st και 25% HP2st. Οι παραγγελίες για τους κινητήρες LP2st και HP2st συνεχίζουν να αυξάνονται καθώς παραγγέλλονται περισσότερα πλοία με καύσιμα LNG. Οι τιμές μεριδίου αγοράς στο Σχήμα 2 δεν περιλαμβάνουν τους αεριοστρόβιλους/ατμοστρόβιλους και τους κινητήρες ανάφλεξης με σπινθήρα, οι οποίοι είτε έχουν πολύ χαμηλή διαρροή μεθανίου είτε αποτελούν μικρό μερίδιο αγοράς. Επίσης, δεν περιλαμβάνονται οι βοηθητικοί κινητήρες.

Με βάση την τρέχουσα ανάλυση μεριδίου αγοράς του κύριου κινητήρα, οι εκπομπές μεθανίου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και για τις τρεις βασικές τεχνολογίες κινητήρων, καθώς το μερίδιο αγοράς των δίχρονων κινητήρων συνεχίζει να αυξάνεται. Ωστόσο, οι τετράχρονοι κύριοι κινητήρες συνεχίζουν να κατέχουν μεγάλο μερίδιο αγοράς λόγω της χρήσης τους ως βοηθητικοί κινητήρες.

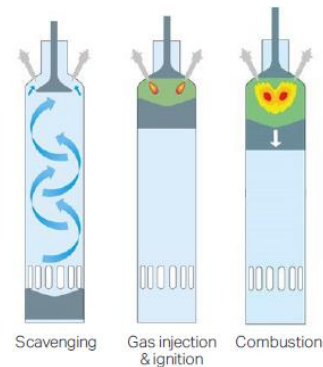


Σχήμα 2. Μερίδιο αγοράς κύριου κινητήρα διπλού καυσίμου μεθανίου. Πηγή: (Maersk Mc-Kinney Moller Center, 2022).

Otto Cycle Engine Operating Cycle



Diesel Cycle Engine Operating Cycle



Σχήμα 3. Ακολουθίες λειτουργίας κινητήρα κύκλου Otto και Diesel. Πηγή: (Maersk Mc-Kinney Moller Center, 2022).

1.4.Η Έννοια της Διαφυγής Μεθανίου

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους το μεθάνιο μπορεί να διαφύγει άκαυστο στην ατμόσφαιρα. Η πιο αναφερόμενη εκπομπή μεθανίου είναι η διαφυγή ή ατελής καύση ή διαρροή μεθανίου (methane slip), όπου μια συγκεκριμένη ποσότητα μεθανίου αποφεύγει την καύση και εκπέμπεται άκαυστη μέσω των καυσαερίων του κινητήρα. Στους κινητήρες LP2st που χρησιμοποιούν τον κύκλο Otto (Σχήμα 3), το αέριο εγχέεται και αναμιγνύεται με τον αέρα. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται περιοχές με διαφορετικούς τοπικούς “Λόγους Αέρα Καυσίμου (Air to Fuel Ratio - AFR)”. Κάποιες από αυτές τις περιοχές είναι φτωχές σε φυσικό αέριο, δηλαδή έχουν υψηλό AFR που μπορεί να υπερβαίνει τιμές όπως 20, 25, 30 κλπ. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται σε κάθε περιοχή μπορεί να ποικίλλει, ανάλογα με το AFR.. Οι φτωχές και οι ψυχρές περιοχές μπορούν να καούν μόνο εν μέρει, οδηγώντας σε ατελή καύση. Η ατελής καύση (methane slip) μπορεί επίσης να εξαρτάται από το φορτίο (δυναμική ολίσθηση): καθώς μειώνεται το φορτίο, τα φτωχά μείγματα εμφανίζονται πιο συχνά και, σε συνδυασμό με τα ψυχρά μέρη που σχηματίζονται, αυξάνει την διαρροή μεθανίου. Η αλλαγή στη σύνθεση του αερίου με την πάροδο του χρόνου επηρεάζει επίσης τη βέλτιστη αναλογία αέρα/καυσίμου και μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή της διαρροής του μεθανίου. Οι συνθήκες περιβάλλοντος επηρεάζουν επίσης την ποσότητα διαφυγής μεθανίου καθώς η βέλτιστη αναλογία αέρα προς καύσιμο ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία. Επιπλέον, σε συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου (δηλαδή, όταν

το σκάφος αντιμετωπίζει έντονες καιρικές συνθήκες), ο υπερσυμπιεστής δεν μπορεί να ακολουθήσει τη μεταβαλλόμενη ζήτηση αέρα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη διαφυγή μεθανίου.

Άμεση διαφυγή μπορεί επίσης να συμβεί με έναν κινητήρα LP2st, με πολλές πιθανές πηγές. Κατά τη στιγμή της εισαγωγής αερίου, η βαλβίδα εξαγωγής είναι μερικά ανοιχτή. Επομένως, μια μικρή ποσότητα αερίου μπορεί να ρέει απευθείας στην υποδοχή της εξάτμισης. Η θέση της βαλβίδας εισαγωγής αερίου, ο χρονισμός της βαλβίδας εξαγωγής και ο χρονισμός εισαγωγής αερίου μπορούν να βελτιστοποιηθούν για τη μείωση ή την εξάλειψη της άμεσης διαφυγής. Οι περιοχές μεταξύ του διακένου μεταξύ πιστονιού και κυλίνδρου περιέχουν ένα μείγμα αέρα και αερίου που δεν αναφλέγεται, αυξάνοντας την διαφυγή. Επιπλέον, το μείγμα αερίου-αέρα που προσκρούει στο όριο της καύσης ψύχεται λόγω της έντονης ψύξης της επένδυσης και είναι επίσης πιθανό να παραμείνει άκαυστο. Η προανάφλεξη λιπαντικού από ατμοποιητές που στάζουν μπορεί να οδηγήσει σε πρόωμη καύση και ασταθή και ατελή καύση, αυξάνοντας περαιτέρω την διαρροή μεθανίου.

Οι τετράχρονοι κινητήρες DF λειτουργούν με τη διαδικασία καύσης Otto, όπου το αέριο καύσιμο προαναμιγνύεται με τον αέρα πριν από την ανάφλεξη. Το μείγμα αέρα/καυσίμου συμπιέζεται και αναφλέγεται με έναν πιλοτικό ψεκασμό υγρού καυσίμου και έτσι βρίσκεται στον κύλινδρο για όλες τις διαδρομές εισαγωγής και συμπίεσης και μέρος της διαδρομής ισχύος. Επιπλέον, επειδή οι τετράχρονοι κινητήρες βασίζονται πολύ περισσότερο στην ανταλλαγή αερίων στις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής, στην τετράχρονη διαδικασία Otto υπάρχει αυξημένος κίνδυνος για το αέριο καύσιμο να αποφύγει την καύση (επικάλυση ανοιγμάτων βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής). Η επικάλυση βαλβίδων δημιουργεί μια αναπόφευκτη περίοδο κατά τη διάρκεια της διαδρομής εισόδου ενός τετράχρονου κινητήρα, όταν και οι δύο βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής είναι ανοιχτές για να αντικαταστήσουν τον κύλινδρο, δηλ. να αντικαταστήσουν τα καυσαέρια με αέρα πλήρωσης ή μίγμα αέρα/καυσίμου. Επιπρόσθετα η γεωμετρία του θαλάμου καύσης μπορεί να αυξήσει την πιθανότητα *όγκων ρωγμών* (crevice volumes), δηλαδή περιοχών όπου μπορούν να παγιδευτούν θύλακες άκαυστου αερίου που δεν μπορούν να προσεγγιστούν από τη φλόγα κατά την καύση, με αποτέλεσμα να διαφεύγει το μεθάνιο όταν ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής. Οι

κύριες διαφορές μεταξύ ενός LP4st και ενός LP2st, είναι ότι στις τετράχρονες βαλβίδες συνήθως υπάρχουν τέσσερις βαλβίδες (που σημαίνει τέσσερις θήκες βαλβίδων και οι αντίστοιχοι όγκοι ρωγμών) και ότι οι τετράχρονοι κινητήρες έχουν μικρότερο θάλαμο καύσης (αναλογία επιφάνειας προς όγκο) συν περισσότερα κινούμενα μέρη. Οι κατασκευαστές κινητήρων εργάζονται για βελτιώσεις σχεδιασμού και συστήματος για να μειώσουν σημαντικά την διαφυγή μεθανίου στους κινητήρες LP4st.

Για τους κινητήρες HP2st που χρησιμοποιούν τον κύκλο Diesel, το αέριο εγχέεται στον πεπιεσμένο αέρα φόρτισης γύρω από το πάνω νεκρό σημείο λίγο μετά τον πιλότο υγρού καυσίμου, όταν ο πιλότος έχει ήδη αναφλεγεί. Δεδομένου ότι το αέριο καύσιμο εισέρχεται στον κύλινδρο μόνο αφού κλείσει η βαλβίδα εξαγωγής και αναφλέγεται αμέσως, δεν υπάρχει δυνατότητα διαφυγής μεθανίου κατά τη διάρκεια του καθαρισμού του κυλίνδρου, πράγμα που σημαίνει ότι δεν συμβαίνει άμεση ατελής καύση. Η πίεση έγχυσης του αερίου θα δημιουργήσει ένα ρεύμα πίδακα που έλκει τον απαραίτητο αέρα από το περιβάλλον, έτσι με τη σωστή πίεση έγχυσης αναμιγνύεται επαρκής αέρας με το αέριο μεθανίου και μπορεί να πραγματοποιηθεί αμέσως μια ιδανική καύση. Αυτό σημαίνει ότι το μεθάνιο δεν έχει τη δυνατότητα να παγιδευτεί σε όγκους ρωγμής και να παραμείνει άκαυστο, όπως η περιοχή μεταξύ του εμβόλου (στο άνω μέρος του) και του χιτωνίου κυλίνδρου.

1.5.Κινητήρας LNG και Διαφυγή Μεθανίου

Εκτός από τις διαρροές ανεφοδιασμού καυσίμων, στη βιομηχανία έχουν προκύψει ανησυχίες για την διαφυγή του μεθανίου, που διαφεύγει από τον θάλαμο καύσης ως άκαυστος υδρογονάνθρακας. Αυτή η διαφυγή μεθανίου είναι συνάρτηση του τύπου του κινητήρα LNG που χρησιμοποιείται. Για εφαρμογές θαλάσσιων κινητήρων με φυσικό αέριο οι σχεδιασμοί που εξετάζονται είναι: (1) Κινητήρες με ανάφλεξη σπινθήρα που λειτουργούν στον κύκλο Otto. (2) Κινητήρες ντίζελ διπλού καυσίμου (Diesel dual fuel, DDF) με ανάφλεξη συμπίεσης, που λειτουργούν σαν κινητήρας πτωχού μίγματος καυσίμου στον κύκλο Otto αλλά με έγχυση ντίζελ για την ανάφλεξη του μείγματος μεθανίου/αέρα. και (3) Κινητήρες ανάφλεξης συμπίεσης με έγχυση ντίζελ, που λειτουργούν με φυσικό αέριο στον κύκλο ντίζελ. Καθένα από αυτά περιγράφεται λεπτομερέστερα παρακάτω:

Οι κινητήρες φυσικού αερίου με ανάφλεξη σπινθήρα, μπορούν να επιτύχουν χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών CO₂ από τους πετρελαιοκινητήρες ντίζελ σε παρόμοιες αναλογίες αέρα-καυσίμου, σε πολύ παρόμοια θερμική απόδοση υπό συνθήκες χαμηλής περιεκτικότητας (Cho & He, 2007). Οι κινητήρες μπορούν επίσης να λειτουργούν σε ένα πολύ πιο αραιό μείγμα καυσίμου-αέρα και να λειτουργούν σε υψηλότερες αναλογίες συμπίεσης χρησιμοποιώντας προηγμένο χρονισμό σπινθήρα (Korakianitis et al., 2011).

Οι κινητήρες διπλού καυσίμου ντίζελ (DDF), λειτουργούν με καύσιμο φυσικό αέριο συνήθως χρησιμοποιούν θύρα εισαγωγής προαναμεμιγμένου μίγματος αέρα/μεθανίου που αναφλέγεται από την έγχυση Diesel και καίγεται με διάδοση φλόγας, όπως η καύση Otto (Broman et al., 2010).

Ο κινητήρας κύκλου ντίζελ με έγχυση φυσικού αερίου υψηλής πίεσης, χρησιμοποιεί απευθείας έγχυση (directly injected, DI) μεθανίου που καίγεται με ελεγχόμενη διάχυση καύσης, όπως η καύση Diesel (Broman et al., 2010). Αυτός ο σχεδιασμός του κινητήρα βασίζεται σε μια αρχή έγχυσης αερίου υψηλής πίεσης με πιλοτική ανάφλεξη καυσίμου. Με αυτήν την αρχή η διαδικασία καύσης ντίζελ μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλήρως και έτσι μπορεί να επιτευχθεί η ίδια υψηλή θερμική απόδοση όπως για τους δίχρονους κινητήρες βαρέος μαζούτ. (Juliussen et al., 2011)

Εκτός από την διαφυγή μεθανίου, υπάρχουν και άλλες διαφορές εκπομπών μεταξύ των θαλάσσιων κινητήρων ντίζελ με παραδοσιακό καύσιμο και των θαλάσσιων κινητήρων με φυσικό αέριο. Αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 1 για δύο πρωτογενή GHG (CH₄ και N₂O) και για τρεις ρύπους κριτηρίων (NO_x, PM10 και NMVOCs). Οι εκπομπές του κύκλου καυσίμου για το CO υπολογίζονται σε ομάδες με βάση τις τιμές ενεργειακής πυκνότητας και θέρμανσης σύμφωνα με τις εισαγωγές του μοντέλου. Οι βασικές εισροές για αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Τυπικοί συντελεστές εκπομπών κινητήρα (αναφέρονται σε g/kWhout, g/hp-hrout και g/mmBTUin). Πηγή: (Corbett et al., 2015).

Engine Type	Units	Methane slip (CH ₄)	Nitrous oxide (N ₂ O)	Oxides of nitrogen (NO _x)	Particulate matter (PM ₁₀)	Non-methane volatile organic compounds (NMVOC)
Lean-burn Otto cycle engine	g/kWh _{out}	5	0.015	2	0.04	0.19
	g/hp-hr_{out}	3.7	0.011	1.5	0.03	0.14
	g/mmBTU _{in}	660	2	264	5	25
Dual-fuel gas engine (gas mode)	g/kWh _{out}	5	0.015	2	0.1	0.19
	g/hp-hr _{out}	3.7	0.011	1.5	0.07	0.14
	g/mmBTU _{in}	660	2	264	13	25
Diesel cycle gas engine	g/kWh _{out}	0.693	0.015	12	0.1	0.5
	g/hp-hr_{out}	0.517	0.011	8.9	0.07	0.37
	g/mmBTU _{in}	91.4	2	1583	13	66
Low-sulfur petroleum Diesel engine	g/kWh _{out}	0.034	0.015	14	0.44	0.7
	g/hp-hr_{out}	0.025	0.011	10.4	0.33	0.52
	g/mmBTU _{in}	4.5	2	1846	58	92
High-sulfur petroleum Diesel engine	g/kWh _{out}	0.034	0.015	14	0.44	0.7
	g/hp-hr_{out}	0.025	0.011	10.4	0.33	0.52
	g/mmBTU _{in}	4.5	2	1846	58	92

Πίνακας 2. Παραδείγματα τιμών εισόδου που σχετίζονται με τις προδιαγραφές καυσίμου. για τον υπολογισμό της χρήσης ενέργειας, των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και οξειδίου του θείου (SO_x). Πηγή: (Corbett et al., 2015).

Fuel	Heating Value (Btu/gal)		Density grams/gal	C ratio (% by wt)	S ratio (ppm by wt)
	LHV	HHV			
Liquid Fuels:					
U.S. conventional on road diesel	128,450	137,380	3,167	86.5%	200
Diesel for non-road engines	128,450	137,380	3,167	86.5%	163
Low-sulfur on-road diesel	129,488	138,490	3,206	87.1%	11
Low-sulfur marine distillate fuel	128,450	137,380	3,167	86.5%	1,000
Residual oil	140,353	150,110	3,752	86.8%	5,000
Bunker residual fuel	140,353	150,110	3,752	86.8%	28,000
Gaseous Fuels (at 32F and 1atm):	Btu/ft³	Btu/ft³	gms/ft³		
Natural gas	983	1,089	22.0	72.4%	6

Οι εκπομπές κινητήρων λόγω διαφυγής μεθανίου σχετίζονται με κακή καύση μεθανίου κάτω από πολύ φτωχά μείγματα μεθανίου/αέρα, διακυμάνσεις στη δυναμική διάδοσης της φλόγας και διαφυγής άκαυστου μεθανίου κατά τη λειτουργία της βαλβίδας κυλίνδρου (Broman et al., 2010). Ωστόσο, για κινητήρες LNG με ανάφλεξη συμπίεσης (compression-ignited, CI), όπου μικρές ποσότητες καυσίμου ντίζελ χρησιμοποιούνται για την ανάφλεξη του φυσικού αερίου στον θάλαμο καύσης χρησιμοποιώντας αρχές ανάφλεξης με συμπίεση, η διαφυγή μεθανίου είναι πολύ μικρότερη. Ορισμένες αναφορές αναφέρουν ότι οι παλαιότερες εκπομπές μεθανίου από κινητήρες αερίου είναι σημαντικά υψηλότερες από τις αναφερόμενες για κινητήρες τελευταίας τεχνολογίας που κυκλοφορούν σήμερα από κατασκευαστές (Nielsen and Stenersen,

2010) και υπάρχουν ενδείξεις ότι οι πρόσφατες καινοτομίες σχεδιασμού μειώνουν την διαφυγή μεθανίου από τον κύκλο Otto και κινητήρες διπλού καυσίμου. Ωστόσο, η διαφυγή μεθανίου παραμένει υψηλότερη για τους κινητήρες κύκλου Otto από ό,τι για τους κινητήρες αερίου κύκλου ντίζελ.

Η μελέτη ICCT εκτίμησε έναν ονομαστικό ρυθμό εξάτμισης μεθανίου μεταξύ 2.2 και 4.6 τοις εκατό των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν. Αυτό συμφωνεί με τους συντελεστές εκπομπών που αναφέρονται στον Πίνακα 1, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3. Εάν η ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα θεωρείται ότι ισοδυναμεί με 175-206 g/kWh, δηλαδή παρόμοια κατανάλωση καυσίμου όπως αναφέρεται από άλλες μελέτες (Corbett και Koehler , 2004; Nielsen and Stenersen, 2010), τότε οι εκπομπές διαφυγής μεθανίου κυμαίνονται από ~0,3% για μεγάλους κινητήρες κύκλου ντίζελ έως ~1,5% - 2,5% για νεότερους κινητήρες αερίου διπλού καυσίμου και κύκλου Otto έως ~4% - 9% για παλαιότερης σχεδίασης κινητήρες φυσικού αερίου. Οι εκτιμήσεις ποσοστιαίων απωλειών μεθανίου που εκτιμήθηκαν από τους Lowell et al (2013) αντικατοπτρίζουν τους ρυθμούς διαφυγής μεθανίου μεταξύ 4-8 g/kWh.

Πίνακας 3. Διαφυγή μεθανίου ως ποσοστό της κατανάλωσης καυσίμου για κινητήρες φυσικού αερίου. Πηγή: (Corbett et al., 2015).

Methane slip (g/kWh _{out})	Specific fuel consumption (g/kWh _{out})		
	175	195	206
0.69	0.40%	0.36%	0.34%
3.00	1.71%	1.54%	1.46%
4.00	2.29%	2.05%	1.94%
5.00	2.86%	2.56%	2.43%
8.00	4.57%	4.10%	3.88%
15.00	8.57%	7.69%	7.28%

Οι διαφορές στην πλήρη καύση αέριων καυσίμων πλούσιων σε μεθάνιο και παραδοσιακών υγρών καυσίμων πετρελαίου είναι καλά κατανοητές στη βιβλιογραφία. Όπως εξηγείται από τους Cho and He (2007):

«Τα ομοιογενή φτωχά μείγματα καύσης έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερη διάδοση φλόγας, εμφάνιση αστοχίας, χαμηλή ποιότητα κατανομής του μείγματος σε πολυκύλινδρους κινητήρες και υψηλές εκπομπές άκαυτων HC στα καυσαέρια. ... Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες καυσαερίων αυξάνουν τις δυσκολίες στην οξειδωση μεθανίου και έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή απόδοση μετατροπής THC. ... Επιπλέον, οι εκπομπές HC από κινητήρες φυσικού αερίου αποτελούνται κυρίως από μεθάνιο. ... Ωστόσο, το μεθάνιο είναι ο πιο δύσκολος υδρογονάνθρακας που οξειδώνεται» (Cho and He, 2007).

Ενώ οι κινητήρες φυσικού αερίου γενικά παράγουν χαμηλότερες εκπομπές CO και υδρογονανθράκων χωρίς μεθάνιο σε σύγκριση με τους κανονικούς βενζινοκινητήρες, το άκαυστο μεθάνιο μπορεί να αντιπροσωπεύει περίπου το 90% των άκαυστων υδρογονανθράκων που διαφεύγουν από την καύση στους κυλίνδρους (Korakianitis et al., 2011) και επίσης:

«Οι εκπομπές άκαυστου HC μερικού φορτίου από κινητήρες διπλού καυσίμου είναι σημαντικά υψηλότερες από ό,τι στους κανονικούς κινητήρες ντίζελ, ... με συγκεντρώσεις της τάξης των 6000 ppm, σε σύγκριση με σημαντικά μικρότερες από 100 ppm στη συμβατική λειτουργία ντίζελ. ... Η στρατηγική φτωχής καύσης επιλύει γενικά ζητήματα εκπομπών, αλλά οι εκπομπές άκαυστου μεθανίου παραμένουν σχετικά υψηλές» (Korakianitis et al., 2011).

Ορισμένοι κατασκευαστές, όπως η Rolls-Royce, ισχυρίζονται ότι διαθέτουν τετράχροτους κινητήρες αερίου με φτωχό καύσιμο με εκτιμήσεις διαφυγής μεθανίου ~3-4 g/kWh. και ορισμένες πρόσφατες δοκιμές κινητήρων άμεσου ψεκασμού αερίου που λειτουργούν ως συμβατικός κινητήρας ντίζελ δείχνουν μειώσεις διαφυγής που είναι 20-40 φορές χαμηλότερες σε σύγκριση με την διαφυγή μεθανίου που καταγράφηκε για τους τελευταίους κατασκευής κινητήρες διπλού καυσίμου (Pospiech, 2014; Kristensen et al., 2004). Αυτές οι μελέτες καύσης και εκπομπών εξηγούν τις μεγάλες διαφορές στους παράγοντες εκπομπών μεθανίου μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών κινητήρων αερίου.

1.6.Επίπεδα Εκπομπών Διαφυγής Μεθανίου

Ορίστηκαν αντιπροσωπευτικά επίπεδα εκπομπών μεθανίου για κάθε βασική τεχνολογία κινητήρα με βάση τα δεδομένα του κατασκευαστή του κινητήρα που θα χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω αξιολογήσεις μείωσης των εκπομπών, όσον αφορά τις εκπομπές μεθανίου (g/kWh), CO₂-ισοδύναμες εκπομπές (gCO₂eq/kWh) και (gCO₂eq/MJ) καθώς και το ποσοστό (%) ατελής καύσης μεθανίου στο βάρος του καυσίμου που καίγεται (Πίνακας 4). Το εύρος τιμών σχετίζεται με διαφορετικά φορτία κινητήρα. Τα επίπεδα εκπομπών εμφανίζονται επίσης για τυπικά φορτία κινητήρα, 25-85% για δίχρονους κινητήρες και >50% για τετράχρονους κινητήρες. Η διαφυγή μεθανίου από ορισμένους κινητήρες ποικίλλει ανάλογα με το φορτίο του κινητήρα, με μεγαλύτερη διαφυγή χαρακτηριστική σε χαμηλότερα φορτία. Ενώ οι αρχικοί κινητήρες LP2st εισήχθησαν χωρίς ανακύκλωση καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation - EGR), αναμένεται να γίνει βασικό μέρος ενός κινητήρα LP2st.

Πίνακας 4. Εκπομπές διαφυγής μεθανίου ανά κινητήρα. Πηγή: (Maersk Mc-Kinney Moller Center, 2022).

Engine Type	CH ₄ slip (%wt)	GHG WtW (gCO ₂ eq/MJ)
HP2st (>25%&<85%)	0.19	76.6~77.9
LP2st without EGR (>25%&<85%)	1.1~1.4	81.3~83.1
LP2st with EGR (>25%&<85%)	0.8~1	79.5~80.9
LP4st (>50%load)	1.5~3.3	83.6~93.0

Η βασική τεχνολογία κινητήρων με την υψηλότερη διαφυγή μεθανίου είναι ο LP4st, ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως ως βοηθητικός κινητήρας σε πλοία με καύσιμο LNG

ή ως μέρος μιας διάταξης ντίζελ-ηλεκτρικού. Η σειρά LP4st αντιπροσωπεύει τις εκπομπές από τους σύγχρονους κινητήρες LP4st. Οι παλαιότεροι κινητήρες LP4st μπορεί να έχουν υψηλότερα επίπεδα εκπομπών διαφυγής μεθανίου. Υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ των κύριων επιλογών κινητήρα, καθώς ο κινητήρας HP2st έχει πολύ χαμηλά επίπεδα διαφυγής μεθανίου (0,20-0,28 g/kWh), ενώ ο κινητήρας LP2st έχει υψηλότερα επίπεδα διαφυγής μεθανίου.

Οι κύριες παραδοχές που χρησιμοποιούνται κατά τον καθορισμό των περιοχών εκπομπών διαφυγής μεθανίου είναι ότι τα δεδομένα της κλίνης δοκιμής για κινητήρες διεξάγονται υπό ελεγχόμενες συνθήκες: ο κινητήρας λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση, χωρίς κυμαινόμενα φορτία και χωρίς διακυμάνσεις θερμοκρασίας. Η σύνθεση του αερίου είναι επίσης ελεγχόμενη και εντός των προδιαγραφών, και τα μπεκ είναι καθαρά και ο θάλαμος καύσης είναι σε καλή κατάσταση. Οι συνθήκες όμως κατά τη λειτουργία του σκάφους είναι πιο δυναμικές και μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων των μεταβαλλόμενων φορτίων κινητήρα, των συνθηκών εξοπλισμού και των θαλάσσιων καταστάσεων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες εκπομπές μεθανίου κατά τη λειτουργία σε σχέση με τις μετρήσεις της κλίνης δοκιμών, ωστόσο, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί μια τέτοια διαφορά.

2. Εκπομπές Αερίου Κινητήρα και Διαφυγή Μεθανίου

Η εφαρμογή του LNG ως καυσίμου σε ναυτιλιακούς κινητήρες ντίζελ (marine diesel engines, MDE) μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση όχι μόνο των ρυθμιζόμενων εκπομπών, όπως τα NO_x και SO_x, αλλά και άλλων εκπομπών που δεν έχουν ακόμη ρυθμιστεί, για παράδειγμα τα PM (Nielsen & Stenersen, 2010; Burel et al., 2013). Επιπλέον, σε σύγκριση με τα συμβατικά διυλισμένα (distillate) και τα υπολειμματικά (residual) καύσιμα, οι εκπομπές CO₂ μπορούν επίσης να μειωθούν κατά 20-25% ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα (Stenersen & Thonstad 2017) χωρίς να απαιτείται επιπλέον σύστημα μετεπεξεργασίας. Πιστεύεται ότι τόσο η χαμηλότερη αναλογία άνθρακα/υδρογόνου (carbon/hydrogen, C/H) του καυσίμου όσο και η υψηλότερη θερμική απόδοση σε υψηλά φορτία συμβάλλουν σε αυτό το πλεονέκτημα.

Και οι δύο τύποι του κινητήρα LBSI και LPDF βασίζονται στον κύκλο Otto, επιτρέποντας έτσι την καύση πιο φτωχών ομοιογενών μιγμάτων καυσίμου-αέρα (Heywood, 2018). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση 75–90% του παραγόμενου NO_x. Οι κινητήρες LPDF έχουν κάπως υψηλότερες εκπομπές NO_x από τους κινητήρες LBSI λόγω της χρήσης καυσίμου ντίζελ. Ταυτόχρονα και οι δύο τύποι κινητήρων πληρούν τις απαιτήσεις εκπομπών IMO Tier III, όπως και οι κινητήρες LPLSDF (Krivopolianski et al., 2019). Οι κινητήρες HPLSDF λειτουργούν σύμφωνα με τον κύκλο Diesel και έχουν υψηλότερες εκπομπές NO_x από τους κινητήρες LBSI, LPDF και LPLSDF, αλλά εξακολουθούν να επιτρέπουν μείωση NO_x 25–30% σε σύγκριση με το τυπικό diesel.

Οι εκπομπές μεθανίου και φορμαλδεΐδης είναι μια σοβαρή πρόκληση για τους κινητήρες αερίου και προκαλούν μεγάλη ανησυχία καθώς όλο και περισσότερα πλοία που λειτουργούν με αέριο κατασκευάζονται και τίθενται σε λειτουργία. Οι εκπομπές φορμαλδεΐδης είναι γνωστό ότι είναι τοξικές, αλλεργιογόνες και καρκινογόνες (Brusick, 1983) και θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Το άκαυστο μεθάνιο που διαφεύγει, εξακολουθεί να αποτελεί το κύριο μέλημα λόγω της συμβολής του στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (greenhouse gas, GHG) (Schinas & Butler, 2016) και λόγω του γεγονότος ότι οι εκπομπές μεθανίου σε χαμηλά φορτία κινητήρα μπορεί να είναι πολύ υψηλές, έως και 15% (Nielsen & Stenersen, 2010). Σε τέτοιες περιπτώσεις οι οικονομικές απώλειες για τον πλοιοκτήτη είναι επίσης σημαντικές, επομένως είναι απαραίτητη η σωστή επιλογή του τύπου του κινητήρα αερίου.

Είναι γεγονός ότι οι τρέχοντες κανονισμοί εκπομπών για τα πλοία ορίζουν ότι οι εκπομπές NO_x πρέπει να βρίσκονται εντός του ορίου της Βαθμίδας III (TIER III) εντός των Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas, ECA) και εντός της Βαθμίδας II (TIER II)—εκτός των ECA αντίστοιχα (Suopanki, 2021). Από το 2020, οι τρέχοντες κανονισμοί ορίζουν ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε θείο στα καύσιμα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1% εντός των Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas, ECA) και το 0,5% παγκοσμίως. Αυτά τα όρια μπορούν να επιτευχθούν με συμβατικό διωλισμένο καύσιμο ή ακόμα και υπολειμματικό καύσιμο σε συνδυασμό με κατάλληλο συνδυασμό διαφόρων τεχνολογιών μείωσης, όπως EGR,

επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (Nugroho et al., 2021) ή με χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Μεταξύ όλων των εναλλακτικών καυσίμων που διατίθενται, το LNG φαίνεται να είναι η πιο εφικτή λύση αυτή τη στιγμή (Bouman et al., 2017), όχι μόνο λόγω των οικονομικών πλεονεκτημάτων (Schinas & Butler, 2016), αλλά και λόγω του γεγονότος ότι η τεχνολογία αερίου κυκλοφορεί στην αγορά για θαλάσσια εφαρμογή εδώ και δεκαετίες, έχει δοκιμασθεί και εξελιχθεί επαρκώς, και επίσης προτείνει πρόσθετες λειτουργικές βελτιώσεις (Hegab et al., 2017) και περιβαλλοντικά οφέλη (Thomson et al., 2015). Επιπλέον στη διαδρομή προς το στόχο ενός καυσίμου χωρίς άνθρακα, το LNG είναι ίσως η πιο λογική «ενδιάμεση στάση» που επιτρέπει επίσης τη διατήρηση ενός αυστηρότερου παγκόσμιου ανώτατου ορίου θείου καυσίμου (0,5%) (Cullinane et al., 2014).

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η αιτιολόγηση της χρήσης ορισμένων λύσεων για υψηλότερη απόδοση, χαμηλότερες εκπομπές και κόστος σε οποιαδήποτε εφαρμογή συμπεριλαμβανομένων και αυτών εκτός του ναυτιλιακού τομέα, απαιτεί όχι μόνο τις ολοκληρωμένες προσεγγίσεις μοντελοποίησης και προσομοίωσης (Schinas & Butler, 2016), αλλά και τα πραγματικά δεδομένα μέτρησης που έχουν ληφθεί στο πεδίο και τα οποία είναι κατάλληλα για την επαλήθευση αυτών των μοντέλων. Τα δεδομένα απόδοσης και εκπομπών για κινητήρες πλοίων είναι κυρίως διαθέσιμα από μετρήσεις σε εργαστηριακές συνθήκες δοκιμών με λίγες μόνο μελέτες που αναφέρουν πραγματικά επιχειρησιακά δεδομένα, όπως για παράδειγμα στη μελέτη των Anderson et al. (2015).

2.1. Διαφυγή Μεθανίου κατά τη Μεταφορά LNG

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (ΥΦΑ, Liquefied natural gas, LNG) μεταφέρεται μέσω θαλάσσης με εξειδικευμένα πλοία (LNG tankers) τα οποία είναι έτοιμα να μεταφέρουν φορτίο σε κρυογονικές δεξαμενές σε θερμοκρασία περίπου $-161,5^{\circ}\text{C}$ και λίγο πάνω από την πίεση περιβάλλοντος (Mitsui OSK Lines, 2007; DeLancey, 2013). Το LNG χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο ως καύσιμο σε πλοία. Με βάση τη χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη, η καύση του μεθανίου προκαλεί περίπου 28% λιγότερο CO₂ σε σύγκριση με το καύσιμο ντίζελ, γιατί το μεθάνιο έχει υψηλότερη Κατώτερη Θερμογόνο Δύναμη (Lower Heating Value, LHV) και μικρότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Η διαφυγή από διαρροή μεθανίου ονομάζεται γλίστρημα ή ολίσθηση (slip) και μπορεί να συμβεί σε ένα πηγάδι εξόρυξης, κατά τη διάρκεια διεργασιών καθαρισμού και υγροποίησης (Mokhatab et al., 2018), κατά τη διάρκεια των διαδικασιών μεταφοράς και επαναφόρτωσης, εξαιτίας τυχόν διαρροών, σε εργασίες ανεφοδιασμού πλοίων, κατά τη διάρκεια διακοπής λειτουργίας κινητήρα κ.λπ. και αυτό σημαίνει ότι τελικά το αέριο μεθάνιο καταλήγει στην ατμόσφαιρα επιδεινώνοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (global warming potential, GWP) εξαρτάται από τον τύπο του αερίου και τον χρόνο που λαμβάνεται υπόψη σε σύγκριση με το αποτέλεσμα του διοξειδίου του άνθρακα (Corbett et al, 2015).

2.2. Διαρροή Μεθανίου κατά τον Ανεφοδιασμό με LNG

Ο ανεφοδιασμός με LNG ενός θαλάσσιου σκάφους μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, αλλά ξεχωρίζουν τέσσερις προσεγγίσεις:

- (1) Φορτηγό σε πλοίο, το καύσιμο αντλείται από ένα φορτηγό βυτιοφόρο στο πλοίο, για μικρούς όγκους της τάξης των 50 – 100 m³.
- (2) Από πλοίο σε πλοίο, τα καύσιμα αντλούνται από ένα πλοίο ή φορτηγίδα στο πλοίο, για όγκους της τάξης των 200 – 10,000 m³.
- (3) Τερματικό σε Πλοίο, το καύσιμο αντλείται από χερσαίες εγκαταστάσεις παραγωγής ή αποθήκευσης στο πλοίο, για όγκους της τάξης των 100-10.000 m³ και,
- (4) Φορητές δεξαμενές, οι αρθρωτές (γεμάτες) δεξαμενές ανταλλάσσονται με κενές (ABS, 2014). Κάθε μία από αυτές τις διαδικασίες μεταφοράς μπορεί να συμβεί χρησιμοποιώντας είτε έναν εύκαμπτο σωλήνα είτε έναν βραχίονα φόρτωσης (Arnet, 2014) και ορισμένες μπορεί να περιλαμβάνουν σωλήνες/σωλήνες ψύξης που χρησιμοποιούν υγρό άζωτο για την ελαχιστοποίηση του εξατμιζόμενου μεθανίου κατά τη μεταφορά (Arnet, 2014). Τεχνικές λεπτομέρειες και τα πλεονεκτήματα /μειονεκτήματα για καθεμία από αυτές τις προσεγγίσεις μπορούν να βρεθούν σε μια έκθεση MARAD του 2014 σχετικά με αυτό το θέμα (DNV GL, 2014).

Σε όλα αυτά τα σενάρια ανεφοδιασμού, υπάρχει η ευκαιρία για διαρροή CH₄ μέσω διαφόρων στοιχείων του συστήματος ανεφοδιασμού. Η πιο ολοκληρωμένη μελέτη μέχρι σήμερα σχετικά με τη διαρροή LNG από τις θαλάσσιες δραστηριότητες ανεφοδιασμού είναι αυτή των Lowell, et al. (2013) με βάση τις εργασίες για τον Διεθνή

Συνασπισμό για Καθαρές Μεταφορές (International Coalition for Clean Transportation, ICCT). Αυτή η μελέτη προσδιορίζει ένα εύρος ρυθμών διαρροής λόγω ανεφοδιασμού (μετράται σε $\text{gCO}_2 \text{ e/MJ}$ και συμπληρώνεται με πρόσθετες πληροφορίες από τη Marintek (Lowell et al., 2013; Nielsen and Stenersen, 2010). Αυτά τα ποσοστά διαρροής ποικίλλουν ευρέως και μπορεί να προκύψουν από (1) απώλειες λόγω απορρόφησης θερμότητας και εξαερισμού από τις δεξαμενές αποθήκευσης με την πάροδο του χρόνου· (2) εξαέρωση εκτοπισμένων ατμών κατά την πλήρωση μιας δεξαμενής αποθήκευσης· (3) υγρό και ατμός LNG που εκκενώνονται από εύκαμπτους σωλήνες και γραμμές μετά την τροφοδοσία καυσίμου ενός σκάφους· και (4) απώλειες αποτομής εκτόνωσης που δημιουργούνται από γραμμές προψύξης και δεξαμενές αποθήκευσης ή από τη μεταφορά LNG από μια δεξαμενή υψηλής πίεσης σε μια δεξαμενή χαμηλής πίεσης (Lowell et al., 2013). Οι απώλειες αποτομής εκτόνωσης (flash losses) δεν μετρήθηκαν στην έκθεση του Διεθνούς Συνασπισμού για Καθαρές Μεταφορές (International Coalition for Clean Transportation, ICCT) λόγω της δυσκολίας ποσοτικοποίησης αυτών των απωλειών, ωστόσο, αυτές οι απώλειες απότομης εκτόνωσης αναμένεται να είναι ασήμαντες.

Τα ποσοστά διαρροής ποικίλλουν ανάλογα με το εάν η τροφοδοσία LNG είναι κοντά στην προμήθεια (παραγωγή ή εισαγωγή), εάν είναι μέρος μιας κεντρικής δραστηριότητας ανεφοδιασμού καυσίμων ή σε απομακρυσμένη τοποθεσία και εάν υπάρχει μακροπρόθεσμη αποθήκευση LNG. Οι υποθέσεις διαρροής ICCT οδήγησαν σε εκτιμώμενες τιμές διαρροής κατά τη διάρκεια ανεφοδιασμού. Η διαμόρφωση ανεφοδιασμού με τη μεγαλύτερη διαρροή, ανά ICCT, περιελάμβανε ανεφοδιασμό σε θέση με κατανομημένη τροφοδοσία καυσίμων και αποθήκευση.

Το American Bureau of Shipping (ABS) υιοθετεί ένα πλαίσιο αξιολόγησης κινδύνου για την εξέταση της διαρροής LNG κατά τη διάρκεια της ανεφοδιασμού. Παρόμοια με την έκθεση ICCT, το ABS προσδιορίζει τέσσερα συμβάντα έναρξης που αποτελούν παράγοντες κινδύνου για τις λειτουργίες ανεφοδιασμού LNG και προσδιορίζει κοινές αιτίες για κάθε συμβάν (ABS, 2014). Αυτά τα γεγονότα έναρξης περιλαμβάνουν: (1) διαρροές από αντλίες, σωλήνες, σωλήνες ή δεξαμενές ΥΦΑ. (2) ακούσια αποσύνδεση των εύκαμπτων σωλήνων. (3) υπερπλήρωση ή υπερπίεση δεξαμενών καυσίμου σκαφών. και, (4) εξωτερική επίδραση. Η έκθεση προσδιορίζει επίσης 22 διασφαλίσεις

πρόληψης και μετριασμού που μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση της συχνότητας και του όγκου των διαρροών ανεφοδιασμού καυσίμων.

Μια ερευνητική μελέτη διεξήχθη από το Νορβηγικό Πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας, που ανέπτυξε μια προσέγγιση βάσει κινδύνου για τον υπολογισμό της διαρροής μεθανίου κατά τη διάρκεια της ανεφοδιασμού, η οποία αναφέρεται στη συνολική μάζα που απελευθερώνεται (kg) (Arnet, 2014). Αυτά υπολογίστηκαν με δύο τρόπους: (1) υποθέτοντας ότι το καύσιμο φυσικού αερίου συμβαίνει σε ένα εξάρτημα, που ονομάζεται «στατική απελευθέρωση» και (2) υποθέτοντας ότι η διαδικασία ανεφοδιασμού καυσίμων δεν τερματίζεται αμέσως και το φυσικό αέριο «σπρώχνεται» μέσω της παραβίασης του συστήματος, που ονομάζεται «δυναμική απελευθέρωση». Η εκτιμώμενη έκλυση κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος είναι το άθροισμα της στατικής απελευθέρωσης και της δυναμικής απελευθέρωσης φυσικού αερίου. Ο Arnet (2014) υπολογίζει επίσης τον κίνδυνο ή τη συχνότητα των γεγονότων απελευθέρωσης ανεφοδιασμού καυσίμων. Οι περισσότερες συνθήκες απελευθέρωσης που υπολογίζονται καταλήγουν σε συχνότητες της τάξης των 10 στο εκατομμύριο ή λιγότερο. Επομένως, όταν εξετάζεται ένα μεμονωμένο ταξίδι με ανεφοδιασμό ενός πλοίου, οι σταθμισμένοι ως προς τη συχνότητα όγκοι απελευθέρωσης είναι μικρότεροι από τους συνήθεις ρυθμούς διαρροής που προτείνονται από τη μελέτη ICCT. Επομένως, δεν προσαρμόζονται οι τιμές ICCT για πρόσθετη διαρροή βάσει κινδύνου, αλλά αυτό είναι ένα χρήσιμο βήμα όταν εξετάζεται η διαρροή σε μια εγκατάσταση ανεφοδιασμού LNG που μπορεί να τροφοδοτήσει εκατοντάδες ή χιλιάδες πλοία σε ένα χρόνο.

2.3. Λόγοι Διαφυγής Μεθανίου κατά τις Επιχειρήσεις Φορτίου

Όλες οι εργασίες φορτίου σε δεξαμενόπλοια LNG θα πρέπει να πραγματοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η διαρροή μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Οι παρακάτω παράγοντες ευθύνονται για διαρροές μεθανίου στην ατμόσφαιρα (Hamworthy Gas Systems, 2006; Herdzik, 2018; IMO, 2009):

- Η διαδικασία ψύξης δεξαμενών φορτίου με τη χρήση συστήματος υγροποίησης.

- Οι βαλβίδες πίεσης-κενού και εκτόνωσης ασφαλείας για την αποφυγή του κινδύνου αύξησης της πίεσης πάνω από το επιτρεπτό όριο και θραύσης της δεξαμενής φορτίου.
- Οι εργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης με την ανάγκη σύνδεσης και αποσύνδεσης των αγωγών, τα προβλήματα ανταλλαγής υγρού και ατμού μεταξύ του σκάφους και του τερματικού σταθμού.
- Η εξάτμιση (boil-off) σε δεξαμενές φορτίου, κατά τη διαδικασία μεταφοράς από τις δεξαμενές φορτίου στους κινητήρες των σταθμών παραγωγής ενέργειας (μετά την προετοιμασία) ως συστήματα καυσίμου και υγροποίησης LNG.
- Η λειτουργία του συστήματος υγροποίησης κατά τη φόρτωση και το ταξίδι έρματος.
- Η απελευθέρωση αερίου της δεξαμενής φορτίου για την απόκτηση πιστοποιητικού χωρίς αέριο.
- Η πυρκαγιά μετά από διαρροή φορτίου.
- Η ρήξη σύνδεσης φορτίου, θραύση αγωγού ή διαρροή φορτίου.
- Η ανύψωση ανακουφιστικής βαλβίδας συστήματος φορτίου (SIGTTO, 2016).
- Οι λειτουργίες ανεφοδιασμού ΥΦΑ.
- Η αστοχία σε κινητήρες διπλού καυσίμου ή LNG.

Η ανάφλεξη του αερίου σε συμβατικούς ή σε κινητήρες διπλού καυσίμου δημιουργεί πάντα κάποια διαρροή μεθανίου. Οι εκπομπές άκαυστου μεθανίου ήταν περίπου 7 g (0,7%) ανά 1 kg LNG σε υψηλά φορτία κινητήρα (σχεδόν ονομαστικό), αυξάνοντας στα 23-36 g (2,3-3,6%) σε χαμηλότερα φορτία (Anderson et al., 2015). Ο λόγος της αύξησης της διαρροής μπορεί να οφείλεται στην αργή καύση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, η οποία επιτρέπει σε ορισμένες ποσότητες αερίου να αποφύγουν τη διαδικασία καύσης και να απελευθερωθούν άκαυστες στην ατμόσφαιρα μαζί με τα αέρια της καύσης. Αυτό μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με επιλεκτικό έλεγχο, οι πιθανοί τρόποι για να γίνει αυτό περιλαμβάνουν προσεκτικό χρονισμό της έγχυσης πιλοτικού καυσίμου (περίπου 1% ντίζελ θαλάσσης ή ναυτιλιακού πετρελαίου (marine diesel oil, MDO) ή χημικά χρωματισμένου πετρελαίου diesel (Marine Gas Oil, MGO) για την έναρξη της ανάφλεξης. Ένας άλλος τρόπος είναι η χρήση των καταλυτών οι οποίοι θα

μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αποφυγή ή ελαχιστοποίηση των εκπομπών μεθανίου.

Οι εκπομπές περιείχαν επίσης σωματίδια (particulate matters, PM), παρόλο που οι συνολικές εκπομπές PM είναι χαμηλότερες στο LNG από το MGO. Ωστόσο οι εκπομπές PM από το LNG κυριαρχούνταν από πολύ μικρά και πτητικά σωματίδια (περίπου 1 μm και λιγότερο). Τέτοια εξαιρετικά λεπτά PM μπορούν να διεισδύσουν στο αναπνευστικό σύστημα των ανθρώπων και να μεταφερθούν σε άλλα μέρη του ανθρώπινου σώματος και μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένη φλεγμονή, επίσης τα σωματίδια αυτά μπορεί να είναι τοξικά, επίσης μπορεί να περιέχουν πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (για παράδειγμα βενζόλιο) που έχουν καρκινογόνες ιδιότητες, βαρέα μέταλλα και τα συστατικά τους κ.λπ. Τα PM μπορούν επίσης να δημιουργήσουν πρωτογενή οργανικά αερολύματα.

2.4. Δυνατότητες Μείωσης της Ατμοποίησης από Δεξαμενές Φορτίου

Η κύρια πηγή διαρροής αερίου στα πλοία μεταφοράς LNG είναι η ατμοποίηση από τις δεξαμενές φορτίου. Λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών μεταφοράς LNG (περίπου -161,5°C) και της μεταφοράς θερμότητας από τους χώρους του περιβάλλοντος στις δεξαμενές φορτίου το μεθάνιο που βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, εξατμίζεται. Υπάρχουν κανονισμοί για τον περιορισμό του ρυθμού εξάτμισης ο οποίος θα πρέπει να είναι λιγότερο από το 0,25% της χωρητικότητας της δεξαμενής ανά ημέρα. Η χρήση των ατμοσφαιρικών δεξαμενών απαιτεί κρυογονικές δεξαμενές για μεθάνιο. Η πολύ χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία για το μεθάνιο (-82,56°C) και η μάλλον υψηλή κρίσιμη πίεση (4,7 MPa) δημιουργεί πρόβλημα για την πιθανότητα υγροποίησης και μεταφοράς μεθανίου σε κατάσταση υγρού. Ο λόγος εξάτμισης (vaporizing ratio, VR) για το μεθάνιο είναι περίπου 660, αυτό σημαίνει ότι από 1m³ υγρού κατά την εξάτμιση θα ληφθούν 660m³ αερίου σε κανονική κατάσταση (0°C και 1.013 bar) (για LNG το VR είναι περίπου 600) .

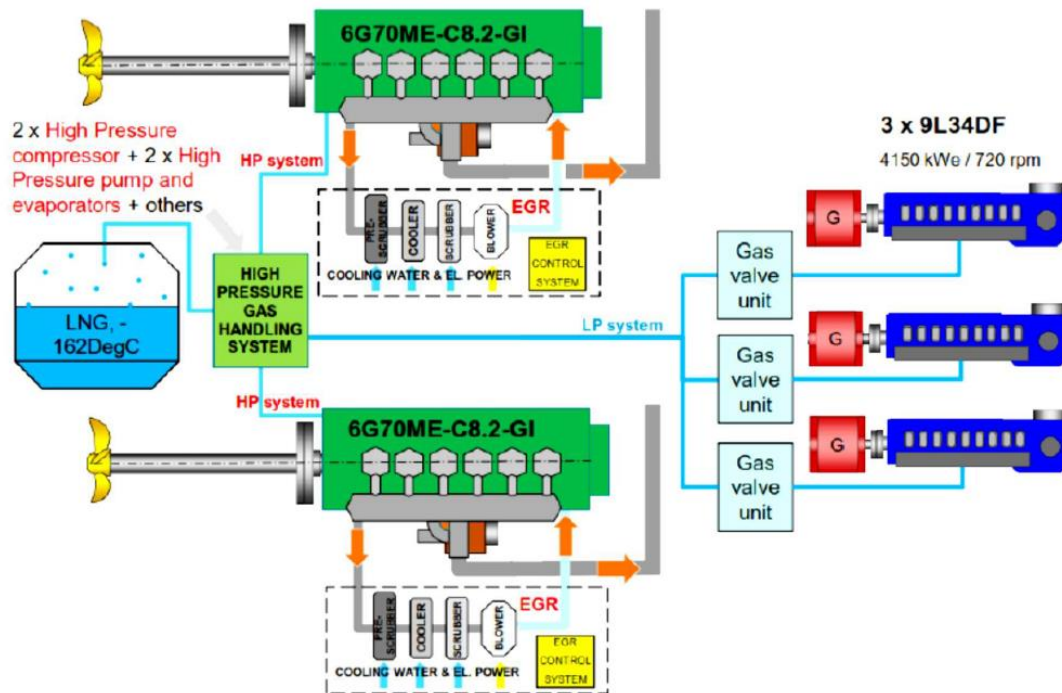
Ο ρυθμός εξάτμισης μπορεί να μειωθεί με τη θερμομόνωση των δεξαμενών φορτίου που έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για το τοίχωμα της δεξαμενής φορτίου *k*. Η εύρεση καλύτερων μονώσεων με

χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα είναι ένα ανοιχτό ζήτημα σε ότι αφορά την έρευνα. Η μονάδα ψύξης σε ένα φορέα αερίου κατασκευάζεται και υπολογίζεται για θερμική διαρροή (boil-off) από τις δεξαμενές φορτίου και το σύστημα μεταφοράς αερίου όταν το πλοίο είναι καινούργιο. Με το πέρασμα του χρόνου η μόνωση εκτίθεται σε γήρανση και φθορά και μειώνεται η ικανότητα της εάν δεν συντηρείται (IMO, 2009). Αν μειωθεί η μόνωση στις δεξαμενές φορτίου και στους αγωγούς, θα προκύψει αυξημένη εξάτμιση.

2.5. Διαρροές από Λειτουργίες Ανεφοδιασμού

Ο ανεφοδιασμός υγροποιημένου φυσικού αερίου σε πλοία που τροφοδοτούνται με αέριο προκαλεί διαρροή μεθανίου λόγω της εμφύσησης στους εύκαμπτους σωλήνες καυσίμου πριν και μετά τη διαδικασία ανεφοδιασμού. Δεν υπάρχουν μονάδες εκ νέου υγροποίησης, επομένως σε κανονικές καταστάσεις λειτουργίας, ο ρυθμός της απαιτούμενης ατμοποίησης επιτυγχάνεται μέσω της εξαναγκασμένης εξάτμισης (χρησιμοποιώντας τη θερμότητα από το μέσο ψύξης του κινητήρα). Σε περίπτωση μακροχρόνιας παραμονής με χαμηλή ζήτηση ενέργειας, η κανονική εξάτμιση (χωρίς αναγκαστική θέρμανση) μπορεί να είναι πολύ υψηλή για τη χρήση του ως καύσιμο. Λόγω της αύξησης της πίεσης στις δεξαμενές καυσίμου που ξεπερνά τη ρύθμιση πίεσης της ανακουφιστικής βαλβίδας ασφαλείας, οι βαλβίδες θα ανοίξουν και το μεθάνιο θα διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Μια μερική λύση του προβλήματος αυτού είναι η χρήση του αεριοποιημένου μεθανίου ως καύσιμο, όπου κατά την καύση παράγεται διοξείδιο του άνθρακα.

Οι κινητήρες ντίζελ όταν λειτουργούν με πετρέλαιο ντίζελ έχουν διαρροή μεθανίου στο επίπεδο 0,5-1 g/kWh, ενώ όταν εργάζονται με αέριο η ολίσθηση μπορεί να είναι μεγαλύτερη λόγω αστοχιών. Ένα παράδειγμα συστήματος έγχυσης αερίου κύριας μηχανής παρουσιάζεται στο Σχ. 4.



Σχ. 4. Σύστημα ψεκασμού αερίου κύριου κινητήρα (Main engine gas injection, MEGI).

Η οξείδωση των υδρογονανθράκων στα καυσαέρια είναι δυνατή αλλά απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες. Για το μεθάνιο η οξείδωση απαιτεί πάνω από 540°C, ενώ οι βαρύτεροι υδρογονάνθρακες οξειδώνονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (Contessi, 2013).

Τα ποσοστά διαρροής μεθανίου άνω του 2-3% πιθανότατα θα αντισταθμίζουν τα περιβαλλοντικά οφέλη που αναμένονται από τη χρήση του αερίου. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι τα ποσοστά διαρροής μεθανίου είναι πολύ υψηλότερα από τις μέσες εκτιμήσεις της βιομηχανίας, τα οποία είναι πιθανά στο επίπεδο 5-9% (Morgan Stanley, 2013).

Υπάρχουν ορισμένες προτάσεις διαθέσιμων τεχνολογιών για τη μείωση της διαρροής μεθανίου κατά τη διάρκεια της εξόρυξης, όπως εμβολοφόρες αντλίες (plunger lifts), αντικατάσταση πνευματικών συστημάτων υψηλής ροής με ισοδύναμα χαμηλής ροής, ανίχνευση και επισκευή διαρροών (World Ocean Review, 2014, Morgan Stanley, 2013) αλλά απαιτείται επιπλέον επενδυτικό κόστος.

2.6.Πρωτογενείς και Δευτερογενείς Πιθανότητες Μείωσης της Διαρροής Μεθανίου

Είναι απαραίτητο να βρεθούν μέθοδοι μείωσης της διαρροής μεθανίου. Για κινητήρες διπλού καυσίμου (dual fuel, DF) ή κινητήρες αερίου υπάρχουν οι ακόλουθες προτάσεις (Contessi, 2013):

- Κατάλληλος χρονισμός κύριου ψεκασμού καυσίμου.
- Ενισχυτική πίεση
- Κατάλληλη θερμοκρασία αέρα καύσης.
- Ανοιχτή βαλβίδα διέλευσης αερίων εξάτμισης (EGR) σε μερικό φορτίο.
- Ανενεργοποίηση πυροδότησης
- Ελαχιστοποίηση νεκρών όγκων.
- Τροποποίηση της αναλογίας βαθμού συμπίεσης.
- Πιλοτική βελτιστοποίηση καυσίμου σε κινητήρες DF.
- Χρησιμοποίηση των βαλβίδων ανακύκλωσης καυσαερίων(exhaust gas recirculation, EGR).
- Χρησιμοποίηση καταλύτη οξειδωσης.

2.7.Διαφυγή Μεθανίου σε Σχέση με το Φορτίο και τη Θερμοκρασία του Κινητήρα

Οι Balcombe, P., Heggio, D. A., & Harrison, M. Το 2022 δημοσίευσαν μελέτη σχετικά με τις εκπομπές μεθανίου και CO₂ που εκπέμπεται από πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου. Στην εργασία που περιλαμβάνει και πρωτογενείς μετρήσεις, οι συγγραφείς κάνουν και μια ανάλυση των βασικών πηγών εκπομπών, με έμφαση στη διακύμανση της διαφυγής μεθανίου, μια σύγκριση των αερίων θερμοκηπίου (Green house gas, GHG) με άλλες πηγές της βιβλιογραφίας, τον εντοπισμό πιθανών μειώσεων εκπομπών στο μέλλον και τη βελτίωση των μετρήσεων μεθανίου στα πλοία. Σε ότι αφορά τη μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε το πλοίο GasLog Galveston LNG carrier (LNGC), κατασκευής 2021, επιλέχθηκε για μέτρηση λόγω του

δίχρονου κινητήρα διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσης WinGD XDF (low-pressure dual-fuel, LPDF) που χρησιμοποιείται για πρόωση. Το πλοίο διαθέτει δύο κύριους κινητήρες διπλού καυσίμου για πρόωση (M1, M2) και τέσσερις κινητήρες γεννήτριας διπλού καυσίμου (G1, G2, G3, G4) για την παραγωγή ισχύος για άλλες απαιτήσεις του πλοίου. Οι κινητήρες M1, M2 είναι WinGD W5X72DF two-stroke, 11,530 kW, οι γεννήτριες G1, G4 είναι Hyundai HiMSEN 8H35DF four-stroke, 3840 kW και οι γεννήτριες G2, G3 είναι HiMSEN 6H35DF four-stroke, 2880 kW.

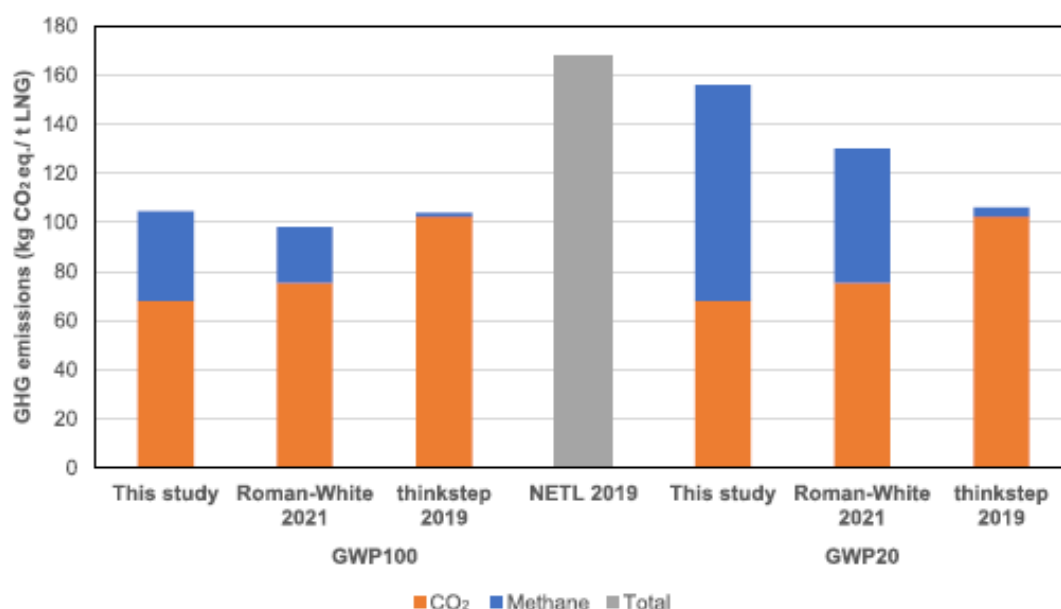
Οι ρυθμοί διαφυγής (ή διαρροής ή ατελούς καύσης) μεθανίου (methane slip) είναι υψηλότεροι στους κινητήρες γεννήτριας από ό,τι αναμενόταν, και στα αποτελέσματα καταδείχθηκε επίσης υψηλή μεταβλητότητα, για παράδειγμα, ο κινητήρας γεννήτριας G4 παρήγαγε 16% διαφυγή (το άκαυστο μεθάνιο ως ποσοστό του μεθανίου στον κινητήρα), το οποίο είναι διπλάσιο από αυτό του G1 (8%, το οποίο είναι το ίδιο μοντέλο και ονομαστική ισχύς). Σε όλους τους κινητήρες, η διαφυγή μεθανίου αλλάζει με διαφορετικά φορτία κινητήρα (Balcombe et al., 2021).

Η επίδραση του φορτίου του κινητήρα στην διαφυγή μεθανίου είναι πιο έντονη για τους τετράχρονους κινητήρες (γεννήτριες) παρά για τους δίχρονους (κύριους) κινητήρες, οι οποίοι παρουσιάζουν πιο επίπεδο προφίλ φορτίου. Όλοι οι κινητήρες γεννήτριας παρουσίασαν μια σχετικά παρόμοια διαφυγή σε όλο το εύρος φορτίου, αλλά οι δύο κύριοι κινητήρες εμφανίζουν σημαντικά διαφορετικούς ρυθμούς διαφυγής μεταξύ των φορτίων. Το M2 παρουσίασε χαμηλότερη διαφυγή μεθανίου σε όλα τα φορτία κινητήρα, με μέσο όρο 2% σε υψηλότερα φορτία (>50%) σε σύγκριση με το 2.3% για το M1.

Εκτός από το φορτίο του κινητήρα, η διαφυγή μεθανίου διέφερε επίσης σημαντικά μεταξύ των θερμοκρασιών των καυσαερίων του κινητήρα, συγκεκριμένα η θερμοκρασία των καυσαερίων διέπεται από την αναλογία αέρα προς καύσιμο, όπου οι χαμηλότεροι ρυθμοί διαφυγής μεθανίου συσχετίστηκαν με υψηλότερες θερμοκρασίες καυσαερίων ή χαμηλότερους λόγους αέρα προς καύσιμο. Αυτή η συσχέτιση ήταν ουσιαστικά ισχυρότερη με τους κινητήρες γεννήτριας, οι οποίοι εμφάνιζαν υψηλότερη θερμοκρασία καυσαερίων από τους κύριους κινητήρες: Οι θερμοκρασίες εξόδου αερίων του κύριου κινητήρα, συνήθως κυμαινόντουσαν γύρω στους 200-250 °C, σε αντίθεση με εκείνες των γεννητριών που ήταν συνήθως στα 350-450 °C. Αυτή η σχέση

μεταξύ θερμοκρασίας, φορτίου και διαφυγής μεθανίου αντανακλάται επίσης στις παραμέτρους του μοντέλου εκπομπών.

Ενώ η διαφυγή μεθανίου στους κινητήρες ήταν πολύ μεταβλητή, οι κινητήρες είχαν παρόμοια απόδοση με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή ή τις δοκιμές πριν από τον κινητήρα. Για τους κύριους κινητήρες, οι ρυθμοί διαφυγής μεθανίου ήταν σε γενικές γραμμές σύμφωνοι με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, αλλά φαίνεται να υπάρχει μεγαλύτερη απόκλιση από τις προδιαγραφές, ιδιαίτερα για το M1 σε χαμηλότερα φορτία κινητήρα. Για τους κινητήρες της γεννήτριας, η διαφυγή μεθανίου ήταν πολύ παρόμοια με την απόδοση πριν από τη δοκιμή.



Σχήμα 5. Σύγκριση των εκπομπών GHG από πλοία LNG με άλλες μελέτες, εκφρασμένες σε kg CO₂ ισοδύναμα/τόνο παραδοθέντος LNG, χρησιμοποιώντας κλιματικές μετρήσεις GWP100¹ (Global Warming Potential 100 ετών) και GWP20 για το μεθάνιο.

Για την κατανόηση των αποτελεσμάτων GHG, η μελέτη των Balcombe et al. (2022) συγκρίνεται με τρεις πρόσφατες μελέτες, Roman-White et al. (2021), NETL (2019) και Thinkstep (2019), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Όλες οι μελέτες αξιολογούν τις εκπομπές GHG του κύκλου ζωής που σχετίζονται με την εξόρυξη LNG σε

¹ Understanding Global Warming Potentials, <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>

διαφορετικές τοποθεσίες και συμπεριλαμβάνουν τη μεταφορά LNG ως μέρος της αλυσίδας εφοδιασμού. Οι Roman-White et al. (2021), μοντελοποίησαν όλα τα φορτία που παραδόθηκαν από το Sabine Pass, ΗΠΑ, το 2018, τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίνονται με τον μέσο όρο όλων των πλοίων XDF από τις ΗΠΑ στο Ηνωμένο Βασίλειο, καθώς ταιριάζει πολύ με την απόσταση μεταφοράς και τις τεχνολογίες πρόωσης με τη μελέτη των Balcombe et al. (2022). Η σύγκριση της μελέτης NETL (2019), αφορά το ταξίδι μελέτης περίπτωσης ΗΠΑ-Ρότερνταμ με χρήση σκάφους DFDE. Η μελέτη Thinkstep (2019), χρησιμοποιεί δεδομένα από μια προηγούμενη μελέτη (Thinkstep, 2017) με πελάτη το Natural & Bio Gas Vehicle Association (NGVA) Europe, χρησιμοποιώντας συντελεστές καυσίμου και εκπομπών για διαφορετικούς τύπους φορέα LNG ανά megajoule km (ένα megajoule ενσωματωμένης ενέργειας στο LNG που μεταφέρεται πολλαπλασιασμένο με την απόσταση που διανύθηκε): λήφθηκαν οι συντελεστές εκπομπής για 174.000 m³ πλοίο DFDE και τα δεδομένα εφαρμόστηκαν στην απόσταση και το LNG που παραδόθηκε.

Σε βάση GWP100, αυτή η μελέτη έχει παρόμοιες εκπομπές GHG με εκείνες των Roman-White et al. (2021) και Thinkstep (2019), εντός εύρους 7%, αλλά 38% χαμηλότερα από την εκτίμηση NETL (2019). Σε βάση GWP20, αυτή η μελέτη είναι 20-47% υψηλότερη από τις συγκρίσεις.

Η αιτία ορισμένων από αυτές τις διακυμάνσεις είναι η διάσπαση μεταξύ των εκπομπών CO₂ και μεθανίου, όπου σε σύγκριση με τις μελέτες Roman-White et al. (2021) και Thinkstep (2019), οι εκπομπές CO₂ από τη μελέτη των Balcombe et al. (2022) είναι 10-33% χαμηλότερες. Για τη μελέτη NETL (2019), δεν υπήρχαν επαρκείς πληροφορίες σχετικά με τη διάσπαση μεταξύ CO₂ και μεθανίου για σύγκριση. Οι χαμηλότερες εκπομπές CO₂ στη μελέτη των Balcombe et al. (2022), προκύπτουν από τη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου από αυτή που θεωρήθηκε σε όλες τις μελέτες, ίσως λόγω της αποτελεσματικότερης λειτουργίας του κινητήρα σε σύγχρονους κινητήρες αερίου και του πιο αποδοτικού σχεδιασμού της γάστρας. Η κατανάλωση boil-off gas (BOG) σε αυτή τη μελέτη ήταν 88 kg/km(47.5 kg/Nm) και η κατανάλωση ντίζελ ήταν 1.3 kg/km(0.7 kg/Nm), επιτρέποντας όλες τις χρήσεις αερίου και ντίζελ. Οι διαφορετικές τεχνολογίες κινητήρων έχουν ποικίλες αποδόσεις και ο δίχρονος

κινητήρας που μετρήθηκε στη μελέτη των Balcombe et al. (2022), είναι ένας από τους πιο αποδοτικούς κινητήρες αερίου θαλάσσης (Balcombe et al., 2021).

Ωστόσο, οι εκπομπές μεθανίου σε αυτό το ταξίδι ήταν 60% υψηλότερες από αυτές που υποθέτουν οι Roman-White et al. (2021), γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στη διαφορά στην υποτιθέμενη διαρροή μεθανίου. Η μελέτη Roman-White et al. (2022) υποθέτει ποσοστό διαρροής μεθανίου 2,3%, που είναι συγκρίσιμο με αυτό των κινητήρων πρόωσης, ενώ ο μέσος ρυθμός διαρροής σε όλους τους κινητήρες (συμπεριλαμβανομένων των γεννητριών) ήταν 3,8%. Η μελέτη Thinkstep (2019), περιλαμβάνει αμελητέους ρυθμούς διαρροής μεθανίου με ελάχιστη αιτιολόγηση και δεν κάνει καμία αναφορά σε εξαερισμό ή διαφυγή εξόρυξης, αλλά περιλαμβάνει συγκριτικά υψηλότερες εκπομπές CO₂, με αποτέλεσμα μικρή διακύμανση στους χρονικούς ορίζοντες του GWP. Η σύγκριση με άλλες μελέτες έχει αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά τη σύγκριση της ομοιότητας, που σχετίζονται κυρίως με τις αποστάσεις μεταφοράς και την τεχνολογία πρόωσης. Χρησιμοποιήθηκαν παρόμοιες αποστάσεις (εντός 1000 km), αλλά μόνο η Roman-White et al. (2021) χρησιμοποίησε μια συγκρίσιμη τεχνολογία πρόωσης. Επίσης καμία άλλη μελέτη δεν προσδιόρισε ρητά τις εκπομπές του κινητήρα της γεννήτριας, παρά μόνο την κύρια πρόωση ή ένα σύνολο (π.χ. με βάση τη συνολική κατανάλωση καυσίμου σύμφωνα με την αναφορά). Οι μελέτες επίσης συνήθως δεν έχουν συμπεριλάβει εκπομπές από εξαερισμό ή διαφυγή εξόρυξης (fugitives). Η μελέτη των Balcombe et al. (2022) καταδεικνύει τη σημασία της εξέτασης όλων των πηγών εκπομπών για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους των εκπομπών και για τον προσδιορισμό του πού βρίσκονται οι μεγαλύτερες μειώσεις.

3. Μείωση Εκπομπών Μεθανίου στα Πλοία

3.1.Ρυθμιστικές Διατάξεις για τη Μείωση Εκπομπών Μεθανίου

Επί του παρόντος, δεν υπάρχουν διεθνείς κανονισμοί για τις εκπομπές μεθανίου από τα πλοία, όμως οι συνεχιζόμενες πρωτοβουλίες και οι περιφερειακές κατευθυντήριες γραμμές δείχνουν ότι πιθανότατα οι πρώτοι κανονισμοί θα εμφανιστούν σύντομα. Μια παγκόσμια δέσμευση για μείωση των εκπομπών μεθανίου έως το 2030 ανακοινώθηκε στη Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή του 2021 (COP 26), που υπογράφηκε τόσο από τις Ηνωμένες Πολιτείες όσο και από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ). Αν και αυτό μπορεί να θεωρηθεί μόνο εκδήλωση προθέσεων από αυτές τις χώρες και καλύπτει όλες τις πηγές εκπομπών μεθανίου, ωστόσο υπογραμμίζει τη σημασία των εκπομπών μεθανίου και θα μπορούσε να επιταχύνει την εφαρμογή ρυθμιστικών μέτρων στη ναυτιλία. Τέτοια μέτρα μπορεί να περιλαμβάνουν εθνικούς κανονισμούς, προσπάθειες για τη μείωση της διαφυγής μεθανίου ή διεθνείς κανόνες που θα περιλαμβάνουν και το μεθάνιο εκτός από το CO₂, όπως η συμπερίληψη στις επόμενες φάσεις EEDI (Energy Efficiency Design Index), τα μέτρα που βασίζονται στην αγορά (market-based measures, MBM) και οι κατευθυντήριες γραμμές για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής (lifecycle assessment, LCA).

Ενώ ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization, IMO) δεν έχει συγκεκριμένους κανονισμούς για την διαρροή μεθανίου, το μεθάνιο θα μπορούσε να συμπεριληφθεί στο κανονιστικό πλαίσιο του IMO με διάφορους τρόπους, όπως:

- Ενσωμάτωση της διαφυγής μεθανίου στις κατευθυντήριες γραμμές αξιολόγησης GHG κύκλου ζωής θαλάσσιων καυσίμων, όπως συμφωνήθηκε στο IMO 78th Marine Environment Protection Committee (MEPC 78).
- Συμπεριλαμβανομένης της ατελούς καύσης μεθανίου στη EEDI Φάση 4 (ISWG-GHG 7/3 και MEPC 75/7/10).
- Συμπεριλαμβανομένης της μέτρησης ατελούς καύσης μεθανίου με τις τυποποιημένες μεθόδους (NO_x τεχνικό αρχείο) κατά την πιστοποίηση κινητήρα με μεθάνιο που προσδιορίζεται ως CO₂-ισοδύναμο.

Σε περιφερειακό επίπεδο, η ΕΕ εφαρμόζει το πακέτο Fit for 55 που περιλαμβάνει ένα σύνολο μέτρων που σχετίζονται με το μεθάνιο, όπως:

- Έως τις 31 Δεκεμβρίου 2024, η Επιτροπή θα αξιολογήσει τον αντίκτυπο στο παγκόσμιο κλίμα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου εκτός από το CO₂, συμπεριλαμβανομένου του μεθανίου, του υποξειδίου του αζώτου και των σωματιδίων με δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, από πλοία που φτάνουν ή αναχωρούν από λιμάνια υπό τη δικαιοδοσία ενός κράτους μέλους (EU ETS-Emissions Trading System).
- Ο κανονισμός FuelEU for Maritime εξετάζει την διαρροή του μεθανίου. Αυτός ο κανονισμός (σε ισχύ από το 2025) θα περιορίσει τις εκπομπές CO₂- ισοδύναμων ρύπων από πλοία. Η επίδραση της διαρροής μεθανίου εισάγεται ως ποσοστό της μάζας του καυσίμου που χρησιμοποιείται από τον κινητήρα (Cslip)
- Το πρόγραμμα Fit for 55 προβλέπει μειώσεις των εκπομπών μεθανίου στον ενεργειακό τομέα.
- Ένταξη CO₂, οξειδίου του αζώτου και μεθανίου στον κανονισμό Παρακολούθησης, Αναφοράς και Επαλήθευσης (Monitoring, Reporting, and Verification, MRV).

Επίσης οι κινεζικοί κανονισμοί για τους κινητήρες πλοίων περιλαμβάνουν όρια (GB15097-2016 2nd stage: 1 g/kWh) και μεθόδους μέτρησης για τους ρύπους των καυσαερίων από κινητήρες θαλάσσης (CHINA II). Αυτό ο κανονισμός, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ το 2018, ισχύει για πλοία με κινεζική σημαία που ασχολούνται με την εσωτερική ναυσιπλοΐα. Αυτό είναι ένα σημαντικό ορόσημο, ακόμη και αν δεν ισχύει άμεσα για τη διεθνή ναυτιλία.

3.2.Μείωση των Εκπομπών Μεθανίου σε Επίπεδο Πλοίου

Η βασική τεχνολογία του κύριου κινητήρα μπορεί να συμβάλει σημαντικά στις συνολικές εκπομπές του σκάφους και ως εκ τούτου, θα πρέπει να αποτελεί το αρχικό επίκεντρο των προσπαθειών μείωσης των εκπομπών. Σε δίχρονο κινητήρες υψηλής πίεσης (High-Pressure 2-Stroke Engine - HP2st), οι προσπάθειες μείωσης των εκπομπών μεθανίου θα πρέπει να ξεκινήσουν με τη μείωση των εκπομπών μεθανίου που σχετίζονται με τα LP4st. Σε μια διαμόρφωση LP2st ME, θα πρέπει πρώτα να

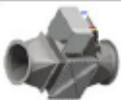
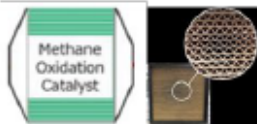
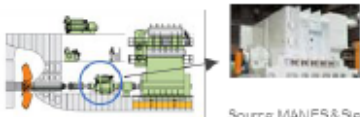


εξεταστεί η διερεύνηση της μείωσης των εκπομπών μεθανίου που σχετίζεται με τον κύριο κινητήρα. Οι εφαρμοστέες τεχνολογίες και λύσεις μείωσης των εκπομπών θα εξαρτηθούν από το εάν το σκάφος είναι νεότευκτο ή εάν εξετάζεται το ενδεχόμενο μετασκευής ενός υπάρχοντος σκάφους. Για παράδειγμα, η εκ των υστέρων τοποθέτηση μιας γεννήτριας άξονα είναι απίθανο να είναι εφικτή λόγω του υπάρχοντος σχεδιασμού της γάστρας του σκάφους, όμως μπορεί να ενσωματωθεί σε μια νέα κατασκευή.

Το δυναμικό μείωσης εκπομπών μεθανίου σε επίπεδο πλοίου για κάθε τεχνολογία ή λύση που συζητήθηκε προηγουμένως, παρουσιάζεται στο Σχήμα 7. Οι λύσεις που μελετήθηκαν περιλαμβάνουν PRS (Plasma Reduction System) για τους κύριους και βοηθητικούς κινητήρες, MOC (Methane Oxidation Catalyst) μόνο για βοηθητικούς κινητήρες, EGR (Exhaust Gas Reduction) για τον κύριο κινητήρα και παροχής ηλεκτρικής ισχύος από την ακτή.

Στη μελέτη MMMCZCS (2022) (Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping), το αποτέλεσμα της εφαρμογής διαφορετικών μέτρων μείωσης των εκπομπών υπολογίστηκε για τα πλοία και για όλες τις ρυθμίσεις κινητήρων με εκτίμηση των συνολικών εκπομπών GHG WTW. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών φαίνονται στο Σχήμα 8 για ένα δεξαμενόπλοιο LR2 και στο Σχήμα 9 για ένα μεταφορέα LNG. Για κάθε διάταξη σκάφους και κινητήρα, οι εκπομπές GHG και η ετήσια διαφυγή μεθανίου εμφανίζονται για τις αρχικές διαμορφώσεις μετά την υιοθέτηση μιας επιλογής μέτρων μείωσης των εκπομπών. Συμπεριελήφθησαν επίσης όρια δείκτη έντασης FuelEU GHG για το 2025, το 2030, το 2035 και το 2040 για να παρουσιασθεί πώς οι μελετημένες λύσεις μείωσης των εκπομπών μεθανίου μπορούν να βοηθήσουν τους ιδιοκτήτες σκαφών να επιτύχουν τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς.

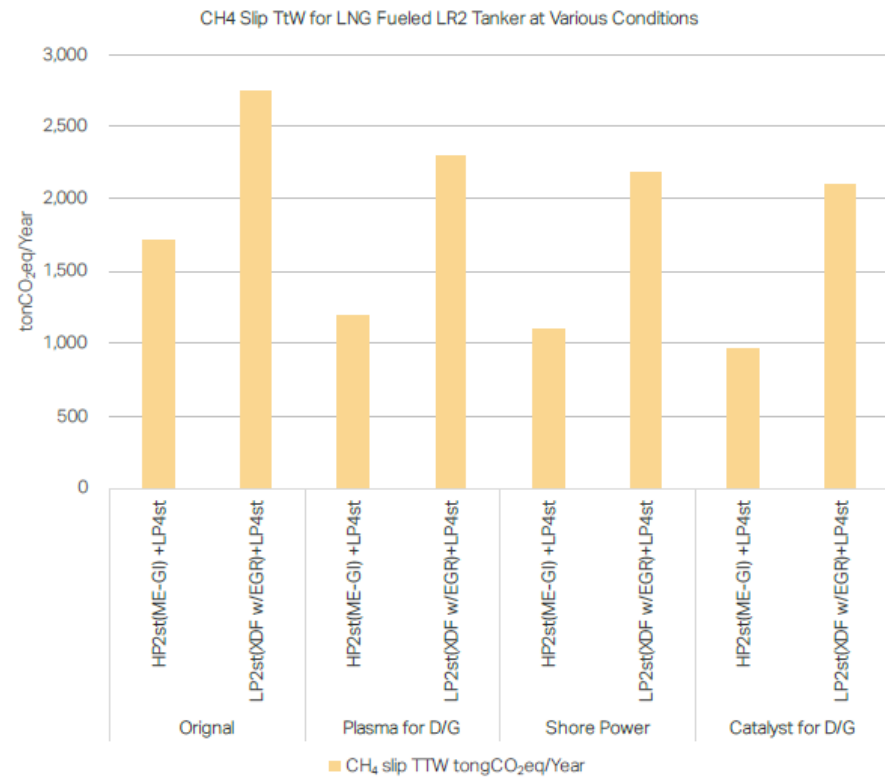
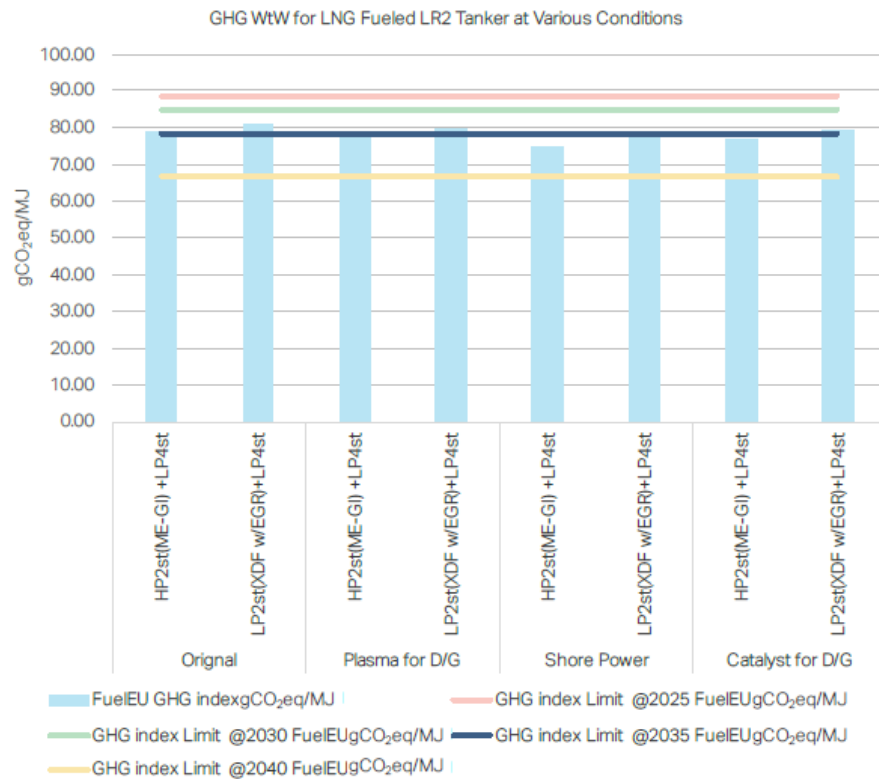
Αυτή η ανάλυση (MMMCZCS, 2022), επιτρέπει τόσο την αξιολόγηση της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς όσο και τη σύγκριση μεταξύ των εκπομπών μεθανίου και τεχνολογιών και λύσεων μείωσης των εκπομπών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς και την επίτευξη συμμόρφωσης. Για τα δύο πλοία που μελετήθηκαν, τα επίπεδα εκπομπών πριν από την εφαρμογή μέτρων μείωσης των εκπομπών είναι ήδη κάτω από τα όρια του δείκτη έντασης του δείκτη FuelEU GHG

του 2025 και του 2030, αλλά ωστόσο, είναι πολύ κοντά ή ξεπερνούν τα όρια του 2035.
Για αναφορά, το επίπεδο FuelEU για το HFO είναι 91,6 gCO₂eq/MJ.

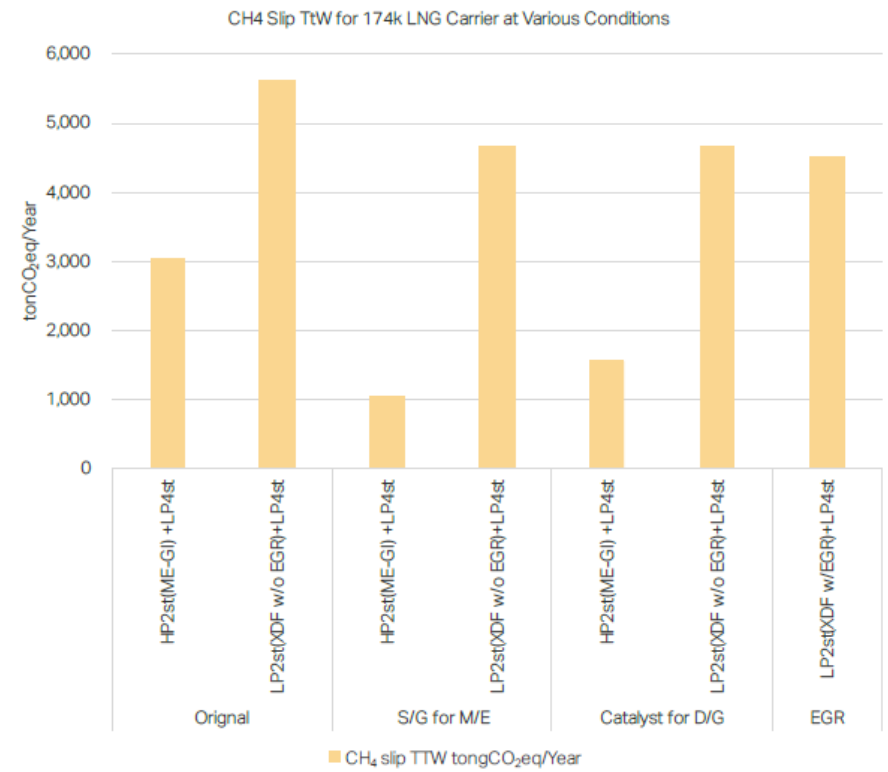
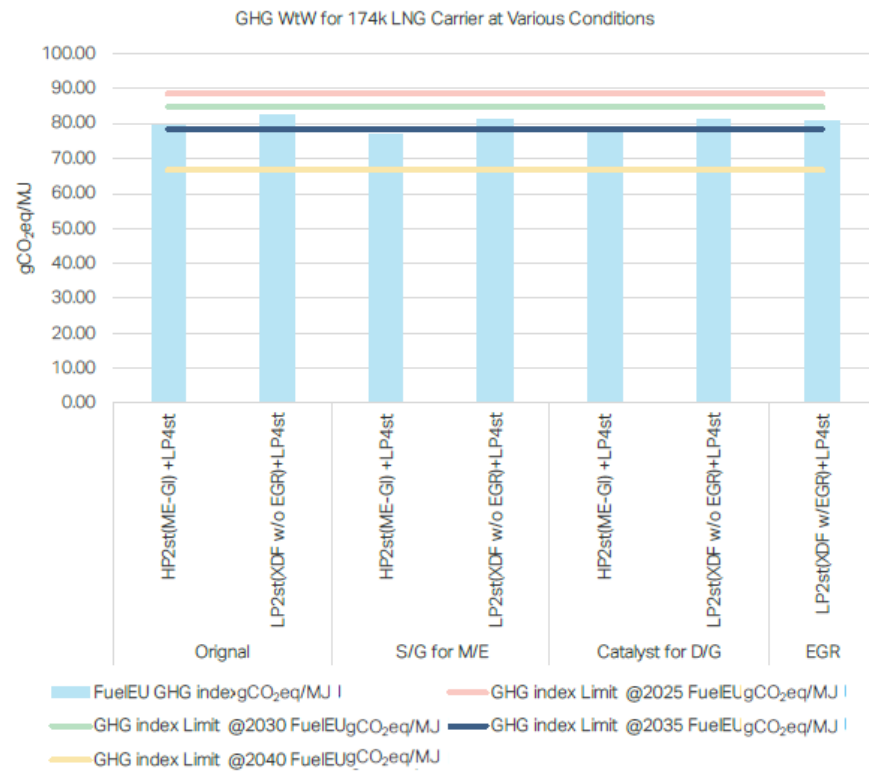
Measure	Application	Principle
<p>Plasma Technology</p>  <p>Source: Daphne Technology</p>	<p>Applicable for both M/E & D/G Not recommended for HP2st, since additional CO₂ by plasma is higher than reduced CH₄ slip</p>	<p>CH₄ is decomposed to H₂O and CO by plasma power. No restriction is required for inlet exhaust gas condition. But additional power for plasma cause additional CO₂. The performance of the device is expected as below. - LR2 tanker M/E : 75% at 4% power of engine consumed - LR2 tanker D/G : 50% at 4% power of engine consumed (Only operated at sailing and port idling for 1 D/G operation) - LNGC M/E : 75% at 4% power of engine consumed - LNGC D/G : 70% at 4% power of engine consumed (Only operated sailing for 2 small D/G operation)</p>
<p>Catalyst</p>  <p>Source: Hitachi Zosen</p>	<p>For D/G under development For M/E, temperature is too low to oxidize CH₄ and interference of the performance could be caused, if the catalyst is installed at the inlet of turbo charger.</p>	<p>Oxidization catalyst can oxidize CH₄ to CO₂ and H₂O. But, generally, Sulphur content in fuel cases deterioration of performance and higher exhaust gas temperature is required. Low pressure 4 stroke engine which is normally used as D/G, has relatively higher exhaust gas temperature so that application of the catalyst is easier than 2 stroke engines. The expected performance of the catalyst is 70% CH₄ reduction. The catalyst is operated only at sailing and port idling for 1 D/G operation in case of LR2 tanker and at sailing for 2 small or 1 large D/G operation in case of LNGC.</p>
<p>Shaft Generator</p>  <p>Source: MANES & Siemens</p>	<p>Installed for M/E, but the main aim is reduction of emission from D/G</p>	<p>CH₄ slip from low pressure 4 stroke engine is higher than that from 2 stroke engine. Since whole electric demand at sailing is covered by shaft generator, operation hour of D/G is reduced. Fuel oil consumption is also improved, because SFOC for 2 stroke engines is better than 4 stroke engines.</p>
<p>Shore Power</p> 	<p>Alternative to use of D/G Note GHG including CO₂ from shore is not accounted.</p>	<p>During vessel in port, whole electric demand is supplied from shore side. GHG emission for shore power is not counted on GHG Index for vessel in FuelEU. So, GHG from D/G at port operation is totally no count for GHG emission</p>
<p>Exhaust Gas Recirculation (EGR)</p>  <p>Integrated EGR design Source: MANES</p>	<p>Applicable only for M/E</p>	<p>The EGR system works through drawing around 30 to 50% of the engine's exhaust gas into the EGR receiver, where it passes through a pre spray to lower its temperature, before passing through a cooler spray. After passing through a water-mist catcher, the gas then goes through a blower to increase pressure back up to scavenging air pressure, before being fed back into the compressor and the engine. This process improves the stability of the combustion process by eliminating the chance of lean mixtures formation and thus reducing methane slip.</p>

Σχήμα 7: Προτάσεις μείωσης των εκπομπών μεθανίου σε επίπεδο πλοίου. Πηγή: (Maersk Mc-Kinney Moller Center, 2022)

Καθώς πρόκειται για μεθοδολογία CO₂-ισοδύναμου, υπάρχουν πολλοί τρόποι μείωσης των εκπομπών για συμμόρφωση με τον κανονισμό, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων ή τεχνολογιών και λύσεων μείωσης των εκπομπών επί του σκάφους. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι πρωτοβουλίες ενεργειακής απόδοσης για τη μείωση της συνολικής ενεργειακής ζήτησης του σκάφους δεν επηρεάζουν τα επίπεδα του δείκτη FuelEU, καθώς είναι μια μέτρηση έντασης GHG που μετρά τις εκπομπές ανά μονάδα ενέργειας που χρησιμοποιείται από το πλοίο. Ως αποτέλεσμα, οι πρωτοβουλίες ενεργειακής απόδοσης θα είχαν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες απόλυτες εκπομπές, αλλά και χαμηλότερη ενέργεια που καταναλώνεται, επομένως ο δείκτης έντασης GHG θα παραμείνει αμετάβλητος.



Σχήμα 8: Εκπομπές GHG WtW δεξαμενόπλοιων LR2 για μέτρα μείωσης των εκπομπών. Πηγή: (Maersk Mc-Kinney Moller Center, 2022).



Σχήμα 9: Εκπομπές GHG WTW φορέα LNG για μέτρα μείωσης των εκπομπών. Πηγή: (Maersk Mc-Kinney Moller Center, 2022).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 και στο Σχήμα 9, υπάρχουν διάφορες επιλογές για τη μείωση των εκπομπών για την επίτευξη συμμόρφωσης το 2035 και το 2040 χρησιμοποιώντας τεχνολογίες και λύσεις μείωσης των εκπομπών επί του σκάφους. Για το δεξαμενόπλοιο LR2 με HP2st ME, το PRS με μόνο το LP4st AE θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές σύμφωνα με τα όρια FuelEU του 2035. Ωστόσο, για τη διαμόρφωση LP2st ME, το PRS πρέπει να εφαρμόζεται τόσο στο ME όσο και στο AE για να επιτευχθεί συμμόρφωση. Στο λιμάνι η παροχή ισχύος από την ακτή, εξάλειψε επίσης αποτελεσματικά τα βοηθητικά φορτία και επομένως την διαφυγή μεθανίου που παράγεται από τους κινητήρες LP4st.

Η γεννήτρια άξονα είναι μια συσκευή που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια που παράγεται από τον κινητήρα του πλοίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία διαφόρων συστημάτων εντός του πλοίου, μειώνοντας την ανάγκη για τη χρήση πρόσθετων κινητήρων. Για τους φορείς μεταφοράς LNG, η χρήση της γεννήτριας άξονα μπορεί να μειώσει σημαντικά την διαφυγή μεθανίου επί του σκάφους. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως μειώνοντας τη χρήση του κινητήρα LP4st (τετράχρονου κινητήρα διπλού καυσίμου), καθώς η γεννήτρια άξονα εξασφαλίζει την αναγκαία ενέργεια. Έτσι, μειώνονται οι εκπομπές μεθανίου από το σκάφος, ενώ ταυτόχρονα προωθείται η αποδοτικότητα και η οικονομία της χρήσης ενέργειας.

Οι γεννήτριες άξονα αναφέρονται ως εναλλακτική λύση για την παραγωγή ενέργειας σε πλοία LNG, επιτρέποντας την λειτουργία με μεγαλύτερη αποδοτικότητα και μειώνοντας την εξάρτηση από τους κινητήρες LP4st. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της διαφυγής μεθανίου και της συνολικής εκπομπής αερίων θερμοκηπίου από το σκάφος. Η συμμόρφωση με το FuelEU 2035 μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή μιας γεννήτριας άξονα σε φορέα LNG που τροφοδοτείται από κινητήρα HP2st. Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα μπορεί επίσης να αναμένεται με ένα σύστημα καταλύτη.

Το EGR μπορεί να μειώσει την διαφυγή μεθανίου στα πλοία που διαθέτουν κινητήρα LP2st και πρόκειται να γίνει βασικός εξοπλισμός με τους πιο πρόσφατους κινητήρες

LP2st μετά το 2021. Ωστόσο, αυτή η λύση από μόνη της δεν μπορεί να επιτύχει τη συμμόρφωση με το Fuel EU 2035, καθώς απαιτείται συνδυασμός μεθόδων, όπως μια γεννήτρια άξονα με LP2st εφοδιασμένη με EGR και χρήση ισχύος στην ακτή.

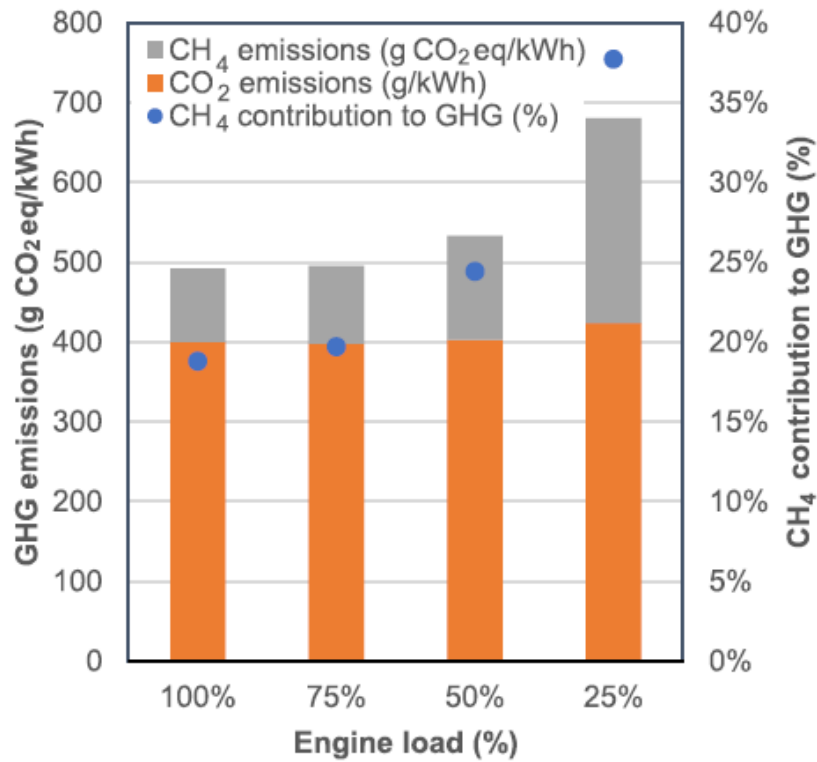
Αυτή η μελέτη MMMCZCS (2022) επικεντρώθηκε σε τεχνολογίες και λύσεις μείωσης των εκπομπών επί του σκάφους, αλλά τελικά η απόφαση για τον τρόπο επίτευξης συμμόρφωσης πρέπει να περιλαμβάνει ζητήματα όπως τα τεχνοοικονομικά της μείωσης των εκπομπών επί του σκάφους, η τιμή και η διαθεσιμότητα εναλλακτικών καυσίμων, καθώς και η ευελιξία και ο χρόνος για το πότε πρέπει να ληφθεί αυτή η απόφαση.

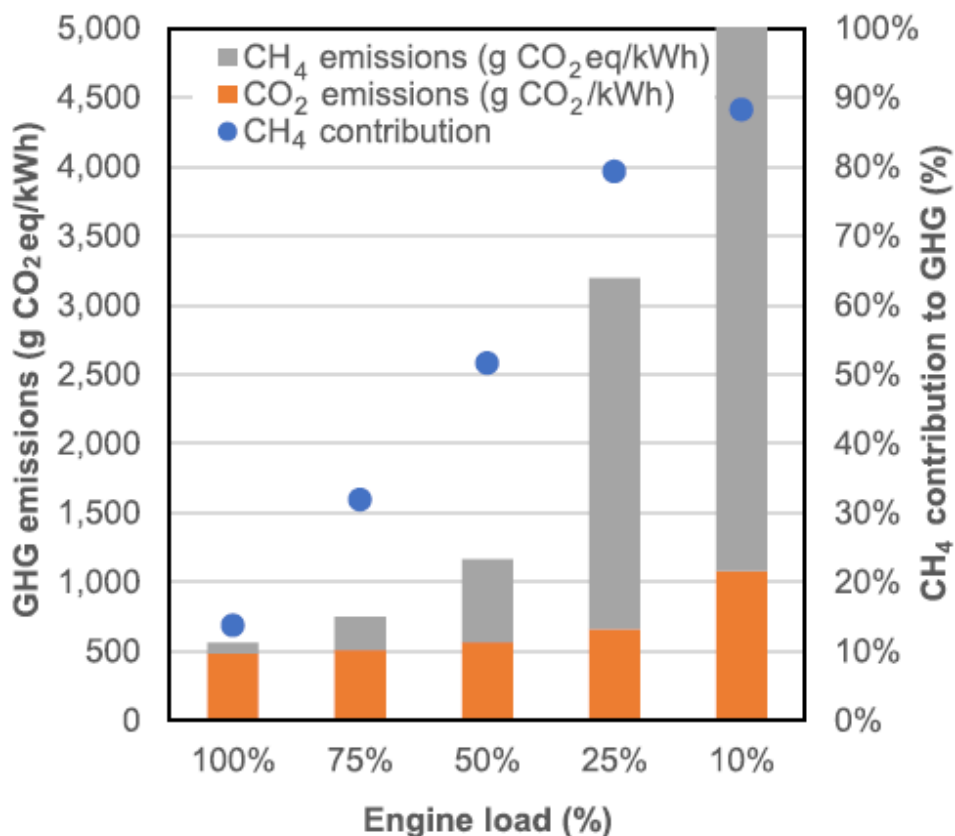
3.3.Μελλοντικές Μειώσεις Εκπομπών

Οι συνολικές εκπομπές είναι παρόμοιες για τα πλοία που αναλύθηκαν σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες, αλλά η συνεισφορά από το μεθάνιο είναι υψηλότερη και αυτό αποτελεί σημαντική ευκαιρία για περαιτέρω μελέτη και μετριασμό. Η ατελής κάυση μεθανίου συνέβαλε στο 99% των εκπομπών μεθανίου κατά τη διάρκεια του ταξιδιού και στο 35% των συνολικών εκπομπών GHG (GWP100).

Κατά τη διάρκεια της μελέτης των Balcombe et al. (2022), το μέσο φορτίο κινητήρα ήταν περίπου 40% τόσο στον κύριο κινητήρα όσο και στον κινητήρα της γεννήτριας. Αυτό είναι χαμηλότερο από αυτό που μπορεί να θεωρηθεί βέλτιστο από την άποψη της ενεργειακής απόδοσης της συνολικής χρήσης καυσίμου, αλλά παρέχει επίσης σημαντικά υψηλότερη διαφυγή μεθανίου. Το Σχήμα 10 δείχνει τις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε διαφορετικά φορτία κινητήρα ανά μονάδα ισχύος κινητήρα για τη γεννήτρια (αριστερά) και τους κύριους (δεξιά) κινητήρες. Το γράφημα δείχνει την εκθετική αύξηση των εκπομπών μεθανίου και τη συμβολή του στις εκπομπές GHG με χαμηλότερα φορτία. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εκπομπές GHG που σχετίζονται με τη χρήση πετρελαίου ντίζελ πλοίων κατά τη συνολική διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 700 gCO₂ _{equiv} /kWh έξοδος κινητήρα (Balcombe et al., 2021), αυτό θα απαιτούσε φορτία κινητήρα άνω του 75% για να ταιριάζει με τους κινητήρες της γεννήτριας, αλλά για τον κύριο κινητήρα XDF υπάρχει σημαντική βελτίωση σε όλα τα φορτία κινητήρα. Δεν είναι γνωστό εάν η λειτουργία με φορτίο 40% για κινητήρες γεννήτριας είναι ένας τυπικός τρόπος λειτουργίας σε όλο τον στόλο πλοίων μεταφοράς LNG, και οι

συζητήσεις με τους φορείς εκμετάλλευσης φορέων LNG για το τυπικό εύρος φορτίων κινητήρα, δείχνουν ότι είναι κατά μέσο όρο 70% για κινητήρες πρόωσης σταθερής ταχύτητας (κύκλος δοκιμής E2) και 47% για βοηθητικούς κινητήρες σταθερής ταχύτητας (κύκλος δοκιμής D2) (Marpoltraining, 2022).





Σχήμα 10. Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με διαφορετικά φορτία κινητήρα για τον κύριο κινητήρα 1 (αριστερά) και τον κινητήρα γεννήτριας (οκτακύλινδρος, δεξιά), διαχωρισμένες με τη συνεισφορά από το μεθάνιο (GWP100) και το CO₂. Η αναλογική συμβολή στις συνολικές εκπομπές από το μεθάνιο υποδεικνύεται μέσω των μπλε κουκκίδων και του δευτερεύοντος άξονα.

Το πλοίο στη μελέτη Balcombe et al. (2022) ήταν καινούργιο, και αυτό ήταν μόνο το δεύτερο ταξίδι του πλοίου, και έτσι, οι χειριστές προτίμησαν να έχουν δύο κινητήρες σε λειτουργία ανά πάσα στιγμή για να αποφύγουν τυχόν διακοπή λειτουργίας σε περίπτωση που ένας κινητήρας σταματούσε ξαφνικά. Ωστόσο, εάν οι κινητήρες λειτουργούσαν πιο κοντά στο φορτίο ~80%, οι εκπομπές μεθανίου θα είχαν μειωθεί πάνω από το μισό (βλ. Σχήμα 10). Οι χειρισμοί και πρακτικές λειτουργίας του κινητήρα αντιστοιχούν σε ένα ευρύ φάσμα περιορισμών ασφάλειας, αξιοπιστίας, οικονομικών και άλλων περιβαλλοντικών περιορισμών και απαιτείται περαιτέρω εργασία για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι δυνατότητες μείωσης των εκπομπών μεθανίου θα μπορούσαν να ταιριάζουν σε αυτούς τους περιορισμούς.

Υπάρχουν πολλές πρόσθετες ευκαιρίες για τη μείωση της διαφυγής μεθανίου, από την άποψη της λειτουργίας, της επεξεργασίας καυσαερίων και του σχεδιασμού του κινητήρα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για τους κύριους κινητήρες πρόωσης, προσφέρεται τώρα μια νέα έκδοση του κινητήρα XDF και προτείνεται η μείωση της διαφυγής του μεθανίου κατά περίπου στο μισό, κυρίως λόγω της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων. Υπάρχει επείγουσα ανάγκη εντοπισμού και εφαρμογής περαιτέρω εφικτών μεθόδων μείωσης των εκπομπών μεθανίου, εάν το φυσικό αέριο πρόκειται να συμβάλει στην επίτευξη των στόχων μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου στη θάλασσα (Balcombe et al., 2019).

3.4.Βελτίωση της Μέτρησης Μεθανίου στα Πλοία

Απαιτείται καλύτερη κατανόηση των εκπομπών μεθανίου και των πηγών/αιτιών τους σε διαφορετικά πλοία για τον εντοπισμό των καλύτερων μεθόδων μείωσης των εκπομπών. Πολλά ερωτήματα προκύπτουν από τη μελέτη των Balcombe et al. (2022), συμπεριλαμβανομένων των εξής: Ποιες είναι οι πραγματικές εκπομπές μεθανίου σε διαφορετικά πλοία LNG; πώς διαφέρουν οι εκπομπές ανάλογα με την ηλικία του πλοίου, τη δεξαμενή φορτίου και την τεχνολογία μόνωσης, το μέγεθος, τον χειριστή και τον τύπο κινητήρα; και οι εκπομπές εξαερισμού και οι εκπομπές φυγής είναι εξίσου μικρές για άλλα πλοία; Υπάρχουν δύο σημαντικά επόμενα βήματα για την καλύτερη κατανόηση και μείωση των εκπομπών μεθανίου: μια ευρύτερη ανεξάρτητη μελέτη μέτρησης για την παροχή μιας ισχυρής κατανόησης των εκπομπών μεθανίου σε όλο τον στόλο και αυξημένη βιομηχανική παρακολούθηση των εκπομπών μεθανίου.

Απαιτούνται πιο ανεξάρτητες, δημοσιευμένες μετρήσεις των εκπομπών μεθανίου από τους μεταφορείς LNG και τη ναυτιλία ευρύτερα για τη λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος και για την κατανόηση του τρόπου μετριάσμού των εκπομπών. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι αυτή η ενιαία εκστρατεία μέτρησης δεν αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα του στόλου των πλοίων μεταφοράς LNG, ο οποίος αποτελούσε 572 ενεργά πλοία το 2021 (IGU, International Gas Union 2021). Παρόμοια με άλλα τμήματα της αλυσίδας εφοδιασμού φυσικού αερίου, το μεθάνιο και οι εκπομπές CO₂ διαφέρουν εκτός άλλων παραγόντων και στην περιοχή, φορέα εκμετάλλευσης, τεχνολογία, και την ηλικία της εγκατάστασης. Για να γίνουν

κατανοητές οι κλιματικές επιπτώσεις της εισαγωγής LNG από διαφορετικές περιοχές, πρέπει να κατανοηθεί πώς ποικίλλουν οι εκπομπές μεθανίου και απαιτείται ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα μετρήσεων στους διαφορετικούς τύπους κινητήρων, τεχνολογιών αποθήκευσης, πλοίων και χειριστών.

Η μελέτη των Balcombe et al. (2022), χρησιμοποίησε μια προσέγγιση μηχανικής από κάτω προς τα πάνω στη μέτρηση, όπου πρώτα αξιολόγησε όλες τις πιθανές πηγές εκπομπής και, στη συνέχεια προσπάθησε να μετρήσει / ελέγξει κάθε πιθανή πηγή: Συνεχής παρακολούθηση εκπομπών FTIR για τις εκπομπές στοίβας, ανίχνευση διαρροής κάμερας Optical Gas Imaging (OGI) σε συνδυασμό βοηθητικών δεδομένων πλοίου, τεχνογνωσίας χειριστή και σημείων ελέγχων κάμερας OGI για εκπομπές αερισμού. Οι τεχνικές FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) και Optical Gas Imaging (OGI) χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και μέτρηση εκπομπών αερίων από πηγές ρύπανσης. Η τεχνική FTIR είναι μια μέθοδος ανάλυσης που βασίζεται στη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας. Με τη χρήση μιας συσκευής FTIR, μπορούν να ανιχνευθούν και να μετρηθούν τα αέρια που εκπέμπονται σε ένα περιβάλλον. Η συσκευή καταγράφει το φάσμα των υπέρυθρων ακτίνων που απορροφούνται από τα αέρια, και από αυτό το φάσμα μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση και τις συγκεντρώσεις των αερίων. Η τεχνική OGI χρησιμοποιεί ειδικές κάμερες εικόνας για την ανίχνευση αερίων. Οι κάμερες αυτές είναι ευαίσθητες στις θερμικές ακτινοβολίες που εκπέμπονται από τα αέρια και επιτρέπουν την οπτική ανίχνευση των εκπομπών. Με τη χρήση της τεχνικής OGI, μπορούν να εντοπιστούν διαρροές αερίων και να παρακολουθηθούν οι πηγές εκπομπής.

Αυτή η μελέτη των Balcombe et al. (2022), ήταν ιδιαίτερα περιεκτική ως προς το εύρος της για την ανίχνευση διαφυγόντων εκπομπών, όπου κάθε μονάδα ελέγχθηκε περίπου πέντε φορές κατά τη διάρκεια του ταξιδιού: έρευνες OGI για πολλές άλλες εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου μπορεί να πραγματοποιούνται μόνο μία φορά το χρόνο. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας μέτρησης είναι ότι μελετώντας τις εκπομπές από όλες τις γνωστές μεμονωμένες πηγές, έγινε δυνατή η συλλογή επαρκών δεδομένων για να κατανοηθεί από πού προέρχονται οι εκπομπές και ποιες ήταν οι αιτίες τους. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για τις προσπάθειες μείωσης των εκπομπών στο μέλλον.

Ο πειραματικός σχεδιασμός της μελέτης των Balcombe et al. (2022), είχε ως στόχο να διασφαλίσει ότι δεν υπήρχαν άγνωστες πηγές εκπομπών με τον εντοπισμό όλων των πιθανών διαρροών και με τακτική επιθεώρηση, αλλά ένα γενικό μειονέκτημα των μετρήσεων από κάτω προς τα πάνω είναι ότι δεν είναι εφικτή η επιβεβαίωση της απουσίας πιθανών πηγές εκπομπών που δεν εντοπίστηκαν κατά τον σχεδιασμό ή κατά τη διάρκεια της εκστρατείας μέτρησης. Οι μελέτες από πάνω προς τα κάτω με χρήση αεροσκαφών ή drones θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες ως συγχρονικά στιγμιότυπα των εκπομπών σε πολλά πλοία (Allen, 2014).

3.4.1. Τεχνολογίες και Λύσεις Μείωσης για τη Μείωση Εκπομπών Μεθανίου

Οι λύσεις μείωσης των εκπομπών, συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών που σχετίζονται με τον κινητήρα και της μετεπεξεργασίας, και η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα ισχύος, πρόωσης και άλλα συστήματα θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη μείωση των εκπομπών μεθανίου. Οι τρεις κύριες κατηγορίες λύσεων μείωσης των εκπομπών περιλαμβάνουν:

1. Τεχνολογία κινητήρα: πλήρως ενσωματωμένο στον κινητήρα,
2. Τεχνολογίες μετεπεξεργασίας: ξεχωριστό από τον κινητήρα αλλά ενσωματωμένο, και
3. Λύσεις συστήματος: διαστασιολόγηση συστήματος, διαμόρφωση και συνδεδεμένες τεχνολογίες.

Ορισμένες λύσεις καλύπτουν πολλές κατηγορίες με βάση τον τρόπο ενσωμάτωσής τους. Ο τρόπος με τον οποίο οι τεχνολογίες και οι λύσεις ενσωματώνονται μαζί και σε υπάρχοντα συστήματα είναι κρίσιμος και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη. Εδώ, εξετάζονται οι τεχνολογίες κινητήρων, οι τεχνολογίες μετεπεξεργασίας και οι λύσεις συστήματος για τη μείωση των εκπομπών μεθανίου.

3.4.2. Τεχνολογίες Κινητήρα

Έχουν εντοπισθεί τέσσερις τεχνολογίες κινητήρων για τη μείωση της ατελούς καύσης μεθανίου: άμεσος ψεκασμός υψηλής πίεσης, ανακυκλοφορία καυσαερίων (exhaust gas recirculation, EGR), λογισμικό ρύθμισης και ελέγχου κινητήρα και βελτιστοποίηση σχεδιασμού εξαρτημάτων κινητήρα. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή τεχνολογίας κινητήρα καθοδηγείται από τους σχεδιαστές και τους κατασκευαστές κινητήρων. Η μείωση της ατελούς καύσης μεθανίου είναι ένα θέμα για τους κατασκευαστές κινητήρων για περισσότερα από 10 χρόνια και έχουν γίνει βελτιώσεις καθώς αναπτύσσονται νέα σχέδια κινητήρων και διατίθενται στο εμπόριο. Οι τεχνολογίες κινητήρα μπορούν να ληφθούν υπόψη μόνο για νέους σχεδιασμούς κινητήρων, καθώς συνδέονται με το υλικό του κινητήρα ή/και απαιτούν εργαστηριακές δοκιμές για την απόκτηση έγκυρου Τεχνικού Φακέλου NO_x.

Η υψηλή πίεση άμεσης έγχυσης χρησιμοποιείται σε κινητήρες HP2st που βασίζονται στον κύκλο Diesel, οι οποίοι έχουν τις χαμηλότερες τιμές διαφυγής μεθανίου (0,20 - 0,28 g/kWh σε όλο το εύρος φορτίου του κινητήρα) σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες κινητήρων βασικής γραμμής. Οι χαμηλές τιμές διαφυγής μεθανίου επιτυγχάνονται κυρίως χρησιμοποιώντας την αρχή του κύκλου καύσης Diesel, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως εξής:

- Το αέριο εγχέεται μέσω μπεκ ψεκασμού αερίου στην κυλινδροκεφαλή
- Δεν υπάρχει επικάλυψη του χρονισμού της βαλβίδας ψεκασμού αερίου και εξαγωγής
- Ο υψηλότερος λόγος συμπίεσης, οι υψηλές πιέσεις καύσης και η φτωχή λειτουργία οδηγούν σε υψηλότερη απόδοση
- Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες καύσης σε συνδυασμό με ένα πλούσιο μείγμα μπορεί να οδηγήσουν σε πλήρη καύση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα ελάχιστα έως καθόλου άκαυστα μόρια μεθανίου
- Η υψηλή ταχύτητα έγχυσης του μεθανίου επιτρέπει ένα ιδανικό μείγμα αέρα και αερίου

Ως εκ τούτου, ένας άλλος τρόπος για τη μείωση της διαρροής μεθανίου από τους τετράχρονους κινητήρες θα μπορούσε να είναι η χρήση παρόμοιας λειτουργικής αρχής με τους κινητήρες HP2st. Σε αυτή την περίπτωση, το αέριο και το καύσιμο πιλότου θα μπορούσαν να εγχυθούν μαζί απευθείας στον κύλινδρο, εντός ενός περιβάλλοντος με αέρα υψηλής πίεσης όταν το έμβολο φτάσει στο ανώτερο νεκρό σημείο. Αυτό δεν θα άφηνε καμία δυνατότητα διαφυγής του μεθανίου κατά τη διαδικασία απομάκρυνσης των αερίων από τον κύλινδρο σε τετράχρονους κινητήρες, με αποτέλεσμα τη μείωση της διαρροής του μεθανίου. Ενώ μπορεί να υπάρχει η τεχνική λύση της χρήσης ψεκασμού υψηλής πίεσης για τετράχρονους κινητήρες, ενδέχεται να μην είναι εμπορικά βιώσιμη λόγω δυσκολίας εφαρμογής και επίσης να είναι οικονομικά λιγότερο εφικτή. Ενώ οι NO_x εκπομπές ενός κινητήρα HP DF είναι πάνω από τα όρια Tier III, γνωστές τεχνολογίες όπως SCR(Selective Catalytic Reduction) ή EGR (Exhaust Gas Recirculation) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του NO_x πολύ κάτω από τα όρια του Tier III.

Η ανακυκλοφορία καυσαερίων (exhaust gas recirculation, EGR) ανακυκλώνει ένα μέρος των καυσαερίων πίσω στον κινητήρα και σε συνδυασμό με άλλα στοιχεία σχεδιασμού, οι κατασκευαστές κινητήρων έχουν χρησιμοποιήσει την τεχνολογία EGR για να επιτύχουν σημαντική μείωση της διαρροής μεθανίου στους κινητήρες LP2st. Οι κινητήρες δεύτερης γενιάς έχουν ενσωματωμένη την τεχνολογία EGR ως αναπόσπαστο μέρος του συντονισμού κινητήρα και σύμφωνα με τους κατασκευαστές κινητήρων αυτοί οι κινητήρες LP2st δεύτερης γενιάς με τεχνολογία EGR έχουν 50% χαμηλότερη διαρροή μεθανίου από τους κινητήρες LP2st πρώτης γενιάς.

Η ρύθμιση κινητήρα είναι μια κοινή πρακτική που χρησιμοποιεί προηγμένο λογισμικό ελέγχου κινητήρα για τη βελτίωση της απόδοσης καύσης για τετράχρονους κινητήρες και μπορεί να μειώσει την διαρροή μεθανίου, αλλά ωστόσο, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί η δυνατότητα μείωσης αυτής της μεθόδου. Το λογισμικό ελέγχου κινητήρα μπορεί να ρυθμίσει τις ακόλουθες παραμέτρους καύσης για τη μείωση της διαφυγής μεθανίου:

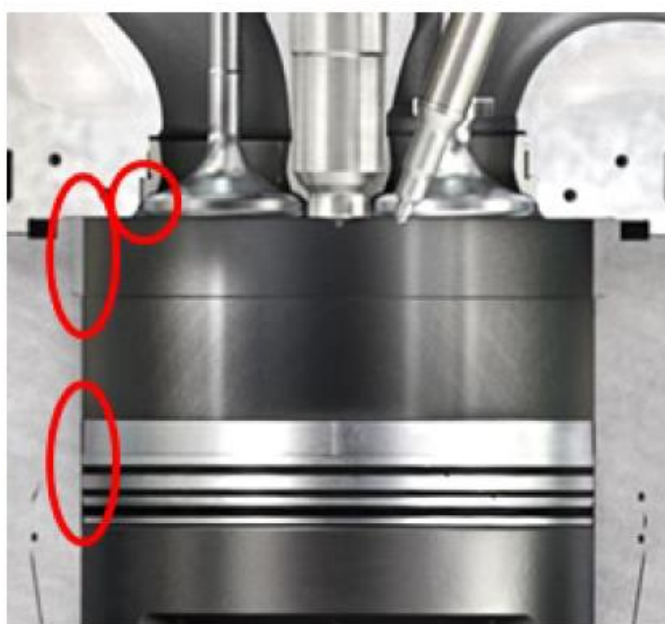
1. Ο χρονισμός της βαλβίδας εισαγωγής και εξαγωγής αερίου μπορεί να βελτιστοποιηθεί κατά την επικάλυψη βαλβίδων.

2. Ο χρονισμός της καύσης μπορεί να βελτιστοποιηθεί για να αποφευχθεί η λανθασμένη ανάφλεξη.

3. Η απενεργοποίηση ενός κυλίνδρου μπορεί να επιτευχθεί για φορτία έως και 50%. Κόβοντας κάθε N-οστό κύλινδρο, η ταχύτητα καύσης μπορεί να βελτιωθεί και να μειωθεί το σβήσιμο της φλόγας.

4. Χρόνος και ποσότητα έγχυσης καυσίμου πιλότου για τη βελτίωση της καύσης με προ-διασπορά και μετά την ανάφλεξη του πιλοτικού καυσίμου.

Η βελτιστοποίηση σχεδιασμού εξαρτημάτων κινητήρα λειτουργεί παρόμοια με τον συντονισμό του κινητήρα. Η βελτιστοποίηση εξαρτημάτων κινητήρα ενσωματώνεται στη διαδικασία σχεδιασμού του κινητήρα από τους σχεδιαστές και τους κατασκευαστές κινητήρων καθώς προσπαθούν συνεχώς να βελτιώνουν τη σχεδίαση εξαρτημάτων κινητήρα. Η βελτιστοποίηση σχεδιασμού κινητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της διαφυγής μεθανίου ελαχιστοποιώντας τις Περιοχές Νεκρών Όγκων (Dead Volumes Areas) στον θάλαμο καύσης (Σχήμα 11).



Σχήμα 11. Περιοχές Νεκρών Όγκων στο θάλαμο καύσης.

Οι περιοχές νεκρών όγκων, θα πρέπει να μειωθούν καθώς πρόκειται για περιοχές όπου μπορούν να παγιδευτούν θύλακες άκαυστου αερίου. Ένα παράδειγμα τροποποίησης σχεδιασμού για τη μείωση του νεκρού όγκου θα ήταν η αλλαγή της θέσης του εμβόλου

στην κάτω όψη πιο κοντά στο άνω νεκρό κέντρο (top dead center, TDC) του ανώτατου δακτυλίου εμβόλου. Αυτή η αλλαγή μπορεί να περιορίσει αποτελεσματικά μία από τις περιοχές παγιδευμένου αερίου, που παραμένουν κρύες και που προκαλούν διαφυγή μεθανίου.

3.4.3. Τεχνολογίες Μετεπεξεργασίας (After Treatment)

Υπάρχουν δύο κύριες λύσεις μετεπεξεργασίας: καταλύτες οξείδωσης μεθανίου (εφαρμόζεται μόνο σε τετράχρονους κινητήρες) και τεχνολογία μείωσης πλάσματος. Ο καταλύτης οξείδωσης μεθανίου (Methane Oxidation Catalyst, MOC) μειώνει τις εκπομπές μεθανίου σε κινητήρες με μεθάνιο DF που χρησιμοποιούν καταλύτη με πολύτιμο (ευγενές) μέταλλο. Η οξείδωση μεθανίου μπορεί επίσης να επιτευχθεί μέσω ενός καταλύτη χωρίς πολύτιμα μέταλλα. Αν και η τετραεδρική δομή του μορίου του μεθανίου είναι πολύ σταθερή και δύσκολα διασπάται, μπορεί να οξειδωθεί χρησιμοποιώντας έναν καταλύτη.

Για να συμβεί οξείδωση θα πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες τρεις απαιτήσεις:

1. Η επιφάνεια του καταλύτη πρέπει να είναι επικαλυμμένη με ένα ευγενές μέταλλο (πλατίνα, παλλάδιο ή ρόδιο). Το παλλάδιο (Pd) θεωρείται ο πιο ενεργός καταλύτης για την οξείδωση μεθανίου υπό ξηρές συνθήκες και χωρίς αντίδραση με το διοξείδιο του θείου (SO₂).
2. Η θερμοκρασία των καυσαερίων πρέπει να είναι υψηλή (πάνω από 390 °C).
3. Η περιεκτικότητα σε θείο στα καυσαέρια πρέπει να περιορίζεται σε περίπου 3 ppm. Καθώς το κύριο δραστικό συστατικό στην επιφάνεια του καταλύτη είναι το Pd, μια αυξημένη ποσότητα θείου στα καυσαέρια θα σχηματίσει PdSO₄, που θα μειώσει σημαντικά την καταλυτική απόδοση και θα οδηγήσει σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται «δηλητηρίαση».

Η παρουσία νερού και θείου μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στην καταλυτική απόδοση. Ένας φρέσκος καταλύτης (χωρίς παρουσία νερού ή θείου) μπορεί να επιτύχει σημαντική μετατροπή/μείωση του μεθανίου σε επαρκώς υψηλές θερμοκρασίες. Ένας καταλύτης που λειτουργεί σε υψηλότερα επίπεδα θείου μπορεί να αποδώσει μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες που ρεαλιστικά δεν μπορούν να επιτευχθούν με τετράχρονους κινητήρες μετά από τον υπερσυμπιεστή. Καθώς οι ενώσεις θείου βρίσκονται συνήθως

σε καύσιμα και λιπαντικά έλαια, το ζήτημα της δηλητηρίασης από θείο πρέπει να αντιμετωπιστεί όταν χρησιμοποιείται το MOC.

Υπάρχουν τέσσερις πιθανές επιλογές για την επίλυση του ζητήματος της δηλητηρίασης από θείο που προκαλεί μειωμένη καταλυτική απόδοση:

1. Τεχνολογία αποθείωσης με άμεση οξείδωση: Ένας αντιδραστήρας αποθείωσης για την παγίδευση θείου τοποθετημένου ανάντη του MOC (μπροστά από το στρώμα του καταλύτη)
2. Αναγέννηση καταλύτη: Θερμική επεξεργασία για τη μείωση των επιφανειακών υπολειμμάτων.
3. Ανάπτυξη καταλύτη χαμηλής θερμοκρασίας, υψηλής απόδοσης, ανθεκτικό στο θείο
4. Αποκλειστική χρήση πιλοτικού λαδιού χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο

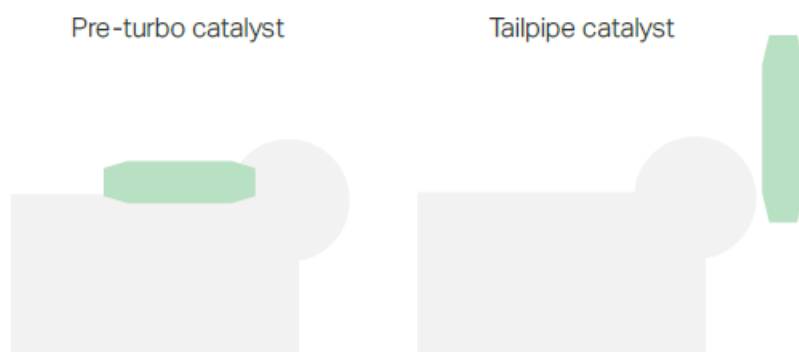
Η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (200-300 °C) και οι εκπομπές καυσαερίων μεγάλου όγκου που παράγονται από δίχρονους κινητήρες DF καθιστούν την οξείδωση του μεθανίου σχεδόν αδύνατη, ακόμη και με την παρουσία καταλύτη. Ωστόσο, οι τετράχρονοι κινητήρες DF έχουν εύρος θερμοκρασίας καυσαερίων 275-580 °C και ένα MOC θα μπορούσε να επιτύχει έως και 99% απομάκρυνση μεθανίου σε αυτές τις θερμοκρασίες.

Η βέλτιστη θέση για έναν καταλύτη οξείδωσης είναι πριν από τον στροβιλοσυμπιεστή (Σχήμα 12), όπου οι θερμοκρασίες των καυσαερίων είναι αρκετά υψηλές για αποτελεσματική λειτουργία του καταλύτη. Ωστόσο, αυτή η τοποθεσία δημιουργεί πρόσθετες μηχανολογικές προκλήσεις για τον σχεδιασμό του κινητήρα. Μια εναλλακτική θέση είναι μετά τον υπερσυμπιεστή (Σχήμα 12) γιατί αυτή η τοποθέτηση θα παρακάμπτει τις μηχανικές προκλήσεις με το στροβιλοσυμπιεστή (turbocharger) και τη σχεδίαση του κινητήρα. Ωστόσο, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες καυσαερίων θα μειώσουν την αποτελεσματικότητα του MOC και τη συνολική μείωση των εκπομπών μεθανίου.

Για την καλύτερη κατανόηση του δυναμικού μείωσης των εκπομπών μεθανίου των MOC, στην μελέτη MMMCZCS (2022), ολοκληρώθηκαν δύο περιπτώσιολογικές μελέτες με βάση ένα δεξαμενόπλοιο LR2 και ένα μεταφορέα LNG 174.000 m³, οι

οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως πλοία μελέτης περίπτωσης. Και οι δύο μελέτες περιπτώσεων εντόπισαν το MOC μετά τον στροβιλοσυμπιεστή.

Η μελέτη περίπτωσης δεξαμενόπλοιου LR2 περιλαμβάνει τρεις βοηθητικούς κινητήρες LP4st με καύσιμο LNG 1 MW. Ας υποθεθεί ότι το καύσιμο LNG περιείχε θείο 2 ppm και το πιλοτικό καύσιμο ντίζελ περιείχε 50 ppm θείο (ενδεικτική τιμή). Μια περίληψη των παραμέτρων και των αποτελεσμάτων φαίνεται στον Πίνακα 5.



Σχήμα 6: Πιθανές θέσεις καταλύτη οξείδωσης μεθανίου.

Οι θερμοκρασίες καυσαερίων από τους βοηθητικούς κινητήρες του δεξαμενόπλοιου LR2 επιτρέπουν καταλυτική μετατροπή/μείωση μεθανίου κατά 99%, ακόμη και με θείο που υπάρχει τόσο στα καύσιμα LNG όσο και στα πιλοτικά καύσιμα ντίζελ.

Η μελέτη περίπτωσης φορέα LNG 174.000 m³ περιλαμβάνει δύο βοηθητικούς κινητήρες LP4st 3 MW και δύο 4 MW με καύσιμο LNG. Και πάλι, ας υποθεθεί ότι το καύσιμο LNG περιείχε θείο 2 ppm και το πιλοτικό καύσιμο ντίζελ περιείχε 50 ppm θείο. Μια περίληψη των παραμέτρων και των αποτελεσμάτων φαίνεται στον Πίνακα 6.

Οι θερμοκρασίες καυσαερίων από τους βοηθητικούς κινητήρες του LNG Carrier είναι πολύ χαμηλές για μέγιστη μετατροπή μεθανίου με θείο που υπάρχει στα καυσαέρια και έτσι μπορεί να επιτευχθεί μετατροπή μεθανίου 30-66% ανάλογα με το φορτίο του κινητήρα. Οι περιπτώσιολογικές μελέτες δείχνουν ότι με επαρκή θερμοκρασία, είναι δυνατή η μετατροπή υψηλών εκπομπών μεθανίου για τους κινητήρες LP4st.

Η μετακίνηση του MOC ανάντη του στροβιλοσυμπιεστή αυξάνει αποτελεσματικά τη θερμοκρασία του αερίου για να επιτευχθεί καλύτερη καταλυτική δραστηριότητα. Ωστόσο, αυτό φέρνει προκλήσεις μηχανικής που όπως περιγράφηκε προηγουμένως πρέπει να αντιμετωπισθούν.

Στην εργασία MMMCZCS (2022), εκτός από τον προσδιορισμό του δυναμικού μείωσης των εκπομπών μεθανίου, ολοκληρώθηκε μελέτη ολοκλήρωσης σχεδιασμού για την ανάντη θέση, όπου προέκυψε ότι η κατανάλωση καυσίμου του βοηθητικού κινητήρα θα αυξηθεί κατά περίπου 1%. Για την κατάντη θέση, η πτώση πίεσης ήταν διαχειρίσιμη για το πλοίο που μελετήθηκε, αλλά αυτό πρέπει να επικυρωθεί για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας προσθήκης MOC σε ένα τυπικό σκάφος. Για αυτή τη μελέτη ολοκλήρωσης χρησιμοποιήθηκε ένας φορέας LNG και διαπιστώθηκε ότι ο εντοπισμός του MOC είτε ανάντη είτε κατάντη είναι τεχνικά εφικτός. Ο χώρος είναι διαθέσιμος και στις δύο τοποθεσίες, υπάρχει ελάχιστη αύξηση βάρους περίπου 10 τόνων και δεν υπάρχουν σημαντικές επιπτώσεις στη σταθερότητα ή τη δομή.

Πίνακας 5. Περίληψη μελέτης περίπτωσης δεξαμενόπλοιου MOC LR2.

	1 MW LP 4-st -20 bore engine			
Scenario 1 LR2 Tanker auxiliary engines: 3 x LP 4-stroke 1 MW. Load	%	60	70	75
Methane engine outlet	g/kWh	5,7	5,4	5,3
Exhaust Temp	°C	471	464	461
Catalytic CH ₄ removal	%	99	99	99
Methane catalyst outlet	g/kWh	0,057	0,054	0,053

Πίνακας 6. Περίληψη μελέτης περίπτωσης μεταφοράς LNG MOC 174.000 m³.

		3 MW LP 4-st 6 cyl -35 bore engine			4 MW LP 4-st 8 cyl -35 bore engine		
Scenario 2 LNGC auxiliary engines: LP 4-stroke 2 x 6 cyl 3 MW + 2 x 8 cyl 4 MW Load	%	76	78	83	76	78	83
Methane engine outlet	g/kWh	3,22	3,17	3,05	4,29	4,23	4,07
Exhaust Temp	°C	420	415	408	420	415	408
Catalytic CH ₄ removal	%	66	60	30	66	60	30
Methane catalyst outlet	g/kWh	1,09	1,27	2,14	1,46	1,70	2,85

Οι λύσεις MOC διερευνώνται επί του παρόντος ως πιθανή λύση για τη μείωση της διαφυγής μεθανίου από κατασκευαστές κινητήρων και καταλυτών. Η τεχνολογία βρίσκεται τώρα στο στάδιο ανάπτυξης και αναμένεται ότι οι πρώτες μονάδες θα κυκλοφορήσουν μεταξύ 2024 και 2027. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής ενός MOC θα είναι 2-3 χρόνια, ανάλογα με τη συγκέντρωση θείου στα καυσαέρια, τη συχνότητα λειτουργίας και τα διαστήματα συντήρησης.

Μερικά βασικά χρονοδιαγράμματα έργων MOC είναι τα ακόλουθα:

- Topsoe Catalyst: Περίοδος ανάπτυξης 2020-2022. Οι δοκιμές πεδίου το 2023 με την κυκλοφορία στην αγορά να αναμένεται το 2024.

- Χρονοδιάγραμμα έργου MAN ES 4-Stroke - IMO KAT II: Διερεύνηση 2021-2023 της αλληλεπίδρασης καταλύτη-κινητήρα (συμπεριλαμβανομένης της δοκιμής πεδίου) με την κυκλοφορία στην αγορά που αναμένεται το 2025.

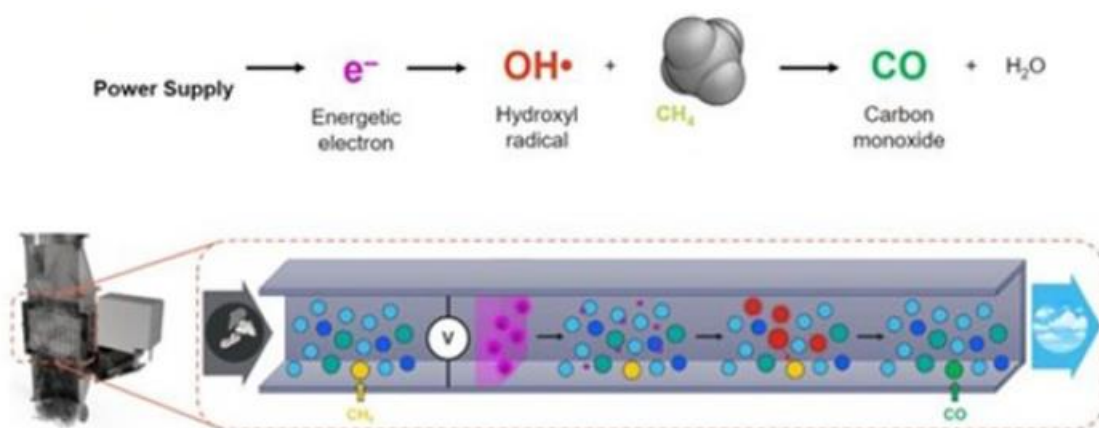
- Χρονοδιάγραμμα έργου Hitachi Zosen – NEDO: Περίοδος ανάπτυξης 2021-2026, συμπεριλαμβανομένων: δοκιμών κλίμακας πάγκου (2022-2023), πρακτική επίδειξη σε πλοίο μεταφοράς άνθρακα (2024-2026), με την έναρξη της αγοράς να αναμένεται το 2026.

Τα συστήματα μείωσης πλάσματος (plasma reduction systems, PRS) αποτελούνται από τεχνολογία μετεπεξεργασίας χωρίς καταλύτη και απορροφητικά που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για τη μετατροπή του μεθανίου σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και H₂O. Η εφαρμογή ρεύματος υψηλής τάσης σε ένα φυσίγγιο PRS (PRS cartridge) δημιουργεί ένα μη θερμικό πλάσμα που ονομάζεται εκκένωση διηλεκτρικού φραγμού μεταξύ του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης και του ηλεκτροδίου γείωσης. Το μη θερμικό πλάσμα παράγει ένα μερικώς ιονισμένο αέριο με την ενέργειά του αποθηκευμένη σε ενεργητικά ηλεκτρόνια μέσα στο φυσίγγιο. Τα ενεργητικά ηλεκτρόνια παράγουν ρίζες υδροξυλίου που αντιδρούν με το μεθάνιο, διασπώντας το μέσω μιας σειράς παροδικών ειδών στα κύρια προϊόντα της οξειδωσης μεθανίου, H₂O, και CO (Σχήμα 13).

Κατά τη διάρκεια των αρχικών εργαστηριακών δοκιμών της Daphne Technology, το PRS αφαίρεσε έως και 78% του μεθανίου από τα καυσαέρια. Αυτές οι δοκιμές χρησιμοποίησαν ένα μείγμα καυσαερίων με διαφυγή μεθανίου 4,8 γραμμαρίων ανά

κιλοβατώρα (g/kWh). Ένας αναλυτής αερίου πολλαπλών συστατικών παρακολούθησε τη διάσπαση του μεθανίου και του συνοδού προϊόντος και $3,7 \pm 0,1$ g/kWh μεθανίου αφαιρέθηκαν από τα καυσαέρια.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ρυθμοί μείωσης των εκπομπών μεθανίου ήταν υψηλότεροι σε υψηλότερες θερμοκρασίες καυσαερίων. Το PRS μπορεί να τοποθετηθεί τόσο πριν όσο και μετά τον καταλύτη για δίχρονους κινητήρες χωρίς σημαντική υποβάθμιση της απομάκρυνσης του μεθανίου. Το PRS μπορεί επίσης να λειτουργήσει αποτελεσματικά χωρίς υποβάθμιση απομάκρυνσης μεθανίου σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών ($\approx 150-400$ °C) από τα συστήματα MOC. Επιπλέον, η απόδοση απομάκρυνσης μεθανίου δεν επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε θείο ή την υψηλή υγρασία στα καυσαέρια.



Σχήμα 13. Μηχανισμός διάσπασης μεθανίου με PRS.

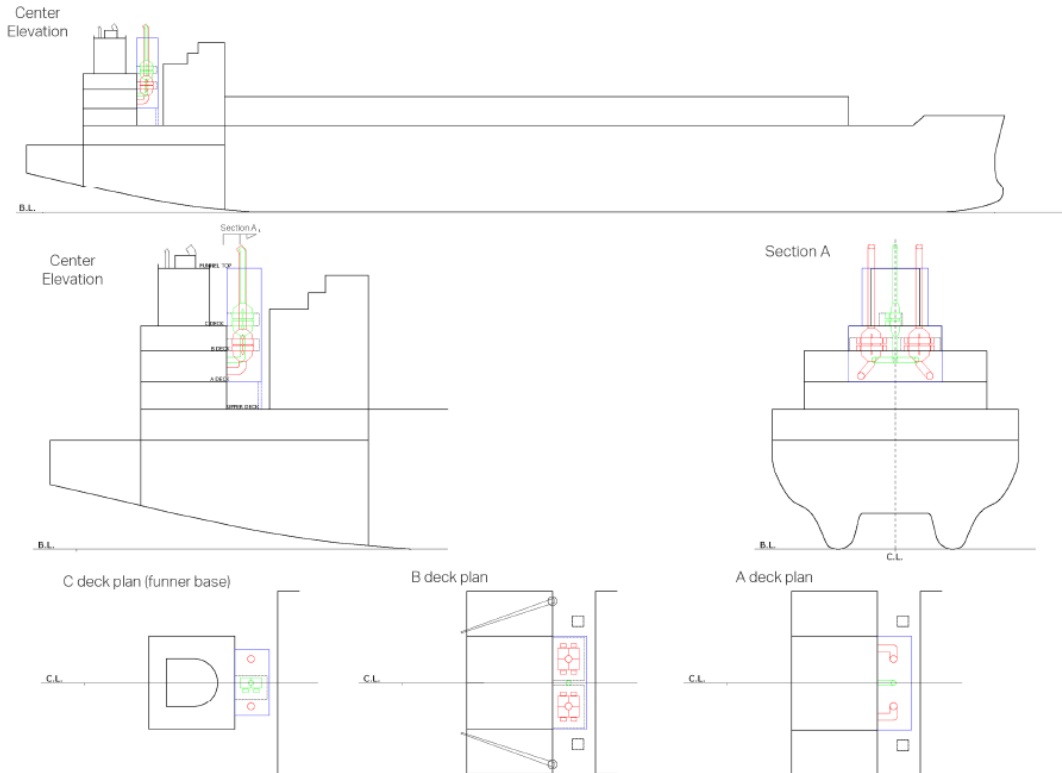
Πρόσθετη ηλεκτρική κατανάλωση περίπου 4% της κύριας απόδοσης του κινητήρα απαιτείται για την τροφοδοσία του PRS, επηρεάζοντας τις συνολικές εκπομπές GHG και επίσης τα φυσίγγια PRS θα πρέπει να αντικαθίστανται σε απροσδιόριστη συχνότητα. Η καλύτερη κατανόηση όλων των εκπομπών που προκύπτουν από τη χρήση του PRS είναι απαραίτητη πριν από την εφαρμογή, συμπεριλαμβανομένης της επιβεβαίωσης ότι μπορεί να διατηρηθεί η κανονιστική συμμόρφωση, για παράδειγμα, για το NO_x εκπομπών.

Στη μελέτη MMMCZCS (2022), για την ολοκλήρωση σχεδιασμού για τον προσδιορισμό της σκοπιμότητας της προσθήκης PRS στη θήκη μεταφοράς LNG,

πραγματοποιήθηκαν συνολικά τρεις ενσωματώσεις σχεδιασμού PRS, συμπεριλαμβανομένων δύο σετ για τους κύριους κινητήρες 12 MW και ενός σετ 6 MW με διαστάσεις για δύο από τους τέσσερις βοηθητικούς κινητήρες. Διαπιστώθηκε ότι η ενσωμάτωση της PRS είναι τεχνικά εφικτή και έχει συνολική αύξηση βάρους περίπου 200 τόνων και αύξηση της ολικής χωρητικότητας μικρότερη από 1%. Το αυξημένο βάρος και η θέση του PRS θα οδηγήσει σε 0,2-0,4% υψηλότερο KG και περίπου 6% αύξηση στη ροπή κάμψης (συντηρητική εκτίμηση). Τα υπάρχοντα περιθώρια ευστάθειας και διαμήκους αντοχής του σκάφους επαρκούν για να αντιμετωπίσουν αυτές τις αυξήσεις. Η πτώση πίεσης αναμένεται να είναι περίπου 40 mmaq και θεωρείται αποδεκτή για τα περισσότερα σχέδια που έχουν συνήθως περιθώριο 50-60 mmaq.

Το Σχήμα 14 παρέχει μια επισκόπηση των σχεδίων ολοκλήρωσης του φορέα LNG PRS. Οι κόκκινες γραμμές υποδεικνύουν το PRS για τους κύριους κινητήρες και οι πράσινες γραμμές αντιπροσωπεύουν το PRS για τους βοηθητικούς κινητήρες.

Η τεχνολογία PRS είναι ακόμη υπό ανάπτυξη και δεν έχει ακόμη αποδειχθεί σε μεγάλη κλίμακα επί των πλοίων. Μετά το επιτυχημένο εργαστήριο δοκιμής μικρής κλίμακας από την Daphne Technology το τρίτο τρίμηνο του 2021, η τεχνολογία θα δοκιμαστεί τώρα σε ένα LNG Carrier από την Daphne Technology κατά το 1ο-2ο τρίμηνο του 2023.



Σχήμα 14. Ενσωμάτωση συστήματος διάσπασης μεθανίου PRS.

3.4.4. Λύσεις Συστήματος για τη Μείωση των Εκπομπών Μεθανίου

Οι λύσεις συστήματος για τη μείωση των εκπομπών μεθανίου περιλαμβάνουν τη διαστασιολόγηση του συστήματος, τις διαμορφώσεις και τις συνδεδεμένες τεχνολογίες. Οι λύσεις συστημάτων που θα μπορούσαν να θεωρηθούν πρωτίστως τεχνολογίες ενεργειακής απόδοσης μπορούν επίσης να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη μείωση των ειδικών εκπομπών. Για παράδειγμα, η διαρροή μεθανίου από ορισμένους κινητήρες εσωτερικής καύσης ποικίλλει ανάλογα με το φορτίο του κινητήρα, με μεγαλύτερη ατέλεια καύσης να είναι τυπική σε χαμηλότερα φορτία. Μια γεννήτρια άξονα ή μπαταρίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση του φορτίου του κινητήρα και τη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με αποτέλεσμα λιγότερες εκπομπές άκαυστου μεθανίου. Τα στοιχεία αυτά θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της χρήσης ή την εξάλειψη της ανάγκης για βοηθητικούς κινητήρες. Το δυναμικό μείωσης των εκπομπών αυτών των λύσεων

εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα σκάφη και τα γενικά επίπεδα μείωσης δεν μπορούν να προσδιοριστούν.

Οι γεννήτριες άξονα μπορούν να εγκατασταθούν για τον κύριο κινητήρα με κύριο στόχο την αύξηση του φορτίου του κύριου κινητήρα και, ως εκ τούτου, τη μείωση της κατανάλωσης και των εκπομπών από τις βοηθητικές γεννήτριες ντίζελ. Η διαρροή μεθανίου από τους κινητήρες LP4st είναι υψηλότερη από ό,τι από τους δίχρονους κινητήρες, επομένως η κάλυψη της συνολικής ηλεκτρικής ζήτησης κατά την πλεύση με τη γεννήτρια άξονα επιτρέπει τη μείωση των ωρών λειτουργίας των βοηθητικών κινητήρων, μειώνοντας συνολικά τις εκπομπές μεθανίου. Η κατανάλωση καυσίμου είναι επίσης βελτιωμένη επειδή η ειδική κατανάλωση αερίου ενός δίχρονου κινητήρα (SGC) είναι χαμηλότερη από τους βοηθητικούς τετράχρονους κινητήρες. Μια γεννήτρια άξονα μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο πίσω άκρο είτε στο μπροστινό άκρο του κύριου κινητήρα.

Για παροχή ισχύος όταν το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι, χρησιμοποιείται μια παρόμοια αρχή με τη γεννήτρια άξονα για να μειώσει μερικώς ή πλήρως τη χρήση βοηθητικών κινητήρων. Μια γεννήτρια άξονα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο λιμάνι, καθώς ο κύριος κινητήρας δεν λειτουργεί, επομένως η συνολική ηλεκτρική ζήτηση τροφοδοτείται από την ακτή. Η κατανάλωση καυσίμου για κάθε σκάφος και οι σχετικές εκπομπές μειώνονται κατά τη χρήση ισχύος από την ξηρά. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν εκπομπές που βασίζονται στην ακτή που σχετίζονται με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο σκάφος μέσω σύνδεσης ηλεκτρικής ενέργειας από την ακτή, οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη σε υπολογισμούς για συγκεκριμένο σκάφος, όπως ο κανονισμός FuelEU.

4. Συμπεράσματα

Η μείωση των εκπομπών μεθανίου μπορεί να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση των συνολικών εκπομπών CO_{2eq} ισοδύναμων ρύπων σε ένα σκάφος, επιτρέποντας τη συμμόρφωση με τους επερχόμενους κανονισμούς και την αύξηση της βιωσιμότητας και της ανταγωνιστικότητας των εναλλακτικών καυσίμων με βάση το μεθάνιο.

Με βάση τα αποτελέσματα της ερευνάς προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι συνολικές εκπομπές μεθανίου ενός σκάφους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη: Ενώ η κύρια πηγή εκπομπών μεθανίου επί του πλοίου είναι η διαρροή μεθανίου από τον κύριο και τους βοηθητικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι συνολικές εκπομπές μεθανίου ενός σκάφους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις λειτουργίες του σκάφους, τις διαστάσεις του συστήματος, τις διαμορφώσεις των μηχανημάτων και τις συνδεδεμένες τεχνολογίες. Εκτός από την επιλογή του βασικού κινητήρα και των πιθανών τεχνολογιών μετεπεξεργασίας, οι λύσεις συστήματος μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές μεθανίου στο πλοίο.
- Η οικονομικά αποδοτική μείωση των εκπομπών μεθανίου στο πλοίο είναι δυνατή αλλά περιορισμένη για τα υπάρχοντα πλοία: Για τα πλοία που μελετήθηκαν, οι εκπομπές μεθανίου επί του σκάφους μπορούν να μειωθούν οικονομικά κατά 40-80% για ένα νεότευκτο και 20-50% για ένα υπάρχον σκάφος, μέσω της επιλογής βασικών τεχνολογιών κινητήρων και της χρήσης τεχνολογιών μετεπεξεργασίας και λύσεων συστήματος. Αυτές οι μειώσεις μεταφράζονται σε μείωση των εκπομπών μεθανίου επί του σκάφους από 7-14% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη δεξαμενή στο σκάφος, σε 2-8% για ένα νεότευκτο και 4-12% για ένα υπάρχον σκάφος. Οι πλοιοκτήτες θα πρέπει να εξετάσουν προσεκτικά τη μείωση των εκπομπών μεθανίου επί του πλοίου στη φάση της νέας κατασκευής για να αποφύγουν πιθανές δαπανηρές τροποποιήσεις αργότερα στη διάρκεια ζωής του πλοίου. Αν και είναι τεχνικά εφικτό να μειωθούν περαιτέρω οι εκπομπές μεθανίου επί των πλοίων πέρα από αυτά τα επίπεδα, η χρήση άλλων επιλογών όπως η χρήση

καυσίμων χαμηλών εκπομπών θα μπορούσε να είναι πιο αποδοτική από πλευράς κόστους εάν απαιτούνται περαιτέρω μειώσεις εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

- Απαιτείται μείωση των εκπομπών μεθανίου επί του σκάφους για να αυξηθεί η βιωσιμότητα των καυσίμων: Η μείωση των εκπομπών μεθανίου επί του σκάφους σε αυτά τα οικονομικά αποδοτικά επίπεδα αυξάνει τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των καυσίμων ηλεκτρο- και βιο-μεθανίου, ωστόσο, δεν είναι ακόμη σαφές εάν οι ανεξέλεγκτες εκπομπές από την εξόρυξη προς τη δεξαμενή μπορούν να μειωθούν σε αποδεκτά επίπεδα. Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία FuelEU και οικονομικά αποδοτικά μέτρα μείωσης των εκπομπών μεθανίου στο πλοίο, οι εκπομπές GHG WTW μπορούν να μειωθούν σε 5-9 gCO₂eq/MJ (CO₂ equivalent per MJ of biomass fuel) χρησιμοποιώντας 100% ηλεκτρομεθάνιο και πετρέλαιο υδροθερμικής υγροποίησης (hydrothermal liquefaction, HTL) ως πιλοτικό καύσιμο (μείωση 90-95% σε σχέση με το βαρύ μαζούτ).
- Τα προτεινόμενα όρια FuelEU για ναυσιπλοΐα δεν είναι αρκετά αυστηρά για να ενεργοποιήσουν τη μείωση των εκπομπών μεθανίου στο πλοίο: Για τα πλοία που μελετήθηκαν, τα επίπεδα εκπομπών GHG είναι ήδη συμβατά με τα όρια του δείκτη έντασης GHG FuelEU του 2025 και του 2030 χωρίς να εισάγονται μέτρα μείωσης των εκπομπών μεθανίου επί του σκάφους. Αυτό οφείλεται στο χαμηλότερο συντελεστή εκπομπών CO₂ του LNG που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της μεθοδολογίας GWP 100 ετών. Εάν εισαχθεί ρύθμιση εξισορρόπησης CO₂-eq με τα προτεινόμενα όρια FuelEU, δεν θα χρειαστούν μέτρα μείωσης των εκπομπών μέχρι το 2035.
- Απαιτείται ρύθμιση για την ευρεία υιοθέτηση τεχνολογιών και λύσεων μείωσης των εκπομπών μεθανίου επί του σκάφους: Χωρίς ισχυρά κίνητρα ή ρυθμιστικές απαιτήσεις για τη μείωση των εκπομπών μεθανίου, υπάρχει περιορισμένη δέσμευση από τους πλοιοκτήτες να υιοθετήσουν τεχνολογίες και λύσεις μείωσης των εκπομπών μεθανίου. Υπάρχουν συνεχείς συζητήσεις στον IMO για να συμπεριληφθεί το μεθάνιο στη μεθοδολογία LCA, μια προσέγγιση CO₂-eq όπως το FuelEU. Υπάρχει επίσης η πιθανότητα το μεθάνιο να ρυθμίζεται με πιο άμεσο τρόπο χρησιμοποιώντας τον τεχνικό φάκελο ενός σκάφους όπως αυτόν των NO_x εκπομπών. Αυτός ο τύπος ρύθμισης θα μπορούσε να στοχεύει πιο άμεσα τα επίπεδα

διαρροής μεθανίου και την ανάγκη μείωσης τους στο σκάφος είτε για νεότευκτα είτε για υπάρχοντα πλοία.

Για να αξιολογηθεί σωστά η βιωσιμότητα εναλλακτικών λύσεων καυσίμου με βάση το μεθάνιο, πρέπει να γίνει πλήρως κατανοητή η ικανότητα μείωσης των εκπομπών διαφυγόντων εκπομπών από την εξόρυξη προς τη δεξαμενή. Οι ανοδικές ανεξέλεγκτες εκπομπές μελετώνται επί του παρόντος στο Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping (MMMCZCS)² για να καταστεί δυνατή μια πλήρης αξιολόγηση βιωσιμότητας των λύσεων καυσίμου με βάση το μεθάνιο. Το MMCZCS σχεδιάζει επίσης να μελετήσει τις εκπομπές των πλοίων κατά τη λειτουργία όπου συγκεκριμένοι παράγοντες όπως τα δυναμικά φορτία του κινητήρα και η κατάσταση της θάλασσας μπορούν να επηρεάσουν τα επίπεδα εκπομπών μεθανίου.

Παρά την αργή πρόοδο για την παροχή κινήτρων ή την απαίτηση από τα πλοία με καύσιμα LNG να περιορίσουν τις εκπομπές μεθανίου, υπάρχει σημαντική διεθνής κοινωνική πίεση για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα του μεθανίου. Από την Παγκόσμια Δέσμευση Μεθανίου (Global Methane Pledge, COP26) μέχρι τον Νόμο για τη μείωση του πληθωρισμού των ΗΠΑ του 2022, η αυξανόμενη παγκόσμια ανησυχία πιέζει έντονα για μειώσεις των αερίων του θερμοκηπίου για να περιοριστεί η αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας σε πολύ κάτω από τους 2°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα. Αναμένεται ότι αυτή η κοινωνική πίεση θα οδηγήσει σε οριστική δράση από τους ενδιαφερόμενους σε όλους τους κλάδους.

² <https://www.zerocarbonshipping.com>

Βιβλιογραφία

- ABS, (2014). Bunkering of Liquefied Natural Gas-fuelled Marine Vessels in North America. *American Bureau of Shipping*, Houston, TX.
- Allen, D. T. (2014). Methane emissions from natural gas production and use: reconciling bottom-up and top-down measurements. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 5, 78-83.
- Allen, M. R., Fuglestedt, J. S., Shine, K. P., Reisinger, A., Pierrehumbert, R. T., & Forster, P. M. (2016). New use of global warming potentials to compare cumulative and short-lived climate pollutants. *Nature Climate Change*, 6(8), 773-776.
- Anderson, M., Salo, K., & Fridell, E. (2015). Particle-and gaseous emissions from an LNG powered ship. *Environmental science & technology*, 49(20), 12568-12575.
- Arnet, N. M. L. (2014). *LNG Bunkering Operations: Establish probabilistic safety distances for LNG bunkering operations* (Master's thesis, Institutt for energi-og prosessteknikk). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy conversion and management*, 182, 72-88.
- Balcombe, P., Heggo, D. A., & Harrison, M. (2022). Total methane and CO₂ emissions from liquefied natural gas carrier ships: the first primary measurements. *Environmental Science & Technology*, 56(13), 9632-9640.
- Balcombe, P., Staffell, I., Kerdan, I. G., Speirs, J. F., Brandon, N. P., & Hawkes, A. D. (2021). How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis. *Energy*, 227, 120462.
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408-421.
- Bourbon, E. (2014). Clean cities alternative fuel price report. *US Department of Energy: Washington, DC, USA*.

- Broman, R., Staalhammar, P., & Erlandsson, L. (2010). *Enhanced Emission Performance and Fuel Efficiency for HD Methane Engines*. Literature Study. Final Report AVL MTC Motortestcenter AB, Sweden
- Brusick DJ (1983) Genetic and transforming activity of formaldehyde. In: *Gibson JE (ed) Formaldehyde Toxicity*. Hemisphere, New York, pp 72–83
- Brynolf, S., Magnusson, M., Fridell, E., & Andersson, K. (2014). Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 28, 6-18.
- Burel, F., Taccani, R., & Zuliani, N. (2013). Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion. *Energy*, 57, 412-420.
- Cho, H. M., & He, B. Q. (2007). Spark ignition natural gas engines—A review. *Energy conversion and management*, 48(2), 608-618.
- Cho, H. M., & He, B. Q. (2007). Spark ignition natural gas engines—A review. *Energy conversion and management*, 48(2), 608-618.
- Contessi C., (2013). *Gas Engine Emissions, Wärtsilä Dual Engines*, Wärtsilä. <https://docplayer.net/43900723-Gas-engine-emissions-wartsila-dual-fuel.html>
- Corbett, J. J., & Koehler, H. W. (2004). Considering alternative input parameters in an activity-based ship fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Øyvind Endresen et al. on “Updated emissions from ocean shipping”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D23).
- Corbett, J. J., Thomson, H., & Winebrake, J. J. (2015). Methane emissions from natural gas bunkering operations in the marine sector: A total fuel cycle approach. *US Department of Transportation, Maritime Administration: Washington, DC, USA*.
- Corbett, J. J., Thomson, H., & Winebrake, J. J. (2015). Methane emissions from natural gas bunkering operations in the marine sector: A total fuel cycle approach. *US Department of Transportation, Maritime Administration: Washington, DC, USA*.
- Corbett, J. J., Thomson, H., & Winebrake, J. J. (2015). Methane emissions from natural gas bunkering operations in the marine sector: A total fuel cycle approach. *University of Delaware, US Department of Transport*.
- Cullinane, K., & Bergqvist, R. (2014). Emission control areas and their impact on maritime transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 28, 1-5.

- DeLancey, G. (2013). Principles of chemical engineering practice. John Wiley & Sons.
- Demirbas, A. (2010). Methane Gas Hydrate (Green Energy and Technology). *Springer-Verlag*.
- Dimopoulos, G., & Frangopoulos, C. (2008). A dynamic model for liquefied natural gas evaporation during marine transportation. *International Journal of Thermodynamics*, 11(3), 123-131.
- DNV GL, (2014). *Liquefied Natural Gas (LNG) Bunkering Study*. U.S. Department of Transportation, Maritime Administration, Washington, DC.
- Eide, M. S., & Endresen, Ø. (2010). Assessment of measures to reduce future CO₂ emissions from shipping. *Position Paper*, 5.
- Feist, M. D., Landau, M., & Harte, E. (2010). The effect of fuel composition on performance and emissions of a variety of natural gas engines. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 3(2), 100-117.
- Hamworthy Gas Systems AS, (2006). QGII QFLEX Operational Manual.
- Hauschild, M. Z., Goedkoop, M., Guinée, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Joliet, O., ... & Pant, R. (2013). Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 683-697.
- Hegab, A., La Rocca, A., & Shayler, P. (2017). Towards keeping diesel fuel supply and demand in balance: Dual-fuelling of diesel engines with natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 666-697.
- Herdzik, J. (2018). Methane slip during cargo operations on LNG carriers and LNG-fueled vessels. *New Trends in Production Engineering*, 1(1), 293-299.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education.
- IGU (2021). IGU World LNG Report 2021; *International Gas Union*. [igu.org/resources/world-lng-report-2021/2021](https://www.igu.org/resources/world-lng-report-2021/2021).
- IMO (2009). Second IMO GHG Study 2009. *International Maritime Organization*, London. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>
- IMO (2013) MARPOL annex VI and NTC 2008: with guidelines for implementation. *International Maritime Organization*, London. https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/publications/Documents/Supplements/English/QQC664E_092020.pdf

- IMO (2014). Third IMO GHG Study 2014. *International Maritime Organization*, London. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Greenhouse-Gas-Studies-2014.aspx>
- IMO (2015). Summary of Outcome of MEPC 73. *International Maritime Organization*, London.
- IMO (2020). Fourth Greenhouse Gas Study 2020. *International Maritime Organization*, London. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>
- Jordan, C. M., Verones, F., & Cherubini, F. (2018). Integrating impacts on climate change and biodiversity from forest harvest in Norway. *Ecological Indicators*, 89, 411-421.
- IPCC (2014). AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf
- Juliussen, L. (2011). MAN B&W ME-GI engines Recent research & results. *ISME KOBE 2011*.
- Korakianitis, T., Namasivayam, A. M., & Crookes, R. J. (2011). Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. *Progress in energy and combustion science*, 37(1), 89-112.
- Kristensen, P. G., Jensen, J. K., Nielsen, M., & Illerup, J. B. (2004). Emission factors for gas fired CHP units < 25 MW. *Vancouver: IGRC*.
- Krivopolianskii, V., Valberg, I., Stenersen, D., Ushakov, S., & Æsøy, V. (2019). Control of the combustion process and emission formation in marine gas engines. *Journal of Marine Science and Technology*, 24(2), 593-611.
- Lindstad, E., & Riialand, A. (2020). LNG and cruise ships, an easy way to Fulfil regulations—versus the need for reducing GHG emissions. *Sustainability*, 12(5), 2080.
- Lowell, D., Wang, H., & Lutsey, N. (2013). Assessment of the fuel cycle impact of liquefied natural gas as used in international shipping. *The International Council on Clean Transportation*.
- Lynn, J., & Peeva, N. (2021). Communications in the IPCC's Sixth Assessment Report cycle. *Climatic Change*, 169(1-2), 18.

- Maersk Mc-Kinney Moller Center (2022). Reducing methane emissions onboard vessels. An overview of methane emission sources and levels onboard vessels and the technologies, solutions, and regulatory drivers that can help reduce them.
- Mitsui, O. S. K. Lines Ltd.,(2007). LNG Carrier Operation Technology Text. Search in.
- MMMCZCS (2022). Reducing methane emissions onboard vessels. Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/reducing-methane-emissions-onboard-vessels/>
- Mokhatab, S., Poe, W. A., & Mak, J. (2018). Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices. Gulf professional publishing.
- Morgan Stanley Research, (2013). Natural Gas as a Transportation Fuel Energy. <https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2014/05/Morgan.pdf>
- NETL (2019). *Life Cycle Greenhouse Gas Perspective on Exporting Liquefied Natural Gas from the United States*. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/09/f66/2019%20NETL%20LCA-GHG%20Report.pdf>
- Nielsen, J. B., & Stenersen, D. (2010). *Emission factors for CH₄, NO_x, particulates and black carbon for domestic shipping in Norway, revision 1*. Klima og forurensningsdirektoratet: Marintek. Norwegian Marine Technology Research Institute, Trondheim, Norway
- Nielsen, J. B., & Stenersen, D. (2010). Emission factors for CH₄, NO_x, particulates and black carbon for domestic shipping in Norway, revision 1. *Klima og forurensningsdirektoratet*: Marintek.
- Nugroho, S., Lazuardi, S. D., Faida, E. E. N., Mustakim, A., Yunianto, I. T., & Buana, I. G. N. S. (2021, February). Addressing the challenges of Global Sulphur Cap 2020: case study Indonesian tanker shipping. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 649, No. 1, p. 012005). IOP Publishing.
- Ocko, I. B., Hamburg, S. P., Jacob, D. J., Keith, D. W., Keohane, N. O., Oppenheimer, M., ... & Pacala, S. W. (2017). Unmask temporal trade-offs in climate policy debates. *Science*, 356(6337), 492-493.
- Pospiech, P., (2014). Is Internal Combustion Engine Methane Slip Harmful to the Environment?, Maritime Reporter and MarineNews magazines online. <https://www.marinelink.com/news/environment-combustion367472>

- Roman-White, S. A., Littlefield, J. A., Fleury, K. G., Allen, D. T., Balcombe, P., Konschnik, K. E., ... & George, F. (2021). LNG supply chains: A supplier-specific life-cycle assessment for improved emission accounting. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(32), 10857-10867.
- Schinas, O., & Butler, M. (2016). Feasibility and commercial considerations of LNG-fueled ships. *Ocean Engineering*, 122, 84-96.
- Schuller, O., Kupferschmid, S., Hengstler, J., & Whitehouse, S. (2019). Life cycle GHG emission study on the use of LNG as marine fuel. *Thinkstep: Stuttgart, Germany*.
- Semin, R. A. B. (2008). A technical review of compressed natural gas as an alternative fuel for internal combustion engines. *Am. J. Eng. Appl. Sci*, 1(4), 302-311.
- Shine, K. P. (2009). The global warming potential—the need for an interdisciplinary retrieval. *Climatic Change*, 96(4), 467-472.
- SIGTTO (2016). *Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals (LGHP4)*. Society of International Gas Tanker and Terminal Operators. 4th Edition, Witherby Publishers.
- Stenersen D, Thonstad O (2017) GHG and NOx emissions from gas fuelled engines. *Mapping, verification, reduction technologies*. Trondheim: SINTEF Ocean AS
- Suopanki, A. (2021). Global Sulphur Cap 2020 and The Latest EGCS Trends- Wäertsilä EGCS-The Latest Technology and Achievements. *Marine Engineering*, 56(3), 428-434.
- Tanaka, K., Cavalett, O., Collins, W. J., & Cherubini, F. (2019). Asserting the climate benefits of the coal-to-gas shift across temporal and spatial scales. *Nature climate change*, 9(5), 389-396.
- Thinkstep (2017). Greenhouse Gas Intensity of Natural Gas; *Thinkstep AG* for Natural & Bio Gas Vehicle Association (NGVA) Europe.
- Thinkstep (2019). Life cycle GHG emission study on the use of LNG as marine fuel. *Thinkstep AG: Stuttgart, Germany*.
- Thomson, H., Corbett, J. J., & Winebrake, J. J. (2015). Natural gas as a marine fuel. *Energy Policy*, 87, 153-167.
- Turner, A. J., Frankenberg, C., & Kort, E. A. (2019). Interpreting contemporary trends in atmospheric methane. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(8), 2805-2813.

- UN (2015). United Nations Framework Convention on Climate Change; Paris Agreement: FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. *United Nations*, New York.
- Ushakov, S., Stenersen, D., & Einang, P. M. (2019, June). Methane slip summarized: Lab vs. field data. In *Proceedings of the CIMAC Congress, Vancouver, BC, Canada* (pp. 10-14).
- Wei, L., & Geng, P. (2016). A review on natural gas/diesel dual fuel combustion, emissions and performance. *Fuel Processing Technology*, 142, 264-278.
- World Ocean Review, (2014). *Marine Resources – Opportunities and Risks*, https://worldoceanreview.com/wp-content/downloads/wor3/WOR3_en.pdf
- Yusuf, R. O., Noor, Z. Z., Abba, A. H., Hassan, M. A. A., & Din, M. F. M. (2012). Methane emission by sectors: a comprehensive review of emission sources and mitigation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5059-5070.
- Marpoltraining (2022). *Annex VI-Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships*. http://www.marpoltraining.com/MMSKOREAN/MARPOL/Annex_VI/app2.htm