

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

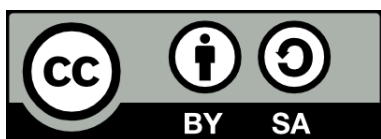
## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΧΡΗΣΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (LNG) ΣΕ ΜΗΧΑΝΕΣ ΠΡΩΣΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΩΝ ΠΛΟΙΩΝ**

Τσανίδης Παναγιώτης  
Α.Μ. 46145903

*Επιβλέπων Καθηγητής:* Θεοδωρακάκος Ανδρέας  
Αναπλ. Καθηγητής

Αθήνα, 2020



*Επιτρέπεται η αντιγραφή, διανομή, αναπαραγωγή και η παρουσίαση της εργασίας και των παράγωγων έργων που βασίζονται σε αυτή, με την προϋπόθεση της πλήρους αναφοράς των στοιχείων της εργασίας, όπως αναγράφονται στο εξώφυλλο και η διάθεση των νέων δημιουργημάτων με τους ίδιους ακριβώς όρους.*

ΔΕΛΤΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	
Ακαδ. έτος	2019-2020
Τίτλος Εργασίας	ΧΡΗΣΗ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ (LNG) ΣΕ ΜΗΧΑΝΕΣ ΠΡΩΣΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΩΝ ΠΛΟΙΩΝ
Φοιτητής	Τσανίδης Παναγιώτης (Α.Μ. 46145903)
Τμήμα	Μηχανολόγων Μηχανικών
Επιβλ. Καθ.	Δρ. Θεοδωρακάκος Ανδρέας
Ημερομηνία	Ιούλιος-2020
Λέξεις κλειδιά	Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (Υ.Φ.Α.), Ναυτικές πετρελαιομηχανές, Συστήματα αποθήκευσης & διαχείρισης του LNG, Συστήματα πρόωσης, Ναυτικές μηχανές αερίου, Ναυτικές μηχανές διπλού & τριπλού καυσίμου
<p><b>Περίληψη:</b> Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επισκόπηση τεχνολογιών για τη χρήση του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) σε κινητήρες σύγχρονων εμπορικών πλοίων (κυρίως των LNG carriers). Το πρώτο κεφάλαιο αποτελείται από την εισαγωγή του θέματος που εξετάζεται, τον σκοπό &amp; στόχο της εργασίας, καθώς και μια διαχρονική εξέλιξη των ναυτικών μηχανών. Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στις συμβατικές ναυτικές πετρελαιομηχανές, με σκοπό την ανάπτυξη υποβάθρου, μιας και οι μηχανές αυτές αποτελούν τον “πρόγονο” των νεότερων τεχνολογιών. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στο καύσιμο LNG, καθώς και στα μέσα αποθήκευσης, διαχείρισης και μεταφοράς του, εντός του πλοίου. Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται ανάλυση των συστημάτων πρόωσης LNG, με χρονολογική σειρά εξελίξεων και μεγαλύτερη έμφαση στα νεότερα συστήματα υψηλότερου βαθμού απόδοσης. Καταληκτικά, εξάγονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις, σχετικά με τις διαφορετικές τεχνολογίες που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε καθώς και ένα παράρτημα.</p>	

DIPLOMA THESIS INFORMATION SHEET	
<i>Academic year</i>	2019-2020
<i>Title</i>	THE USE OF LNG FOR THE PROPULSION OF MODERN COMMERCIAL SHIPS
<i>Student</i>	Tsanidis Panagiotis
<i>Department</i>	Mechanical Engineering
<i>Advisor</i>	Dr. Theodorakakos Andreas
<i>Date</i>	July-2020
<i>Keywords</i>	Liquified Natural Gas (LNG), Marine diesel engines, LNG containment & management systems, Propulsion systems, Marine Gas Engines, Dual Fuel (DF) & Tri-Fuel Engines
<p><b><i>Abstract:</i></b> <i>The objective of this thesis is the survey of technologies of LNG usage for the propulsion of modern commercial ships. The first chapter consists of an introduction of this subject, the purpose and goal of the thesis, and also the evolution of marine engines. The second chapter refers to conventional diesel marine engines, to create a background, as they are the “ancestors” of future technologies. The third chapter refers to LNG fuel, and also the containment and management systems. In the fourth chapter, there is an analysis of LNG propulsion systems, with chronological order of development and a greater emphasis for newer systems with a higher efficiency level. Finally, there is the conclusion and suggestions, about the technologies of previous chapters, as well as the bibliographic references, and an appendix.</i></p>	

## Δήλωση ακαδημαϊκής ακεραιότητας

*(Declaration of academic integrity)*

Ο υπογράφων υπεύθυνα δηλώνει ότι η παρούσα εργασία με τίτλο «Χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) σε μηχανές πρόωσης σύγχρονων εμπορικών πλοίων» είναι προϊόν δικής του δουλειάς και ότι όλες οι πηγές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σύνταξη της αναφέρονται πλήρως.

Παναγιώτης Τσανίδης \_\_\_\_\_



## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Θεοδορακάκο Ανδρέα, για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε σχετικά με τη περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και τον Δρ. Φιλίο Ανδρόνικο, για τη βοήθεια που μου προσέφερε σχετικά με το πρότυπο ακαδημαϊκής εργασίας, καθώς και τη σωστή χρήση των βιβλιογραφικών αναφορών.





## ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική επισκόπηση τεχνολογιών για τη χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG), σε κινητήρες σύγχρονων εμπορικών πλοίων (κυρίως των LNG carriers), συμπεριλαμβανομένου και της αποθήκευσης - διαχείρισης του καυσίμου εντός του πλοίου.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή των τελευταίων ναυτιλιακών εξελίξεων γύρω από τα καύσιμα, και κυρίως του εναλλακτικού καυσίμου LNG που αφορά την συγκεκριμένη εργασία. Στη συνέχεια παρατίθεται ο σκοπός και στόχος της εργασίας, καθώς και μια διαχρονική εξέλιξη των ναυτικών μηχανών.

Το δεύτερο κεφάλαιο ουσιαστικά αποτελεί το υπόβαθρο της εργασίας. Γίνεται ανάλυση των συμβατικών πετρελαιομηχανών, διότι οι μηχανές αυτές αποτελούν τον “πρόγονο” των νεότερων τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, θα γίνει αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών λειτουργίας, των εξαρτημάτων των μηχανών, των συστημάτων έγχυσης, υπερπλήρωσης, κλπ. Το κεφάλαιο θα κλείσει με το θέμα της μείωσης των εκπομπών ρύπων, που αποτελεί ουσιαστικά τον παράγοντα που οδηγεί στην αντικατάσταση των μηχανών αυτών, με νέες μηχανές εναλλακτικών καυσίμων (LNG).

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στο εναλλακτικό καύσιμο LNG. Συγκεκριμένα, εκτός από τη περιγραφή του καυσίμου, θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή των μέσων αποθήκευσης (δεξαμενές LNG). Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα συστήματα διαχείρισης του καυσίμου, συμπεριλαμβανομένου της μεταφοράς του καυσίμου με σωληνώσεις & αντλίες, των συστημάτων αεριοποίησης & επανυγροποίησης, καθώς και των συστημάτων ασφαλείας & αδρανούς αερίου. Το κεφάλαιο θα κλείσει με την περιγραφή ενός τυπικού κύκλου φόρτωσης – εκφόρτωσης του πλοίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται ανάλυση των συστημάτων πρόωσης, με χρονολογική σειρά των εξελίξεων και μεγαλύτερη έμφαση στα προηγμένα συστήματα υψηλού βαθμού απόδοσης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο συμβατικός αμοστροβίλος και τα συστήματα πρόωσης με αεριοστροβίλους. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση των μεσόστροφων μηχανών διπλού καυσίμου, καθώς και η χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης με συνδυασμό των παραπάνω μηχανών (συστήματα DFDE/TFDE). Το κεφάλαιο θα κλείσει με την αναλυτική περιγραφή των βραδύστροφων μηχανών διπλού καυσίμου (τεχνολογίες υψηλής & χαμηλής πίεσης), που αποτελούν και τη νεότερη τεχνολογία χρήσης LNG για την πρόωση των σύγχρονων εμπορικών πλοίων.

Καταληκτικά, εξάγονται τα συμπεράσματα & οι προτάσεις σχετικά με τις διαφορετικές τεχνολογίες που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, και παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και ένα παράρτημα.



## **EXTENDED SUMMARY**

The objective of this thesis is the bibliographic survey of LNG usage for the propulsion of modern commercial ships, including ways of containment and management of the fuel inside ships.

In first chapter there is an introduction of recent shipping developments about fuels, and especially of the alternative LNG fuel that concerns this project. Subsequently, the purpose and goal of the thesis are listed, and also the evolution of marine engines.

The second chapter is actually the background of this thesis. There is an analysis of conventional marine diesel engines, because these engines are the “ancestors” of the newer technologies. Specifically, there will be an analytical description of operating characteristics, engine parts, injection, turbocharging, etc). The chapter will close with the subject of emission reduction, which actually constitutes the factor that drives the replacement of those engines, with newer engines that use alternative fuels (LNG).

The third chapter refers to the alternative fuel LNG. Specifically, except of the description of the fuel, there will be an analytical description of cargo containment systems (LNG tanks). Subsequently, an analysis of cargo management systems, including the transportation of cargo with pumps and pipes, the regasification and reliquefaction systems, and also the safety and inert gas systems. The chapter will close with the description of a typical cargo cycle (loading – unloading).

In fourth chapter there is an analysis of LNG propulsion systems, with chronological order of development and a greater emphasis for newer systems with a higher efficiency level. Specifically, the conventional steam turbine is introduced, along with gas turbine propulsion systems. Subsequently, the analysis of Medium-Speed Dual-Fuel engines, along with electrical propulsion combinations (DFDE & TFDE systems). The fourth chapter will close with an analytical description of Low-Speed Dual-Fuel engines (both technologies of high and low pressure), that constitutes the newest technology of LNG usage for the propulsion of modern commercial ships.

Finally, there is the conclusion and suggestions about the technologies of previous chapters, as well as the bibliographic references, and the appendix.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ .....	15
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	17
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ	18
1.2 ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	19
2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΝΑΥΤΙΚΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΜΗΧΑΝΕΣ .....	25
2.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	25
2.1.1 Ο δίχρονος κύκλος λειτουργίας	26
2.1.2 Έργο, ισχύς & ροπή	28
2.1.3 Μέση ενεργός πίεση κύκλου	29
2.1.4 Ειδική κατανάλωση καυσίμου	29
2.1.5 Μέση ταχύτητα εμβόλου	29
2.1.6 Βαθμός απόδοσης	29
2.1.7 Κραδασμοί – ταλαντώσεις	30
2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΜΕΡΗ	33
2.2.1 Η βάση της μηχανής	34
2.2.2 Ο σκελετός και το σώμα κυλίνδρων	35
2.2.3 Στροφαλοφόρος	36
2.2.4 Χιτώνια – Θυρίδες εισαγωγής	38
2.2.5 Ελατήρια & έμβολο – βάκτρο – διάφραγμα	40
2.2.6 Πώμα κυλίνδρου & βαλβίδα εξαγωγής	42
2.2.7 Σταυρός (ζύγωμα)	43
2.2.8 Έδρανα διωστήρα & ωστικό έδρανο	45
2.2.9 Η συναρμολόγηση της μηχανής	46
2.3 ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΜΕΣΟΣΤΡΟΦΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	47
2.4 ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	49
2.4.1 Εγχυτήρες & ακροφύσια	52
2.4.2 Ο στροβιλισμός κατά τη σάρωση	53
2.4.3 Λόγος αέρα – καυσίμου	55
2.4.4 Υπολογισμός ποσότητας ψεκασμού	56
2.5 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ	57
2.5.1 Συμπιεστές	58
2.5.2 Στρόβιλοι	64
2.5.3 Έδραση στροβίλου & συμπιεστή	68
2.5.4 Λοιπά παρελκόμενα	69
2.5.5 Υπολογισμός ογκομετρικής παροχής αέρα υπερπλήρωσης	70

2.6	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ	71
2.6.1	Καύσιμα	71
2.6.2	Λιπαντικά	73
2.6.3	Συντήρηση - Διάγνωση	76
2.7	ΜΕΙΩΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ	79
2.7.1	Τρόποι μείωσης των οξειδίων του αζώτου (NO <sub>x</sub> )	82
2.7.2	Τρόποι μείωσης των οξειδίων του θείου (SO <sub>x</sub> )	89
3	ΤΟ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ.....	91
3.1	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ LNG	93
3.1.1	Ανεξάρτητες δεξαμενές	93
3.1.2	Δεξαμενές τύπου μεμβράνης	95
3.2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗΣ LNG	101
3.2.1	Σωληνώσεις & βαλβίδες	101
3.2.2	Αντλίες	102
3.2.3	Εξατμιστές & μονάδες επαναεριοποίησης	103
3.2.4	Χειρισμός & επανυγροποίηση του BOG	104
3.2.5	Γεννήτρια αδρανούς αερίου & συστήματα αζώτου	108
3.3	ΤΥΠΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ – ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ	110
4	ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΕΡΙΟΥ & ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ .....	111
4.1	ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ	112
4.1.1	Ατμοστρόβιλοι με αναθέρμανση	113
4.2	ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ	114
4.2.1	Συστήματα πρόωσης αεριοστρόβιλων	116
4.3	ΜΕΣΟΣΤΡΟΦΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	120
4.4	ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ	129
4.4.1	Ηλεκτρική πρόωση με θερμικές στροβιλομηχανές	129
4.4.2	Ηλεκτρική πρόωση με παλινδρομικές μηχανές	132
4.5	ΒΡΑΔΥΣΤΡΟΦΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	133
4.5.1	Μηχανές υψηλής πίεσης	133
4.5.2	Μηχανές χαμηλής πίεσης	145
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	151
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	154
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	157

## ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
W	Έργο	Joule
p	Πίεση	Pa
P	Ισχύς	W
n	Στροφές	rps
$\omega$	Γωνιακή ταχύτητα	rad/s
MEP	Μέση ενεργός πίεση	Pa
V <sub>n</sub>	Όγκος εμβολισμού	m <sup>3</sup>
b <sub>eff</sub>	Ειδική κατανάλωση καυσίμου	kg/Wh
$\dot{m}_{fuel}$	Παροχή καυσίμου	kg/s
$\eta_{th}$	Θερμικός βαθμός απόδοσης	
$\eta_{mec}$	Μηχανικός βαθμός απόδοσης	
LHV	Κατωτέρα θερμογόνοξ δύναμη καυσίμου	J/kg
P <sub>b</sub>	Ωφέλιμη ισχύς	W
P <sub>i</sub>	Ενδεικνύμενη ισχύς	W
MPS	Μέση ταχύτητα εμβόλου	m/s
H	Διαδρομή εμβόλου	m
m <sub>air</sub>	Μάζα αέρα	kg
m <sub>fuel</sub>	Μάζα καυσίμου	kg
$\rho_{air}$	Πυκνότητα ατμοσφαιρικού αέρα	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{turbo}$	Πυκνότητα αέρα υπερπλήρωσης	kg/m <sup>3</sup>
Q <sub>turbo</sub>	Ογκομετρική παροχή αέρα υπερπλήρωσης	m <sup>3</sup> /s
N <sub>cyl</sub>	Αριθμός κυλίνδρων	

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες
f	Συχνότητα	Hz
q	Μέτρο ακαμψίας	Nm/rad
I	Ροπή αδράνειας	Kg*m <sup>2</sup>



## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία εξήντα χρόνια, το μαζούτ (HFO) ήταν το κυρίαρχο καύσιμο των εμπορικών πλοίων. Όλα αυτά τα χρόνια, οι ναυτικοί κινητήρες κατασκευάζονταν και εξελίσσονταν γύρω από αυτό. Ωστόσο, το καύσιμο αυτό ρυπαίνει το θαλάσσιο περιβάλλον και έχει υψηλή περιεκτικότητα σε θείο. Στις Περιοχές Ελέγχου Εκπομπών (ECA) τα πλοία θα επιτρέπεται να χρησιμοποιούν μόνο καύσιμο που περιέχει 0,1% θείο. Η Μεσόγειος δεν έχει οριστεί ακόμη ως τέτοια περιοχή, όμως νέοι παγκόσμιοι κανόνες για τις εκπομπές θείου (Sulphur Cap) τίθενται σε ισχύ το 2020, με το όριο περιεκτικότητας σε θείο να κατεβαίνει στο 0,5%. Ως κύριες λύσεις για την επίτευξη των στόχων για τη μετά 2020 εποχή προβάλλονται νέες τεχνολογίες και νέα καύσιμα [1]:

- Χαμηλού Θείου Μαζούτ (LSHFO)
- Εγκατάσταση πλυντριδών (Scrubbers)
- Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο, γνωστό ως LNG, αναμένεται να απασχολήσει τη διεθνή επικαιρότητα ολοένα και περισσότερο τα επόμενα χρόνια. Αυτό κυρίως οφείλεται στη κλιματική αλλαγή που αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα παγκόσμιας κλίμακας. Η αιτία του προβλήματος για τον τομέα της ναυτικής βιομηχανίας προέρχεται από τους αέριους ρύπους που εκπέμπονται κατά τη καύση του μαζούτ. Ως γνωστόν, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), επιβαρύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ενώ ατμοσφαιρικοί ρύποι όπως το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ), τα οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), επηρεάζουν αρνητικά τόσο το περιβάλλον όσο και την υγεία του ανθρώπου.

Το 2018 ο Διεθνής Οργανισμός Ναυτιλίας – IMO (International Maritime Organization) ανακοίνωσε το πρώτο μακροπρόθεσμο σχέδιο του για την μείωση των βλαβερών εκπομπών στον κλάδο των θαλάσσιων μεταφορών, εισάγοντας πολύ αυστηρότερα ανώτατα όρια εκπομπών θείου. Ειδικότερα, από το 2020, μόνο πλοία που χρησιμοποιούν καύσιμα με περιεκτικότητα σε θείο 0.5% ή λιγότερο θα επιτρέπεται να πλέουν στους ωκεανούς, καθώς η στρατηγική του IMO είναι να περικόψει τις εκπομπές ρύπων στις θαλάσσιες μεταφορές στο μισό μέχρι το 2050. Τα πλοία, τα οποία καταναλώνουν καύσιμο με υψηλότερη περιεκτικότητα σε θείο (για την ώρα το όριο είναι στο 3.5%) θα έχουν δικαίωμα να παραμείνουν σε λειτουργία μόνο εφόσον είναι εξοπλισμένα με σύστημα καθαρισμού εκπομπών (τα λεγόμενα scrubbers). Σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στην ιστοσελίδα crude oil, κοστίζουν από 1 έως 5.7 εκατομμύρια δολάρια, ποσό που για κάποιους πλοιοκτήτες παραμένει ασύμφορο, όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά.

Από την πλευρά της η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη δαπανήσει 250 εκατομμύρια δολάρια για την ανάπτυξη υποδομών καυσίμων LNG και προωθεί το καύσιμο LNG ως εναλλακτική λύση. Φαίνεται ακόμη έτοιμη να δαπανήσει δισεκατομμύρια για να καταστήσει το LNG, ως το κύριο καύσιμο των πλοίων [2]. Ο λόγος βρίσκεται κυρίως στην καθαρότητα του καυσίμου, όπου το LNG σε σχέση με το πετρέλαιο εκπέμπει περίπου 30% λιγότερο διοξείδιο

του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), μηδενικό διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και 80% λιγότερα οξείδια του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ).

Συγκεκριμένα για τη χώρα μας, υπάρχει ήδη ένας τερματικός σταθμός LNG στη Ρεβυθούσα. Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Poseidon-Med II, προγραμματίζεται η δημιουργία σταθμών LNG στην Αλεξανδρούπολη και στον Βασιλικό της Κύπρου, καθώς και σταθμοί μικρότερης κλίμακας (Πειραιάς, Πάτρα, Ηγουμενίτσα, Ηράκλειο και Λεμεσός Κύπρου).



Σχήμα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση σταθμού LNG [3].

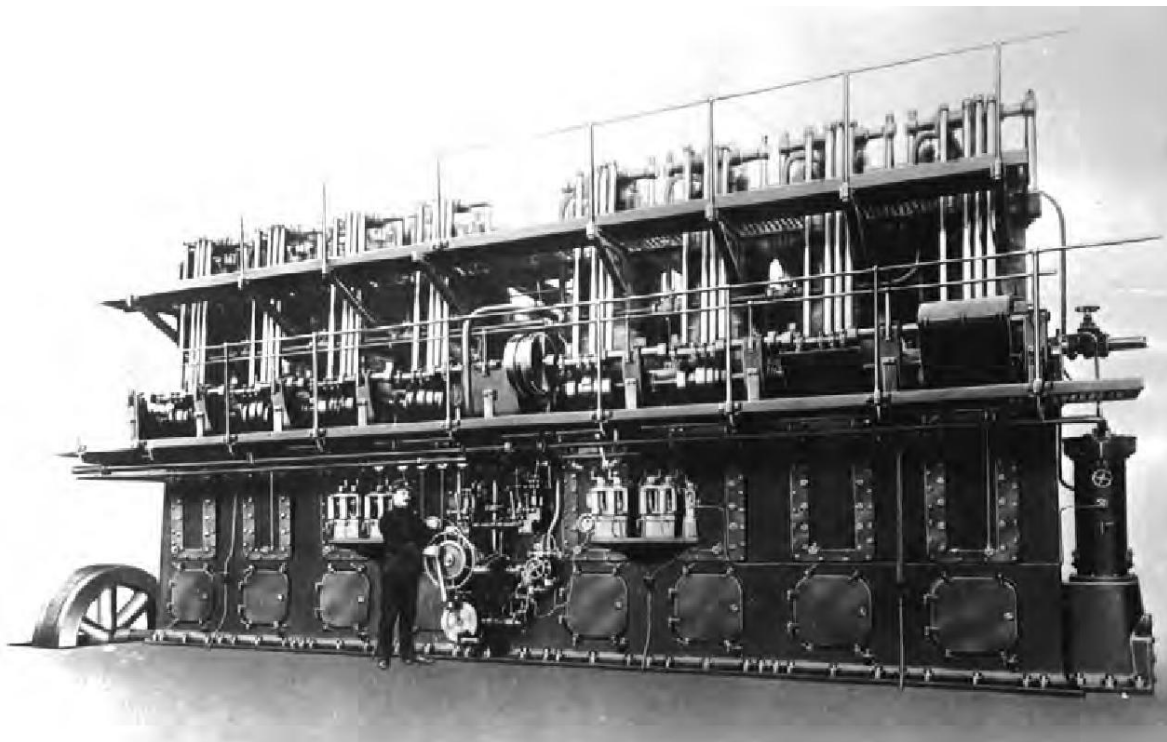
## 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η βιβλιογραφική επισκόπηση των τεχνολογιών χρήσης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) στα συστήματα πρόωσης των σύγχρονων εμπορικών πλοίων (κυρίως των LNG carriers), καθώς και της ασφαλούς του αποθήκευσης, διαχείρισης και μεταφοράς.

Στόχος είναι η δημιουργία ενός χρήσιμου εγχειριδίου για το μηχανικό που ενδιαφέρεται για το συγκεκριμένο θέμα, αποκτώντας έτσι τις απαραίτητες θεωρητικές γνώσεις και το υπόβαθρο, έτσι ώστε να μπορεί να ασχοληθεί μεταγενέστερα με το συγκεκριμένο αντικείμενο, σε πιο πρακτικά θέματα. Επιπρόσθετα, θα γίνει και μια σύγκριση των τεχνολογιών που βρέθηκαν, σχετικά με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που διαθέτουν, και με τελικό στόχο την πρόταση βέλτιστων λύσεων για τα σύγχρονα πλοία.

## 1.2 ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Εδώ και έναν περίπου αιώνα, η μηχανή Diesel κυριαρχεί απόλυτα στις αγορές μηχανών πρόωσης εμπορικών πλοίων, μετά την λειτουργία του “Selandia”, του πρώτου παγκοσμίως υπερωκεάνιου μηχανοκίνητου πλοίου. Ο ατμοστροβίλος έχει εκτοπιστεί προ πολλού από τις αργόστροφες και μεσόστροφες μηχανές που χρησιμοποιούνται ευρέως σε πλοία τύπου container, bulk carrier, VLCCs & cruise liners. Ακόμα και στα **LNG carrier**, που εξακολουθούν να χρησιμοποιούν μηχανές πρόωσης ατμοστροβίλων, έχουν κάνει την εμφάνισή τους οι **μηχανές διπλού-καυσίμου**, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί να καίνε το αέριο καύσιμο εξίσου καλά με τις συμβατικές αργόστροφες μηχανές Diesel.

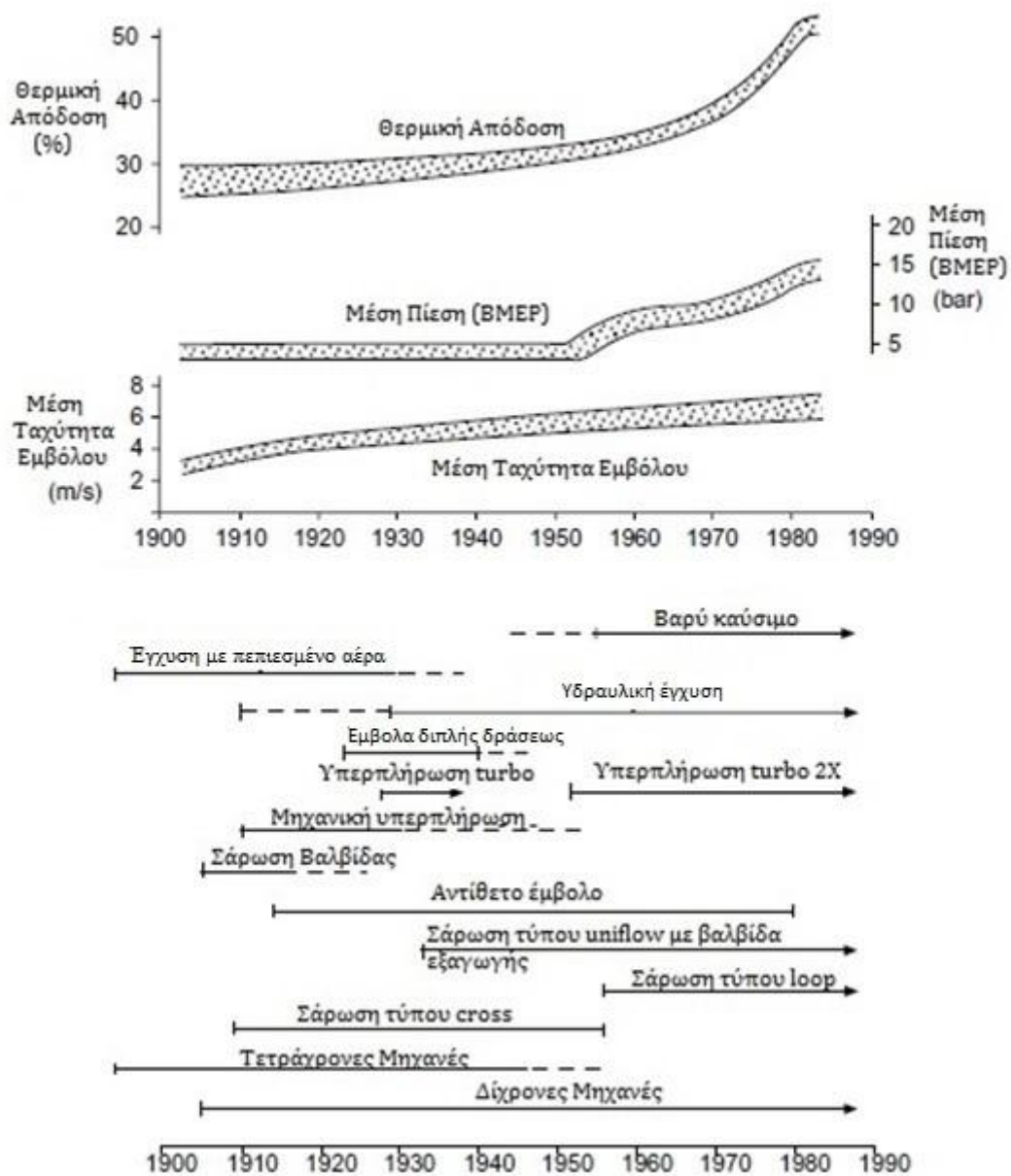


Σχήμα 1.2: Ένας από τους δύο κινητήρες Burmeister & Wain DM8150X που τέθηκαν σε λειτουργία το 1912 για το πρώτο Selandia (MAN B&W Diesel) [4].

Το 1987, με την μετατροπή ατμού-πετρελαίου του υψηλού κύρους κρουαζιερόπλοιου “Queen Elizabeth 2”, συμβολίστηκε η μεγάλη άνοδος της μηχανής Diesel, εκτοπίζοντας έτσι τις παλινδρομικές ατμομηχανές και τις εγκαταστάσεις ατμοστροβίλων. Έγιναν σημαντικές αλλαγές στους χώρους ατμοστροβίλων & λεβητών για να μπορέσει να τοποθετηθεί μια πετρέλαιο-ηλεκτρική εγκατάσταση ισχύος 95.600kW.

Ένα έτος μετά το Selandia, το πλοίο “Monte Penedo” της ναυτιλιακής εταιρίας Hamburg-South Amerika Line τέθηκε σε λειτουργία ως το πρώτο μεγάλο υπερωκεάνιο πλοίο έχοντας για μηχανές πρόωσης, δίχρονης πετρελαιομηχανές της κατασκευαστικής εταιρίας Sulzer.

Η υιοθέτηση του δίχρονου κύκλου από την Sulzer το 1905, αύξησε σημαντικά την ισχύ και την απλότητα των ναυτικών μηχανών. Με τις θυρίδες που προτάθηκαν από την Sulzer το 1910, αφαιρέθηκαν οι βαλβίδες στο πώμα του κυλίνδρου, έχοντας ως συνέπεια τη δημιουργία ενός απλού και χωρίς βαλβίδες συγκροτήματος μηχανής που χαρακτήριζε την εταιρία Sulzer για 70 χρόνια. Η αλλαγή στη σάρωση ήρθε με τη σειρά μηχανών RTA το 1982, λόγω του μακρύ εμβολισμού που είχαν. Οι βαλβίδες εξαγωγής τοποθετήθηκαν λόγω της υψηλότερης απόδοσης που απέδιδαν στη προπέλα στις χαμηλές ταχύτητες. Τα πλοία έγιναν μεγαλύτερα και γρηγορότερα με την υιοθέτηση του δίχρονου κύκλου καθώς και με τη χρήση μεγαλύτερων διαμέτρων και αριθμών κυλίνδρων [4].



Σχήμα 1.3: Διαχρονική εξέλιξη των μεγάλων και βραδύστροφων μηχανών [4].

## **Άμεση έγχυση – Direct Injection**

Κατά τα τέλη του 1920, οι περισσότεροι κατασκευαστές συμπέραναν ότι η έγχυση με πεπιεσμένο αέρα (blast injection), η οποία χρειαζόταν μεγάλους και περίπλοκους συμπιεστές υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης, έπρεπε να αντικατασταθεί από τον τύπο έγχυσης χωρίς συμπιεστή. Εξάλλου, ο ίδιος ο Rudolf Diesel δεν ήταν ικανοποιημένος από την ιδέα αυτή, και για το λόγο αυτό έφτιαξε τη πατέντα το 1905 με την αντλία υψηλής πίεσης σε συνεργασία με το ακροφύσιο. Ο McKechnie το 1915 κατασκεύασε και δοκίμασε μια μηχανή Diesel με άμεση έγχυση (direct injection) και 8 χρόνια αργότερα η βιομηχανία ήταν ικανή να κατασκευάζει αξιόπιστες αντλίες υψηλών πιέσεων [4].

## **Η χρήση της στροβιλοϋπερπλήρωσης – Turbocharging**

Μια μεγάλη ενίσχυση στην ισχύ εξόδου των μηχανών καθώς και στη μείωση μεγέθους και βάρους, επιτεύχθηκε με την υιοθέτηση των συστημάτων στροβιλοϋπερπλήρωσης (turbochargers). Για την επίτευξη της επαρκούς παροχής αέρα μέσω της σάρωσης, οι περισσότεροι κατασκευαστές μηχανών, κατά τις δεκαετίες 1920s & 1930s χρησιμοποίησαν διάφορες μεθόδους παροχής υπό πίεση. Ωστόσο ο Ελβετός μηχανικός Alfred Büchi (ο εφευρέτης της υπερπλήρωσης μέσω καυσαερίων) αφού απέκτησε τη πατέντα το 1905, ξεκίνησε τα πειράματα υπερπλήρωσης στους αδερφούς Sulzer τις χρονιές 1911/1915. Για να μπορέσει να εφαρμοστεί αυτός ο τύπος υπερπλήρωσης σε μεγάλες δίχρονες ναυτικές μηχανές, έπρεπε να περάσουν σχεδόν 50 χρόνια.

Μια πιο πρόσφατη συνεισφορά των συστημάτων υπερπλήρωσης, με βαθμό απόδοσης που φτάνει πλέον το 70%, είναι μέσω της διοχέτευσης καυσαερίων σε έναν στρόβιλο ανάκτησης ισχύος, ο οποίος θα χρησιμοποιείται για τη πλήρωση της κύριας μηχανής ή για τη περιστροφή μίας γεννήτριας. Για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των δίχρονων και μεγάλων τετράχρονων μηχανών, μια μεγάλη ποικιλία αεριοστροβίλων ισχύος είναι πλέον διαθέσιμη, έτσι ώστε να επιτευχθεί αύξηση της ισχύος αλλά και μείωση της κατανάλωσης καυσίμου [4].

## **Βαρέα καύσιμα & περιβαλλοντικές πιέσεις**

Ένα άλλο σημαντικό βήμα για την ενίσχυση των μηχανών Diesel στα ναυτικά συστήματα πρόωσης ήταν η έρευνα & ανάπτυξη (R&D), μέσω της οποίας τους δόθηκε η δυνατότητα να καίνε φθηνά και βαρύτερα πετρελαϊκά καύσιμα. Κατά τη δεκαετία του '50, τα λιπαντικά εξελίχθηκαν, έχοντας έτσι τη δυνατότητα να εξουδετερώνουν τα όξινα προϊόντα της καύσης και κατά συνέπεια να μειώνουν τα επίπεδα φθοράς της καύσης πετρελαίου. Πλέον, όλες οι αργόστροφες δίχρονες, καθώς και οι μεσόστροφες τετράχρονες πετρελαιομηχανές, λειτουργούν με χαμηλής ποιότητας καύσιμα έως και 700 cSt/50°C ιξώδες. Καταληκτικά, μέσω της υποβάθμισης της ποιότητας του καυσίμου, οι σχεδιαστές των πετρελαιομηχανών σε συνεργασία με τους τεχνολόγους λιπαντικών και καυσίμων κατάφεραν με επιτυχία να κατασκευάσουν μηχανές ικανές να καλύψουν τις ανάγκες της αγοράς.

Μια άλλη δοκιμασία για τους κατασκευαστές μηχανών, είναι η μείωση των αέριων ρύπων. Για την μείωση των NOx, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καθυστέρηση έγχυσης καυσίμου, άμεση έγχυση νερού, γαλακτοποίηση του καυσίμου, καθώς και υγροποίηση του αέρα εισαγωγής. Στο μέλλον, με τα αυστηρότητα μέτρα μείωσης, πολύ πιθανόν είναι να χρησιμοποιηθούν καταλύτες επιλεκτικής αναγωγής (SCR). Τα συστήματα έγχυσης κοινού συλλέκτη (CR) βοήθησαν στη μείωση του καπνού, ωστόσο τα επίπεδα θορύβου παραμένουν μια δοκιμασία. Τέλος, οι περιβαλλοντικές πιέσεις έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των **μηχανών διπλού-καυσίμου**, οι οποίες εφαρμόζονται πλέον σε σκάφη υποστήριξης, φέριμποτ και **δεξαμενόπλοια LNG** [4].

### **Το μέλλον των ναυτικών μηχανών**

Οι κατασκευαστές μηχανών έχουν ως στόχο την περαιτέρω μείωση κατανάλωσης του καυσίμου, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσω χαμηλότερων ταχυτήτων περιστροφής, υψηλότερων μέγιστων πιέσεων καύσης και αποδοτικότερων συστημάτων υπερπλήρωσης. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης των μηχανών έχει περάσει το 54% και η ειδική κατανάλωση καυσίμου μπορεί να μειωθεί στα 155g/kWh. Ταυτόχρονα, μειώνοντας τις μέγιστες στροφές των μηχανών στις 55 rev/min, προκύπτει και η αύξηση του βαθμού απόδοσης της προπέλας.

Η αντικατάσταση των μηχανών Diesel με εναλλακτικές μηχανές πρόωσης είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Ωστόσο, εάν η αγορά στραφεί σε καθαρότερα καύσιμα (υγρά ή αέρια) μπορεί να δοθεί η ευκαιρία στις μηχανές αερίων και τις στροβιλομηχανές. Οι πρωτοπόροι των ναυτικών μηχανών MAN Diesel και Sulzer (πλέον Wärtsilä Corporation), έχοντας πολυετή εμπειρία στη ναυτική βιομηχανία και σε συνεργασία με άλλους μεγάλους σχεδιαστές, σκοπεύουν να διατηρήσουν τη πρωτιά στον ανταγωνισμό, έχοντας την υποστήριξη ειδικών στα συστήματα υπερπλήρωσης, λιπαντικών, καυσίμων, αυτοματισμών, συστημάτων διάγνωσης και ελέγχου καθώς και προγραμμάτων διαχείρισης συντηρήσεων και ανταλλακτικών.

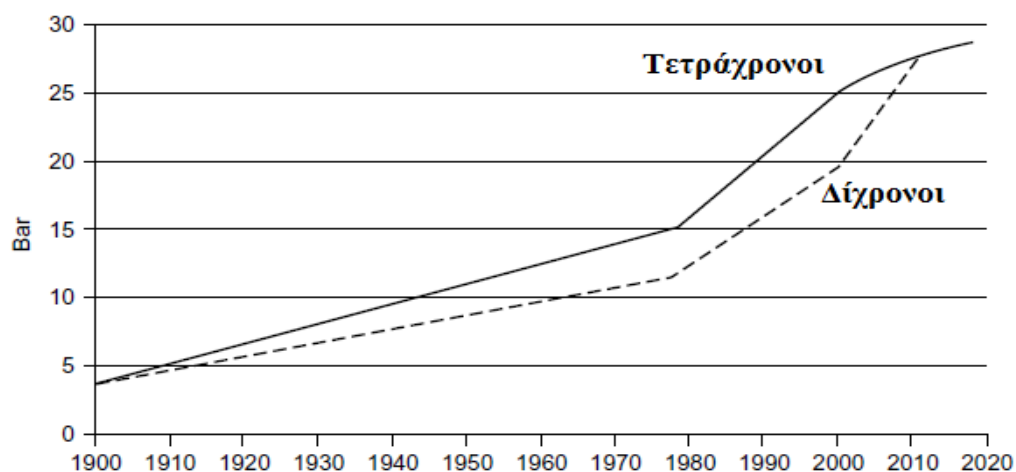
Οι αργόστροφες μηχανές με ηλεκτρονικά ελεγχόμενη έγχυση και ηλεκτρονικά ελεγχόμενα συστήματα ενεργοποίησης βαλβίδων εξαγωγής, κάνουν το ντεμπούτο τους, ανοίγοντας έτσι το δρόμο για τις “Εξυπνες Μηχανές” του μέλλοντος. Πρόκειται για τις μηχανές που θα μπορούν ελέγξουν και να ρυθμίσουν τις παραμέτρους λειτουργίας τους, ανάλογα με την εκάστοτε ζήτηση και έχοντας ως στόχο τη βέλτιστη απόδοση. Ωστόσο μερικοί κατασκευαστές εξακολουθούν να προτιμούν τα παραδοσιακά συστήματα ελέγχου μέσω εκκεντροφόρου άξονα.

Εξακολουθούν να υπάρχουν προοπτικές για περαιτέρω αύξηση της ισχύος & απόδοσης των μηχανών Diesel, με ιδέες όπως η έγχυση ατμού και ο συνδυασμένος κύκλος Diesel & Rankine, έχοντας ως στόχο την αύξηση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης στο 60%. Ο συνδυασμένος κύκλος Diesel χρειάζεται μια δραστική αλλαγή στην εξισορρόπηση της θερμότητας, κάτι το οποίο μπορεί να επηρεαστεί μέσω της διαδικασίας της “Θερμής Καύσης”. Η ψύξη στο άνω μέρος του εμβόλου καθώς και στη κυλινδροκεφαλή πρέπει να μηδενιστεί.

Η ψύξη των χιτωνίων να περιοριστεί, έχοντας έτσι ως συνέπεια τη διοχέτευση των απωλειών ψύξης στα καυσαέρια, τα οποία θα παρέχουν την απαιτούμενη θερμότητα για να τροφοδοτήσουν έναν λέβητα, ο οποίος εν σειρά θα τροφοδοτεί με ατμό υψηλής πίεσης έναν αμοστροβίλο [4].



Σχήμα 1.4: Ο ισχυρότερος ναυτικός κινητήρας Diesel με ισχύ 84.420kW, ο 14κύλινδρος, δίχρονος και αργόστροφος Wärtsilä RT-flex96C (Hyundai Heavy Industries) [4].



Σχήμα 1.5: Διαχρονική αύξηση της μέσης ενεργού πίεσης (MEP) των τετράχρονων & δίχρονων πετρελαιομηχανών (Wärtsilä Corporation) [4].





## 2 ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΝΑΥΤΙΚΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΜΗΧΑΝΕΣ

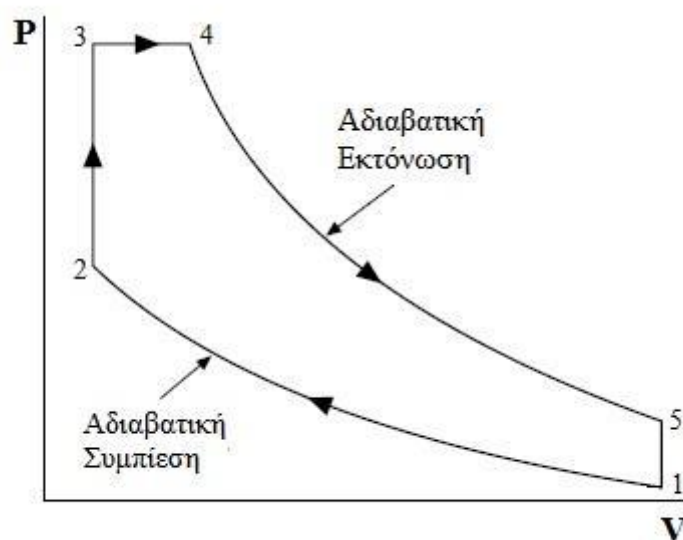
Οι απαιτήσεις για την πρόωση εμπορικών πλοίων γενικά ικανοποιούνται με μια απλή βραδύστροφη μηχανή Diesel. Οι μηχανές αυτές είναι ικανές να κάψουν καύσιμα πολύ χειρότερης ποιότητας από μια μεσόστροφη μηχανή, γιατί έχουν περισσότερο χρόνο και χώρο καύσεως για να το κάνουν.

Όλες οι βραδύστροφες μηχανές έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Όλες οι σύγχρονες μηχανές είναι δίχρονες και με υπερπλήρωση. Η υπερπλήρωση εκτός από την αύξηση σε ισχύ βελτιώνει επίσης σημαντικά και την κατανάλωση καυσίμου [5].

### 2.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Με τον όρο Diesel στη σημερινή εποχή, μπορούμε να περιγράψουμε μια παλινδρομική μηχανή, η οποία ενώ έχει “περισυλλέξει” τα ποσά θερμότητας μέσω της συμπίεσης αέρα στους κυλίνδρους, αυταναφλέγεται μέσω της έγχυσης καυσίμου. Αυτό σημαίνει ότι ο θεωρητικός κύκλος των σύγχρονων μηχανών Diesel, παρουσιάζεται καλύτερα στο διάγραμμα διπλού ή μεικτού κύκλου. (Σχήμα 2.1)

Ξεκινώντας από το σημείο 1, ο αέρας συμπιέζεται αδιαβατικά έως το σημείο 2, όπου ξεκινάει η έγχυση καυσίμου όπου και προστίθενται ποσά θερμότητας υπό σταθερό όγκο μέχρι το σημείο 3, και στη συνέχεια υπό σταθερή πίεση μέχρι το σημείο 4. Έπειτα έχουμε τη διαδικασία αδιαβατικής εκτόνωσης μέχρι το σημείο 5, όπου ξεκινάει και η διαδικασία της εξαγωγής μέχρι το σημείο 1.

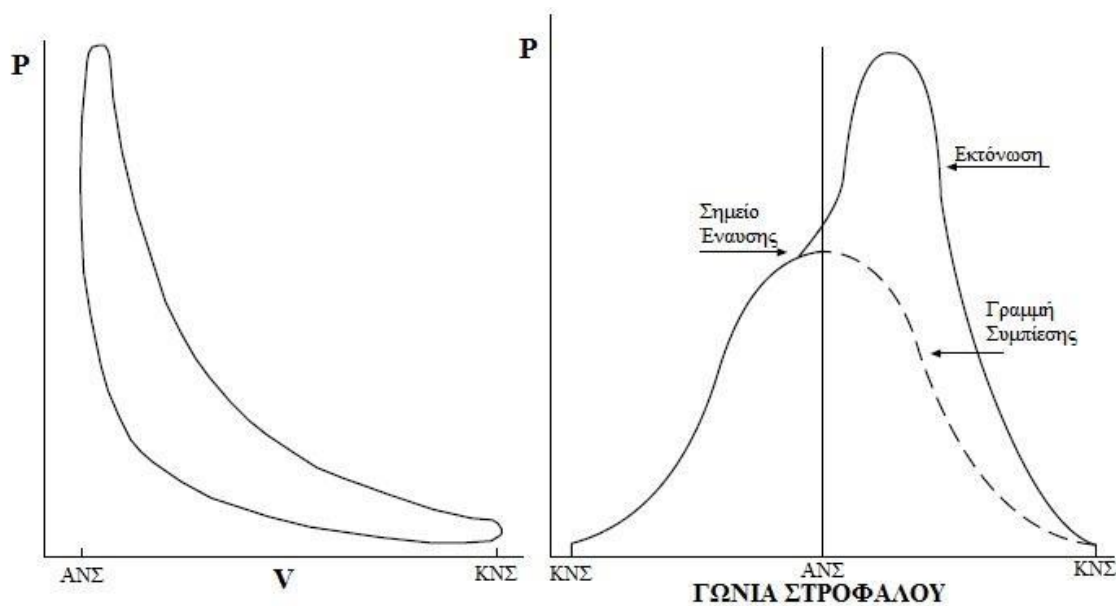


Σχήμα 2.1: Θεωρητικός μεικτός κύκλος μιας πραγματικής μηχανής Diesel [4].

Ο ιδανικός βαθμός απόδοσης αυτού του κύκλου κυμαίνεται στο 55-60%, από όπου περίπου το 40-45% της θερμότητας χάνεται κατά την εξαγωγή. Φυσικά όλα αυτά ισχύουν με τις εξής παραδοχές [4]:

- οι χρόνοι συμπίεσης και εκτόνωσης είναι αδιαβατικοί
- οι τριβές θεωρούνται αμελητέες
- δεν υπάρχουν απώλειες λόγω ψύξης και μετάδοσης θερμότητας προς το περιβάλλον

Όπως είναι γνωστό από τις ΜΕΚ [6], ο θεωρητικός κύκλος Diesel δε συμπίπτει με τον πραγματικό, λόγω των απωλειών. Ο θεωρητικός κύκλος μπορεί να συγκριθεί με τον πραγματικό κύκλο, όπως αυτόν που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2.



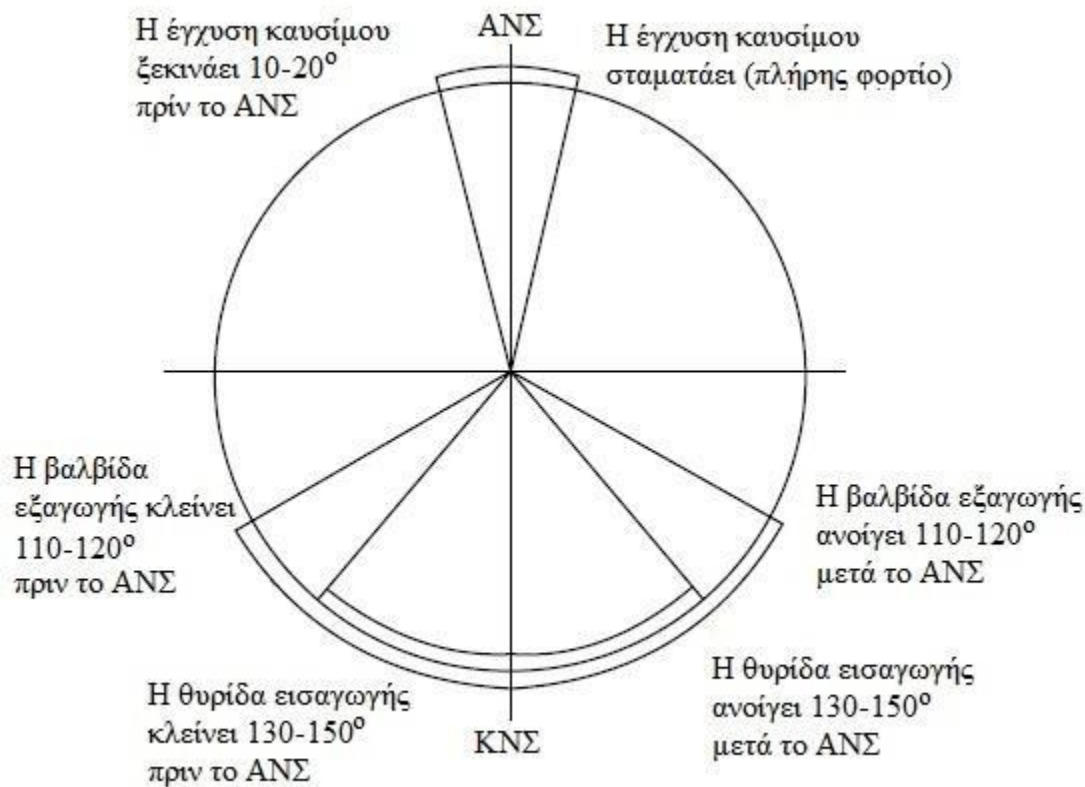
Σχήμα 2.2: Πραγματικό διάγραμμα λειτουργίας δίχρονης μηχανής Diesel [4].

Επισημαίνεται ότι το ενδεικτικό διάγραμμα Πίεσης-Γωνίας Στροφάλου, προκύπτει από το διάγραμμα P-V, και χρησιμεύει στους μηχανικούς κατά τη διαδικασία ρύθμισης του χρονισμού ψεκασμού [4].

### 2.1.1 Ο δίχρονος κύκλος λειτουργίας

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η σειρά των διεργασιών ενός ενδεικτικού 2X κύκλου, ο οποίος και ολοκληρώνεται σε μια πλήρη περιστροφή του στροφάλου (δηλ. 360°). Οι 2X μηχανές συνήθως έχουν θυρίδες εισαγωγής αέρα, οι οποίες και αποκαλύπτονται κατά τη κάθοδο του εμβόλου. Η εξαγωγή γίνεται συνήθως με βαλβίδα εξαγωγής στο άνω μέρος του εμβόλου, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ευθύγραμμης απόπλυσης ή αλλιώς σάρωσης (uniflow scavenging).

Ξεκινώντας στο ΑΝΣ, έχει ήδη ξεκινήσει η καύση και η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει  $110-120^\circ$  μετά το ΑΝΣ για να προωθήσει έτσι μια γρήγορη εκτόνωση πριν ανοίξει η θυρίδα εισαγωγής, περίπου  $20-30^\circ$  αργότερα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ελάχιστη ανάμειξη καυσαερίων και αέρα εισαγωγής, κάτι που γίνεται λόγω της αδράνειας των καυσαερίων, τα οποία κινούνται σχεδόν με τη ταχύτητα του ήχου και απομακρύνονται από τον αέρα εισαγωγής του επόμενου κύκλου.



Σχήμα 2.3: Σπειροειδές διάγραμμα λειτουργίας 2X μηχανής Diesel [4].

Για να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος συμπίεσης του κύκλου, η βαλβίδα εξαγωγής πρέπει να κλείσει πριν εμφανισθεί η θυρίδα εισαγωγής, αλλά κάτι τέτοιο μπορεί και να ελεγχθεί και μέσω της γεωμετρίας της μηχανής και κυρίως του εμβόλου (π.χ. μηχανή αντίθετου εμβόλου).

Οι θυρίδες εισαγωγής θα κλείσουν στις ίδιες μοίρες στροφάλου από όσες άνοιξαν μετά το ΑΝΣ, λόγω γεωμετρίας (δηλαδή  $130-150^\circ$  πριν το ΑΝΣ) και η βαλβίδα εξαγωγής το ίδιο.

Η διαδικασία της έγχυσης καυσίμου ξεκινάει περίπου  $10-20^\circ$  πριν το ΑΝΣ, ανάλογα με την ταχύτητα και η καύση διαρκεί  $30-50^\circ$ , όπως και στις 4X μηχανές [4].

## Ενδεικνύμενοι και ωφέλιμοι παράμετροι απόδοσης

Για τους παρακάτω υπολογισμούς θα πρέπει να επιλέξουμε τον τρόπο μέτρησης, κάτι που είναι σημαντικό για τη τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στις αργόστροφες μηχανές συνήθως οι μετρήσεις λαμβάνονται από τους κυλίνδρους μέσω ενδείξεων από ειδικά ηλεκτρονικά αισθητήρια συστήματα. Αυτό οδηγεί σε υπολογισμούς ενδεικνύμενων τιμών και συμβολίζονται με δείκτη 'i' (από το indicated).

Εάν πάρουμε μετρήσεις από τον στρόφαλο μέσω πέδης (δυναμόμετρο), θα έχουμε ωφέλιμους (ή πραγματικούς) υπολογισμούς και συμβολίζονται με δείκτη 'e' ή 'b' (από brake = πέδη). Στις συγκεκριμένες μετρήσεις θα συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες τριβών, κινηματικού μηχανισμού και βοηθητικών συστημάτων της μηχανής.

Ορισμένοι κατασκευαστές συμπεριλαμβάνουν τις παραπάνω απώλειες στην ισχύ εξόδου [4].

### 2.1.2 Έργο, ισχύς & ροπή

Εάν μετρήσουμε την πίεση στον κύκλο λειτουργίας μίας ΜΕΚ (σε κάποιες συνθήκες λειτουργίας, στροφές – φορτίο), και πάρουμε το πραγματικό δυναμοδεικτικό διάγραμμα όπως το διάγραμμα p-V (Σχήμα 2.2), θα προκύψει το έργο του κύκλου επιλύοντας το παρακάτω ολοκλήρωμα [6]:

$$W = \int p \, dV \quad (2.1)$$

Η ισχύς είναι το έργο στη μονάδα του χρόνου. Οπότε προκύπτει η σχέση [6]:

$$P = W * n \quad (2.2)$$

Η ισχύς συνδέεται με τη ροπή από τη βασική σχέση [6]:

$$P = \omega * T = 2\pi n * T \quad (2.3)$$

### 2.1.3 Μέση ενεργός πίεση κύκλου

Η μέση ενεργός πίεση – MEP (Mean Effective Pressure), υπολογίζεται από την σχέση [6]:

$$MEP = \frac{W}{V_h} = \frac{P}{V_h * n} \quad (2.4)$$

### 2.1.4 Ειδική κατανάλωση καυσίμου

Η ειδική κατανάλωση εκφράζει τον λόγο της κατανάλωσης καυσίμου ως προς την αποδιδόμενη ισχύ. Με άλλα λόγια εκφράζει το λόγο της μάζας καυσίμου που απαιτείται ανά μονάδα αποδιδόμενου έργου [6]. Δηλαδή:

$$b_{eff} = 3600 * \frac{\dot{m}_{fuel}}{P} \quad (2.5)$$

### 2.1.5 Μέση ταχύτητα εμβόλου

Με αυτή τη παράμετρο διακρίνονται οι μηχανές ανάλογα την ταχύτητα των στροφών λειτουργίας, όπου οι αργόστροφες κυμαίνονται στα 8,5 m/s. Η μέση ταχύτητα εμβόλου – MPS (Mean Piston Speed), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$MPS = 2 * H * n \quad (2.6)$$

### 2.1.6 Βαθμός απόδοσης

Για να ταξιδέψει ένα πλοίο σε προκαθορισμένη ταχύτητα, θα πρέπει ο μηχανικός να καταφέρει να “συλλέξει” το επιθυμητό έργο εξόδου από τη λειτουργία της μηχανής. Επίσης θα πρέπει να έχει υπολογίσει τις απώλειες λόγω τριβών καθώς και τις απώλειες ως προς τα βοηθητικά συστήματα της μηχανής. Φυσικά το ίδιο ισχύει και για τις θερμικές απώλειες, αν και στις σύγχρονες μηχανές περίπου το 25% των θερμικών απωλειών στα καυσαέρια χρησιμοποιείται για τη λειτουργία ενός στροβιλοϋπερπληρωτή. Επίσης σε πολλές εφαρμογές αυτή η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη παραγωγή ατμού, και η χαμηλότερη θερμική ενέργεια για άλλες βοηθητικές χρήσεις του πλοίου.

Ο σκοπός του μηχανικού είναι να ρυθμίσει κατάλληλα την έγχυση καυσίμου, την εισαγωγή του αέρα, καθώς και τις θερμοκρασίες ψύξης, έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη εξοικονόμηση καυσίμου σε σχέση με το παραγόμενο έργο της μηχανής [4].

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης της μηχανής, δίνεται από τη σχέση [6]:

$$\eta_{th} = \frac{3600 * P}{\dot{m}_{fuel} * LHV} \quad (2.7)$$

Στην παρούσα εργασία επειδή θα ασχοληθούμε μόνο με το μέρος της μηχανής, η απόδοση θεωρούμε ότι μετριέται στον στρόφαλο της μηχανής από έναν μετρητή ροπής. Σε πραγματικές συνθήκες θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος πρόωσης (κιβώτιο ταχυτήτων, ελικοφόρος, προπέλα, γεωμετρία, καιρικές συνθήκες κλπ).

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_{mec} = \frac{P_b}{P_i} \quad (2.8)$$

Από δοκιμές, έχει αποδειχθεί ότι οι απώλειες τριβών δεν επηρεάζουν σημαντικά την ροπή εξόδου της μηχανής και μειώνονται όσο αυξάνονται οι ταχύτητες. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν επιθυμούμε να λειτουργεί μια μηχανή με το 30% της μέγιστης ροπής για παρατεταμένα διαστήματα [4].

### 2.1.7 Κραδασμοί - ταλαντώσεις

Οι κραδασμοί που προέρχονται από τις γραμμικές (linear) και τις περιστροφικές-στρεπτικές (torsional) ταλαντώσεις, μπορούν να προκαλέσουν πολλά προβλήματα. Συγκεκριμένα, οι στρεπτικές είναι και οι πιο επιβλαβείς για τον στροφαλοφόρο και τον ελικοφόρο άξονα. Οι ταλαντώσεις μπορούν να μετρηθούν μέσω συχνοτήτων (frequency) οι οποίες από ένα βαθμό και πάνω γίνονται αντιληπτές μέσω του “θορύβου” (noise) που προκαλούν.

Οι αστοχίες λόγω κραδασμών έχουν μειωθεί τα τελευταία χρόνια μέσω της δυνατότητας μείωσης των ταλαντώσεων (κατάλληλος σχεδιασμός και σωστή συντήρηση της μηχανής). Ο στροφαλοφόρος άξονας, λόγω της ελαστικής του σύζευξης θα αναπτύξει συχνότητες οι οποίες μετά από ένα πλάτος μπορούν να προκαλέσουν έως και τη θραύση του.

Γενικά μια απλή στρεπτική ταλάντωση μάζας εκφράζεται από τη σχέση [4]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q}{I}} \quad (2.9)$$

Στόχος είναι να ρυθμιστούν οι 2 παράμετροι ( $q/I$ ), έτσι ώστε να επιτευχθεί μια συχνότητα που να μη συμπίπτει με τις συχνότητες διέγερσης (forcing frequencies).

Οι συχνότητες διέγερσης προκαλούνται από της καύση-εκτόνωση των κυλίνδρων της μηχανής και η μελέτη τους είναι μια περίπλοκη διαδικασία. Στις μέρες μας, οι κατασκευαστές είναι σε θέση να ρυθμίσουν τις συχνότητες των ταλαντώσεων μέσω της γεωμετρίας-μεγέθους του στροφαλοφόρου άξονα, αριθμό πτερυγίων προπέλας, αντίβαρων στροφάλου (κιθάρες), σειρά έναυσης κυλίνδρων, καθώς και χρήση αποσβεστήρων κραδασμών (βάσεις). Ωστόσο, ο μηχανικός θα πρέπει να έχει υπόψιν ότι ο κατασκευαστής έχει σχεδιάσει τη μηχανή με βάση την ισορροπία των κυλίνδρων, κάτι το οποίο δε θα ισχύει εάν για οποιονδήποτε λόγο τεθεί ένας κύλινδρος εκτός λειτουργίας ή δεν λειτουργεί σωστά (λανθασμένος χρονισμός).

Οι ταχύτητες λειτουργίας όπου δημιουργούνται κραδασμοί, ονομάζονται κρίσιμες ταχύτητες (critical speeds). Συνήθως, οι κραδασμοί αυτοί γίνονται αντιληπτοί από τον “τραχύ” (rough) ήχο λειτουργίας της μηχανής. Αυτό συμβαίνει διότι, κατά τη μέση διαδρομή εμβόλου (mid-stroke), οι στρεπτικές ταλαντώσεις των στροφάλων με το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης, προκαλούν διαμήκεις κραδασμούς στους διωστήρες της μηχανής. Αυτό με τη σειρά του προκαλεί και πλευρικούς κραδασμούς στα έμβολα.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω προβλήματος, εάν διαγνωστεί ότι η μηχανή λειτουργεί σε κρίσιμες στρεπτικές ταχύτητες, θα πρέπει να μεταβληθεί η λειτουργία της σε διαφορετικές και πιο “ήσυχες” ταχύτητες, έως ότου γίνει μια περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος. Δυστυχώς, ο “τραχύς” ήχος λειτουργίας δεν επαρκεί πάντα ως μέτρο προειδοποίησης.

Πολλές φορές είναι δύσκολο ή και απίθανο να ελεγχθούν όλες οι πιθανές κρίσιμες ταχύτητες λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, στις μηχανές πρόωσης μεταβλητών ταχυτήτων, απαιτείται η βαθμονόμηση ορίων ταχυτήτων, όπου οι κραδασμοί κρίνονται επικίνδυνοι για παρατεταμένη λειτουργία [4].

## **ΖΥΓΟΣΤΑΘΜΙΣΗ**

Η ζυγοστάθμιση μιας παλινδρομικής μηχανής, είναι μια μέθοδος ελέγχου των κραδασμών. Συγκεκριμένα, γίνεται ζυγοστάθμιση των αδρανειακών δυνάμεων & ροπών 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης, η οποία περιγράφεται και αναλυτικά στις Σύγχρονες Τεχνολογίες Μ.Ε.Κ. [7] για διάφορους τύπους μηχανών.

Για να μη ξεφύγουμε από τον σκοπό της παρούσας εργασίας, θα γίνει μόνο μια συνοπτική περιγραφή των τρόπων ζυγοστάθμισης των δίχρονων ναυτικών πετρελαιομηχανών.

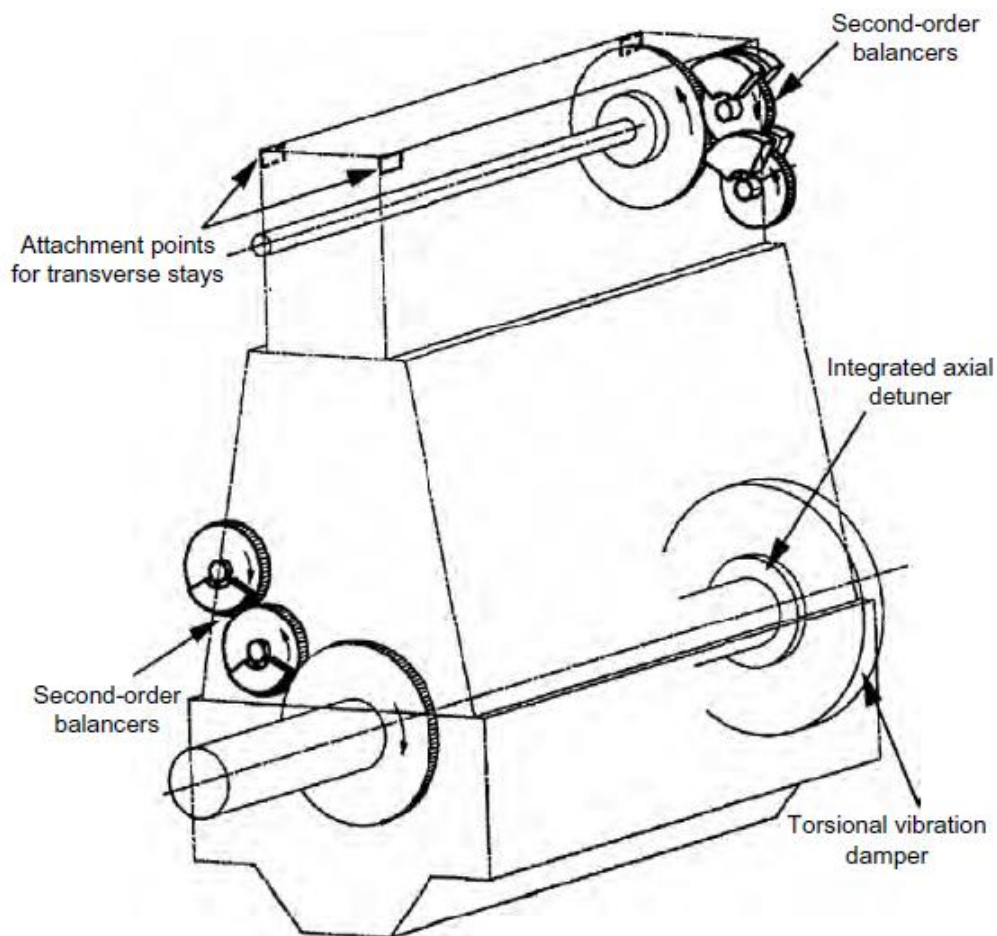
Τα είδη των ταλαντώσεων που επηρεάζουν κυρίως τις μηχανές αυτές είναι οι [4]:

- Αξονικές ταλαντώσεις (axial vibrations)
- Στρεπτικές ταλαντώσεις (torsional vibrations)

Γενικότερα, στις ναυτικές μηχανές οι κραδασμοί μπορούν να μειωθούν με την αύξηση του αριθμού των κυλίνδρων. Για παράδειγμα, οι μηχανές 4-6 κυλίνδρων χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά το θέμα των ταλαντώσεων και της ζυγοστάθμισης. Συνήθως, από τους 8 κυλίνδρους και άνω μειώνονται οι απαιτήσεις ζυγοστάθμισης. Ανάλογα λοιπόν με τις μετρήσεις και δοκιμές, οι κατασκευαστές είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τους κραδασμούς χρησιμοποιώντας κάποιες τεχνικές ζυγοστάθμισης. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι, τα υλικά και η γεωμετρία του στροφαλοφόρου άξονα επιλέγονται από TVC (Torsional Vibration Calculation), έτσι ώστε να μειωθεί η πιθανότητα τυχόν αστοχίας.

Η ζυγοστάθμιση των ναυτικών μηχανών μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους [4]:

- Ρυθμιζόμενα αντίβαρα (adjustable counterweights)
- Αντισταθμιστές (compensators)
- Αποσβεστήρες (dampers)
- Εξισορροπητές (balancers)
- Εγκάρσια στηρίγματα (transverse stays)

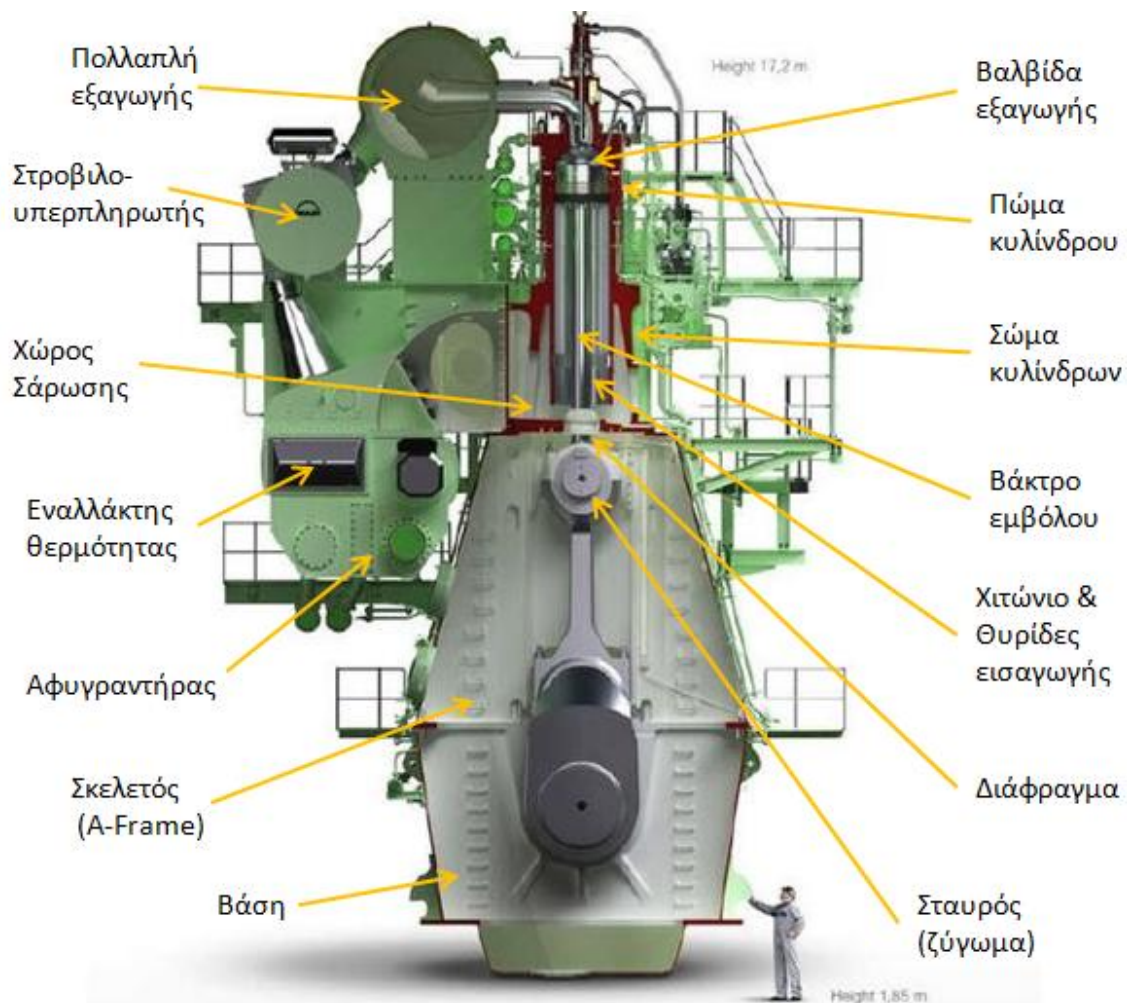


Σχήμα 2.4: Προληπτικά μέτρα ελέγχου και ζυγοστάθμισης των κραδασμών, σε βραδύστροφη μηχανή σειράς RTA της εταιρίας Wärtsilä [4].



## 2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΜΕΡΗ

Η αργόστροφη μηχανή έχει λιγότερους κυλίνδρους και κατά συνέπεια λιγότερα κινούμενα μέρη, κάτι που σημαίνει ότι υπάρχει μικρότερη πιθανότητα να δημιουργηθεί πρόβλημα. Τα εξαρτήματα, το καθένα χωριστά είναι βαρύτερα αλλά ο χειρισμός τους μπορεί να γίνει με την ίδια ευκολία με ειδικά εργαλεία και συσκευές. Επίσης, η εργασία διευκολύνεται με την ύπαρξη χώρου μέσα στη μηχανή και συνήθως στο μηχανοστάσιο. Έτσι, το κόστος συντήρησης αποδεικνύεται συχνά ότι είναι μικρότερο από αυτό των μεσόστροφων μηχανών. Το επίπεδο θορύβου είναι αρκετά μικρότερο από του μεσόστροφου τύπου.

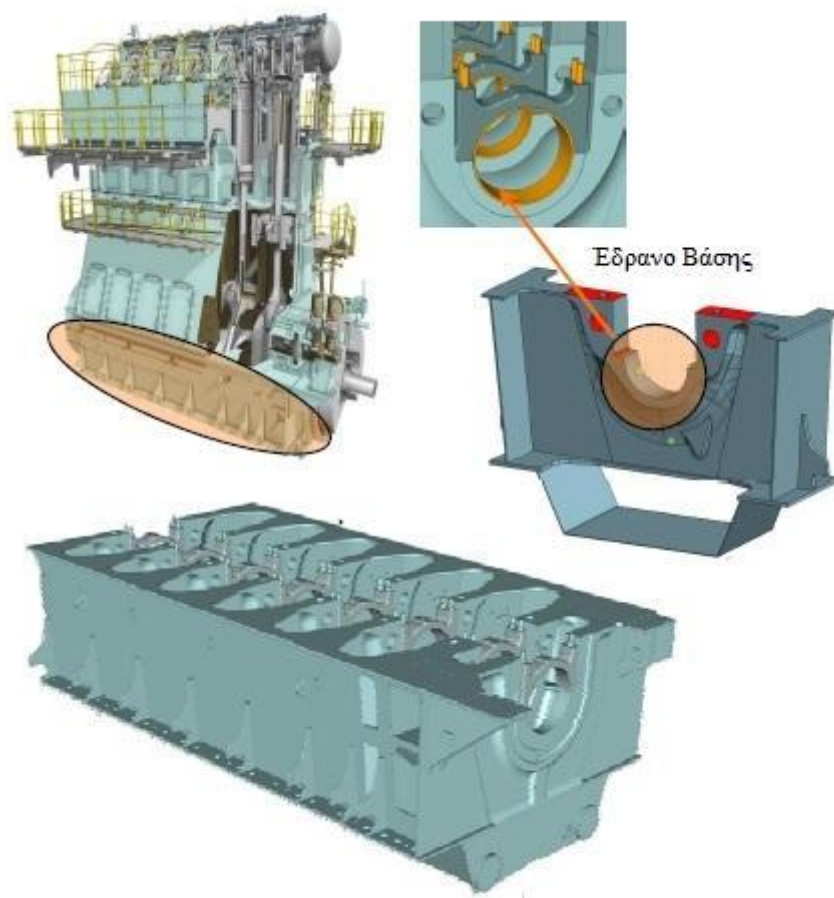


Σχήμα 2.5: Εγκάρσια διατομή βραδύστροφου 2X κινητήρα [8].

Τα μειονεκτήματα των αργόστροφων μηχανών όσον αφορά το χώρο που καταλαμβάνουν, το μεγαλύτερο βάρος και την τιμή τους, χάνουν αρκετά εάν εξεταστεί ολόκληρη η εγκατάσταση πρόωσης και όχι μόνο η απομονωμένη μηχανή [5].

### 2.2.1 Η βάση της μηχανής

Η βάση του κινητήρα (bedplate) στηρίζει τον κινητήρα και εξασφαλίζει την ευθυγράμμιση του άξονα. Για τη βάση χρειάζεται μια ισχυρή, άκαμπτη αλλά και ελαφριά κατασκευή, η οποία επιτυγχάνεται με συγκόλληση ελασμάτων ώστε να σχηματιστούν κιβωτιοειδείς δοκοί που συνδέονται με μια σειρά εγκάρσιων κιβωτιοειδών δοκών. Οι εγκάρσιες δοκοί φέρουν και το κάτω ήμισυ των εδράνων βάσεων της μηχανής. Τα έδρανα πρέπει να αντέχουν στα φορτία που μεταφέρονται μέσω του κινηματικού μηχανισμού εμβόλου-βάκτρου-διωστήρα-στροφάλου της μηχανής, τα οποία είναι και μεταβαλλόμενης εντάσεως στη διάρκεια ενός κύκλου της μηχανής και επίσης αυξάνονται όσο αυξάνει η μέγιστη & μέση πίεση των κινητήρων.



Σχήμα 2.6: Η βάση και τα έδρανα μιας δίχρονης μηχανής Diesel [8].

Τα άνω και κάτω ελάσματα των διαμήκων δοκών είναι παχύτερα, ώστε να επιτρέπουν επί τόπου κατεργασία και λείανση κατά την τελική κατασκευή της βάσης της μηχανής, ώστε να απαλειφθούν τυχόν στρεβλώσεις κατά τη συγκόλληση των δοκών. Η κατεργασία γίνεται σε γιγάντιες φρέζες και πλάνες. Έτσι το άνω τμήμα της βάσης επιτρέπει την ανέγερση των υπόλοιπων τμημάτων της μηχανής, ενώ το κάτω τμήμα της προσφέρει λεία επιφάνεια για

την τοποθέτηση τάκων (chocks) και των σφηνών στηρίξεως κατά την τοποθέτηση της μηχανής στο πλοίο.

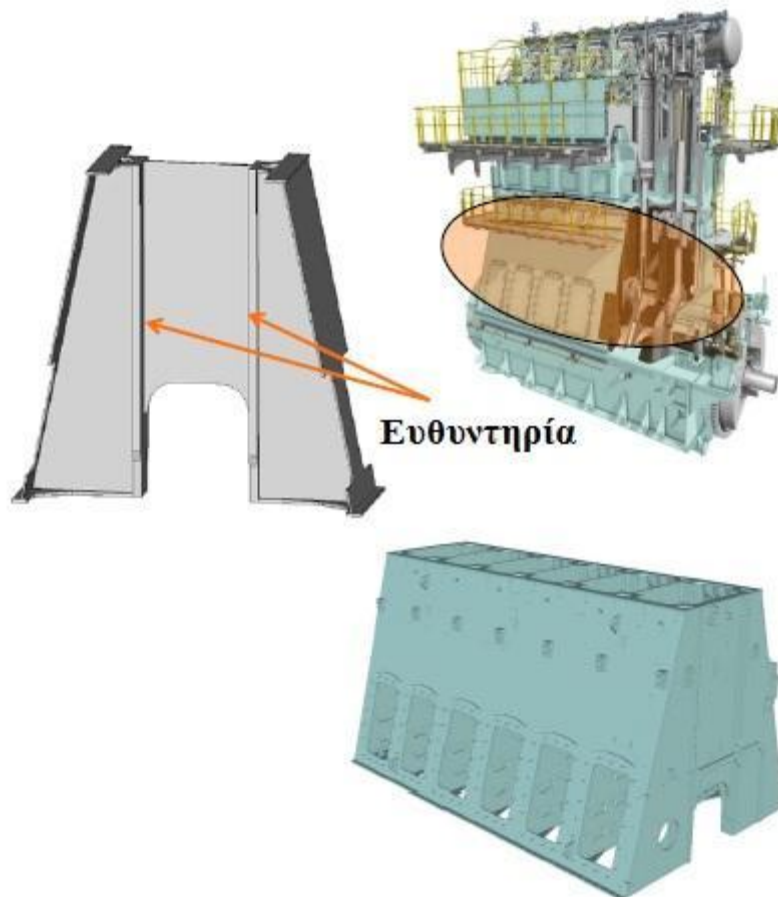
Η προσαρμογή των chocks χρειάζεται μεγάλη εμπειρία και προσοχή, ώστε η τοποθέτηση να γίνει με ακρίβεια και να αποφευχθεί η σχετική μετακίνηση των δύο εφαπτόμενων τμημάτων. Μια τέτοια μικρή κίνηση δύο τμημάτων που εφαπτονται υπό φορτίο μπορεί να προκαλέσει επιφανειακή μικροσκοπική εκτριβή του υλικού (fretting) η οποία επεκτείνεται σταδιακά. Για το λόγο αυτό οι τάκοι και οι σφήνες πρέπει κατά τη τοποθέτηση να έχουν μέγιστη δυνατή επιφάνεια επαφής και το ταίριασμά τους να γίνεται με προσοχή, διότι τυχόν μετακίνηση των τμημάτων γρήγορα θα επηρεάσει την ευθυγράμμιση της βάσης της μηχανής. Αυτό θα έχει σαν άμεση συνέπεια την απώλεια ευθυγράμμισης του άξονα, που με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε σωρεία προβλημάτων ξεκινώντας από τα κουζινέτα, μέχρι και τη ρωγμάτωση και θραύση του στροφάλου. Γενικά προτιμάται η χρήση εποξικών chocks ή άλλων σύνθετων ρητινών, λόγω της ευκολίας κατά τη τοποθέτηση, διότι δε χρειάζονται πεπειραμένοι τεχνίτες ούτε λείες επιφάνειες επαφής.

Τέλος, στη βάση είναι ενσωματωμένοι και οι οδηγοί των εντατήρων που συνδέουν τα διάφορα τμήματα του κινητήρα μεταξύ τους. Οι εντατήρες (τιράντες) διαπερνούν καθ' ύψος τον κινητήρα από τη βάση μέχρι το σώμα των κυλίνδρων που περιβάλλει τα χιτώνια και διατηρούν όλα τα τμήματα σε σύνθλιψη. Κατά τη μέγιστη τάση λόγω της πίεσης καύσεως στους κυλίνδρους, οι εντατήρες πρέπει να είναι σχεδιασμένοι ώστε να αντέχουν στην κυκλική φόρτιση της λειτουργίας της μηχανής [5].

### **2.2.2 Ο σκελετός και το σώμα κυλίνδρων**

Ο σκελετός της μηχανής (A-frame) συνδέει το συγκρότημα των κυλίνδρων με τη βάση και αποτελείται από μια σειρά εγκάρσιων πλαισίων (κολώνες ή columns) σχήματος “A” που συνδέονται μεταξύ τους κατά το διαμήκη άξονα εξωτερικά με ελάσματα ώστε να δημιουργείται μια κιβωτιοειδής κατασκευή. Στα διαμήκη ελάσματα τοποθετούνται οι ανθρωποθυρίδες προσπελάσεως και οι βαλβίδες ασφαλείας για έκρηξη στροφαλοθαλάμου. Παρ' όλο που θα ήταν ιδεώδες να κατασκευάζεται το κιβώτιο του σκελετού με χύτευση, αυτό δεν είναι δυνατόν λόγω των μεγάλων διαστάσεων.

Οι εντατήρες διαπερνούν το σκελετό μέσω καθέτων σωλήνων που αποτελούν δομικό στοιχείο γιατί προσδίδουν στρεπτική ακαμψία, κυρίως στις δοκούς συγκρατήσεως της ευθυντηρίας. Η ευθυντηρία (guide rails) είναι μια κατακόρυφη μεταλλική πλάκα, που είτε κατασκευάζεται ενσωματωμένη στο σώμα του σκελετού αν ο κατασκευαστής έχει την κατάλληλη μηχανουργική εγκατάσταση, είτε είναι ξεχωριστό τμήμα που εφαρμόζεται με μια σειρά κοχλίων. Πάνω στη πλάκα γλιστρά το πέδιλο του ζυγώματος (σταυρού), και σκοπός της είναι η παραλαβή των πλάγιων δυνάμεων. Το πλαίσιο του σκελετού συνδέεται προς τα κάτω με τη βάση και προς τα άνω με το σώμα των κυλίνδρων με έναν αριθμό ελαστικών κοχλίων ομοιόμορφα κατανεμημένων, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή παραλαβή τάσεων.



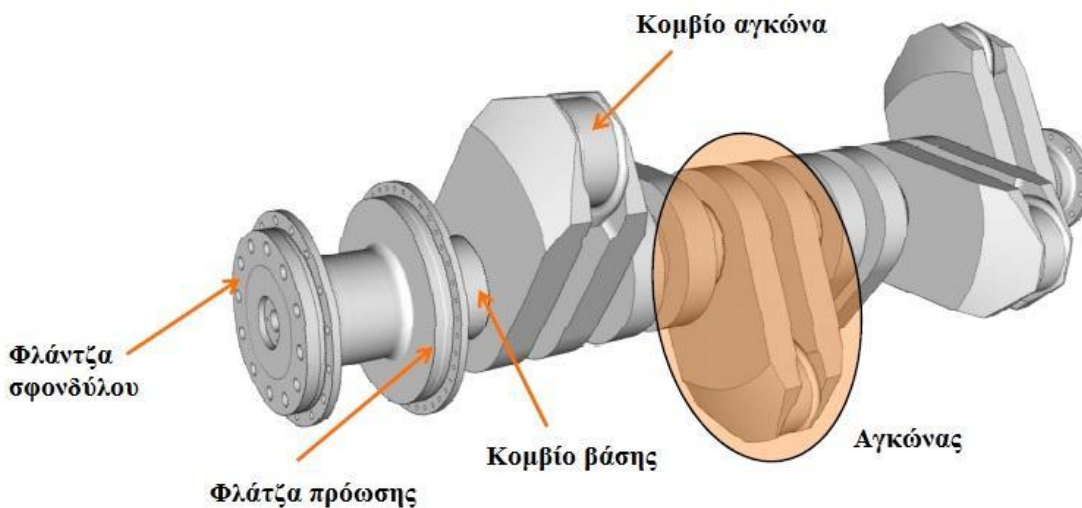
Σχήμα 2.7: Ο σκελετός μιας δίχρονης μηχανής Diesel [8].

Το σώμα των κυλίνδρων (cylinder block) αποτελείται από χυτοσίδηρο ή χαλύβδινο πλαίσιο μέσα στο οποίο τοποθετούνται τα χιτώνια. Κατασκευάζονται τμήματα για ένα, δύο ή και τρεις μαζί κυλίνδρους, ανάλογα με τις δυνατότητες χύτευσης και μηχανουργικής κατεργασίας [5].

### 2.2.3 Στροφαλοφόρος

Στους μεγάλους κινητήρες ο στροφαλοφόρος είναι από τα πιο βαριά και ακριβά εξαρτήματα του κινητήρα (αντιπροσωπεύοντας το 20% του συνολικού βάρους και 10-12% του κόστους). Ο στροφαλοφόρος κατασκευάζεται από σφυρήλατα τμήματα χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άλλα μέταλλα. Το κάθε τμήμα αποτελείται από δύο βραχίονες (κιθάρες) που συνδέονται μεταξύ τους με το κάτω κομβίο διωστήρα και αποτελούν τον αγκώνα (crank throw).

Οι αγκώνες συνδέονται μεταξύ τους με τα κομβία βάσεως (που εδράζονται στη βάση της μηχανής) και η συναρμογή τους γίνεται με τη μέθοδο συστολής-διαστολής (shrink-fit). Κατά τη συναρμολόγηση προτιμάται η ψύξη του κομβίου με υγρό άζωτο ώστε να συσταλεί και να εισχωρήσει στο βραχίονα.



Σχήμα 2.8: Στροφαλοφόρος άξονας 2X μηχανής Diesel [8].

Όταν τα τμήματα έρθουν στην ίδια θερμοκρασία δημιουργούνται ισχυρές θλιπτικές τάσεις στο κομβίο και αντίστοιχες εφελκυστικές στο βραχίονα που καλούνται στεφανιαίες τάσεις (hoop stresses). Για να διατηρηθεί η περιφερειακή ομοιομορφία των τάσεων δεν χρησιμοποιούνται σφήνες ή πείροι συγκρατήσεως μεταξύ των τμημάτων διότι η εγκοπή του αυλακιού θα παραμόρφωνε το πεδίο των τάσεων. Επίσης, για να μειωθεί η πιθανότητα αστοχίας του κομβίου, τα δύο άκρα του που εισέρχονται στους βραχίονες είναι μεγαλύτερης διαμέτρου από το μεσαίο τμήμα και οι δύο διάμετροι συνδέονται με λωρίδα ικανής καμπυλότητας για αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων. Η κατασκευή γίνεται με τορνίρισμα και κυλινδρέλαση για αύξηση της αντοχής σε ρηγμάτωση. Λόγω της διαφοράς διαμέτρων, κατά τη λειτουργία της μηχανής το σημείο μέγιστης στρέψης στο κομβίο δε συμπίπτει με τη περιοχή μέγιστης στεφανιαίας τάσης.

Η συναρμογή των τμημάτων διαιρούμενου στροφάλου με συστολή/διαστολή είναι συνήθως πολύ ικανοποιητική και μόνο σε ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες ενδέχεται να παρατηρηθεί ολίσθηση. Τέτοιες συνθήκες δημιουργούνται σε περίπτωση υδραυλικής φραγής στο θάλαμο καύσεως λόγω διαρροών νερού ψύξεως ή καυσίμου από τον εγχυτήρα όταν η μηχανή είναι σταματημένη. Πρέπει να υπάρχει αρκετή ποσότητα υγρού (που είναι πρακτικά ασυμπίεστο) κατά την εκκίνηση της μηχανής ώστε να μην προλάβει να βρει διέξοδο και να απομακρυνθεί (π.χ. από τα ασφαλιστικά του κυλίνδρου).

Συνήθως μόνον ο αγκώνας που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο κύλινδρο μετακινείται σε σχέση με τους άλλους. Αν όμως ένας αγκώνας στροφάλου μετακινηθεί, επηρεάζεται ο χρονισμός όλων των αγκώνων που βρίσκονται μακρύτερα από αυτόν (σε σχέση με το σημείο μετάδοσης της κίνησης στον εκκεντροφόρο). Μικρές γωνιακές μετακινήσεις έως  $3^\circ$  στροφάλου είναι ανεκτές με κατάλληλη προσαρμογή του χρονισμού καυσίμου. Όμως για επαναφορά μετά από μεγάλες μετακινήσεις απαιτούνται ειδικές διατάξεις για ψύξη των

κομβίων και θέρμανση των βραχιόνων, στερέωση του στροφαλοφόρου και χρήση γρύλλων για την επανάταξη.

Εάν η μηχανή έχει εκκεντροφόρο άξονα, η κίνηση παραλαμβάνεται από τον τροχό στο άκρο του στροφαλοφόρου ή στο μέσον για κινητήρες με πάνω από 7 κυλίνδρους. Η κίνηση μεταδίδεται με αλυσίδες (καδένες) ή με οδοντωτούς τροχούς, και αντίβαρα ζυγοστάθμισης. Ο χρονισμός μπορεί να γίνει και με ηλεκτρονικό τρόπο, από σήμα θέσης στροφάλου σε συνεργασία με συστήματα common-rail & υδραυλικών βαλβίδων εξαγωγής.

Ένας άλλος τρόπος συναρμογής του στροφαλοφόρου είναι μέσω της βαθειάς συγκόλλησης όπου τα μισά κομβία συγκολλούνται και έτσι κατασκευάζονται συγκολλητοί στροφαλοφόροι που είναι ελαφρύτεροι και ισχυρότεροι από τους παραδοσιακούς που κατασκευάζονται με τη παραπάνω μέθοδο της συναρμογής. Επίσης, επειδή δεν υπάρχει η συναρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθούν μεγάλες διάμετροι κομβίων για μεγάλες ισχύες χωρίς πρόβλημα επικάλυψης των διαμέτρων στον αγκώνα. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση του βάρους κατά 30%. Το αρνητικό είναι ότι μια τέτοια κατασκευή χρειάζεται εξειδικευμένες εγκαταστάσεις [5].

#### **2.2.4 Χιτώνια – Θυρίδες εισαγωγής**

Το υλικό κατασκευής του χιτωνίου είναι ο χυτοσίδηρος λόγω της ιδιότητας αυτολιπάνσεως που οφείλεται στην παρουσία γραφίτη. Η εκλογή κατάλληλου υλικού για το χιτώνιο αλλά παράλληλα και για τα ελατήρια του εμβόλου είναι περίπλοκη και εξαρτάται από τη MEP & MPS της μηχανής, διάμετρο χιτωνίου, συνθήκες λειτουργίας της μηχανής και τύπο καυσίμου. Γενικά, η συμβατότητα υλικού χιτωνίου και ελατηρίων είναι απαραίτητη για αποφυγή υπερβολικών φθορών.

Το χιτώνιο υποστηρίζεται και συγκρατείται από την περιβάλλουσα δομή του σώματος του κυλίνδρου και δεν χρειάζεται να έχει ευκαμψία, οπότε ο φυλλοειδής γραφίτης που προσφέρει καλύτερες ιδιότητες αυτολιπάνσεως προτιμάται. Η κατασκευή του χιτωνίου γίνεται με περιστροφική χύτευση ώστε να διατηρείται η ομοιογένεια του κράματος.

Η ανάγκη για ιδιότητες αυτολιπάνσεως προέρχεται από τις συνθήκες λειτουργίας των ελατηρίων του εμβόλου που εξασφαλίζουν τη στεγανότητα του θαλάμου καύσεως. Κατά την κίνηση του εμβόλου στις μεγάλες μηχανές με βάκτρο και ζύγωμα γίνεται έγχυση κυλινδρελαίου (πολύ μικρές ποσότητες και μεγάλη διασπορά) από τις σχισμές περιμετρικά στο χιτώνιο και δημιουργείται στρώμα υδροδυναμικής λιπάνσεως μεταξύ ελατηρίων και χιτωνίου. Καθώς το έμβολο φτάνει στο ΑΝΣ η ταχύτητα μειώνεται και η φορά αντιστρέφεται, άρα η διατήρηση του υδροδυναμικού στρώματος γίνεται δυσκολότερη, καθώς επίσης η πίεση των αερίων αυξάνεται και ωθεί τα ελατήρια προς τα κάτω και προς το χιτώνιο. Επίσης η θερμοκρασία των μεταλλικών μερών αυξάνεται κοντά στο καπάκι και το λάδι αρχίζει να αποσυντίθεται, καθώς τα ελαφρύτερα κλάσματα εξατμίζονται και πιθανόν αναφλέγονται, οπότε παραμένει μόνο το υπόστρωμα από άνθρακα που βέβαια δεν έχει τις ίδιες λιπαντικές ιδιότητες. Για τον λόγο αυτό το άνω μέρος του χιτωνίου υφίσταται τη μεγαλύτερη φθορά. Τα οξέα που σχηματίζονται λόγω της παρουσίας ενώσεων θείου στο καύσιμο προκαλούν οξειδωτική διαβρωτική φθορά στην επιφάνεια του χιτωνίου. Για το λόγο

αυτό τα κυλινδρέλαια χρειάζονται χημικά πρόσθετα, αλκαλικότητα και ποσοστό περιεκτικότητας σε θείο που να συμβαδίζει με το τύπο του καυσίμου. Το κυλινδρέλαιο εκτός από τη λίπανση και εξουδετέρωση των οξέων, προστατεύει τα ελατήρια ευνοώντας τη μετάδοση θερμότητας, ώστε να ψύχονται τα ελατήρια μέσω της επιφάνειας του χιτωνίου.

Οι ρυθμοί φθοράς εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως:

- Ποιότητα και συμβατότητα των υλικών χιτωνίου και ελατηρίων
- Ποιότητα καυσίμου καθώς και τελειότητα καύσης
- Διανομή κατάλληλης ποσότητας και τύπου κυλινδρελαίου
- Φόρτιση της μηχανής, θερμοκρασία λειτουργίας τμημάτων θαλάμου καύσης

Συνήθως ο ρυθμός φθοράς επιταχύνεται από ένα σημείο και μετά, λόγω προβλημάτων στα ελατήρια, διαφυγής καυσαερίων, ρυπάνσεως ή πιθανόν πυρκαγιάς στους θαλάμους αποπλύσεως (βλέπε 2.6.3), μείωσης της συμπίεσης και της ισχύος της μηχανής, υψηλές θερμοκρασίες καυσαερίων, ατελή καύση και μαύρο καπνό στην εξάτμιση.

Η μέτρηση φθοράς του χιτωνίου είναι απαραίτητη ώστε να προγραμματιστεί η αντικατάσταση του σε χρόνο που να εξυπηρετεί το πρόγραμμα κινήσεων του πλοίου. Συνήθως μετά από κάποιες αλλαγές ελατηρίων αλλάζονται και τα χιτώνια αν και οι κατασκευαστές προσφέρουν πλέον συστήματα συνεχούς παρακολούθησης φθοράς κατά τη λειτουργία της μηχανής μέσω αισθητήριων διατάξεων.

Τα χιτώνια όπως κ άλλα μέρη της μηχανής ψύχονται με τη μέθοδο διατήσεων ψύξεως (bore cooling), όπου το ψυκτικό παρέχεται κοντά στην θερμαινόμενη επιφάνεια με διάτρηση αυλών στο μέταλλο και με τρόπο ώστε να μη μειώνεται η στιβαρότητα της μηχανής. Έτσι το χιτώνιο κατασκευάζεται με αρκετό πάχος ώστε να αντέχει στις πιέσεις λειτουργίας της μηχανής και να υπάρχει χώρος για διάτρηση οπών ψύξεως, έτσι ώστε η ψύξη να είναι τόσο αποτελεσματική όσο στα κλασσικά λεπτά χιτώνια. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο το άνω μέρος του χιτωνίου ψύχεται, ενώ η ψύξη ελαττώνεται σταδιακά προς τα κάτω, ώστε να διατηρείται θερμοκρασία επιφανείας μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία δρόσου.



Σχήμα 2.9: Χιτώνιο μεγάλης αργόστροφης μηχανής με τις θυρίδες εισαγωγής και εσωτερικά τα ελατήρια του εμβόλου [8].

Στους κινητήρες με ευθύγραμμη απόπλυση οι θυρίδες εισαγωγής στο κάτω τμήμα του χιτωνίου, έχουν διάταξη τέτοια ώστε να δίνουν συστροφή στον εισερχόμενο αέρα. Η συστροφή αυτή ευνοεί την σάρωση και επειδή αυξάνεται καθώς το έμβολο συμπιέζει αέρα, λόγω διατηρήσεως της ορμής, ευνοεί τη διασπορά και ανάμιξη του καυσίμου [5].

### **2.2.5 Ελατήρια & έμβολο - βάκτρο - διάφραγμα**

Τα ελατήρια είναι συνεχώς σε επαφή με τμήμα του χιτωνίου, άρα η φθορά τους είναι μεγαλύτερη, οπότε το υλικό τους πρέπει να είναι ανθεκτικότερο. Πρέπει να είναι εύκαμπτα ώστε να εφάπτονται στο χιτώνιο παρά την αυξανόμενη με το χρόνο φθορά, η οποία μεταβάλλει την επιφάνεια ολισθήσεως του χιτωνίου. Έτσι ο σφαιροειδής γραφίτης είναι πιο κατάλληλος για κατασκευή ελατηρίων.

Γενικά τα ελατήρια στεγανότητας του εμβόλου είναι τα εξαρτήματα της μηχανής που υπόκεινται στις πιο σκληρές συνθήκες λειτουργίας. Κατά την καύση, τα ελατήρια αντιμετωπίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες και κατόπιν ψύχονται ανομοιόμορφα, καθώς περνούν από τις θυρίδες αποπλύσεως, με αποτέλεσμα να υφίστανται υψηλές τάσεις. Η πίεση καύσεως ωθεί τα ελατήρια προς τα κάτω πιέζοντας τα στην κάτω πλευρά του αυλακιού, οπότε αέρια εισχωρούν στο εσωτερικό της αυλάκωσης και πιέζουν το ελατήριο προς το χιτώνιο, ευνοώντας τη στεγανότητα αλλά αυξάνοντας τη μηχανική φόρτιση. Επειδή ένα μόνο ελατήριο δεν αρκεί για στεγάνωση μεταξύ του θαλάμου καύσης και του χώρου κάτω από το έμβολο, χρησιμοποιείται συστοιχία ελατηρίων.

Τα ελατήρια γίνονται ακατάλληλα για περαιτέρω χρήση όταν η φθορά έχει μειώσει το πάχος τους περίπου κατά 15% (έλεγχος με φύλλερ), οπότε πλέον κινούνται στα έξω χείλη του αυλακιού, όπου παρέχεται περιορισμένη στήριξη και υπάρχει περίπτωση στρέβλωσής τους μέσα στο αυλάκι ή θραύσης από κόπωση του υλικού. Η χειρότερη περίπτωση είναι η φθορά που μπορούν να προκαλέσουν στο χιτώνιο.

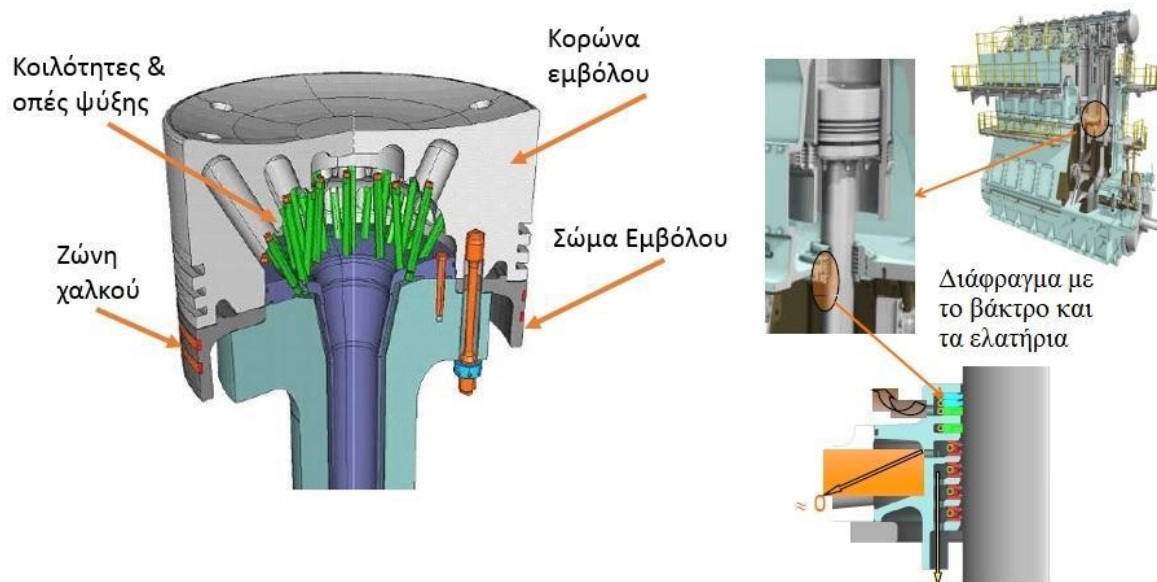
Το υλικό της κορώνας του εμβόλου είναι συνήθως κράμα χάλυβα-χρωμίου-μολυβενίου που σφυρηλατείται και έχει πολύ καλή αντοχή σε θερμικές τάσεις. Το σώμα του εμβόλου (φούστα) κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο. Για λόγους ασφαλείας υπάρχει μια ζώνη χαλκού στο σώμα του εμβόλου η οποία θα έρθει σε επαφή με το χιτώνιο σε περίπτωση αστοχίας των ελατηρίων.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η ψύξη του εμβόλου που επιτυγχάνεται με βεβαιωμένη προσαγωγή ψυκτικού υγρού κοντά στα τοιχώματα του χώρου καύσεως. Η ψύξη του εμβόλου γίνεται με νερό ή λάδι. Τα έμβολα έχουν ένα περίπλοκο εσωτερικό σχεδιασμό από κοιλότητες και οπές, ώστε να επιτυγχάνεται καλή ψύξη τους εσωτερικά από νερό ή λάδι. Πολύ μεγαλύτεροι ρυθμοί ροής θερμότητας επιτυγχάνονται με ψυκτικό νερό αντί για λάδι.



Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ψύξης που χρησιμοποιούνται και μπορούν να συνυπάρξουν ταυτόχρονα:

- Συστήματα πλήρους ροής, όπου οι δίοδοι ψυκτικού είναι γεμάτες από ψυκτικό συνεχώς.
- Συστήματα cocktail shaking, με παφλασμό ψυκτικού στις μισογεμάτες διόδους.



Σχήμα 2.10: Έμβολο 2X μηχανής & διάφραγμα με ελατήρια [8].

Για να επιτευχθεί η απόλυτη στεγανότητα και να μη προκληθεί διαρροή ψυκτικού νερού προς το λιπαντικό της ελαιολεκάνης υπάρχει το διάφραγμα. Με τη χρήση του ζυγώματος ο κινητήρας μπορεί να διαιρεθεί με διάφραγμα σε δύο τμήματα. Το κάτω μέρος με το καθαρό λάδι λιπάνσεως και το άνω μέρος, που έρχεται σε επαφή με τα διαβρωτικά κατάλοιπα της καύσεως, όπου και χρησιμοποιείται χωριστό κυλινδρέλαιο. Το έμβολο συνδέεται με το ζύγωμα μέσω χαλύβδινου άξονα, του βάκτρου.

Η στεγανοποίηση του διαφράγματος επιτυγχάνεται με κατάλληλα ελατήρια αποξέσεως (scraper rings). Τα ελατήρια αυτά μπορεί να έχουν επιφάνεια επαφής ορειχάλκινη ή από Teflon, με τα πρώτα να έχουν καλύτερη μακροχρόνια απόδοση, ενώ τα δεύτερα να προσφέρουν καλύτερη στεγανότητα στην αρχική λειτουργία του κινητήρα [5].

### 2.2.6 Πώμα κυλίνδρου & βαλβίδα εξαγωγής

Το πώμα κυλίνδρου (cylinder cover) είναι ουσιαστικά ένα μονοκόμματο καπάκι από σφυρήλατο χάλυβα στο οποίο και διανοίγονται οπές ψύξης με δράπανο. Το πώμα έχει θολωτό σχήμα για αντοχή και συγχρόνως για να διαμορφώνεται ικανοποιητικός χώρος καύσης.

Φέρει τον κεντρικό κλωβό με την βαλβίδα εξαγωγής, τους θύλακες των εγχυτήρων καυσίμου και πεπιεσμένου αέρα (για την εκκίνηση), καθώς και ασφαλιστικές βαλβίδες. Οι εγχυτήρες καυσίμου συνήθως είναι 2-3 και αυτό για λόγους βελτίωσης της καύσης, όπου θέλουμε ομοιόμορφη φλόγα στο χώρο καύσης, κάτι που επιτυγχάνεται με καλύτερη διασπορά της φλόγας σε συνεργασία με τη συστροφή του αέρα σαρώσεως. Το κάτω μέρος του πώματος είναι σε επαφή με τα αέρια καύσεως και πρέπει να ψύχεται ικανοποιητικά σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Η ψύξη του πώματος εξασφαλίζεται με την προσαγωγή ψυκτικού νερού κοντά στις θερμαινόμενες επιφάνειες.

Λόγω της μεγάλης διαδρομής του εμβόλου σε σχέση με τη διάμετρο του (περίπου 4/1) χρησιμοποιείται η μέθοδος της ευθύγραμμης απόπλυσης όπου καθίσταται απαραίτητη η βαλβίδα εξαγωγής στο πώμα του κυλίνδρου.

Η βαλβίδα εξαγωγής αποκτά τη μέγιστη θερμοκρασία από όλα τα τμήματα του θαλάμου καύσης καθώς περιβάλλεται από θερμά καυσαέρια κατά την εξαγωγή. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της συνεχούς επαφής με θερμά και ιδιαίτερα διαβρωτικά καυσαέρια, το υλικό της βαλβίδας είναι συνήθως κράμα χάλυβα με στοιχεία Μολυβδενίου και Νικελίου, που δίδουν εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής, αλλά έχουν πολύ υψηλό κόστος. Συνήθως ο μίσχος είναι επιχρωμιωμένος για μείωση των τριβών.

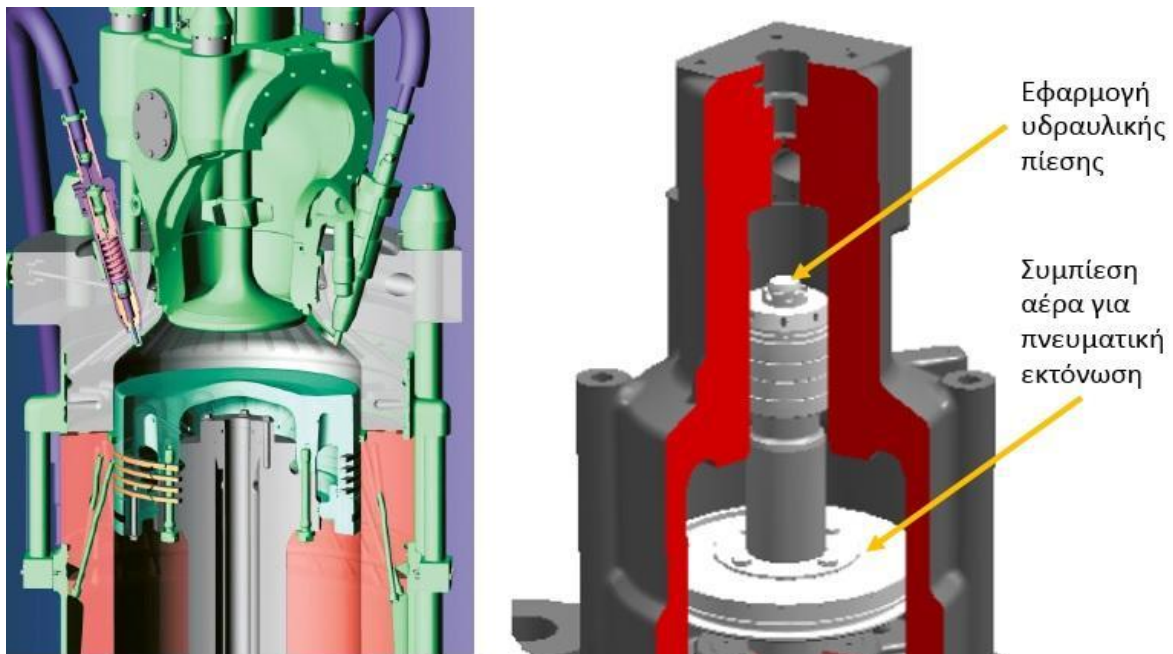
Με τέτοια υλικά επιτυγχάνεται ικανοποιητικός χρόνος ζωής εκτός αν συμβεί σημαντική παραμόρφωση της έδρας. Με παραμορφωμένη την έδρα, η βαλβίδα δεν εφαρμόζει και έτσι υπάρχει κίνδυνος διαρροής θερμών αερίων υψηλής πίεσης μεταξύ της βαλβίδας και της έδρας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα πολύ υψηλή θερμοκρασία βαλβίδας και κάψιμο του υλικού της κεφαλής της βαλβίδας. Η λύση είναι να βελτιωθεί η ψύξη του πώματος και της έδρας ώστε να επιτευχθεί πιο ομοιόμορφη θερμοκρασία και μικρότερη παραμόρφωση.

Η ζωή της βαλβίδας εξαγωγής είναι ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα όταν η μηχανή καίει βαρύ καύσιμο. Τα βαριά καύσιμα περιέχουν Βανάδιο και Νάτριο. Οι ενώσεις των οξειδίων Βανადίου και Νατρίου σχηματίζουν υαλώδη επιθέματα πάνω στις στεγανοποιητικές επιφάνειες της βαλβίδας και έδρας όταν η θερμοκρασία της κεφαλής της βαλβίδας υπερβεί το σχετικά υψηλό σημείο τήξης (περίπου 600°C). Τα επιθέματα εμποδίζουν τη βαλβίδα να κλείσει και δημιουργούν διόδους που οδηγούν σε διάβρωση των μετάλλων, κάτι που μειώνει τη πίεση του κυλίνδρου και συνεπώς τη καύση και την ισχύ.

Η λύση είναι η βελτίωση της ψύξης στην κεφαλή της βαλβίδας είτε άμεσα, με νάτριο μέσω κοίλου του μίσχου, είτε συνήθως έμμεσα με ελάττωση της θερμοκρασίας της έδρας στο πώμα. Αν αυτό συνδυαστεί με έναν υψηλό σχετικό λόγο αέρα-καυσίμου και μεγάλη ποσότητα αέρα σάρωσης, η θερμοκρασία της κεφαλής της βαλβίδας συγκρατείται σε χαμηλό

επίπεδο έτσι ώστε να μην επικολλούνται οι ενώσεις Βαναδίου και Νατρίου στις επιφάνειες στεγανο-ποίησης.

Η βαλβίδα εξαγωγής στους μεγάλους 2X κινητήρες συχνά είναι εφοδιασμένη με περύγια στο μίσχο της, τα οποία, καθώς παρεμβάλλονται στο ρεύμα καυσαερίων κατά την εξαγωγή, περιστρέφουν τη βαλβίδα όταν ανοίγει, οπότε κατά την επαναφορά η βαλβίδα περιστρεφόμενη χτυπά στην έδρα και η εκτριβή εξασφαλίζει ομοιόμορφη φθορά και αποκολλά τις τυχόν επικαθήσεις. Τέλος, επαναφέρεται με ελατήριο πεπιεσμένου αέρα που παρουσιάζει πολύ μικρή αντίσταση στη περιστροφή (σχήμα 2.10). Η χρήση πνευματικών ελατηρίων έλυσε τα προβλήματα αστοχιών λόγω κοπώσεως που παρουσίαζαν τα μεταλλικά ελατήρια παλαιότερων μηχανών. Επίσης η κίνηση αυτοκαθαρισμού συνεισφέρει στη διατήρηση της στεγανότητας της βαλβίδας [5].



Σχήμα 2.11: Πώμα κυλίνδρου & λεπτομέρεια υδραυλικής βαλβίδας εξαγωγής - πνευματικού ελατηρίου [8].

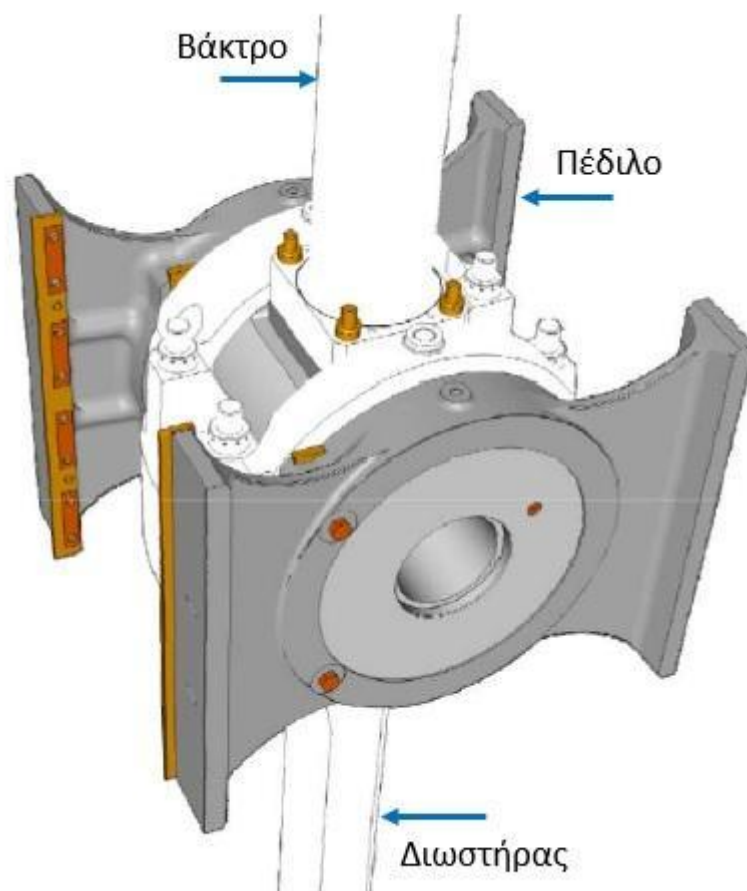
### 2.2.7 Σταυρός (ζύγωμα)

Στις μεγάλες 2X μηχανές, η πλάγια συνιστώσα της δύναμης αντιδράσεως του στροφαλοφόρου, παραλαμβάνεται από την ευθυντηρία του σκελετού, μέσω των πεδίων του ζυγώματος, που ουσιαστικά είναι ένα αναλώσιμο έδρανο ολίσθησης λευκού μετάλλου.

Έτσι οι μεγάλες 2X μηχανές, λόγω της κίνησης του εμβόλου και βάρου μόνο σε κάθετη αξονική διεύθυνση, μπορούν να έχουν σχετικά ελαφριές κατασκευές εμβόλων, διαχωρισμό θαλάμου καύσεως και στροφαλοθαλάμου, καθώς και δύο ειδών διαφορετικά λιπαντικά (κυλινδρέλαιο & λάδι μηχανής).

Η δύναμη αντιδράσεως έχει αντίθετη διεύθυνση κατά τη φάση εκτόνωσεως από ότι κατά τη φάση της συμπίεσης, οπότε πρέπει να υπάρχουν πέδιλα και ευθυντηρίες και προς τις δύο διευθύνσεις, με το φορτίο να μεταφέρεται από τις μεν και δε σε κάθε κύκλο της μηχανής.

Η φθορά είναι μεγαλύτερη στο άνω τμήμα της κάθε ευθυντηρίας, όπου η υδροδυναμική λίπανση είναι πλημμελέστερη και μάλιστα της ευθυντηρίας που παραλαμβάνει το φορτίο κατά τη φάση της εκτόνωσης. Η φθορά των πεδίων, τα οποία βρίσκονται συνεχώς σε κίνηση, είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Τα πέδιλα διαθέτουν αυλακώσεις για τη διανομή λιπαντικού. Η βέλτιστη στιγμή εισροής λιπαντικού υπό πίεση είναι κατά το τέλος της καθόδου του εμβόλου όταν εμφανίζονται οι θυρίδες εισαγωγής.



Σχήμα 2.12: Συγκρότημα σταυρού (ζυγώματος) όπου φαίνονται και τα πέδιλα [8].

Η ευθυγράμμιση των οδηγών στην ευθυντηρία πρέπει να είναι τέτοια ώστε να περιορίζεται η κίνηση του κάτω άκρου του βάκτρου του εμβόλου σε ευθεία παράλληλη με το χιτώνιο. Η έλλειψη ευθυγράμμισης εκτός από θόρυβο χτυπήματος εντείνει τη φθορά του χιτωνίου, του βάκτρου και πιθανόν των πεδίων της ευθυντηρίας. Η χρήση διατάξεων εδράσεως με ελευθέρως κινούμενα πέδιλα μείωσε τα προβλήματα ευθυγράμμισεως [5].

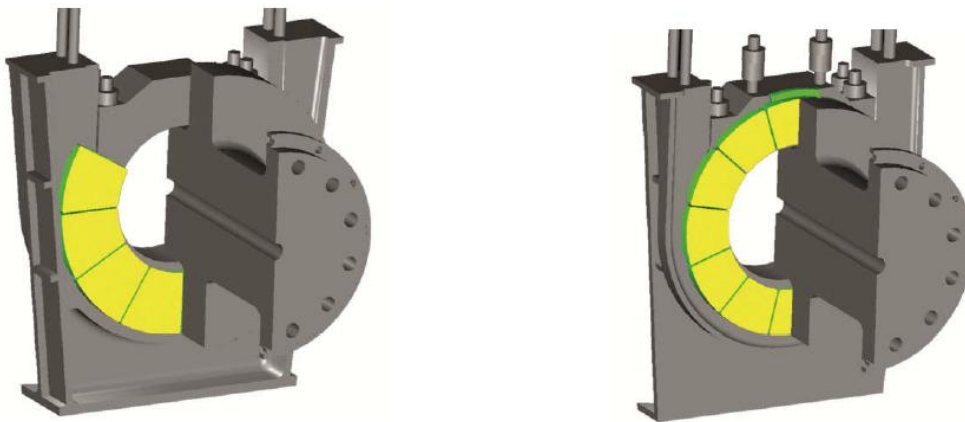
### 2.2.8 Έδρανα διωστήρα & ωστικό έδρανο

Συνήθως τα έδρανα αυτά είναι σύνθετα και αποτελούνται από ένα χαλύβδινο εξωτερικό κάλυμμα, που φέρει στρώμα κράματος χαλκού-μολύβδου πάνω στο οποίο υπάρχει επίστρωση λευκού μετάλλου. Το στοιχείο του μολύβδου χρησιμοποιείται λόγω της ύπαρξης θείου κατά τη καύση. Τα έδρανα αυτά έχουν εξαιρετικές δυνατότητες παραλαβής φορτίου, μεγάλη αντίσταση σε εκτριβή (scoring) και μπορούν να κατεργαστούν με μικρές ανοχές (περίπου 0,1 mm).

Λόγω της αυξημένης MEP των μηχανών αυτών, η λίπανση τους γίνεται με βεβιασμένη προσαγωγή λιπαντικού υπό πίεση κατευθείαν στο άνω έδρανο σταυρού. Τμήμα του λαδιού λιπαίνει το πέδιλο ευθυντηρίας ενώ η περίσσεια λαδιού μέσω διάτρησης του διωστήρα τροφοδοτεί το έδρανο του κάτω άκρου διωστήρα (ποδιού).

Στο τέλος της μηχανής προς τη μεριά του ελικοφόρου βρίσκεται το ωστικό έδρανο, το οποίο σκοπό έχει να παραλάβει τη δύναμη ώσης της προπέλας και να τη μεταφέρει στη βάση της μηχανής. Πρόκειται για ένα κλασσικό ωστικό έδρανο τύπου Michell όπου η τοποθεσία των πλίνθων (segments), επιλέγεται κατά τη σχεδίαση της μηχανής και εξαρτάται από τον αριθμό κυλίνδρων [5].

**240 degrees design, 6-8 cylinder engines    360 degrees design, 9-12 cylinder engines**



Σχήμα 2.13: Λεπτομέρεια πλίνθων των ωστικών εδράνων τύπου Michell [8].

### 2.2.9 Η συναρμολόγηση της μηχανής

Θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή της συναρμολόγησης μιας μεγάλης αργόστροφης ναυτικής μηχανής, όπως γίνεται στα ναυπηγεία. Κάθε κατασκευαστής δίνει λεπτομερής οδηγίες για τη διαδικασία αυτή στο εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό που συνεργάζεται.

1. Η διαδικασία για το στήσιμο της μηχανής, ξεκινάει με τη βάση της μηχανής, η οποία πρέπει να τοποθετηθεί σωστά στον ειδικά διαμορφωμένο χώρο της γάστρας του πλοίου (engine foundation).
2. Στη συνέχεια αφού τοποθετηθεί ο στροφαλοφόρος με τα κουζινέτα, έρχεται και κουμπώνει ο σκελετός της μηχανής, και ακολουθούν διωστήρας & σταυρός.
3. Σειρά έχει το σώμα των κυλίνδρων, όπου ακολουθεί η σύσφιξη των εντατήρων (τιράντες) σταυρωτά, που θα διαπερνάνε τα τρία κύρια μέρη της μηχανής, με συγκεκριμένη ροπή σύσφιξης (παρόμοια διαδικασία με τις κυλινδροκεφαλές των μικρών κινητήρων).
4. Έπειτα στο πλαϊνό τμήμα του σκελετού, έρχεται και δένει το σύστημα εισαγωγής (πολλαπλή εισαγωγής) του χώρου σαρώσεως, μαζί με το ψυγείο της υπερπλήρωσης (intercooler).
5. Εφόσον τοποθετηθούν τα χιτώνια & γίνουν οι απαραίτητες διαδικασίες στα έμβολα (έλεγχοι, τοποθέτηση ελατηρίων κλπ), το έμβολο έρχεται από το άνω μέρος του σώματος κυλίνδρων (ήδη συνδεδεμένο με το βάκτρο) και συνδέεται με το σταυρό. Όπως είναι αναμενόμενο, ακολουθούν τα πάματα (καπάκια) των κυλίνδρων.
6. Το σύστημα υπερπλήρωσης (τούρμπο) θα τοποθετηθεί πριν τη πολλαπλή εξαγωγής και μετέπειτα σειρά έχουν τα υπόλοιπα παρελκόμενα της μηχανής (σωληνώσεις, ηλεκτρονικά κλπ).

Να σημειώσουμε ότι κατά τις συναρμογές, οι επιφάνειες πρέπει να είναι λείες και καθαρές. Το τεχνικό προσωπικό θα πρέπει να καθαρίσει, γυαλίσει τις επιφάνειες και να γίνονται επαρκής έλεγχοι. Συνήθως χρησιμοποιούνται σιλικονούχες κόλλες μεταξύ επιφανειών, όπως και στις μικρές μηχανές. Τέλος, τα τριβόμενα μηχανικά μέρη που συγκροτούνται, θα πρέπει να λιπαίνονται επαρκώς.

### 2.3 ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΜΕΣΟΣΤΡΟΦΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

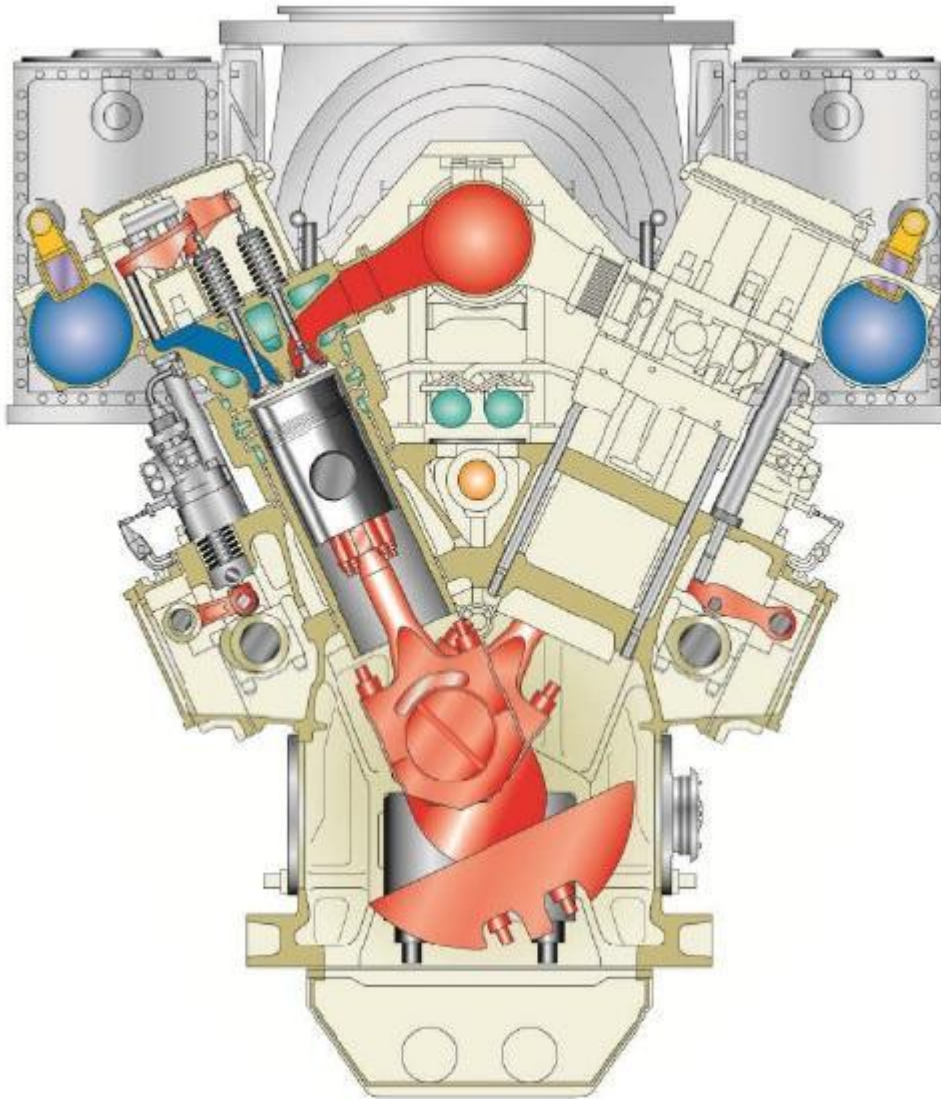
Οι μεσόστροφες μηχανές χρησιμοποιούνται στα εμπορικά πλοία ως βοηθητικές μηχανές για τη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος (auxiliary engines). Σε μικρότερα πλοία χρησιμοποιούνται και ως κύριες μηχανές πρόωσης. Πρόκειται για μια μεγάλου μεγέθους 4X μηχανή, η οποία έχει μεγάλη ομοιότητα με τις κλασσικές μηχανές που γνωρίζουμε από τις ΜΕΚ [6].

Τα σπουδαιότερα θετικά σημεία των μεσόστροφων μηχανών είναι το μικρό ύψος μηχανοστασίου, το οποίο σε πολλές περιπτώσεις επιτρέπει μια πιο ευνοϊκή διάταξη των καταστρωμάτων και την ελευθερία επιλογής της πιο κατάλληλης ταχύτητας έλικας. Η μεσόστροφη μηχανή είναι πολύ ελαφρύτερη σε σύγκριση με μια δίχρονη αργόστροφη για χαμηλή ισχύ λειτουργίας, ακόμη και αν ληφθεί υπόψιν το επιπρόσθετο βάρος των μειωτήρων, υπάρχει ένα πλεονέκτημα βάρους 20-30%.

Λόγω πολυπλοκότητας της εγκατάστασης, η πιθανότητα να υπάρξει πρόβλημα είναι μεγαλύτερη. Παρ' όλ' αυτά η συνήθης ύπαρξη δύο ή και περισσότερων μηχανών καθιστά πολύ μικρή την πιθανότητα πλήρους διακοπής της εγκατάστασης, εκτός από την περίπτωση βλάβης του μειωτήρα (που είναι σπάνια) και συνεπώς έτσι ενισχύεται η αξιοπιστία. Μια εγκατάσταση πολλών μηχανών σε ξεχωριστούς ελικοφόρους άξονες προσφέρει το πλεονέκτημα εύκολων ελιγμών με σύμπλεξη και αποσύμπλεξη μηχανών που λειτουργούν συνεχώς περιστρεφόμενες σε αντίθετες κατευθύνσεις, καθώς και τη δυνατότητα λειτουργίας με λιγότερες μηχανές όταν απαιτείται χαμηλή ισχύ.

Ένα σχετικό μειονέκτημα είναι η ευαισθησία της μηχανής στα καύσιμα χαμηλής ποιότητας. Η μεσόστροφη μηχανή καίει συχνά καύσιμα της ίδιας κακής ποιότητας με αργόστροφες μηχανές χωρίς προβλήματα, όπως αποδεικνύεται από χιλιάδες πλοία, αλλά παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία στο να δεχθεί εξαιρετικά χαμηλής ποιότητας καύσιμα απ' ό,τι η αργόστροφη μηχανή, η οποία λόγω της φύσης της προσφέρει περισσότερο χρόνο και χώρο για πλήρη καύση, καθώς και μικρότερες φθορές λόγω της ύπαρξης κυλινδρελαίου. Επιπρόσθετα, οι βαλβίδες εξαγωγής της μεσόστροφης μηχανής είναι περισσότερο ευπαθείς στη διάβρωση που προκαλείται από συνδυασμούς από στάχτες υπολειμμάτων καυσίμου με χαμηλό σημείο τήξης που περιέχουν οξειδία Βαναδίου και Νατρίου. Για το λόγο αυτό έχει γίνει πρόοδος με την προστασία των εδρών των βαλβίδων μέσω ειδικών υλικών και αποτελεσματικής ψύξης των βαλβίδων και των εδρών.

Οι πιο συνηθισμένες διατάξεις κυλίνδρων είναι η εν σειρά και σε μορφή V, όπου η διάταξη V προσφέρει και τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος. Συγκεκριμένα υπάρχουν διατάξεις V18 με απόδοση ισχύος 30-40 MW. Όλες οι μεσόστροφες μηχανές είναι υπερπληρωμένες και με ψύξη του αέρα εισαγωγής (intercooled). Στο (σχήμα 2.12) διακρίνουμε μια μεσόστροφη μηχανή τύπου V με τις εισαγωγές στα πλάγια και την περιοχή εξαγωγής και υπερπλήρωσης στο κέντρο.



Σχήμα 2.14: Μεσόστροφη 4X μηχανή Diesel, διάταξης V με υπερπλήρωση [8].

Πολλές φορές στους μεσόστροφους κινητήρες δεν υπάρχει πλαίσιο βάσης και απλώς χρησιμοποιείται μια ελαιολεκάνη για τη συλλογή του λιπαντικού, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η βάση αποτελεί μια περίπλοκη αλλά χυτή κατασκευή. Ο σκελετός της μηχανής μπορεί να είναι χυτοσιδηρός μονοκόμματος, με τον στροφαλοθάλαμο και το σώμα των κυλίνδρων μαζί.

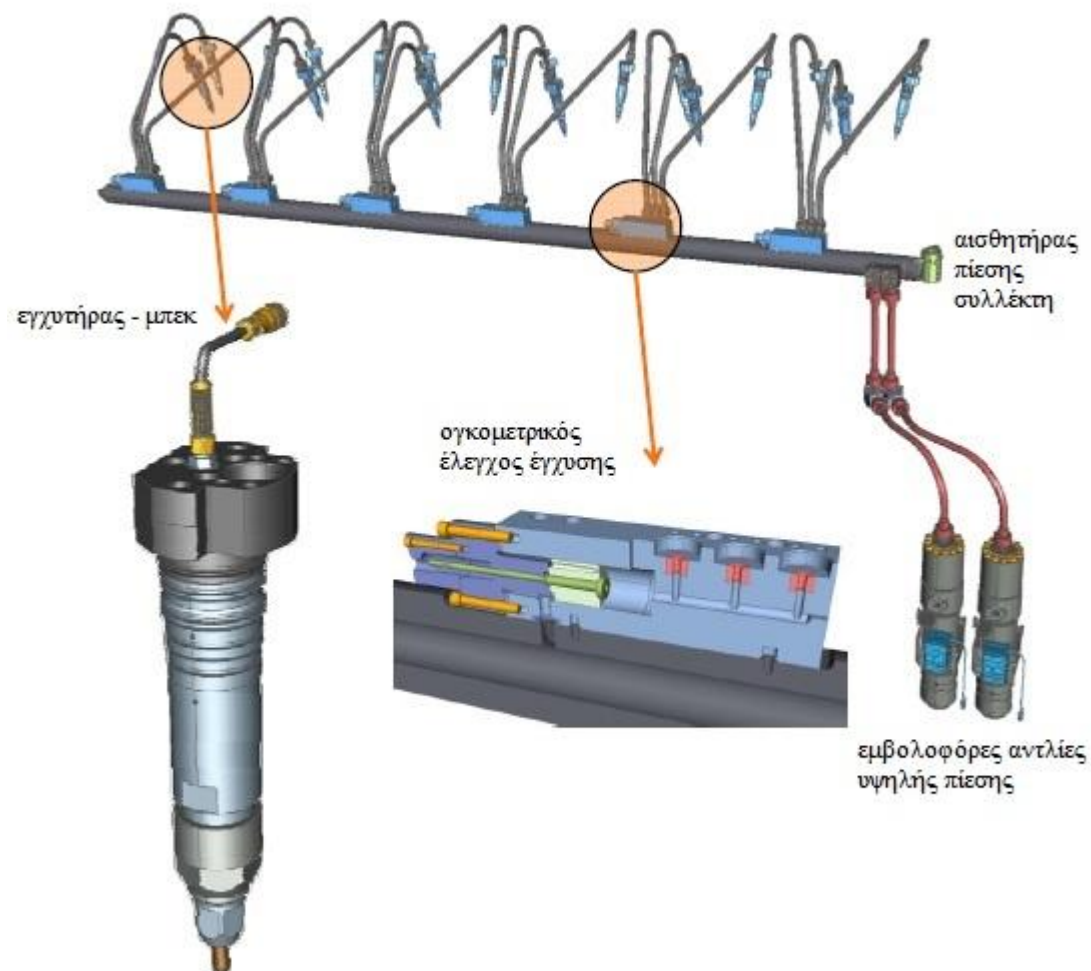
Ο στροφαλοφόρος άξονας είναι από τις μεγαλύτερες χυτές κατασκευές. Σφυρηλατείται από κράμα χάλυβα μονοκόμματος και μετά κατεργάζεται. Έχει διάτρητες οπές για τη λίπανση και αντίβαρα για τη ζυγοστάθμιση.

Τα έμβολα είναι κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου, και έχουν εσωτερικά διάτρητες οπές ψύξης, παρόμοιες με τα έμβολα της αργόστροφης μηχανής. Οι βαλβίδες είναι συνήθως τέσσερις, όπως και στις συμβατικές ΜΕΚ και ανοιγοκλείνουν με μηχανικό τρόπο (εκκεντροφόρος άξονας) [5].



## 2.4 ΕΓΧΥΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η έγχυση καυσίμου, στους σύγχρονους βραδύστροφους αλλά και μεσόστροφους ναυτικούς κινητήρες, πραγματοποιείται με ένα σύστημα Κοινού Συλλέκτη – Common Rail (CR) [8]. Η αρχή της έγχυσης είναι ανεξάρτητη από την αύξηση της πίεσης, οπότε υπάρχει μεγάλη ευελιξία στον χρονισμό της έγχυσης. Κάθε τέτοιο σύστημα αποτελείται από ανεξάρτητα εξαρτήματα τα οποία συνθέτουν το ολοκληρωμένο σύστημα κοινής γραμμής [7]. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει μία σχηματική αναπαράσταση ενός τέτοιου συστήματος.

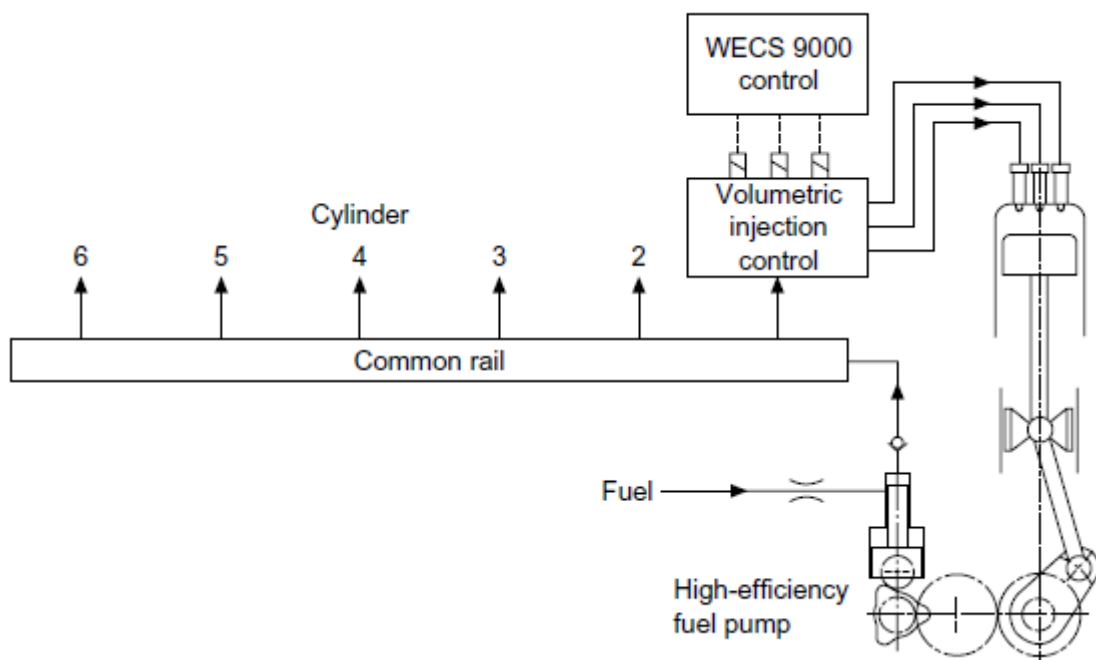


Σχήμα 2.15: Σύστημα Common-Rail ναυτικού κινητήρα [8].

Το CR είναι ουσιαστικά ένας συλλέκτης, ο οποίος έχει το μήκος της μηχανής, και βρίσκεται στο επίπεδο του πώματος κυλίνδρου. Ο συλλέκτης, καθώς και οι παρελκόμενες σωληνώσεις, βρίσκονται στο άνω μέρος της μηχανής, από όπου και υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης σε αυτά. Η τροφοδοσία του συλλέκτη γίνεται με θερμαινόμενο πετρέλαιο σε υψηλές πιέσεις (περίπου 1000-1200 bar) από όπου και βρίσκεται σε ετοιμότητα

για την έγχυση στους κυλίνδρους της μηχανής. Τροφοδοτείται μέσω παλινδρομικών αντλιών υψηλής πίεσης, οι οποίες και λειτουργούν μηχανικά από τη περιστροφή του στροφάλου σε σύνδεση με πολλαπλά έκκεντρα. Για παράδειγμα, ένας 6-κύλινδρος κινητήρας χρειάζεται τέσσερα σετ αντλιών – έκκεντρων.

Το θερμαινόμενο καύσιμο μεταφέρεται από το κοινό συλλέκτη μέσω ενός ‘ελεγκτή ψεκασμού’ για τον κάθε κύλινδρο ξεχωριστά. Το σύστημα αυτό λειτουργεί με ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα ρύθμισης του χρονισμού, της ποσότητας αλλά και της μορφής του ψεκασμού. Οι τρεις εγχυτήρες βρίσκονται στο πόμα κάθε κυλίνδρου, και έχουν τη δυνατότητα διαφορετικής λειτουργίας ο καθένας, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο.

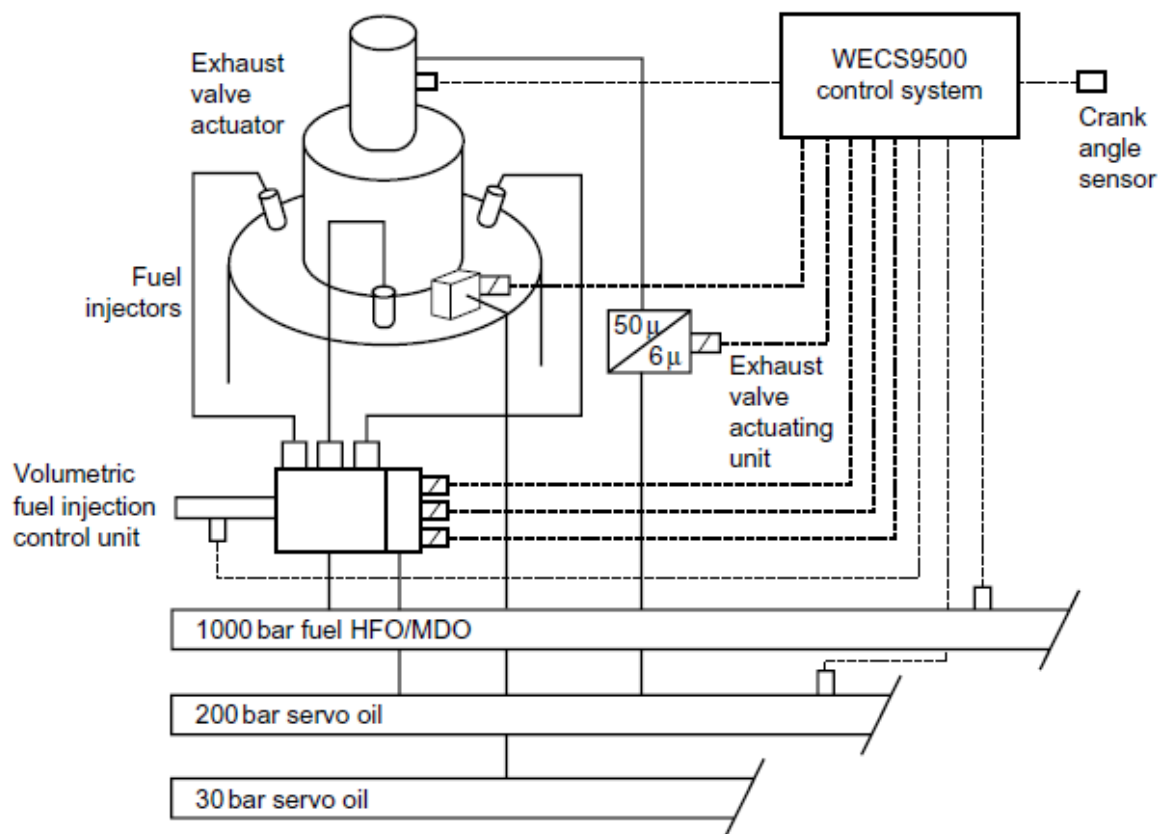


Σχήμα 2.16: Σχηματική διάταξη συστήματος CR των μηχανών RT-flex (Wärtsilä) [4].

Ο τρόπος λειτουργίας της μηχανής μπορεί να μεταβάλλετε, λόγω της “ευελιξίας” που προσφέρει η έγχυση σε συνδυασμό με τις διαφορετικές χαρτογραφήσεις του κατασκευαστή. Για παράδειγμα, ο χειριστής θα μπορούσε να επιλέξει χαμηλή κατανάλωση καυσίμου ή μειωμένα επίπεδα εκπομπών ρύπων. Στη προέγχυση καυσίμου, ένα μικρό ποσοστό ψεκάζεται πριν τη κύρια έγχυση, ενώ στον τριπλό ψεκασμό η έγχυση πραγματοποιείται με τρεις διαδοχικούς ψεκασμούς στη σειρά. Γενικά όλες αυτές οι τροποποιήσεις λειτουργίας των εγχυτήρων, έχουν ως απώτερο σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία της μηχανής, ανάλογα με τις συνθήκες και απαιτήσεις του πλοίου και του χειριστή. Για παράδειγμα, με τη λειτουργία απενεργοποιήσεις κάποιων εγχυτήρων (shut-off), επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία σε μικρούς ελιγμούς του πλοίου, όπου και χρειάζονται χαμηλές στροφές της έλικας. Σε αυτή τη λειτουργία, το σύστημα CR χρησιμοποιεί τους τρεις εγχυτήρες διαδοχικά, έναν για κάθε χρόνο καύσης του κυλίνδρου.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος CR είναι:

- Ακριβής ογκομετρικός έλεγχος του ψεκασμού
- Μεταβλητός ρυθμός ψεκασμού, καθώς και ελευθερία επιλογής της πίεσης
- Σταθερά επίπεδα πιέσεων στον κοινό συλλέκτη, καθώς και στις σωληνώσεις τροφοδοσίας
- Δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου ή και διακοπή λειτουργίας για κάθε μπεκ ξεχωριστά
- Ιδανικό για βαρύ καύσιμο – HFO (έως και 730 cSt ιξώδες για 50°C) με τον διαχωρισμό του πετρελαίου από τις υδραυλικές πιλοτικές βαλβίδες
- Αποδεδειγμένη υψηλή απόδοση των τροφοδοτικών αντλιών
- Αποδεδειγμένη προβλεπόμενη λειτουργία των βαλβίδων ψεκασμού



Σχήμα 2.17: Ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα CR των μηχανών RT-flex (Wärtsilä) [4].

Όπως έχουμε αναφέρει στην υποενότητα 2.2, η βαλβίδα εξαγωγής λειτουργεί με υδραυλικό – πνευματικό τρόπο. Η υδραυλική ενέργεια λαμβάνεται μέσω του στροφάλου. Ουσιαστικά υπάρχει ένας δεύτερος συλλέκτης, λαδιού (servo oil) αυτή τη φορά, ο οποίος και τροφοδο-

τείται με λιπαντικό σε πίεση 200bar, μέσω υδραυλικών αντλιών. Το λιπαντικό αυτό είναι το ίδιο με το λιπαντικό της μηχανής (όχι το κυλινδρέλαιο), για λόγους απλότητας και φιλτράρετε από ξεχωριστό φίλτρο για μεγαλύτερη αξιοπιστία και διάρκεια ζωής. Μέσω αισθητήριων διατάξεων, η κεντρική μονάδα ελέγχου ενημερώνεται για την ακριβή θέση της βαλβίδας, και έχει την δυνατότητα πλήρους ευελιξίας στο άνοιγμα – κλείσιμο της, με ρύθμιση της πίεσης στον συλλέκτη λιπαντικού (servo oil rail).

Η έγχυση καυσίμου καθώς και το άνοιγμα-κλείσιμο των βαλβίδων εξαγωγής, ελέγχονται από ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου – ECU (δηλαδή εγκέφαλος) με αισθητήρες και ενεργοποιητές. Συγκεκριμένα, η Wärtsilä χρησιμοποιεί για τις μηχανές της σειράς RT-flex το σύστημα WECS – Wärtsilä Electronic Control System, το οποίο έχει και τη δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου και λειτουργίας από τον χειριστή της μηχανής για τον κάθε κύλινδρο.

Η εταιρία MAN, για τις μηχανές της σειράς ME-B & C, εξακολουθεί να χρησιμοποιεί το παραδοσιακό σύστημα εκκεντροφόρου για τις βαλβίδες εξαγωγής. Ωστόσο, έχουν ενσωματωθεί αρκετά ηλεκτρονικά συστήματα, όπως το ELFI (electronic fuel injection), ELVA (electronic valve actuation), ηλεκτρονικό σύστημα λίπανσης κυλίνδρου (Alpha Cylinder Lubricator) κλπ [4].

Τα ηλεκτρονικά συστήματα ενσωματώθηκαν στις μηχανές νέας γενιάς (Wärtsilä RT-flex, MAN ME), σε αντίθεση με τις μηχανές της προηγούμενης γενιάς (Wärtsilä RTA, MAN MC), για λόγους βελτίωσης λειτουργίας, και κυρίως τον έλεγχο των εκπομπών ρύπων (βλέπε υποενότητα 2.8).

#### **2.4.1 Εγχυτήρες & ακροφύσια**

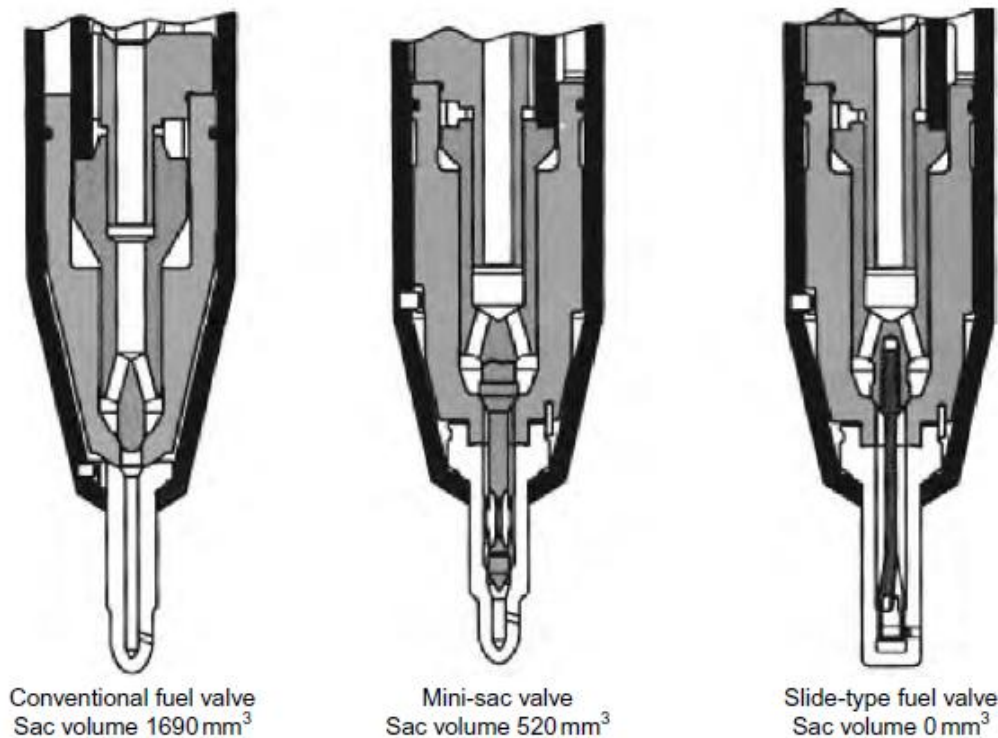
Ο εγχυτήρας είναι πιθανώς το πλέον πολύπλοκο εξάρτημα σε ένα σύστημα κοινής γραμμής. Το ακροφύσιο είναι το τελικό εξάρτημα του εγχυτήρα το οποίο αλληλεπιδρά με το θάλαμο καύσης, και με τον τρόπο αυτό η λειτουργία του εγχυτήρα επηρεάζει την διαδικασία της καύσης. Η πλέον διαδεδομένη μορφή εγχυτήρα που χρησιμοποιείται σε συστήματα CR πλοίων είναι αυτή με υδραυλική ενεργοποίηση και ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα (servo με solenoid actuated).

Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας είναι η ταχύτητα κίνησής της, όπως επίσης και το χαμηλό κόστος. Το βασικό μειονέκτημα είναι η καθυστέρηση που οφείλεται στη δυναμική απόκριση του συστήματος. Εξαιτίας του έμμεσου ελέγχου της κίνησης της βελόνας, υπάρχει μεγάλη καθυστέρηση μεταξύ της ενεργοποίησης και της έγχυσης.

Το καύσιμο εγχύεται στο θάλαμο καύσης από τις οπές του ακροφυσίου του εγχυτήρα. Κατά την διεργασία αυτή το καύσιμο πρέπει να σταγονοποιηθεί κατά το μέγιστο βαθμό μέσω της ίδιας της διαδικασίας της έγχυσης και με τη βοήθεια της κίνησης του αερίου (air guided method).

Τα ακροφύσια των εγχυτήρων είναι του τύπου SAC, όπου οι οπές δεν καλύπτονται από την βελόνα (τυφλές οπές) και επικοινωνούν με έναν όγκο διαμορφωμένο στο άκρο του

ακροφυσίου (SAC). Ανάλογα με τον όγκο που βρίσκεται κάτω από τη βελόνα, διακρίνονται και σε SAC και mini- SAC.



Σχήμα 2.18: Ακροφύσια εγχυτήρα τύπου SAC για μηχανές Diesel [4].

Στα ακροφύσια τύπου SAC, ο όγκος που βρίσκεται κάτω από τη βελόνα (όγκος τυφλής οπής), και τροφοδοτεί με καύσιμο τις οπές, έχει σαν σκοπό να «κατευνάσει» τη ροή, ώστε να δημιουργηθεί κατά το δυνατόν πιο ομοιογενής έγχυση [7]. Σύμφωνα με έρευνες της εταιρίας MAN diesel, έχει διαπιστωθεί ότι με τη μείωση του όγκου τυφλής οπής, επιτυγχάνεται μείωση των ρύπων NO<sub>x</sub>, CO, HC, PM, καθώς και μείωση των επικαθίσεων της μηχανής [4].

#### 2.4.2 Ο στροβιλισμός κατά τη σάρωση

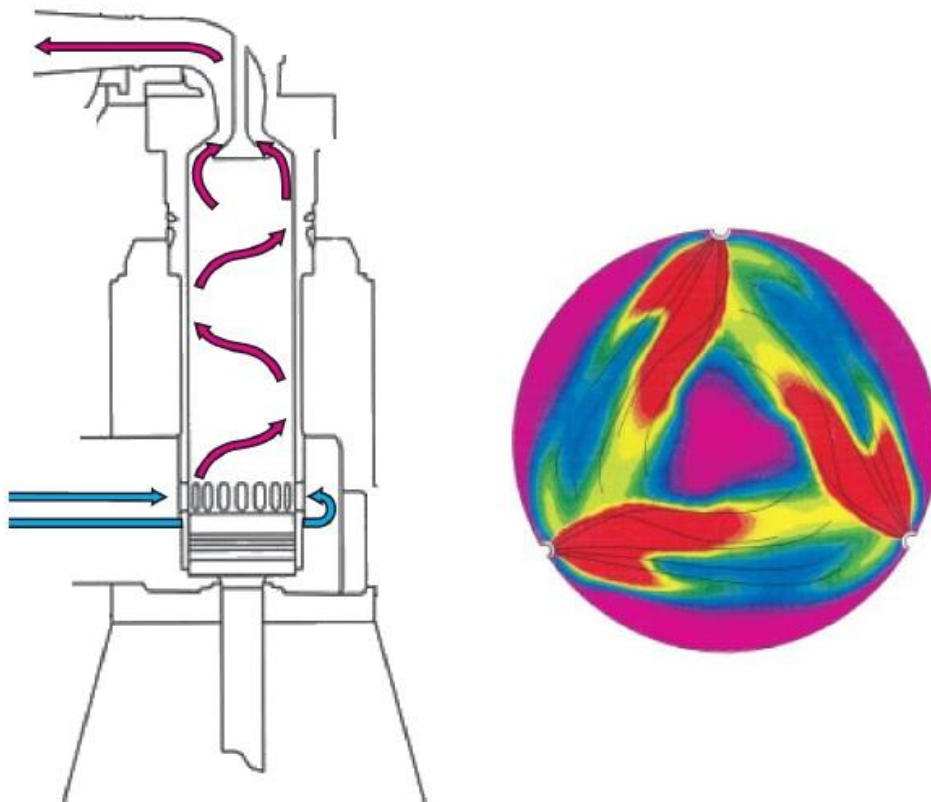
Οι σύγχρονοι 2X diesel κινητήρες πλοίων, χρησιμοποιούν ευθείας ροής σάρωση (uniflow scavenging) με θυρίδες εισαγωγής και μία κεντρικά τοποθετημένη βαλβίδα εξαγωγής. Σε αυτούς τους κινητήρες υπάρχουν συνήθως από 2 έως 4 εγχυτήρες τοποθετημένοι περιμετρικά του θαλάμου καύσης.

Εκτός από την πρόσδωση από το σύστημα έγχυσης, η ενέργεια για την ανάμειξη αέρα – καυσίμου εξαρτάται σημαντικά και από την αλληλεπίδραση της δέσμης του καυσίμου με την ροή του αερίου στο θάλαμο καύσης. Ο στροβιλισμός (swirl) είναι η περιστροφική κίνηση του αερίου γύρω από τον άξονα του κυλίνδρου. Η κίνηση αυτή του αερίου δημιουργείται από τη μορφή των αυλών ή θυρίδων εισαγωγής. Η εκτοπιστική ροή (squish) δημιουργείται καθώς το έμβολο πλησιάζει το ΑΝΣ εκτοπίζοντας το αέριο προς το θάλαμο καύσης. Και ο

στροβιλισμός και η εκτοπιστική κίνηση του αερίου βελτιώνουν την ανάμιξη του καυσίμου με το αέριο.

Οι μεσόστροφες 4X ναυτικές μηχανές σε σχέση με τις ταχύστροφες, συνήθως χρησιμοποιούν χαμηλότερο λόγο στροβιλισμού του αερίου και πιο ρηχές κοιλότητες εμβόλου. Το πλεονέκτημα της δημιουργίας χαμηλής περιδίνησης είναι ο αυξημένος βαθμός πλήρωσης, καθώς η δημιουργία κάθε τύπου μεγάλης δομής κίνησης του αερίου μέσα στον κύλινδρο συνοδεύεται από αυξημένες απώλειες ροής. Σε αυτή την περίπτωση η ενέργεια για την ανάμιξη καυσίμου – αερίου παρέχεται κυρίως από την έγχυση του καυσίμου.

Οι πολύ μεγάλοι δίχρονοι κινητήρες από την άλλη πλευρά έχουν ισχυρό στροβιλισμό εξαιτίας της διαδικασίας απόπλυσης του κυλίνδρου. Συνήθως χρησιμοποιούνται πολύ ρηχές κοιλότητες εμβόλου με διάμετρο ίση με την διάμετρο του εμβόλου, εξαιτίας της περιφερειακής τοποθέτησης των εγχυτήρων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι κινητήρες αυτοί να έχουν χαμηλή ένταση εκτοπιστικής ροής (squish) [7].



Σχήμα 2.19: Δημιουργία στροβιλισμού (swirl) σε θάλαμο καύσης μεγάλου δίχρονου κινητήρα και κάτοψη έγχυσης σε θάλαμο καύσης με 3 περιφερειακά τοποθετημένους εγχυτήρες [7].

### 2.4.3 Λόγος αέρα – καυσίμου

Ο λόγος αέρα – καυσίμου AFR (Air Fuel Ratio) είναι η κατά μάζα αναλογία αέρα καυσίμου, με την οποία αναμιγνύονται αυτά για την καύση σε μία ΜΕΚ (ή σε οποιαδήποτε μορφή καύσης), και δίνεται από τη σχέση [6]:

$$AFR = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (2.10)$$

### Στοιχειομετρική αναλογία αέρα – καυσίμου ( $AFR_{st}$ )

Γενικά καύση ονομάζουμε την χημική αντίδραση ενός καυσίμου με το οξυγόνο ( $O_2$ ), με παραγωγή θερμότητας. Τα μόρια των καθαρών υδρογονανθράκων αποτελούνται μόνο από άτομα άνθρακα (C) και υδρογόνου (H). Στην περίπτωση των ΜΕΚ, το οξυγόνο παρέχεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Τέλεια καύση υδρογονάνθρακα ονομάζεται η καύση εκείνη κατά την οποία τα μοναδικά παράγωγα είναι διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) και νερό ( $H_2O$ ).

Από τη χημική εξίσωση της τέλει καύσης, έχοντας γνωστά τα μοριακά βάρη καθώς και το ποσοστό οξυγόνου στον ατμοσφαιρικό αέρα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη στοιχειομετρική αναλογία αέρα καυσίμου ( $AFR_{st}$ ) από τη παρακάτω σχέση [6]:

$$AFR_{st} = \frac{\frac{1}{0,232} * \left[ \left( n + \frac{m}{4} \right) * 32 \right]}{n * 12 + m * 1} \quad (2.11)$$

Όπου:

- n: τα άτομα C του συγκεκριμένου υδρογονάνθρακα
- m: τα άτομα H του συγκεκριμένου υδρογονάνθρακα

Προκύπτει ότι για τα καύσιμα των συμβατικών πετρελαιομηχανών HFO & MDO, ο  $AFR_{st}$  είναι 14,3 & 14,5 κατ' αντιστοιχία. Στο παράρτημα της εργασίας υπάρχουν αναλυτικά πληροφορίες για διάφορους υδρογονάνθρακες συμπεριλαμβανομένου και του μεθανίου  $CH_4$  που χρησιμοποιείται στις μηχανές αερίου & διπλού καυσίμου.

### Λόγος ισοδυναμίας $\lambda$

Λόγος ισοδυναμίας  $\lambda$  (ή λόγος αέρα) ονομάζεται ο λόγος του πραγματικού λόγου αέρα – καυσίμου AFR, με τον οποίο λειτουργεί ο κινητήρας προς την στοιχειομετρική αναλογία του καυσίμου AFR<sub>st</sub>. Δηλαδή [6]:

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{st}} \quad (2.12)$$

Εάν:

- $\lambda = 1$  σημαίνει ότι  $AFR = AFR_{st}$  δηλαδή το μίγμα είναι στοιχειομετρικό
- $\lambda < 1$  σημαίνει ότι  $AFR < AFR_{st}$  δηλαδή το μίγμα είναι “πλούσιο”, δηλαδή έχει περισσότερο καύσιμο από ότι θα είχε εάν είχε στοιχειομετρική αναλογία.
- $\lambda > 1$  σημαίνει ότι  $AFR > AFR_{st}$  δηλαδή το μίγμα είναι “φτωχό”, δηλαδή έχει λιγότερο καύσιμο από ότι θα είχε εάν είχε στοιχειομετρική αναλογία. Υπάρχει δηλαδή περίσσεια αέρα.

#### 2.4.4 Υπολογισμός ποσότητας ψεκασμού

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε να υπολογίσουμε την θεωρητική ποσότητα ψεκασμού με τον εξής τύπο:

$$m_{fuel} = \frac{Vh * \rho_{air}}{AFR} \quad (2.13)$$

Ο παραπάνω τύπος μπορεί να μας βοηθήσει κατά την εκλογή των μπεκ, εάν προστεθεί και ένας διορθωτικός συντελεστής για τη προσέγγιση της πραγματικής λειτουργίας. Στις μηχανές Diesel συνήθως έχουμε πολύ φτωχό μίγμα (δηλαδή  $\lambda \gg 1$ ). Για τον υπολογισμό ατμοσφαιρικού κινητήρα, η πυκνότητα του αέρα είναι περίπου 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Σε περίπτωση που έχουμε υπερπλήρωση θα πρέπει να βρεθεί η νέα πυκνότητα μέσα από την εφαρμογή της καταστατικής εξίσωσης των αερίων:

$$\rho_{turbo} = \frac{p}{287 * T} \quad (2.14)$$



## 2.5 ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ

Η αύξηση της ισχύος ενός κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- Αύξηση του ενεργειακού περιεχομένου του καυσίμου. Όμως η χρήση καυσίμων υψηλής ενέργειας, καθώς και εκρηκτικών προσθέτων είναι περιορισμένη για προφανείς λόγους.
- Αύξηση της παροχής καυσίμου. Τα καύσιμα όμως καίγονται όταν ο AFR βρίσκεται εντός συγκεκριμένων ορίων και επειδή η ποσότητα του αέρα είναι σημαντικά περισσότερη, η παραπάνω απαίτηση μετατρέπεται σε:
- Αύξηση της παροχής αέρα.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μια σειρά μεθόδων:

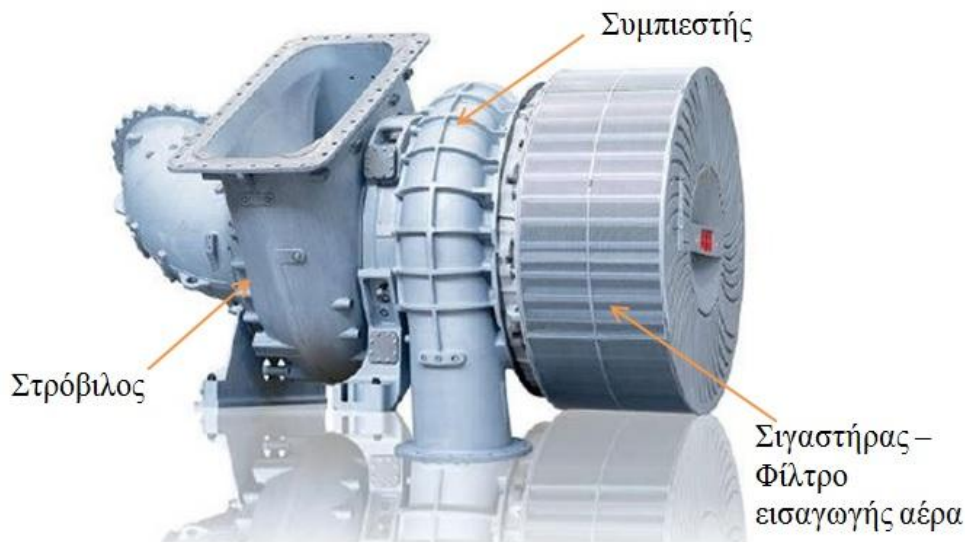
1. Με αύξηση του κυβισμού του κινητήρα. Υπάρχουν όμως περιορισμοί μεγέθους και βάρους.
2. Με αύξηση των στροφών του κινητήρα. Προκύπτουν πιθανές επιπτώσεις στον ογκομετρικό βαθμό απόδοσης και τελικά υπάρχουν περιορισμοί λόγω φορτίσεων της κατασκευής.
3. Με βελτίωση της αναπνοής του κινητήρα.
  - Με προσεκτική σχεδίαση της διαδρομής της ροής από την εισαγωγή ως την εξαγωγή (ροϊκή εξέλιξη).
  - Με αύξηση της πυκνότητας του εισερχόμενου αέρα μέσω συμπίεσεως (υπερπλήρωση).

Στους θερμοδυναμικούς κύκλους που πρακτικά λειτουργούν οι κινητήρες, τα καυσαέρια δεν εξάγονται σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, και έτσι ένα μέρος της ενέργειας χάνεται στην εξαγωγή.

Για να μειωθεί το ποσοστό απορριπτόμενης ενέργειας ή για να βελτιωθεί ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα, μπορεί να γίνει ανάκτηση της ενέργειας των καυσαερίων μέσω περαιτέρω εκτονώσεως.

Ένας αεριοστρόβιλος ισχύος μπορεί να συνδεθεί και να κινήσει ένα συμπιεστή που θα χρησιμοποιείται για να υπερπληρώσει τον κινητήρα. Ο στροβιλο-υπερπληρωτής (turbocharger) αυξάνει την παροχή και πυκνότητα αέρα στον κύλινδρο, πράγμα που επιτρέπει την έγχυση περισσότερου καυσίμου, ώστε να αυξηθεί η ισχύς, διατηρώντας το ίδιο μέγεθος κινητήρα (αύξηση της ειδικής ισχύος). Ο στροβιλο-υπερπληρωτής είναι προτιμότερος από τον εξαρτημένο μηχανικό υπερπληρωτή (supercharger) που κινείται από τον άξονα του κινητήρα με μηχανική σύνδεση, διότι η αύξηση ισχύος στην περίπτωση του turbocharger γίνεται χωρίς μείωση του βαθμού απόδοσης.

Στις μέρες μας, σχεδόν κανένας κινητήρας υψηλών επιδόσεων δεν παράγεται χωρίς στροβιλο-υπερπληρωτές. Στη ναυτιλία, ο στροβιλο-υπερπληρούμενος κινητήρας κυριαρχεί απόλυτα και σαν κύρια 2X μηχανή (βραδύστροφη), αλλά και σαν βοηθητική 4X μηχανή (μεσόστροφη).



Σχήμα 2.20: Στροβιλο-υπερπληρωτής (turbocharger) μεγάλου ναυτικού κινητήρα [8].

Ο συμπιεστής πρέπει να παρέχει μεγάλες ποσότητες αέρα σε μέτρια πίεση και μεγάλο φάσμα παροχών. Οι απαιτήσεις αυτές καλύπτονται από περιστροφικούς συμπιεστές δυναμικού τύπου, τους λεγόμενους φυγοκεντρικούς συμπιεστές.

Τα ίδια ισχύουν και για τη “μηχανή εκτόνωσης”, που επιπλέον πρέπει να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες των καυσαερίων, διατηρώντας μεγάλη αξιοπιστία λειτουργίας. Μόνο αξονικοί και ακτινικοί στρόβιλοι μπορούν να καλύψουν αυτές τις απαιτήσεις.

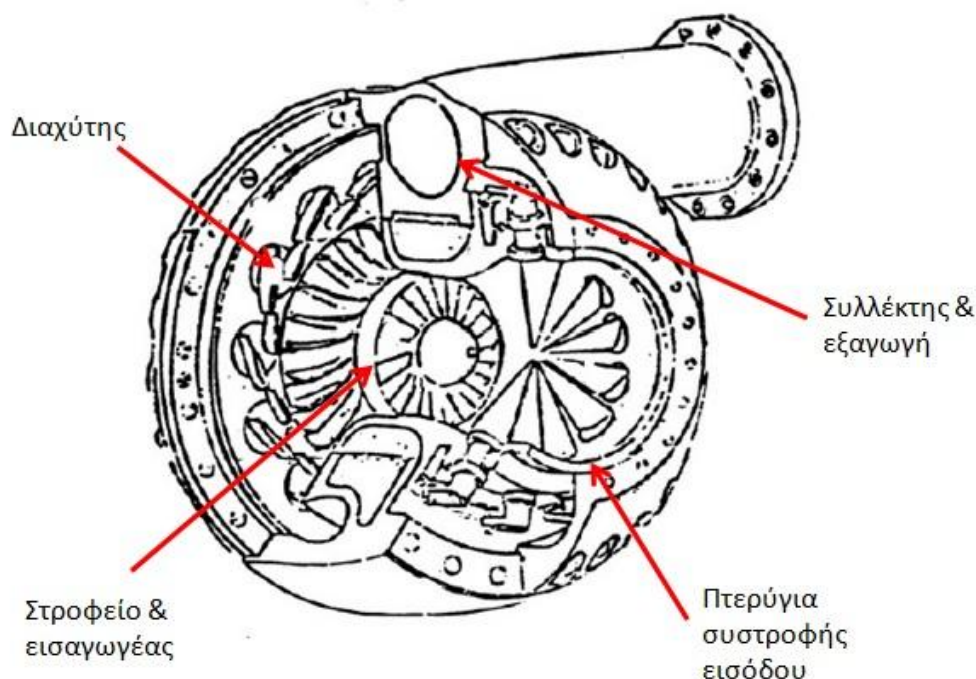
Για την επίτευξη μεγάλων παροχών, συμπιεστές & στρόβιλοι περιστρέφονται με μεγάλες ταχύτητες. Γενικά οι στροβιλο-υπερπληρωτές αποτελούνται συνήθως από ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή και από ένα στρόβιλο ακτινικό (για μικρά μεγέθη) ή αξονικό (για μεγαλύτερα μεγέθη), σε κοινό άξονα [5].

### 2.5.1 Συμπιεστές

Σε εφαρμογές υπερπλήρωσης χρησιμοποιούνται αποκλειστικά φυγοκεντρικοί συμπιεστές. Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές έχουν το πλεονέκτημα να επιτυγχάνουν σημαντικά υψηλότερους λόγους πίεσεως ανά βαθμίδα (έως 10:1), οπότε καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο (compact). Επίσης, σε μικρά μεγέθη είναι φθηνότεροι και ευκολότεροι στη κατασκευή με χύτευση. Όμως σε μεγάλα μεγέθη απαιτούν πολύπλοκη μηχανουργική επεξεργασία, που γίνεται με εργαλειομηχανές CNC. Οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές είναι πιο στιβαροί στην κατασκευή,

οπότε έχουν μεγαλύτερη αντοχή στη μηχανική διάβρωση, αλλά έχουν και μεγαλύτερη ροπή αδρανείας. Επίσης έχουν ευρύτερη περιοχή σταθερής λειτουργίας αλλά μικρότερο βαθμό αποδόσεως στη σημείο σχεδιασμού και μικρότερη παροχή ανά μονάδα διατομής εισόδου. Είναι δυσκολότερο να σχεδιασθούν λόγω της 3-διάστατης ροής που είναι μερικά αποκολλημένη στο ακτινικό τμήμα του συμπιεστή.

Ένας φυγοκεντρικός συμπιεστής αποτελείται ουσιαστικά από το στροφέιο (περιστρεφόμενο μέρος) και τον διαχύτη (ή ακίνητη περωτή). Τα διάφορα εξαρτήματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Το υλικό κατασκευής είναι συνήθως κράματα αλουμινίου, ενώ για υψηλές πιέσεις χρησιμοποιείται το τιτάνιο.



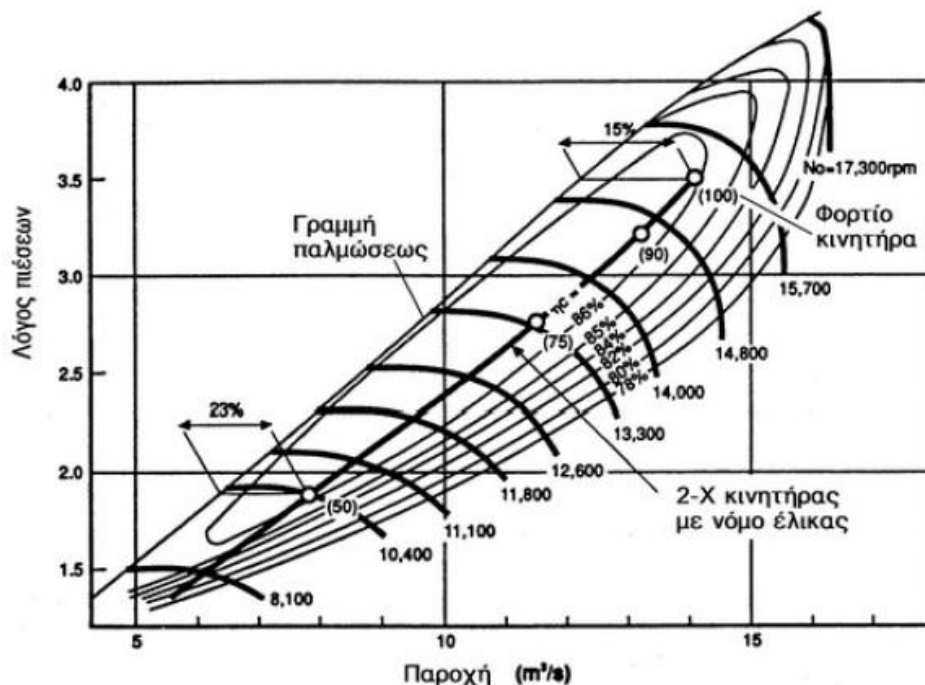
Σχήμα 2.21: Διατομή ενός φυγοκεντρικού συμπιεστή συστήματος υπερπλήρωσης [8].

Ο αέρας αναρροφάται μέσω ενός φίλτρου (αν υπάρχει) και μέσω των πτερυγίων συστροφής εισόδου (pre-whirl inlet guide vanes) προς το “μάτι” του στροφείου. Στην είσοδο του στροφείου η ροή οδηγείται προς τους οχετούς του στροφείου (impeller channels) μέσω του εισαγωγέα. Το στροφέιο αυξάνει την ενέργεια του ρευστού εκτοξεύοντας το ακτινικά και αυξάνοντας έτσι τη γωνιακή ορμή του. Η στατική πίεση καθώς και η ταχύτητα του ρευστού αυξάνονται κατά τη διέλευση από το στροφέιο. Ο διαχύτης έπειτα μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ρευστού σε πίεση, και η κλίση των πτερυγίων του καθορίζει την αύξηση αυτής της πίεσης. Μετά το διαχύτη υπάρχει ένας συλλέκτης της ροής που την οδηγεί προς το σωλήνα εξόδου.

Η εσωτερική ροή στους φυγοκεντρικούς συμπιεστές είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, διότι είναι σαφώς 3-διάστατη με μεγάλη επίδραση ιξώδους. Συνήθως έχει περιοχή αποκόλλησης και συχνά είναι ασταθής.

Οι επιδόσεις ενός συμπιεστή συνήθως παρουσιάζονται σε διάγραμμα με καμπύλες σταθερού αριθμού στροφών σε άξονες λόγου πιέσεων και παροχής. Συνήθως παρουσιάζονται και ισοϋψείς καμπύλες βαθμού απόδοσης.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του συμπιεστή λαμβάνονται πειραματικά, στραγγαλίζοντας τη ροή εξόδου, άρα μειώνοντας την παροχή και διατηρώντας τον αριθμό στροφών σταθερό. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας τυπικός χάρτης επιδόσεως συμπιεστή. Ο νόμος της έλικας ουσιαστικά είναι η απαιτούμενη ισχύς σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του ελικοφόρου για την πρόωση του πλοίου.



Σχήμα 2.22: Χάρτης επιδόσεων συμπιεστή με γραμμή λειτουργίας για ναυτικό κινητήρα [8].

Η κάθε καμπύλη σταθερού αριθμού στροφών σταματά στις μικρές παροχές στο όριο σταθερής λειτουργίας του συμπιεστή. Ο γεωμετρικός τόπος όλων των ορίων για διάφορους αριθμούς στροφών καλείται γραμμή απώλειας στηρίξεως (stall) ή πάλμωσης (surge line).

Η θέση της μέγιστης παροχής σε συγκεκριμένο αριθμό στροφών καλείται όριο στραγγαλισμού (chocking limit), όπου μεγαλύτερη παροχή μπορεί να επιτευχθεί μόνον με αύξηση των στροφών, παρόλο που αν η ροή στο διαχύτη έχει πλησιάσει τις ηχητικές συνθήκες, αύξηση των στροφών επιφέρει μόνο μικρή αύξηση της παροχής.

Η χρήσιμη περιοχή σταθερής λειτουργίας του συμπιεστή βρίσκεται μεταξύ των δύο αυτών ορίων.

Το σημείο σχεδιασμού στον χάρτη επιδόσεων είναι το σημείο λειτουργίας πάνω στο οποίο εφαρμόστηκαν τα διάφορα αεροδυναμικά κριτήρια κατά το σχεδιασμό και συνήθως είναι πάνω ή πολύ κοντά στην περιοχή μέγιστου βαθμού αποδόσεως. Αυτή η περιοχή συνήθως είναι παράλληλη και κοντά στη γραμμή πάλμωσης.

Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων λειτουργίας ενός συμπιεστή σε ένα σύστημα συμπίεσεως για διάφορους αριθμούς στροφών αποτελεί τη γραμμή λειτουργίας. Η θέση της γραμμής λειτουργίας στο χάρτη επιδόσεων του συμπιεστή, δείχνει εάν ο συμπιεστής στο συγκεκριμένο σύστημα εργάζεται μέσα στην περιοχή σταθερής λειτουργίας του, καθώς και τη θέση των σημείων λειτουργίας σε σχέση με τις ισοϋψείς βαθμού απόδοσης [5].

### **Αστάθεια συμπιεστή**

Κατά την κανονική λειτουργία ενός συμπιεστή η ροή είναι (μακροσκοπικά) σταθερή, εκτός από τις διαφορές πίεσεως και ταχυτήτων στον οχετό μεταξύ των πτερυγίων και την παρουσία δευτερευουσών ροών με αστάθειες μικρής κλίμακας.

Καθώς η ροή διαμέσου του συμπιεστή στραγγαλίζεται από το σημείο σχεδιασμού προς χαμηλότερες παροχές, η σταθερή ροή γίνεται ασταθής, διότι η ενέργεια του ρευστού δεν αρκεί για να συγκρατήσει το πεδίο πίεσεως που έχει δημιουργηθεί στην έξοδο του συμπιεστή και στο σύστημα σωληνώσεων κατόπιν μέχρι τη βαλβίδα στραγγαλισμού.

Η ασταθής λειτουργία ενός συμπιεστή μπορεί να διαχωριστεί σε δύο μορφές:

- Αστάθεια βαθμίδας (απώλεια στηρίξεως – stall)
- Αστάθεια συστήματος (κυματισμός/πάλμωση – surge)

Στο χάρτη επιδόσεων του συμπιεστή η περιοχή αστάθειας της ροής είναι αριστερά της περιοχής πάλμωσης. Ανάλογα με τον τύπο του συμπιεστή, καθώς και τα χαρακτηριστικά του συστήματος συμπίεσεως, αν το σημείο λειτουργίας εισέλθει σε αυτή τη περιοχή, πιθανόν να υπάρξουν μεγάλες ταλαντώσεις της παροχής (κυματισμός), ή κυψέλες ροής με σοβαρές παραμορφώσεις ή αναστροφές της ροής, οι οποίες πιθανόν να περιστρέφονται σε σχέση με το στροφέιο (περιστρεφόμενη απώλεια στηρίξεως) ή και συνδυασμός τέτοιων φαινομένων.

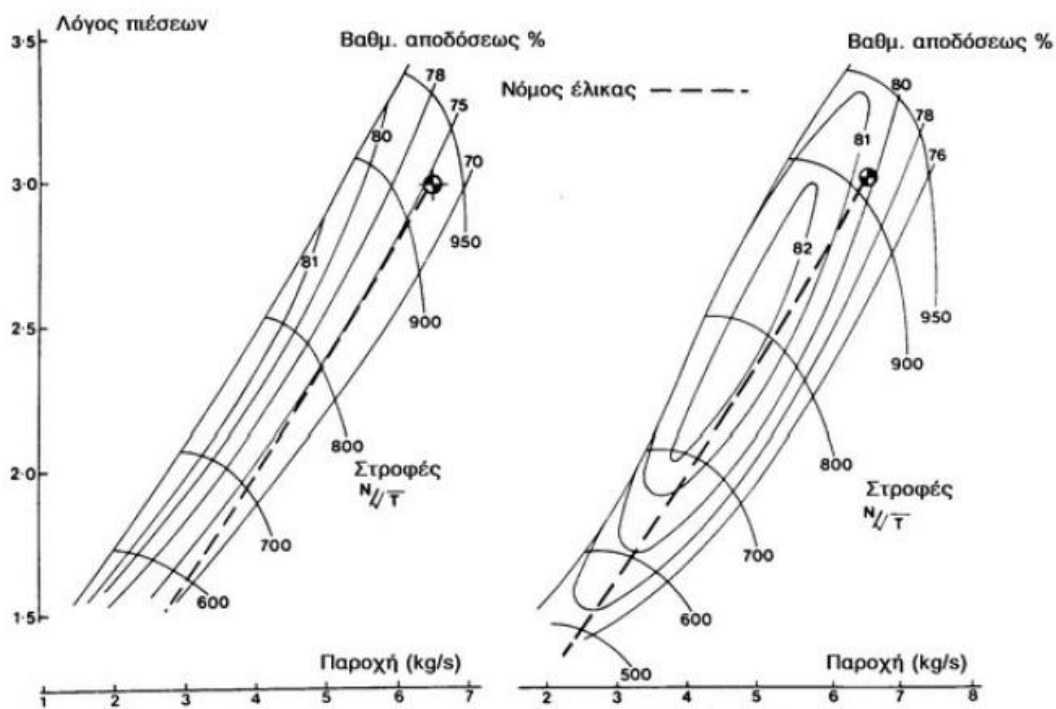
Όπως προαναφέρθηκε, σε φυγόκεντρους συμπιεστές υπάρχει πάντα αποκόλληση και απώλεια στηρίξεως της ροής στον οχετό στο άνω μέρος της πλευράς αναρροφήσεως των πτερυγίων. Αυτή η αστάθεια μπορεί να επεκταθεί σε όλο το μήκος του οχετού και να παρατηρηθεί μερική, ή στιγμιαία ολική, αντιστροφή της ροής διαμέσου του συμπιεστή.

Ο συμπιεστής αδυνατεί υπό αυτές τις συνθήκες να συντηρήσει τον υπό κανονικές συνθήκες λόγο πίεσεως στα άκρα του και περιοδικά αποσταθεροποιείται, επιτρέποντας στην κατεύθυνση της ροής να αντιστραφεί.

Η εξέλιξη αυτή της ροής κατά την ολική απώλεια στηρίξεως είναι θορυβώδης και συχνά βίαιη και συνήθως παρατηρείται κυκλική επανάληψη του φαινομένου, λόγω παρουσίας υστερήσεως του συστήματος συμπίεσεως.

Σε ορισμένες περιπτώσεις ο κυματισμός είναι ήπιος, με χαμηλή ένταση θορύβου, που προέρχεται από τις απότομες αυξομειώσεις πίεσεως. Σε άλλες περιπτώσεις ο κυματισμός είναι τόσο βίαιος, ώστε η αντίστροφη ροή διαμέσου του στροφείου παράγει μια βίαιη αντιστροφή ροπής, η οποία προκαλεί μεγάλες καταπονήσεις πτερυγίων, κραδασμούς, και μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα περιστρεφόμενα μέρη.

Συμπερασματικά, ανεξάρτητα τι τύπου αστάθεια παρουσιάζεται όταν η γραμμή πάλμωσης πλησιάζεται, η γραμμή αυτή γενικά αποτελεί όριο στη χρήσιμη (σταθερή) λειτουργία του συμπιεστή και η προσέγγισή της πρέπει να αποφεύγεται. Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε ότι ο δεύτερος συμπιεστής έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης, όμως βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο αναστροφής. Έτσι είναι ορθότερο να επιλέξουμε τον πρώτο συμπιεστή, ο οποίος αν και με χαμηλότερο βαθμό απόδοσης βρίσκεται σε ασφαλή περιοχή λειτουργίας.



Σχήμα 2.23: Συγκριτικό διάγραμμα δύο φυγοκεντρικών συμπιεστών [8].

Η θέση της γραμμής απώλειας στηρίξεως σε σχέση με τη γραμμή λειτουργίας και η ύπαρξη αρκετού περιθωρίου μεταξύ τους είναι θέμα πολύ σημαντικό στις εφαρμογές συμπιεστών.

Και σε αυτή την περίπτωση όμως, υπάρχουν συνθήκες κάτω από τις οποίες πιθανόν να παρουσιαστεί αστάθεια, όπως επιταχύνσεις ή επιβραδύνσεις του στροφείου, παραμορφώσεις της ροής εισόδου και ταλαντώσεις της παροχής εισόδου ή εξόδου.

Για να υπάρξει η αναγκαία ευελιξία στις εφαρμογές, το εύρος της περιοχής σταθερής λειτουργίας ενός συμπιεστή πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερο. Το εύρος αυτό μειώνεται δραστικά όσο αυξάνεται η ταχύτητα του άκρου του στροφείου και έτσι οι συμπιεστές υψηλού λόγου πίεσεως έχουν εξαιρετικά περιορισμένη περιοχή σταθερής λειτουργίας.

Όταν ο συμπιεστής είναι συνδεδεμένος με την εισαγωγή (ή το δοχείο εισαγωγής) ενός κινητήρα, οι διακυμάνσεις της παροχής μέσω του κινητήρα μπορεί να μετακινήσουν το στιγμιαίο σημείο λειτουργίας πολύ κοντά στη γραμμή παλμών. Η ευαισθησία είναι μεγαλύτερη σε χαμηλές συχνότητες και μεγάλα εύρη διακυμάνσεων, οπότε σε μεγάλες μηχανές με μικρό αριθμό κυλίνδρων που λειτουργούν σε χαμηλές στροφές, όπως οι μεγάλες ναυτικές μηχανές, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για μεγαλύτερα περιθώρια προσεγγίσεως στη γραμμή πάλμωσης.

Σε μηχανές με δύο υπερπληρωτές συχνά υπάρχουν και δύο θάλαμοι εισαγωγής συνδεδεμένοι με στένωση, διότι σε κοινό θάλαμο υπάρχει περίπτωση ο ένας συμπιεστής λόγω διακυμάνσεων στις στροφές, ή ελαφρώς διαφορετικών χαρακτηριστικών λειτουργίας να ωθήσει τον άλλο συμπιεστή σε πάλμωση [5].

### **Αύξηση περιοχής λειτουργίας & προσαρμογή συμπιεστών**

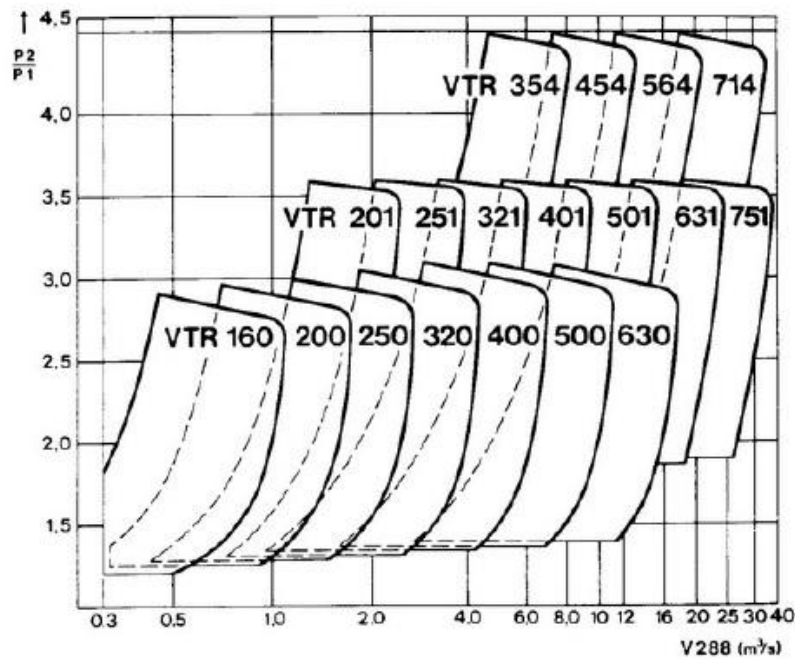
Η περιοχή χρήσιμης λειτουργίας σε παροχή ενός συμπιεστή εξαρτάται από το λόγο πίεσεων και γενικά οι συμπιεστές με υψηλό λόγο πίεσεων ανά βαθμίδα έχουν και σχετικά περιορισμένη περιοχή λειτουργίας, διότι οι αεροδυναμικές επιφάνειες είναι ιδιαίτερα φορτισμένες και μικρές αποκλίσεις από το σημείο σχεδιασμού δε γίνονται ανεκτές.

Η επιλογή διαχύτη επίσης παίζει ρόλο στο εύρος λειτουργίας και γενικά ένας πτερυγώδης διαχύτης προσφέρει μικρότερο εύρος, αλλά μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.

Τέλος, καλύτερη αεροδυναμική σχεδίαση του στροφείου με περισσότερο ομοιογενή ροή στην έξοδο προς το διαχύτη βοηθά στη μετακίνηση της γραμμής πάλμωσης σε χαμηλότερες παροχές.

Μια άλλη μέθοδος για αύξηση του εύρους λειτουργίας είναι η χρήση μεταβλητής γεωμετρίας συμπιεστή. Αυτό βέβαια δε μπορεί να γίνει στο στροφείο το οποίο περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί είτε στην είσοδο του στροφείου με πτερύγια μεταβολής της γωνίας εισόδου (variable inlet guide vanes), είτε με διαχύτη μεταβλητής γεωμετρίας μέσω αλλαγής κλίσης των πτερυγίων (variable diffuser vanes). Έτσι, σε κάθε θέση των πτερυγίων μπορεί να ληφθεί ένας νέος χάρτης επιδόσεων του συμπιεστή. Το μειονέκτημα είναι ότι η μεταβολή της γεωμετρίας προϋποθέτει κάποιον μηχανισμό ακριβείας και επειδή οι κινήσεις είναι σχετικά μικρές η αξιοπιστία μπορεί να επηρεαστεί από τη “ρύπανση” κατά τη λειτουργία.

Σχετικά με τη προσαρμογή των συμπιεστών (trimming), οι κατασκευαστές συνήθως προσφέρουν μια “οικογένεια” από στροφεία και διαχύτες που οι συνδιασμοί τους καλύπτουν μια ευρεία περιοχή παροχών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.24: Εύρος κάλυψης παροχών/πίεσεων οικογένειας συμπιεστών [8].

Αυτό μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

1. Μεταβολή των πτερυγίων προ-περιστροφής εισόδου (αν υπάρχουν).
2. Μείωση του ύψους του οχετού του στροφείου και του διαχύτη.
3. Αλλαγή της γωνίας των πτερυγίων του διαχύτη με αλλαγή δακτυλίου διαχύτη.
4. Βράχυνση των πτερυγίων διαχύτη.

Η τρίτη μέθοδος είναι η πιο κοινή σε ναυτικούς κινητήρες [5].

### 2.5.2 Στρόβιλοι

Ο στρόβιλος παράγει έργο εξάγοντας ενέργεια από εκτόνωση ρευστού που βρίσκεται σε υψηλή πίεση. Ανάλογα με τη διεύθυνση του ρευστού μέσα στο στρόβιλο υπάρχουν ακτινικοί και αξονικοί στρόβιλοι.

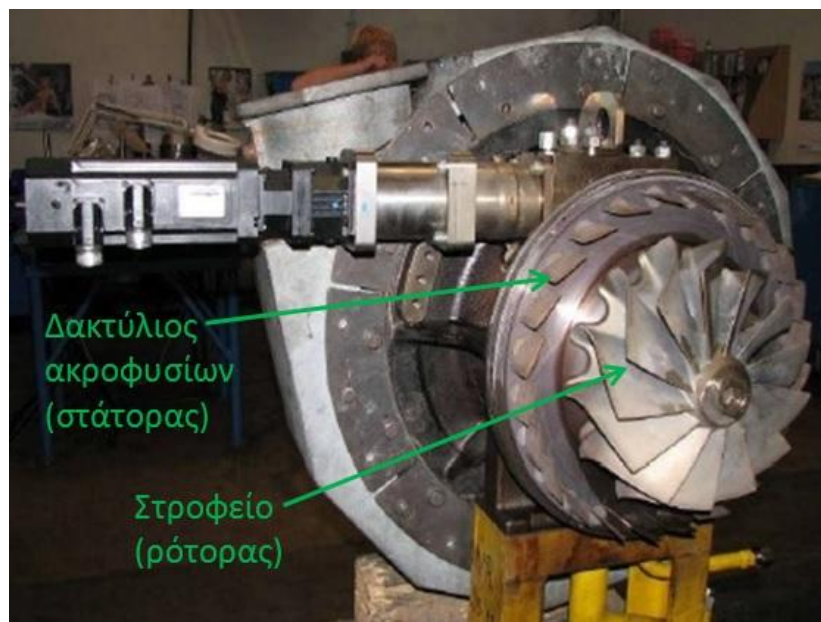
Η μεταφορά ενέργειας γίνεται είτε με αλλαγή της διεύθυνσεως του ρευστού, το οποίο έχει επιταχυνθεί σε ακροφύσιο (στρόβιλοι δράσεως) ή με εκτόνωση και περαιτέρω επιτάχυνση του ρευστού στο στροφείο (στρόβιλοι αντιδράσεως), ή συνηθέστερα με συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδων.



Γενικά οι ακτινικοί στρόβιλοι (ή κεντρομόλοι) συνήθως χρησιμοποιούνται σε περιοχή παροχών από 0,1 – 2 kg/s με λόγους εκτονώσεως 2,5 – 4 και έτσι εφαρμόζονται σε στροβιλο-υπερπλήρωση μικρών κινητήρων. Οι ακτινικοί στρόβιλοι μοιάζουν με φυγοκεντρικούς συμπιεστές, με τα ακροφύσια να αντιστοιχούν στον διαχύτη. Μάλιστα ένας φυγοκεντρικός συμπιεστής αν περιστραφεί ανάποδα θα λειτουργήσει σαν ακτινικός στρόβιλος με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Οι στρόβιλοι αυτοί, διατηρούν σχετικά υψηλό βαθμό απόδοσης ακόμα και σε πολύ μικρά μεγέθη.

Οι αξονικοί στρόβιλοι συνήθως χρησιμοποιούνται σε περιοχή παροχών από 2 – 15 kg/s με λόγους εκτονώσεως 2,5 – 3,5. Σε χαμηλότερες παροχές οι απώλειες άκρου των βραχυτάτων πτερυγίων αυξάνονται σημαντικά. Στις περισσότερες εφαρμογές μεσόστροφων και αργόστροφων ναυτικών μηχανών χρησιμοποιούνται αξονικοί στρόβιλοι.

Σε εφαρμογές στροβιλο-υπερπλήρωσης μια βαθμίδα δακτύλιου ακροφυσίων (στάτορας) και στροφείο (ρότορας) αρκεί για την εκτόνωση των καυσαερίων υπερπληρωμένων κινητήρων μιας βαθμίδας. Σε ειδικές περιπτώσεις πολύ υψηλών λόγων πίεσεως έχουν χρησιμοποιηθεί δύο στροβιλο-υπερπληρωτές με συμπιεστές & στροβίλους εν σειρά (two-stage turbo-charging).



Σχήμα 2.25: Σχηματική αναπαράσταση εργαστηριακού στροβίλου [8].

Πρέπει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση του στροβίλου, εκτός από τα προβλήματα αντοχής υλικών με την υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων η οποία κυμαίνεται [8]:

- 2X κύκλος Diesel  $\approx 400^{\circ}\text{C}$
- 4X κύκλος Diesel  $\approx 500^{\circ}\text{C}$
- Κύκλος Otto  $\approx 800^{\circ}\text{C}$

Η πίεση μειώνεται στους οχετούς των πτερυγίων του στροβίλου, σε αντίθεση με τον συμπίεστή που επιδιώκεται συνεχής διάχυση της ροής και αύξηση της πίεσεως. Η πτώση πίεσεως μειώνει το πάχος του οριακού στρώματος και το σταθεροποιεί, ανακουφίζοντας τα προβλήματα αποκολλήσεως και έτσι η ρευστοδυναμική σχεδίαση των στροβίλων είναι λιγότερο απαιτητική από αυτή των συμπίεστών [5].

### **Επιδόσεις λειτουργίας στροβίλου**

Σε εφαρμογές στροβιλο-υπερπληρωτών για λόγους κατασκευαστικής οικονομίας μία βασική σχεδίαση στροβίλου προσαρμόζεται σε διάφορες απαιτήσεις παροχών και άρα σε διάφορα μεγέθη κινητήρων, μεταβάλλοντας το όριο στραγγαλισμού (chocking limit) μέσω μεταβολής του δακτυλίου ακροφυσίων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους:

1. Αλλαγή της γωνίας των πτερυγίων ακροφυσίων
2. Βράχυνση των πτερυγίων ακροφυσίων κατά μήκος
3. Βράχυνση των πτερυγίων ακροφυσίων & στροφείου καθ' ύψος

Επειδή ο τρίτος τρόπος παρέχει την μεγαλύτερη αλλαγή, οι κατασκευαστές στροβιλο-υπερπληρωτών (A.B.B, M.A.N, Mitsubishi κλπ) συνήθως προσφέρουν ένα βασικό τύπο στροφείου με δύο-τρία ύψη πτερυγίων, που καλύπτουν μεγάλο εύρος μεγεθών κινητήρων, καθώς επίσης για κάθε ύψος διάφορους δακτύλιους ακροφυσίων.

Ένας τρόπος να αυξηθούν οι επιδόσεις ενός στροβίλου είναι να εφαρμοσθεί ένας διαχύτης στην έξοδο του. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας των καυσαερίων που αλλιώς θα χανόταν λόγω αναμίξεως στον κατάντι οχετό. Με τον διαχύτη ο στροβίλος αντιλαμβάνεται ότι εργάζεται σε μεγαλύτερο λόγο εκτονώσεως και η ισχύς του αυξάνεται. Σημειώνεται εδώ ότι οι διαχύτες εφαρμόζονται και στον αυλό καυσαερίων μεγάλων κινητήρων με σύστημα σταθερής πίεσης ώστε να χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια των καυσαερίων, μετατρεπόμενη ομαλά σε αύξηση της πίεσης στο δοχείο καυσαερίων πριν το στροβίλο [5].

### **Τάσεις & ταλαντώσεις πτερυγίων στροβίλου**

Η σχεδίαση των πτερυγίων στροβίλου δεν βασίζεται μόνο σε ρευστοδυναμικές απαιτήσεις αλλά και σε κριτήρια τάσεων και αντοχής υλικών. Το μέγεθος και το σχήμα των πτερυγίων, καθώς και οι μέγιστες στροφές, επηρεάζονται από τις τάσεις στο δίσκο και τα πτερύγια. Επίσης εκτός από τα προβλήματα τάσεων, σε περιπτώσεις στροβιλοπληρώσεως παλμών, δημιουργούνται ταλαντώσεις στα πτερύγια. Όταν λέμε παλμούς εννοούμε την παλλόμενη ροή (όχι συνεχής) που δημιουργείτε από τον τρόπο λειτουργίας της μηχανής (χρόνος εξαγωγής ανά κύλινδρο).

Η στήριξη των πτερυγίων αξονικών στροβίλων στο δίσκο έχει πλέον καθιερωθεί να γίνεται χρησιμοποιώντας την ελατοειδή βάση (fir-tree root). Γενικά η σχεδίαση είναι τέτοια, ώστε τα

περυγία να αστοχήσουν πριν το δίσκο, οπότε να είναι δυνατή η συγκράτηση των θραυσμάτων από το κέλυφος. Το υλικό των περυγίων είναι νικελιούχο κράμα χάλυβα με αντοχές σε υψηλή θερμοκρασία & διάβρωση. Για υψηλότερες απαιτήσεις τα περυγία βγαίνουν χυτά ή σφυρήλατα.

Πολλές φορές σε αξονικούς στροβίλους μεγάλου μεγέθους σε εφαρμογές υπερπλήρωσης χρησιμοποιείται ένα συρμάτινο στεφάνι που διαπερνά όλα τα περυγία. Το στεφάνι αυτό χρησιμεύει ώστε να αποσβένει τις ταλαντώσεις των περυγίων, διότι λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων εκτείνεται και λόγω τριβών εφαρμογής εμποδίζει την ταλάντωση. Βέβαια η ύπαρξη του σύρματος σημαίνει πρόσθετες απώλειες ενέργειας ροής.

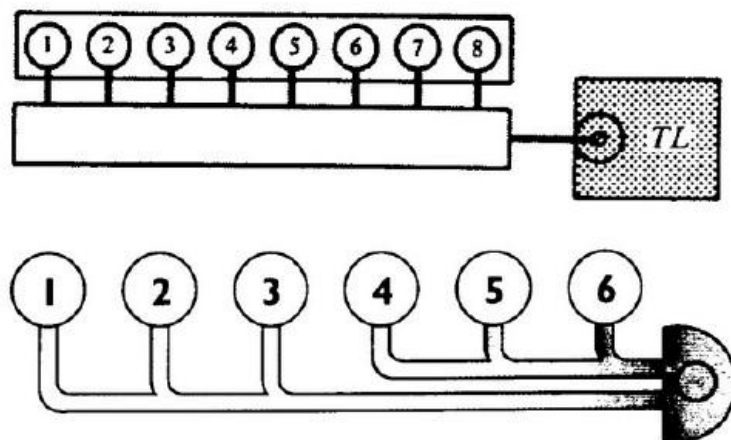
Αν το πρόβλημα ταλαντώσεων των περυγίων είναι πολύ έντονο σε υπερπλήρωση παλμών, πιθανόν να αναζητηθεί λύση αλλάζοντας τον χρονισμό εναύσεως των κυλίνδρων, την ομαδοποίηση και τους συνδυασμούς αυλών προς τον στρόβιλο, ώστε να μειωθεί το εύρος των παλμών [5].

### Συστήματα σύνδεσης στροβιλοπληρώσεως

Υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες συστημάτων στροβιλο-υπερπλήρωσης με ταξινόμηση σύμφωνα με τη διάταξη παροχής των καυσαερίων από τον κινητήρα στον στρόβιλο:

- Σύστημα σταθερής πίεσης
- Σύστημα παλμών

Στο σύστημα σταθερής πίεσης, οι εξαγωγές όλων των κυλίνδρων ενός πολκύλινδρου κινητήρα οδηγούνται σε ένα μεγάλο συλλέκτη καυσαερίων από τον οποίο τροφοδοτείται ο στρόβιλος. Σε μηχανές αερίου & διπλού καυσίμου, η σύνδεση σταθερής πίεσης αποκρίνεται σε ικανοποιητικό επίπεδο (λόγο κύκλου Otto & υψηλής θερμοκρασίας καυσαερίων), κάτι το οποίο δεν ισχύει για τις συμβατικές μηχανές Diesel.



Σχήμα 2.26: Διατάξεις εξαγωγής κινητήρα με σύστημα σταθερής πίεσης & παλμών [8].

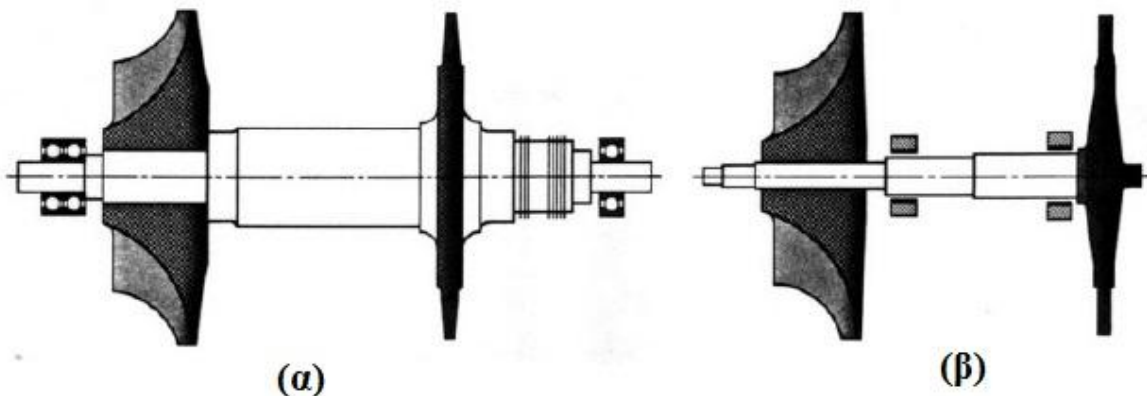
Όπως είπαμε και προηγουμένως, η ασυνέχεια της ροής (δημιουργία παλμών) λόγω του τρόπου λειτουργίας της μηχανής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης του στρόβιλου. Σε συνδυασμό με τη μειωμένη θερμοκρασία καυσαερίων του κύκλου Diesel, ο στρόβιλος δεν αποκρίνεται ικανοποιητικά για να κινήσει τον συμπιεστή, και έτσι οδηγούμαστε σε μια διαφορετική διάταξη παροχής καυσαερίων.

Στο σύστημα παλμών γίνεται σύνδεση ομάδων κυλίνδρων σε κοινούς αγωγούς με σκοπό τη διακύμανση των πιέσεων καυσαερίων κατά την πρόσκρουση στον στρόβιλο. Η σύνδεση γίνεται ανάλογα το χρόνο καύσης του κάθε κυλίνδρου με βέλτιστη την ομαδοποίηση τριών κυλίνδρων ανά αγωγό. Τα σημεία πρόσκρουσης στον στρόβιλο είναι διαφορετικά και έτσι επιτυγχάνεται ικανοποιητικός βαθμός απόδοσης για τη λειτουργία του συστήματος υπερπλήρωσης [5].

### 2.5.3 Έδραση στρόβιλου & συμπιεστή

Στους υπερπληρωτές με στρόβιλο και συμπιεστή σε κοινό άξονα, χρησιμοποιούνται δύο διατάξεις εδράνων:

- Εξωτερικά έδρανα
- Εσωτερικά έδρανα



Σχήμα 2.27: Διατάξεις εδράνων άξονα υπερπλήρωσης, (α) εξωτερικά & (β) εσωτερικά [8].

Οι διατάξεις με εξωτερικά έδρανα χρησιμοποιούνται σπανιότερα, και μόνο σε περιπτώσεις πολύ υψηλής ροπής, όπου και απαιτείται παχύς άξονας και συμφέρει να τοποθετηθούν τα έδρανα στα εξωτερικά σημεία όπου ο άξονας είναι λεπτότερος. Χρησιμοποιούνται ρουλεμάν (κυλινδροτριβείς ή ενσφαιροτριβείς ανάλογα το φορτίο), και η θέση τους επιτρέπει ευκολία στον έλεγχο και τη συντήρηση. Το κυριότερο μειονέκτημα είναι η αναγκαία μορφολογία της ροής εισόδου στο συμπιεστή, που αναγκαστικά λόγω της υπέρξεως του συγκροτήματος εδράνου δεν μπορεί να οδηγείται σε ευθεία προς τον εισαγωγέα του συμπιεστή. Επίσης, οι στυλίσκοι στηρίξεως του περιβλήματος του εδράνου παρεμβάλλονται στη ροή προς το συμπιεστή και μπορεί να διεγείρουν ταλαντώσεις των πτερυγίων του.

Τα εσωτερικά έδρανα είναι τα πιο διαδεδομένα λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Η διάταξη αυτή αφήνει ανεμπόδιστη προσαγωγή αέρα και καυσαερίων, και επιτρέπει σχεδίαση ευπροσάρμοστων εξαρτημάτων. Ουσιαστικά επιτυγχάνεται ευκολία στην εξάρμωση των τμημάτων για επιθεωρήσεις, αλλά όχι και των ίδιων των εδράνων τα οποία είναι λιγότερο επισκέψιμα. Συνήθως χρησιμοποιούνται κουζινέτα (λευκού μετάλλου), τα οποία και λιπαίνονται από το λιπαντικό της μηχανής μέσω του συστήματος λίπανσης. Σε ορισμένες διατάξεις υπάρχει και ένα ξεχωριστό δοχείο λίπανσης του συστήματος υπερπλήρωσης, για περιπτώσεις που σβήσει η μηχανή και σταματήσει να λειτουργεί το σύστημα λίπανσης, διότι ο άξονας του στροβίλο-υπερπληρωτή εξακολουθεί να περιστρέφεται [5].

#### **2.5.4 Λοιπά παρελκόμενα**

##### **Σιγαστήρας & φίλτρο εισόδου - περίβλημα**

Ο θόρυβος του υπερπληρωτή προέρχεται κυρίως από την ανομοιόμορφη ροή στην έξοδο του στροφείου του συμπιεστή προς τον διαχύτη και επίσης στον εισαγωγέα του στροφείου. Ο σιγαστήρας του συμπιεστή συνήθως ενσωματώνει το φίλτρο αέρα στο κέλυφος εισόδου του συμπιεστή, και πρέπει να λειτουργήσει με την ελάχιστη δυνατή πτώση πίεσης που θα δημιουργηθεί λόγω στραγγαλισμού στο φίλτρο και στον οχετό προς το στροφείο. Η απόσβεση του θορύβου γίνεται μέσω πολλαπλών ανακλάσεων και ηχοαπορροφητικών υλικών. Εκτός από θόρυβο, σε υψηλούς λόγους πίεσεως και υψηλές στροφές λειτουργίας υπερπληρωτή, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν συντονισμοί της κατασκευής που δημιουργούν προβλήματα στην ομαλή λειτουργία της.

Τα κελύφη εισόδου & εξόδου του στροβίλου είναι κατασκευασμένα από καλής ποιότητας χυτοσίδηρο. Το κέλυφος εισόδου έχει οχετούς που στρέφουν τη ροή των καυσαερίων κατά 90° και την οδηγούν προς τον δακτύλιο ακροφυσίων που βρίσκεται μεταξύ των δύο κελύφων. Το κέλυφος του συμπιεστή είναι από κράμα αλουμινίου, ή για υψηλές πιέσεις χυτοσίδηρου, λόγω προβλημάτων ερπυσμού και υποδεέστερων χαρακτηριστικών ηχοαπορροφητικότητας του αλουμινίου [5].

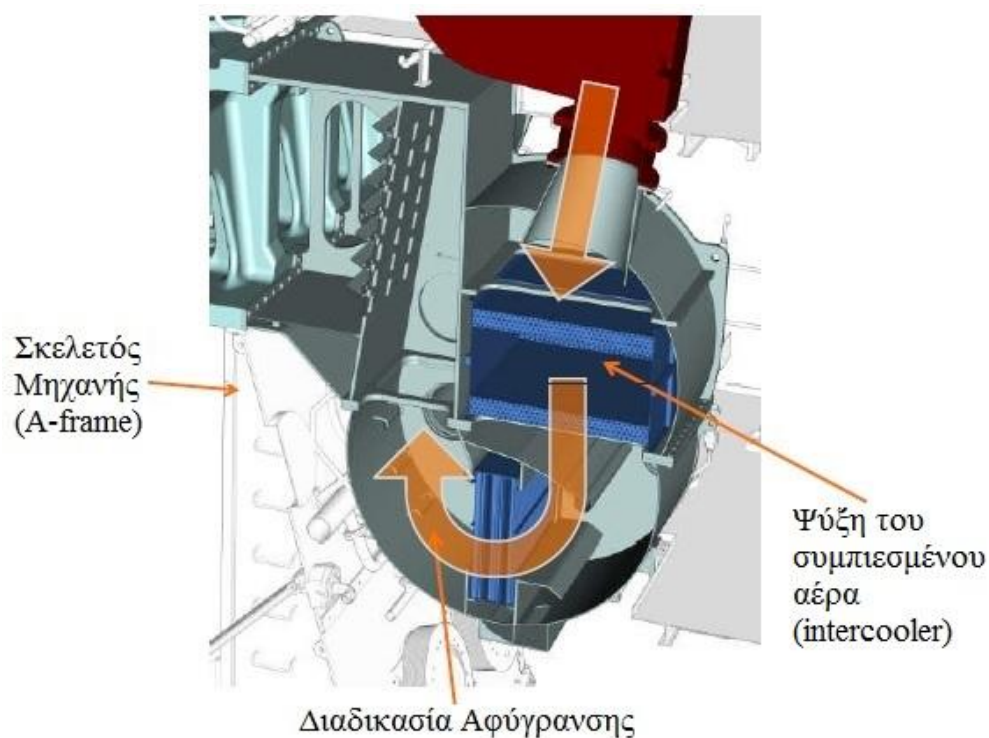
##### **Έλεγχος πίεσης & ψύξη αέρα υπερπλήρωσης**

Ο πιο απλός και διαδεδομένος τρόπος ελέγχου της πίεσης είναι μέσω μιας βαλβίδας ανακουφίσεως ή εκτονώσεως (γνωστή και ως σκάστρα), η οποία βρίσκεται στην έξοδο του συμπιεστή και λειτουργεί με ελατήριο. Όταν η πίεση υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, ανοίγει και διώχνει τον πεπιεσμένο αέρα στο περιβάλλον.

Μια άλλη λύση θα ήταν, μέσω βραχυκύκλωσης να στέλναμε τον πεπιεσμένο αέρα πίσω στον στροβίλο. Ωστόσο και οι δύο λύσεις δεν είναι ενεργειακά ορθές διότι, στη πρώτη έχουμε σπαταλήσει το έργο του στροβίλου, και στη δεύτερη με την ανάμιξη κρύου αέρα με τα θερμά καυσαέρια μειώνεται ο βαθμός απόδοσης του στροβίλου.

Έτσι οδηγούμαστε σε μια καλύτερη λύση, όπου η θέση της βαλβίδας βρίσκεται στην εξαγωγή καυσαερίων πριν από τον στρόβιλο. Η συγκεκριμένη διάταξη ονομάζεται βαλβίδα διαφυγής (γνωστή και ως wastegate) και σκοπό έχει να διώξει τα περίσσεια καυσαέρια απευθείας στην εξαγωγή της μηχανής (καπνοδόχο). Δε λειτουργεί με ελατήριο, αλλά έχοντας απευθείας σύνδεση με το χώρο σάρωσης, όπου όταν η πίεση ξεπεράσει κάποιο όριο, τίθεται σε λειτουργία μέσω ενός διαφράγματος ή με ηλεκτρομαγνητικό – πνευματικό τρόπο.

Τέλος, μετά τον συμπίεστή, ο πεπιεσμένος και θερμός αέρας θα πρέπει να ψυχθεί για να μειωθεί η πυκνότητα του και να εισχωρήσει περισσότερος αέρας στον κύλινδρο της μηχανής κατά τη διαδικασία της σάρωσης. Αυτό γίνεται πολύ απλά με έναν εναλλάκτη θερμότητας (γνωστό και ως intercooler). Κατά τη διαδικασία της ψύξης δημιουργείται υγρασία η οποία φεύγει από το κάτω μέρος του ψυγείου (αναστροφή ροής – διαδικασία αφύγρανσης) [5,8].



Σχήμα 2.28: Κύκλωμα ψύξης συστήματος υπερπλήρωσης [8].

### 2.5.5 Υπολογισμός ογκομετρικής παροχής αέρα υπερπλήρωσης

Η ογκομετρική παροχή αέρα υπερπλήρωσης για έναν δίχρονο κινητήρα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$Q_{turbo} = (Vh * n) * N_{cyl} \quad (2.15)$$

## 2.6 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ

### 2.6.1 Καύσιμα

Το αργό πετρέλαιο (petroleum), αποτελείται από ένα μίγμα υδρογονανθράκων μαζί με μικρές ποσότητες ενώσεων θείου, αζώτου, οξυγόνου και μετάλλων, όπως βαναδίου, νικελίου και σιδήρου. Οι χημικές ιδιότητες των υδρογονανθράκων ποικίλλουν σύμφωνα με τη μοριακή δομή τους και οι φυσικές ιδιότητες σύμφωνα με το μοριακό τους μέγεθος [5].

Το καύσιμο Diesel διατίθεται σε ένα μεγάλο εύρος μοριακών μαζών και φυσικών ιδιοτήτων. Για την ταξινόμησή του υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, είτε αριθμητικές είτε ανάλογα τη χρήση του. Γενικά όσο εντονότερη είναι η δύλιση σε ένα δείγμα καυσίμου, τόσο χαμηλότερη είναι η μοριακή μάζα του και η συνεκτικότητά του, αλλά και τόσο υψηλότερο το κόστος του. Οι αριθμητικές κλίμακες κυμαίνονται από το 1 έως το 5 ή το 6, ενώ υπάρχουν και υποκατηγορίες σύμφωνα με ένα κεφαλαίο γράμμα (π.χ. A1, 2D κ.λπ.). Οι χαμηλότεροι αριθμοί αντιστοιχούν στις χαμηλότερες μοριακές μάζες και χαμηλότερες συνεκτικότητες. Τέτοια είναι τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται συνήθως στις **μηχανές ανάφλεξης διά συμπίεσεως**. Υψηλότεροι αριθμοί αντιστοιχούν σε καύσιμα για οικιακή θέρμανση και για βιομηχανική χρήση. Κάθε κατηγορία έχει κάποια «αποδεκτά» όρια σε διάφορες φυσικές ιδιότητες, όπως είναι η συνεκτικότητα, το σημείο ανάφλεξης, το σημείο πήξης, ο αριθμός κετανίου, η περιεκτικότητα σε θείο κ.λπ.

Μια άλλη μέθοδος ταξινόμησης των καυσίμων diesel κίνησης είναι ο σχεδιασμός τους για την εξειδικευμένη χρήση τους. Τέτοιες χρήσεις είναι για λεωφορεία, για φορτηγά, για τρένα, **για πλοία** και για θερμικούς σταθμούς ισχύος, από τη χαμηλότερη μοριακή μάζα προς την υψηλότερη.

Για λόγους ευχρηστίας, τα καύσιμα diesel που χρησιμοποιούνται στις ναυτικές μηχανές και γενικότερα στις Μ.Ε.Κ., μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Το ελαφρύ πετρέλαιο, με μοριακή μάζα περίπου 170, το οποίο προσεγγίζεται από τον χημικό τύπο  $C_{12,3}H_{22,2}$  (γνωστό και ως MDO – Marine Diesel Oil)
- Το βαρύ πετρέλαιο, με μοριακή μάζα περίπου 200, το οποίο προσεγγίζεται από τον χημικό τύπο  $C_{14,6}H_{24,8}$  (γνωστό και ως HFO – Heavy Fuel Oil)

Τα περισσότερα καύσιμα diesel κίνησης μπορούν να ταξινομηθούν στο εύρος αυτό. Το ελαφρύ πετρέλαιο είναι λιγότερο συνεκτικό (χαμηλότερο ιξώδες), άρα και ευκολότερο να αντλείται, εγχέεται σε μικρότερα σταγονίδια και είναι πιο ακριβό. Αντίθετα, το βαρύ πετρέλαιο μπορεί γενικά να χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερες μηχανές, με υψηλότερες πιέσεις εγχύσεως και θερμαινόμενα συστήματα εισαγωγής.

Ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα, που σχετίζεται με τη χρήση του καυσίμου diesel, προέρχεται από το θείο που περιέχεται στο καύσιμο. Το θείο μεταφέρεται στα καυσαέρια, όπου ενώνεται με τους υδρατμούς σχηματίζοντας θειικό οξύ. Για το λόγο αυτό, η επιτρεπόμενη ποσότητα θείου στο καύσιμο diesel, με βάση την περιβαλλοντική νομοθεσία, συνεχώς ελαττώνεται [9].

## Αριθμός κετανίου

Σε μια μηχανή ανάφλεξης διά συμπίεσεως, η αυτανάφλεξη του μείγματος αέρα-καυσίμου είναι εκ φύσεως αναγκαία. Έτσι, θα πρέπει να επιλέγεται το κατάλληλο καύσιμο, το οποίο θα αυταναφλεγεί την κατάλληλη στιγμή. Καθίσταται, λοιπόν, επιτακτική η γνώση και ο έλεγχος της καθυστέρησης αναφλέξεως καυσίμου. Το μέγεθος που ποσοτικοποιεί την ιδιότητα αυτή είναι ο **αριθμός κετανίου – CN** (Cetane Number). Όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός κετανίου, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος καθυστέρησης αναφλέξεως και τόσο συντομότερα το καύσιμο θα αυταναφλεγεί εντός του θαλάμου καύσης. Χαμηλότεροι αριθμοί κετανίου αντιστοιχούν σε μεγαλύτερους χρόνους καθυστέρησης αναφλέξεως.

Οι συνήθεις τιμές του αριθμού κετανίου για diesel κίνησης κυμαίνονται μεταξύ 40 και 60. Για ένα δεδομένο χρονισμό και ρυθμό έγχυσης, αν ο αριθμός κετανίου είναι χαμηλότερος, τότε ο χρόνος καθυστέρησης αναφλέξεως θα είναι πολύ μεγάλος. Σε αυτή τη περίπτωση, θα πρέπει να εγχύεται περισσότερο καύσιμο στον κύλινδρο πριν αναφλεγούν τα πρώτα στοιχεία του καυσίμου, γεγονός που οδηγεί σε μια πολύ έντονη και απότομη αύξηση της πίεσης κατά την έναρξη της συμπίεσης, με αποτέλεσμα έναν χαμηλό βαθμό θερμικής απόδοσης και μια «τραχιά» λειτουργία της μηχανής. Οι μεγάλοι χρόνοι καθυστέρησης αναφλέξεως που χαρακτηρίζουν τα καύσιμα με CN <40, συνεπάγονται με την αναγκαιότητα ενός πολύ πλούσιου μίγματος καυσίμου – αέρα κατά τη στιγμή της ανάφλεξης. Μια τέτοια λειτουργία προκαλεί την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων καπνού, ώστε η χρήση αυτών των καυσίμων να μην είναι νόμιμη. Από την άλλη, αν ο αριθμός κετανίου είναι πολύ υψηλός, τότε η καύση θα ενεργοποιηθεί πολύ νωρίς, αυξάνοντας σημαντικά την πίεση πριν το ΑΝΣ, με αποτέλεσμα την ανάγκη απορρόφησης περισσότερου έργου κατά τον χρόνο συμπίεσης. Ο αριθμός κετανίου μπορεί να αυξηθεί, εμπλουτίζοντας το καύσιμο με διάφορα νιτρικά και νιτρώδη πρόσθετα.

Παρακάτω βλέπουμε μια ημι-εμπειρική σχέση που υπολογίζει την καθυστέρηση αναφλέξεως σε μοίρες στροφάλου, συναρτήσει του αριθμού κετανίου και άλλων λειτουργικών παραμέτρων [9].

$$ID(ca) = (0,36 + 0,22 * MPS) * exp \left[ Ea * \left( \frac{1}{R * Ti * r_c^{k-1}} - \frac{1}{17190} \right) * \left( \frac{1}{pi * r_c^k - 12,4} \right)^{0,63} \right] \quad (2.16)$$

Όπου:

- $Ea = 618840/(CN+25)$ , η ενέργεια ενεργοποίησης (activation energy)
- $MPS$ : η μέση ταχύτητα εμβόλου
- $R$ : η γενική σταθερά των αερίων = 8,314 kJ/kgK
- $T_i$  &  $p_i$ , η θερμοκρασία (K) & πίεση (bar) κατά την έναρξη του χρόνου συμπίεσης
- $R_c$  ο λόγος συμπίεσης,  $K = 1,35$  (για πρότυπο κύκλο αέρα)



### 2.6.2 Λιπαντικά

Μια μεταλλική επιφάνεια, όσο καλά κατεργασμένη και ομαλή και αν φαίνεται οπτικά, αν μελετηθεί σε μικροσκοπικές ή μοριακές διαστάσεις, παρουσιάζει μια ανώμαλη διάταξη με προεξοχές και κοιλώματα. Όταν δύο τέτοιες μεταλλικές επιφάνειες εφάπτονται, η επαφή δεν απλώνεται σε ολόκληρη την έκταση τους αλλά μόνο όπου συναντώνται οι προεξοχές. Η συναρμογή τους αυτή ευθύνεται για την αντίσταση τριβής στην κίνηση. Αν επιβληθεί ολίσθηση, λόγω τριβής, θα παραχθεί επαρκής θερμότητα ώστε να λιώσει και να συγκολληθεί τις προεξοχές, οπότε η αντίσταση στην κίνηση θα είναι μεγάλη και θα προκληθεί φθορά σαν αποτέλεσμα της απόξεσης των προεξοχών και των συγκολλήσεων.

Παρεμβάλλοντας ένα στρώμα ρευστού (λιπαντικού) ανάμεσα στις επιφάνειες, αυτές διαχωρίζονται υπό την προϋπόθεση ότι το πάχος του στρώματος είναι μεγαλύτερο από το ύψος των προεξοχών, καθώς και ότι το φορτίο δεν είναι τόσο μεγάλο ώστε να διαλύσει το στρώμα. Τότε η αντίσταση στην κίνηση οφείλεται μόνο στην αντίσταση μέσα στο ίδιο το στρώμα του λιπαντικού, η οποία εξ' ορισμού είναι το ιξώδες του λιπαντικού. Η τριβή είναι χαμηλή και η παραγωγή θερμότητας και φθοράς αμελητέες.

Αυτή είναι η ιδανική κατάσταση λίπανσης και καλείται «λίπανση πλήρους στρώματος» ή «λίπανση στρώματος ρευστού». Το στρώμα μπορεί να δημιουργηθεί και να διατηρηθεί με παροχή λιπαντικού υπό επαρκή πίεση προκειμένου να αντέξει το φορτίο (υδροστατική λίπανση) ή συνηθέστερα με διέλκυνση του λιπαντικού ανάμεσα στις επιφάνειες σαν αποτέλεσμα της σχεδίασης του συστήματος, ώστε να σχηματιστεί ένα σφηνοειδές (wedge shaped) στρώμα στο οποίο δημιουργείται επαρκής πίεση για να στηρίξει το φορτίο (υδροδυναμική λίπανση).

Σε ένα κινητήρα Diesel σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας παρατηρείται λίπανση πλήρους στρώματος ανάμεσα στα χιτώνια και τα ελατήρια των εμβόλων εκτός από τα ακραία σημεία της διαδρομής του εμβόλου. Κατά τη διάρκεια του στρωσίματος οι κύριες προεξοχές στις επιφάνειες των χιτωνίων και των ελατηρίων φθείρονται και οι επιφάνειες εφαρμόζουν στεγανοποιώντας τα αέρια καύσεως και το λιπαντικό. Αυτή η διαδικασία στρωσίματος που μπορεί να επιταχυνθεί με τη χρήση ενός ειδικού λαδιού στρωσίματος, δίνει ένα ελεγχόμενο αλλά όχι πολύ λεπτό φινίρισμα των επιφανειών χιτωνίου και ελατηρίων, και είναι η καλύτερη μέθοδος για να αποκτηθεί καλή συναρμογή λειτουργίας ανάμεσα στις επιφάνειες.

Τα έδρανα και οι άξονες δεν χρειάζονται συνήθως στρώσιμο. Το καθιστά περιττό η ακριβής κατεργασία των κελυφών των εδράνων, των κομβίων των στροφάλων και των αξόνων, που επιτυγχάνονται με σύγχρονες τεχνικές κατεργασίας.

Στη λίπανση των κινητήρων Diesel επικρατούν διαφορετικές συνθήκες λίπανση ανάμεσα στις ταχύστροφες & μεσόστροφες μηχανές χωρίς σταυρό, όπου το λάδι του στροφαλοθαλάμου λιπαίνει και τους κυλίνδρους και τα έδρανα. Αντίθετα, στις αργόστροφες μηχανές με σταυρό τα συστήματα λίπανσης των κυλίνδρων και του στροφαλοθαλάμου είναι διαχωρισμένα [5].

## Χαρακτηριστικά & ιδιότητες λιπαντικών

Το ιξώδες είναι η πιο σημαντική ιδιότητα ενός λιπαντικού. Είναι το μέτρο της εσωτερικής αντίστασης του ρευστού σε διάτμηση, άρα κατ' επέκταση είναι ένας δείκτης της αντίστασης σε ροή. Ένα λεπτόρευστο λάδι (λάδι υψηλής ρευστότητας) έχει χαμηλό ιξώδες, ενώ ένα παχύρευστο λάδι έχει υψηλό ιξώδες. Τα περισσότερα λιπαντικά λάδια είναι Νευτώνεια ρευστά, δηλαδή η ροή τους συνεχίζεται όσο εφαρμόζεται τάση, με τη προϋπόθεση βέβαια ότι η θερμοκρασία δεν είναι πολύ χαμηλή. Γενικά το ιξώδες επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και συνεπώς τα λιπαντικά παρουσιάζουν μείωση του ιξώδους με αύξηση της θερμοκρασίας.

Ο δείκτης ιξώδους (VI) είναι ένα μέτρο του ρυθμού αλλαγής της τιμής ιξώδους με τη θερμοκρασία. Η κατάταξη των λιπαντικών ανάλογα με το δείκτη ιξώδους είναι:

- HVI (για VI >85)
- MVI (για 35 < VI < 75)
- LVI (για VI < 30)

Με τη χρήση βελτιωτικών του δείκτη ιξώδους (Viscosity improvers) προκύπτουν τα πολυβάθμια λάδια (multigrade oils) τα οποία έχουν συνήθως δυναμικό ιξώδες χαμηλών θερμοκρασιών ανάλογα με τη διαβάθμιση και κινηματικό ιξώδες υψηλής θερμοκρασίας ανάλογα με τη διαβάθμιση βαρύτερων προϊόντων (πχ το λάδι SAE 10W/30). Ενδεικτικά, στους μεσόστροφους ναυτικούς κινητήρες Diesel το ιξώδες που προτείνεται από τους κατασκευαστές για το λιπαντικό είναι 120-180 cSt στους 40°C (SAE 30 με SAE 40), ενώ για τους μεγάλους 2X κινητήρες με σταυρό προτείνεται λάδι στροφαλοθαλάμου SAE 30 και κυλινδρέλαιο SAE 50.

Τα καθαρά λιπαντικά λάδια διυλίσεως αδυνατούν να αντιμετωπίσουν τις συνθήκες λειτουργίας των σύγχρονων κινητήρων και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κατάλληλα πρόσθετα (additives), ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, σε αναλογίες που κυμαίνονται από μερικά ppm έως και 10% περιεκτικότητας κατά βάρος ή και παραπάνω. Δύο από τις κυριότερες ιδιότητες των πρόσθετων είναι να διατηρούν το κινητήρα καθαρό και να εμποδίζουν όσο το δυνατόν τη φθορά. Η καθαρότητα (που προσδιορίζεται σαν αποφυγή δημιουργίας επικαθίσεων-ιζημάτων) επιτυγχάνεται κυρίως με την αποφυγή της οξείδωσης του λαδιού και τη διατήρηση των αδιάλυτων ουσιών σε κατάσταση αιώρησης, είτε οι ουσίες αυτές είναι προϊόντα καύσεως, είτε παράγωγα οξείδωσης του λαδιού, είτε προέρχονται από εξωτερικές πηγές. Χρησιμοποιούνται πρόσθετα διασκορπισμού και καθαρικά (dispersant – detergent additives).

Αλκαλικά πρόσθετα χρησιμοποιούνται για την ουδετεροποίηση των ανόργανων οξέων που προκύπτουν από την καύση (ιδιαίτερα σε περιπτώσεις καύσης πετρελαίου αυξημένης περιεκτικότητας σε θείο) που είναι και η κύρια αιτία αυξημένων φθορών στα έμβολα-ελατήρια. Στους μεγάλους 2X κινητήρες με σταυρό χρησιμοποιείται, όπως έχει προαναφερθεί ξεχωριστό σύστημα λίπανσης χιτωνίων με αναλώσιμο κυλινδρέλαιο. Τα ιδιαίτερα προβλήματα λίπανσης των κινητήρων αυτών, που μπορεί να έχουν λόγο διαδρομής προς διάμετρο πάνω από 3 προς 1, επιδεινώνονται με τη μείωση της ποιότητας των καυσίμων και την αύξηση της

μέγιστης πίεσης στον κύλινδρο. Το κυλινδρέλαιο πρέπει να έχει αυξημένες ιδιότητες εξαπλώσεως (spreadability) και προσκόλλησης σε μέταλλο (metal-wetting), μιας και οι επιφάνειες προς λίπανση μπορεί να είναι της τάξης των 7m<sup>2</sup> με το έμβολο να κινείται σε μια διαδρομή της τάξης των 3m, ενώ η ποσότητα κυλινδρέλαιου που εισάγεται σε κάθε περιστροφή είναι μικρότερη του ενός γραμμαρίου.

Τα πρόσθετα στο κυλινδρέλαιο θα πρέπει να ικανοποιούν τα ακόλουθα:

- Υψηλή τιμή ιξώδους και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό όμως με καλή διασπορά που απαιτείται λόγω των μεγάλων επιφανειών
- Αντοχή σε υψηλές πιέσεις λειτουργίας και διατήρηση αναγκαίας μεμβράνης λίπανσης
- Γρήγορη ουδετεροποίηση των οξέων ώστε να μειωθούν οι φθορές λόγω οξειδωσης
- Διάλυση των στερεών κατάλοιπων της καύσης και αποφυγή δημιουργίας επικαθίσεων ιδιαίτερα στις περιοχές των ελατηρίων των εμβόλων και των θυρίδων του χιτωνίου

Τα κυριότερα αυτά πρόσθετα είναι ένας συνδυασμός μεταλλικών σαπώνων που μετατρέπονται σε αλκαλικά με προσθήκη ανθρακικού ασβεστίου. Η προσθήκη διασκορπιστικών βοηθάει στην αποφυγή επικαθίσεων και υπάρχουν ενδείξεις ότι επιταχύνει την ουδετεροποίηση των οξέων.

Η εξέταση του μεταχειρισμένου λαδιού γίνεται συνήθως κάθε 2000-3000 ώρες λειτουργίας ή 2-4 φορές το χρόνο. Δείγματα λαδιού λαμβάνονται με κατάλληλο τρόπο (σε κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα). Εξέταση γίνεται για το ιξώδες, το σημείο ανάφλεξης, την περιεκτικότητα σε αδιάλυτα (insolubles), την περιεκτικότητα σε νερό, την αλκαλικότητα (TBN), και πιθανών τη μόλυνση από καύσιμο και την περιεκτικότητα σε μέταλλα.

Συνήθως ένα μεταχειρισμένο λάδι γίνεται αποδεκτό εάν ισχύουν:

- Μεταβολή ιξώδους -20% με +30%
- Σημείο ανάφλεξης (κλειστού δοχείου) πάνω από 180°C
- Περιεκτικότητα σε νερό μικρότερη του 0,5%
- Περιεκτικότητα σε αδιάλυτα μικρότερη του 2,5%
- TBN (περίπου) έως 60% αρχικής τιμής

Οι διορθωτικές ενέργειες σε περίπτωση που το μεταχειρισμένο λάδι ξεπεράσει τα αποδεκτά όρια περιλαμβάνουν:

- Αύξηση ρυθμού καθαρισμού (φυγόκεντρος διαχωριστής & λεπτό φίλτρο)
- Ειδική επεξεργασία σε “δεξαμενή αναγέννησης” με χρήση προσθέτων
- Μερική αλλαγή λαδιού
- Ολική αλλαγή λαδιού

Σημειώνεται ότι με την χημική ανάλυση του μεταχειρισμένου λιπαντικού (φασματογραφία & φερρογραφία), μπορούν να ανιχνευτούν αρχικά σημάδια φθοράς της μηχανής [5].

### 2.6.3 Συντήρηση - Διάγνωση

Για τα θέματα συντήρησης – διάγνωσης μιας ναυτικής μηχανής, δίνονται κάποια εγχειρίδια (manuals) από την κατασκευάστρια εταιρία, τα οποία και συμβουλευόμαστε οι μηχανικοί της εκάστοτε ναυτιλιακής εταιρίας. Θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή για το τι εμπεριέχεται στα κυριότερα και συνηθέστερα από αυτά τα εγχειρίδια.

#### Operation manual

Πρόκειται για το εγχειρίδιο που αφορά τα θέματα λειτουργίας της μηχανής. Σε αυτό περιλαμβάνονται τα εξής:

- Γενικές πληροφορίες για τη μηχανή, καθώς και οι έλεγχοι που πρέπει να γίνονται κατά τις περιόδους ακινησίας του πλοίου.
- Οι διαδικασίες που προβλέπεται να γίνονται πριν την εκκίνηση της μηχανής, καθώς και οι προβλεπόμενοι έλεγχοι κατά τη λειτουργία της μηχανής.
- Πιθανές λύσεις τυχόν προβλημάτων δυσλειτουργίας που μπορεί να προκύψουν. Επίσης υπάρχουν και πληροφορίες για τις ειδικές καταστάσεις που μπορεί να προκύψουν σε μια ναυτική μηχανή (έκρηξη στροφαλοθαλάμου & πυρκαγιά θαλάμου σάρωσης) τις οποίες θα αναλύσουμε ξεχωριστά παρακάτω.
- Πληροφορίες για τα καύσιμα, τη προθέρμανση και τον καθαρισμό που χρειάζονται (φυγοκέντρηση, φίλτρα κλπ). Αξίζει να σημειωθεί πως με υψηλότερο ποσοστό θείου (S) στο καύσιμο χρειάζεται αύξηση έγχυσης κυλινδρέλαιου, κάτι το οποίο υπολογίζεται από τον μηχανικό με την χρήση των manual.
- Πληροφορίες για την καθημερινή & εβδομαδιαία συντήρηση του συστήματος υπερπλήρωσης (π.χ. καθημερινή εισαγωγή crushed nut shells! στη μεριά του στροβίλου).
- Μαθηματικούς τύπους για τον υπολογισμό διαφόρων χρήσιμων παραμέτρων λειτουργίας της μηχανής, καθώς και χάρτες - διαγράμματα λειτουργίας με τη χρήση των οποίων μπορούν να γίνουν διορθωτικές ρυθμίσεις.
- Ο έλεγχος κατάστασης του κυλίνδρου γίνεται με οπτικό έλεγχο στον χώρο σάρωσης (μέσα από τις θυρίδες εισαγωγής). Με αργή περιστροφή του στροφάλου (για τις κατάλληλες θέσεις), οι μηχανικοί μπορούν να ελέγξουν το χιτώνιο, το έμβολο, τα ελατήρια και το βάκτρο. Ο κατασκευαστής επίσης δίνει ενδεικτικές φωτογραφίες για την αναγνώριση επιφανειακών φθορών που μπορεί να συναντήσουν οι μηχανικοί κατά τους ελέγχους.
- Πληροφορίες & τρόπος ελέγχου της βαλβίδας εξαγωγής (οπτικά και με μετρητικά όργανα) στην έδρα της. Ομοίως και για τα έδρανα, το σύστημα λίπανσης και το σύστημα ψύξης της μηχανής. Συνήθως τα έδρανα ελέγχονται εμπειρικά ή με μέτρηση γεωμετρικών διαστάσεων. Για το σύστημα λίπανσης & ψύξης λαμβάνονται δείγματα

και με ειδικά “τεστ-κιτ” που προσφέρει ο κατασκευαστής μπορεί να γίνει μια εκτίμηση, αν και γενικά προτείνεται να σταλθεί το δείγμα για χημική ανάλυση.

- Τέλος, το operation manual περιέχει και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής και των παρελκόμενων της, καθώς και τα διαγράμματα λειτουργίας και οι τεχνικές εκθέσεις που έγιναν κατά τη συναρμογή της στο ναυπηγείο (έλεγχοι – δοκιμές κλπ).

### **Maintenance manual**

Πρόκειται για το εγχειρίδιο συντηρήσεων της μηχανής, όπου υπάρχει λίστα με τις ανάλογες διαδικασίες που πρέπει να γίνονται (ανά ώρες λειτουργίας). Οι διαδικασίες αυτές μπορεί να είναι checks (έλεγχοι), overhauls (επιδιορθώσεις), και adjustments (ρυθμίσεις). Δίνονται αναλυτικές οδηγίες για το πώς πρέπει να γίνονται οι διαδικασίες αυτές.

### **Fittings and accessories manual**

Ένα πολύ χρήσιμο εγχειρίδιο για τον μηχανικό, το οποίο περιέχει τις λίστες των ανταλλακτικών και των ειδικών εργαλείων για όλα τα μέρη της μηχανής. Δίνονται σκαριφήματα με τις βασικές διαστάσεις, το βάρος και το υλικό κατασκευής, καθώς και κωδικοποιήσεις που χρησιμεύουν κατά την αγορά-παραγγελία των ανταλλακτικών.

### **Λοιπά manual**

Ενσωματωμένα στα παραπάνω βασικά manual ή σε ξεχωριστά manual (πχ code book, drawings κλπ) υπάρχουν όλα τα αναλυτικά σχέδια της μηχανής, δηλαδή όψεις και διαστάσεις για κάθε assembly καθώς και αρίθμηση των επί μέρους parts, από τα οποία βρίσκουμε περαιτέρω πληροφορίες στο fittings and accessories manual. Επίσης υπάρχουν και τα δίκτυα σωληνώσεων και τα ηλεκτρικά κυκλώματα της μηχανής.

Στις μηχανές τελευταίας τεχνολογίας έχουν ενσωματωθεί πολλά ηλεκτρονικά συστήματα διαγνώσεων και αυτοματισμών. Πλέον ο τυπικός έλεγχος που έκαναν οι μηχανικοί, έχει αντικατασταθεί από ηλεκτρονικά & πνευματικά συστήματα. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά χρειάζονται τη συντήρησή τους (έλεγχοι λειτουργίας, καλιμπράρισμα κλπ). Στα manual, υπάρχουν όλες οι απαραίτητες οδηγίες για το ηλεκτρονικό κομμάτι της μηχανής, συμπεριλαμβανομένου και του ειδικού λογισμικού που έχει βγάλει η εκάστοτε κατασκευάστρια εταιρία (πχ PMI, WECS, ELMI κλπ).

Μερικά από τα “έξτρα” που διαθέτει μια σύγχρονη μηχανή είναι οι πολλαπλοί αισθητήρες σε διάφορα σημεία της μηχανής, το σύστημα εντοπισμού ομίχλης λαδιού (για την αποφυγή έκρηξης στροφαλοθαλάμου), σύστημα ελέγχου και απόσβεσης των στρεπτικών ταλαντώσεων, αισθητήρας εντοπισμού νερού στο κύκλωμα λίπανσης, ακόμα και σύστημα ελέγχου της φθοράς των εδράνων!. Προφανώς η ανάγκη ενός UPS είναι αυτονόητη, έτσι ώστε τα ηλεκτρονικά αυτά συστήματα να εξακολουθούν να λειτουργούν σε περίπτωση πτώσης του ρεύματος.

Παρακάτω θα γίνει μια περιγραφή δύο πολύ σημαντικών φαινομένων που μπορεί να συμβούν σε μια βραδύστροφη μηχανή, και κρίνεται απαραίτητη η έγκαιρη διάγνωση τους.

### **Έκρηξη στροφαλοθαλάμου**

Οι εκρήξεις στο στροφαλοθάλαμο δεν είναι συχνό φαινόμενο, αλλά όταν συμβαίνουν μπορούν να οδηγήσουν σε εκτενή βλάβη, φωτιά ή και σοβαρούς τραυματισμούς. Στο στροφαλοθάλαμο των μηχανών, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας υπάρχουν συσσωματώσεις σταγονιδίων λιπαντικού διαμέτρου 100-300 μm διεσπαρμένες στο χώρο. Η συγκέντρωση των σταγόνων αυτών δεν επιτρέπει την εκρηκτική τους καύση, παρόλο που υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να αναφλεγούν. Η παρουσία κάποιου σημείου με τοπική υπερθέρμανση πάνω από 360°C μπορεί να εξαερώσει τις σταγόνες στο στροφαλοθάλαμο οπότε και σχηματίζεται μια ομίχλη λιπαντικού (σταγονίδια λιπαντικού 2-10μm), το λεγόμενο “oil mist”. Σε περίπτωση αναφλέξεως του μίγματος αυτού η καύση μπορεί να είναι εκρηκτική. Η ανάφλεξη μπορεί να προέλθει από τοπικά πυρακτωμένο εξάρτημα (πχ κάποιο έδρανο), πλημμυρή λίπανση ή από κάποιον σπινθήρα. Έτσι, είναι ζωτικής σημασίας να εξασφαλιστεί ότι όταν παρουσιασθεί βλάβη που μπορεί να παράγει συνθήκες ευνοϊκές για έκρηξη, πρώτον η έκρηξη θα πρέπει να αποφευχθεί ή στην ακραία περίπτωση να ελεγχθούν τα αποτελέσματα της.

Η διάγνωση του oil mist γίνεται με τα ηλεκτρονικά συστήματα που αναφέραμε παραπάνω και συγκεκριμένα τα “oil mist detectors”. Το πλήρωμα οφείλει να ακολουθήσει τις οδηγίες του κατασκευαστή σε μια τέτοια περίπτωση για την αποφυγή της πιθανής έκρηξης. Οι μεγάλες δίχρονες μηχανές χρειάζονται ανακουφιστικές βαλβίδες για να αντέξουν τις πιέσεις μιας ενδεχόμενης έκρηξης [5].

### **Πυρκαγιά χώρου σάρωσης**

Στο θάλαμο σαρώσεως ενδέχεται να συσσωρευτεί λιπαντικό που προέρχεται από διαρροές του υπερπληρωτή ή των ελατηρίων του εμβόλου, ή ακόμα και τον ίδιο τον αέρα αναρροφήσεως από το μηχανοστάσιο. Επίσης, προβλήματα στην καύση βαρέων καυσίμων με μεγάλες καθυστερήσεις αναφλέξεως, μπορεί να προκαλέσουν σχετικά υψηλή πίεση στο τέλος της διαδρομής εκτονώσεως και διαφυγή καυσαερίων στο θάλαμο σαρώσεως, μόλις αποκαλυφθούν από το έμβολο οι θυρίδες εισαγωγής, με αποτέλεσμα τη ρύπανση του θαλάμου σαρώσεως από επίστρωμα λιπαρών κατάλοιπων καύσεως. Η ανάφλεξη μπορεί να προέλθει από υπερθέρμανση (κολλημένο έμβολο ή διαρροή καυσαερίων από τα ελατήρια), και έχει ως εμφανή αποτελέσματα την πτώση ισχύος της μηχανής (λόγω ατελούς καύσης), την αύξηση της θερμοκρασίας καυσαερίων και πιθανόν της θερμοκρασίας του ψυκτικού, καθώς και της ασταθούς λειτουργίας του συμπιεστή. Επίσης, οι πυρκαγιές αυτές μπορούν να ευνοήσουν την πορεία προς έκρηξη στροφαλοθαλάμου. Όπως και για το προηγούμενο φαινόμενο, υπάρχουν διαγνωστικά ηλεκτρονικά συστήματα και το πλήρωμα οφείλει να ακολουθήσει τις οδηγίες του κατασκευαστή για την αντιμετώπιση της πυρκαγιάς [5].

## 2.7 ΜΕΙΩΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ

Οι σχεδιαστές των ναυτικών μηχανών, τα τελευταία χρόνια έπρεπε να αντιμετωπίσουν τα αυστηρότερα όρια των βλαβερών ρύπων που εκπέμπονται μέσω των καυσαερίων. Τα όρια αυτά επιβλήθηκαν από τις εθνικές, τοπικές και διεθνείς αρχές για τους λόγους της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των επιπτώσεων της στην ανθρώπινη υγεία και στην κλιματική αλλαγή.

Τα καυσαέρια των ναυτικών πετρελαιομηχανών περιέχουν μεγάλες ποσότητες αζώτου, οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα και υδρατμών, με μικρότερες ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του θείου και αζώτου, άκαυστων υδρογονανθράκων, και αιωρούμενων σωματιδίων.

Παρακάτω θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή των κυριότερων ρύπων που αφορούν τις σύγχρονες ναυτικές πετρελαιομηχανές:

Οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>) – Δημιουργούνται θερμικά από άζωτο και οξυγόνο σε υψηλές θερμοκρασίες καύσης εντός κυλίνδρου. Θεωρούνται καρκινογόνοι και ότι συνεισφέρουν στη δημιουργία του φωτοχημικού νέφους που σχηματίζεται πάνω από τις πόλεις, καθώς και στην όξινη βροχή.

Οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>) – Δημιουργούνται από την οξείδωση του θείου στα καύσιμα. Έχουν δυσάρεστη οσμή και προκαλούν ερεθισμό στο ρινικό του ανθρώπου. Επίσης θεωρούνται ως η κύρια πηγή της όξινης βροχής. Οι αποθέσεις των οξειδίων του θείου είναι ένα διασυντοριακό πρόβλημα. Από την εκπομπή τους, τα SO<sub>x</sub> μπορούν να ταξιδέψουν για εκατοντάδες μίλια στην ατμόσφαιρα πριν αποτεθούν σε λίμνες και ρέματα, όπου μειώνουν την αλκαλικότητα του νερού. Γενικότερα, οι αποθέσεις αυτές, μπορούν να μολύνουν το πόσιμο νερό, και να προκαλέσουν φθορά σε ιστορικά κτήρια και μνημεία.

Αιωρούμενα σωματίδια (PM) – Πρόκειται για μια περίπλοκη μίξη ανόργανων και οργανικών ενώσεων, η οποία μπορεί να προκύψει από:

- ατελή καύση
- μερικώς άκαυτο κυλινδρέλαιο
- θερμικό διαχωρισμό (HC) από το καύσιμο και το κυλινδρέλαιο
- τέφρα στο καύσιμο και το κυλινδρέλαιο
- θειικά άλατα και νερό

Το μεγαλύτερο ποσοστό της μάζας ενός σωματιδίου είναι από αιθάλη (soot), η οποία και γίνεται αντιληπτή από τον καπνό που εκπέμπεται. Γενικότερα, τα σωματίδια τύπου soot δεν είναι τοξικά, ωστόσο μερικά από αυτά θεωρούνται καρκινογόνα. Το ποσοστό των PM στα καυσαέρια μιας σύγχρονης ναυτικής πετρελαιομηχανής δεν ξεπερνάει το 0,003%.

Άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) & Μονοξείδιο του άνθρακα (CO) – Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες δημιουργούνται από την ατελή καύση του καυσίμου με το κυλινδρέλαιο, καθώς και από την εξάτμιση του καυσίμου. Έχουν δυσάρεστη οσμή, είναι μερικώς

καρκινογόνοι, και προκαλούν νέφος. Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι προϊόν ατελούς καύσης. Γενικά, οι εκπομπές αυτών των ρύπων είναι τυπικά χαμηλές στις σύγχρονες πετρελαιομηχανές.

Διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) – Παρόλο που δεν είναι τοξικό, το διοξείδιο του άνθρακα συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Το αέριο αυτό είναι ένα αναπόφευκτο προϊόν καύσης όλων των ορυκτών καυσίμων. Όμως, οι εκπομπές του από τις μηχανές Diesel, είναι οι χαμηλότερες λόγω του υψηλού θερμοκινητικού βαθμού απόδοσης που προσφέρουν. Δεν έχουν οριοθετηθεί περιορισμοί για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> στη ναυτιλία. Ωστόσο, είναι κάτι το οποίο αναμένεται κάποια στιγμή στο μέλλον [4].

### **Κανονισμοί πρόληψης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία**

Το 1997, σε μια διπλωματική σύσκεψη του IMO, γνωστή και ως Marpol 73/78, έγινε μια παγκόσμια προσέγγιση των ελέγχων εκπομπών της ναυτιλίας. Τα πλοία που χρησιμοποιούσαν HFO και MDO εκείνη την εποχή, ήταν υπεύθυνα για περίπου το 7% των παγκόσμιων εκπομπών των NO<sub>x</sub>, για το 4% των παγκόσμιων εκπομπών των SO<sub>x</sub>, και το 2% των παγκόσμιων εκπομπών του CO<sub>2</sub>.

Για τους λόγους αυτούς εγκρίθηκε το Annex VI (παράρτημα 6), το οποίο θέτει όρια στις εκπομπές NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub> των καυσαερίων των πλοίων.

Τα πρότυπα των ορίων εκπομπών του IMO, αναφέρονται συνήθως ως πρότυπα Tier I, II, III. Τα πρότυπα Tier I, είναι αυτά που καθιερώθηκαν στη σύσκεψη Marpol το 1997, ενώ τα πρότυπα Tier II/III αποτελούν τροπολογίες των επόμενων ετών [10].

### **Ελεγχόμενες περιοχές εκπομπών - ECA**

Σύμφωνα με τον Annex VI, υπάρχουν δύο σελτ περιορισμών και απαιτήσεων ποιότητας καυσίμων: (1) παγκόσμιες απαιτήσεις, και (2) πιο αυστηρές απαιτήσεις, οι οποίες εφαρμόζονται στα πλοία που βρίσκονται σε ελεγχόμενες περιοχές εκπομπών – ECA (Emission Control Areas).

Οι υπάρχουσες ECA είναι οι:

- Βαλτική θάλασσα (SO<sub>x</sub>: υιοθετήθηκε το 1997 / σε ισχύ από το 2005; NO<sub>x</sub>: 2016/2021)
- Βόρεια θάλασσα (SO<sub>x</sub>: 2005/2006; NO<sub>x</sub>: 2016/2021)
- ECA Βόρειας Αμερικής, συμπεριλαμβάνονται οι περισσότερες ακτές ΗΠΑ & Καναδά (NO<sub>x</sub> & SO<sub>x</sub>: 2010/2012).
- ECA ΗΠΑ Καραϊβικής, συμπεριλαμβάνεται το Puerto Rico και τα US Virgin Islands (NO<sub>x</sub> & SO<sub>x</sub>: 2011/2014)

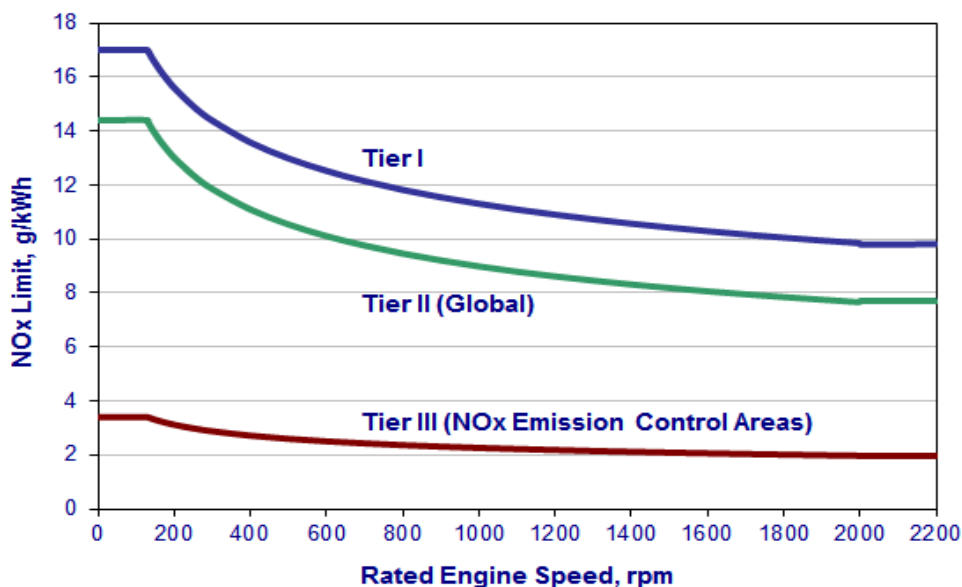


Η ρύθμιση των εκπομπών NO<sub>x</sub>, εφαρμόζεται σε κάθε ναυτική μηχανική Diesel με ισχύ εξόδου μεγαλύτερη των 130 kW. Ως ναυτική μηχανή Diesel, ορίζεται οποιαδήποτε παλινδρομική MEK που λειτουργεί με υγρό ή διπλό καύσιμο.

Πίνακας 2.1: Όρια εκπομπών των NO<sub>x</sub> - MARPOL Annex VI [10].

Tier	Date	NO <sub>x</sub> Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016†	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.96

† In NO<sub>x</sub> Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).



Σχήμα 2.29: Διάγραμμα ορίων εκπομπών των NO<sub>x</sub> – MARPOL Annex VI [10].

Οι εκπομπές που έχουν οριοθετηθεί για τα NO<sub>x</sub>, εξαρτώνται από την μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας της μηχανής σε στροφές (n, rpm), όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα και φαίνεται γραφικά στο παραπάνω διάγραμμα. Εμάς, μας ενδιαφέρουν οι πρώτες δύο στήλες, για τις βραδύστροφες και μεσόστροφες μηχανές αντίστοιχα. Στις μέρες μας, τα Tier II είναι αυτά που ισχύουν παγκόσμια, και τα Tier III είναι αυτά που ισχύουν στις ECA.

Τα πρότυπα Tier II, αναμένεται να τηρούνται μέσω της βελτιστοποίησης της καύσεως. Οι παράμετροι που εξετάζονται από τους κατασκευαστές των μηχανών αφορούν τον χρονισμό ψεκασμού, την πίεση και τον λόγο συμπίεσης, την ροϊκή περιοχή των ακροφυσίων, τον χρονισμό της βαλβίδας εξαγωγής, και το βαθμό πλήρωσης του κυλίνδρου.

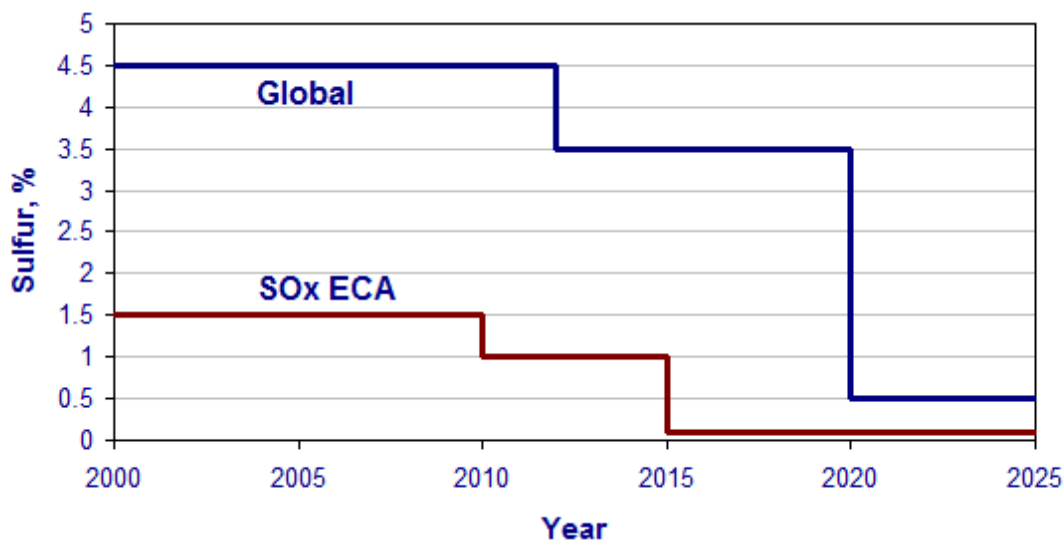
Τα πρότυπα Tier III, αναμένεται να χρειάζονται απαιτητικότερες τεχνικές ελέγχου των εκπομπών NO<sub>x</sub>, όπως οι διαφορετικές μορφές εισαγωγής του νερού στη διαδικασία της

καύσης, η ανακυκλοφορία των καυσαερίων (EGR), και καταλύτες επιλεκτικής αναγωγής (SCR).

Σχετικά με τις εκπομπές των  $SO_x$ , ο κανονισμός Annex VI προβλέπει τον έλεγχο του ποσοστού θείου στα καύσιμα ως μέτρο ελέγχου των  $SO_x$  και έμμεσα των PM. Τα όρια αυτά και οι ημερομηνίες έναρξης ισχύος τους, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα και διάγραμμα. Το HFO θα επιτρέπεται να χρησιμοποιείται εφόσον το ποσοστό σε S βρίσκεται εντός ορίων. Επίσης, θα επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται εναλλακτικά μέτρα (παγκοσμίως & στις ECA) μείωσης των εκπομπών  $SO_2$ , όπως μέσω συστήματος καθαρισμού καυσαερίων (scrubbers). Γενικότερα, τα πλοία το 2020 θα μπορούν να χρησιμοποιούν οποιοδήποτε καύσιμο, αρκεί η περιεκτικότητα σε  $SO_2$  των καυσαερίων να μη ξεπερνάει τα 6gr/kWh [10].

Πίνακας 2.2: Όρια περιεκτικότητας των  $SO_x$  στα καύσιμα - MARPOL Annex VI [10].

Date	Sulfur Limit in Fuel (% m/m)	
	SOx ECA	Global
2000	1.5%	4.5%
2010.07	1.0%	3.5%
2012		
2015	0.1%	0.5%
2020		



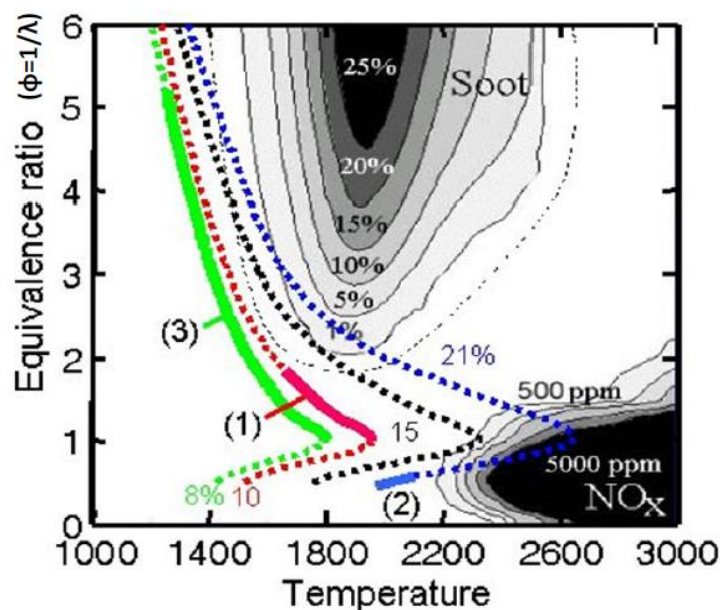
Σχήμα 2.30: Διάγραμμα περιεκτικότητας των  $SO_x$  στα καύσιμα – MARPOL Annex VI [10].

### 2.7.1 Τρόποι μείωσης των οξειδίων του αζώτου ( $NO_x$ )

Τα τελευταία χρόνια, λόγω των αυστηρότερων μέτρων που επιβάλλει ο IMO, ως προτεραιότητα των κατασκευαστών μηχανών είναι η μείωση των εκπομπών των  $NO_x$ , έτσι ώστε να εξασφαλίζεται περιβαλλοντικά η αποδοχή, χωρίς όμως να θυσιάζεται η εξοικονόμηση καυσίμου και αξιοπιστία που έχει επιτευχθεί.

Οι κύριοι παράγοντες του σχηματισμού των  $\text{NO}_x$ , είναι η θερμοκρασία και η συγκέντρωση οξυγόνου, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής σε υψηλή θερμοκρασία στον κύλινδρο, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα θερμικού  $\text{NO}_x$  θα δημιουργηθεί. Για παρόμοια ισχύ, μια αργόστροφη δίχρονη μηχανή σχηματίζει μεγαλύτερη ποσότητα  $\text{NO}_x$  από τις μεσόστροφες και ταχύστροφες τετράχρονες, λόγω των περισσότερων χρόνων καύσης. Με εξαίρεση την χρήση των εναλλακτικών καυσίμων, υπάρχουν δύο είδη μέτρων προσεγγίσεως στα επιθυμητά επίπεδα εκπομπών των  $\text{NO}_x$  [4]:

- Πρωτογενή μέτρα: Μείωση των εκπομπών ρυθμίζοντας τις παραμέτρους της μηχανής κατά τη διαδικασία της καύσης (λόγος συμπίεσης, αύξηση της πίεσης, ρύθμιση βαλβίδων, χρονισμός ψεκασμού, διαφορετικοί τύποι ακροφυσίων, γαλάκτωμα νερού – καυσίμου, ύγρανση αέρα εισαγωγής, σύστημα EGR, κλπ). Τα επίπεδα εκπομπών μπορούν να μειωθούν στο 30-60%. Συνήθως, οι μέθοδοι αυτοί καλύπτουν τα όρια για το Tier II (global).
- Δευτερογενή μέτρα: Μείωση των εκπομπών αφαιρώντας τα  $\text{NO}_x$  από τα καυσαέρια με μεταγενέστερες τεχνικές καθαρισμού (σύστημα SCR). Τα επίπεδα εκπομπών μπορούν να μειωθούν στο 95%. Συνήθως, χρησιμοποιείται για το Tier III (περιοχές ECA).



Σχήμα 2.31: Περιοχές σχηματισμού των  $\text{NO}_x$  & Soot, του αντίστροφου λόγου συμπίεσης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία, για διαφορετικά ποσοστά οξυγόνου [7].

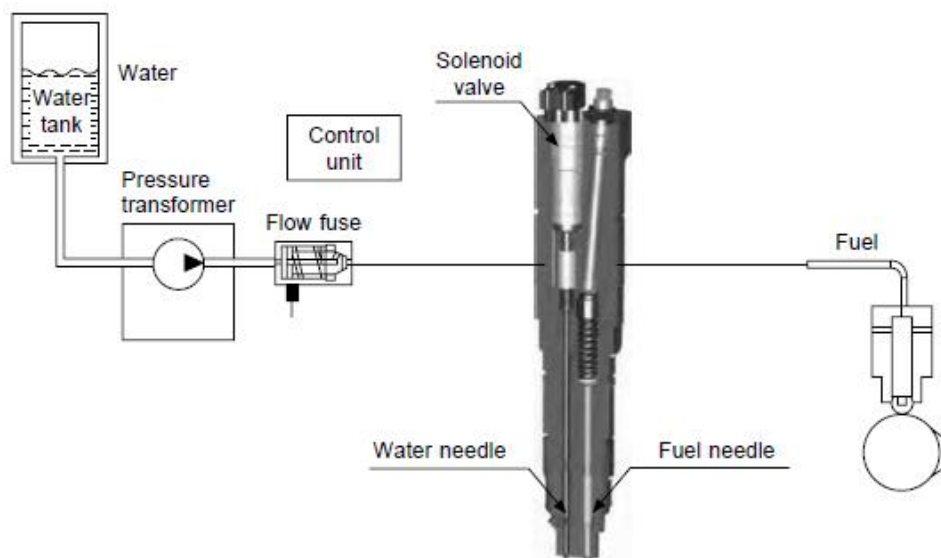
Παρακάτω θα γίνει μια περιγραφή των κυριότερων τεχνικών μείωσης εκπομπών  $\text{NO}_x$  που συναντάμε στις ναυτικές μηχανές των εμπορικών πλοίων.

## Τεχνικές μείωσης των NO<sub>x</sub>, βασιζόμενες στο νερό – Γαλάκτωμα νερού-καυσίμου

Μια μεγάλη μείωση του σχηματισμού των NO<sub>x</sub>, μπορεί να επιτευχθεί μέσω εγχύσεων γαλακτώματος νερού-καυσίμου. Η μείωση αυτή, εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα, αλλά γενικότερα 1% νερού, μειώνει 1% τις εκπομπές των NO<sub>x</sub>. Οι μέθοδοι γαλακτώματος νερού-καυσίμου – FWE (fuel water emulsion), λειτουργούν μέσω της μίξης καυσίμου με γλυκό νερό εν πλω. Σχηματίζεται ένα γαλάκτωμα το οποίο έχει τη δυνατότητα να εγχυθεί στον θάλαμο καύσης. Στην περίπτωση του HFO, 30% νερού μπορεί να γαλακτοποιηθεί στο καύσιμο, έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> περίπου 30%.

Το γαλάκτωμα νερού-καυσίμου μπορεί να δημιουργείται συνεχόμενα κατά τη λειτουργία της μηχανής (η προτιμότερη μέθοδος) ή ξεχωριστά ανά παρτίδες. Η MAN χρησιμοποιεί τη συνεχόμενη μέθοδο FWE, και αναφορικά αποδεικνύονται πολύ ικανοποιητικές μακροπρόθεσμες επιδόσεις. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου, περιλαμβάνονται το μέτριο κόστος επένδυσης, καθώς και η ελάχιστη επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου.

Από την άλλη η Wärtsilä, τονίζει ότι το ποσοστό του νερού που προστίθεται κατά την τεχνική FWE, περιορίζεται λόγω της μέγιστης μεταφορικής χωρητικότητας των αντλιών έγχυσης καυσίμου. Επομένως πρακτικά, είτε θα μειωθεί η απόδοση της μηχανής, είτε θα μειωθεί το ποσοστό σχηματισμού των NO<sub>x</sub> στο 10-20%. Για να επιτευχθεί η μέγιστη μείωση των NO<sub>x</sub> στο μέγιστο φορτίο, θα πρέπει να γίνει ένας επανασχεδιασμός του συστήματος έγχυσης, καθώς και του εκκεντροφόρου και της καδένας χρονισμού. Το ποσοστό του προστιθέμενου νερού επίσης περιορίζεται από το ιζώδες του γαλακτώματος και το βαθμό θερμότητας που χρειάζεται για να επιτευχθεί το κατάλληλο ιζώδες ψεκασμού.



Σχήμα 2.32: Το σύστημα DWI της Wärtsilä με το συνδυασμένο μπεκ καυσίμου & νερού [4].

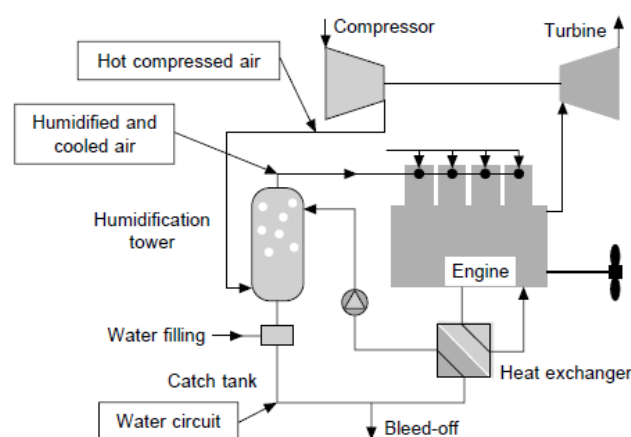
Μια άλλη άποψη αφορά τον σχεδιασμό του ακροφυσίου, ο οποίος και πρέπει να προσαρμόζεται στα αυξημένα ποσά έγχυσης υγρού. Η Wärtsilä εξηγεί πως με μια τέτοια τροποποίηση στα ακροφύσια, θα υπάρχουν επιπτώσεις στη κατανάλωση καυσίμου και τη

θερμοκρασία της μηχανής (κατά τη λειτουργία χωρίς προσθήκη νερού). Παρόλο που οι μηχανές με εκκεντροφόρο έχουν περιορισμούς στον χρονισμό της έγχυσης, οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενες μηχανές (βλέπε Wärtsilä RT-flex) έχουν την ευελιξία αυτή ως πλεονέκτημα κατά την καύση γαλακτώματος νερού-καυσίμου. Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου, μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα στις διαφορετικές συνθήκες ψεκασμού (είτε γαλακτώματος είτε απλού καυσίμου). Επιπρόσθετα, οι ρυθμίσεις της μηχανής μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με το φορτίο και την ταχύτητα. Το σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου, μπορεί επίσης να επεκταθεί έτσι ώστε να παρέχει μίξη νερού-καυσίμου στον γαλακτοποιητή σε συνάρτηση με το φορτίο.

Το νερό μπορεί να εισαχθεί στον χώρο καύσης μέσω διαφορετικών ακροφυσίων ή από στρωματοποιημένο διαχωρισμό έγχυσης νερού-καυσίμου από το ίδιο ακροφύσιο. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνικές, η άμεση έγχυση νερού – DWI (Direct Water Injection), επιτρέπει στο νερό να ψεκαστεί την κατάλληλη στιγμή και στο κατάλληλο σημείο, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η μείωση σχηματισμού των  $\text{NO}_x$ . Πρόκειται ένα από τα πρώτα (και εσωτερικά) μέτρα, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μηχανή, με τη βέλτιστη αποδοτικότητα [4].

### Ύγρανση αέρα εισαγωγής – Charged air humidification

Ένας άλλος τρόπος προσθήκης νερού στη ζώνη καύσης, είναι μέσω της ύγρανσης του αέρα σάρωσης. Το θερμό νερό εγχύεται και εξατμίζεται στην εισαγωγή του αέρα, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόλυτης υγρασίας. Ένα παλιό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής ήταν η φθορά που προκαλεί στα χιτώνια των κυλίνδρων η μεγάλη ποσότητα νερού στον αέρα εισαγωγής, κάτι το οποίο επιλύθηκε με τη χρήση των αντι-στιλβωτικών ελατηρίων (anti-polishing rings).



Σχήμα 2.33: Αναπαράσταση του συστήματος HAM της MAN για τη μείωση των  $\text{NO}_x$  [4].

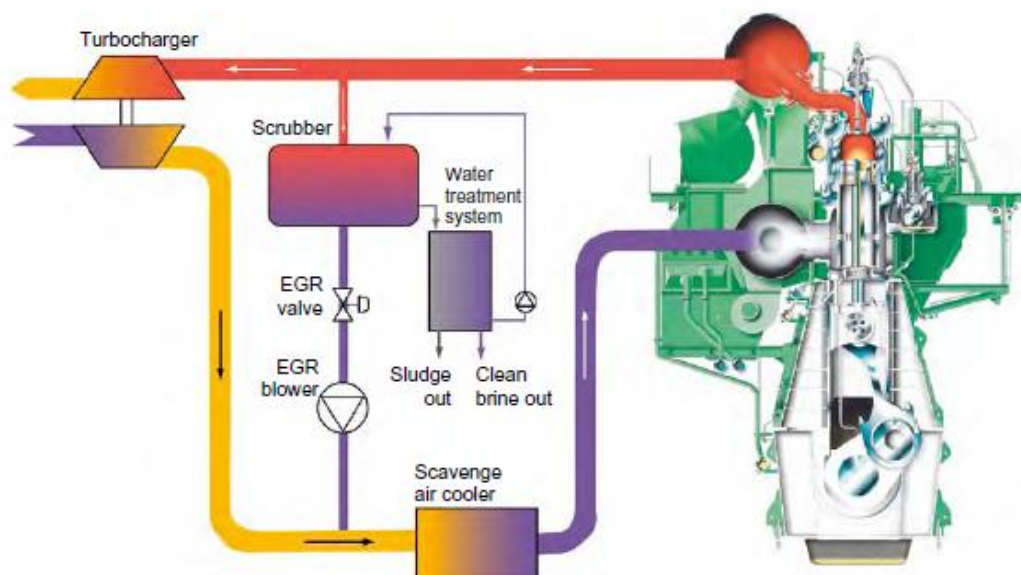
Η εταιρία MAN ανέπτυξε το σύστημα HAM (humid air motor) για την ύγρανση του αέρα εισαγωγής με υδρατμούς. Η τεχνική αυτή μπορεί να μειώσει τον σχηματισμό των  $\text{NO}_x$  έως

και 65%. Ο κορεσμός του αέρα εισαγωγής γίνεται με υδρατμούς, οι οποίοι σχηματίζονται εν πλω από θαλασσινό ακατέργαστο νερό, χρησιμοποιώντας τη θερμική ενέργεια της μηχανής.

Σύμφωνα με την MAN, το μεγάλο πλεονέκτημα του συστήματος HAM βρίσκεται στη χρήση της θερμότητας από τη μηχανή, για την αύξηση θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού (δεν χρειάζεται κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας). Η χρήση του ακατέργαστου θαλασσινού νερού μειώνει το κόστος λειτουργίας. Άλλα πλεονεκτήματα αφορούν το πολύ μικρό κόστος συντήρησης, τη μείωση της κατανάλωσης κυλινδρέλαιου και την υψηλή διαθεσιμότητα, έχοντας μόνο μια μικρή επίπτωση στην κατανάλωση καυσίμου. Επίσης, η παρουσία υδρατμών στον θάλαμο καύσης προσφέρει καθαρότερη καύση, μειώνοντας έτσι τις αποθέσεις στον θάλαμο, στον στρόβιλο και γενικότερα στο σύστημα εξαγωγής. Στα σύγχρονα συστήματα, το σύστημα HAM έχει αντικαταστήσει τον συμβατικό intercooler [4].

## Σύστημα EGR

Η επανακυκλοφορία καυσαερίων – EGR (Exhaust Gas Recirculation), είναι μια μέθοδος η οποία τροποποιεί τον αέρα εισαγωγής, με σκοπό τη μείωση των  $\text{NO}_x$  και έχει εφαρμοστεί ευρέως και με επιτυχία σε εφαρμογές αυτοκινητοβιομηχανίας. Μερικά από τα καυσαέρια ψύχονται και καθαρίζονται πριν την επανακυκλοφορία στον χώρο σάρωσης. Η λειτουργία του συστήματος οφείλεται κυρίως από τη μείωση της συγκέντρωσης οξυγόνου στη ζώνη καύσης, και μερικώς από το περιεχόμενο νερού και διοξειδίου του άνθρακα στα καυσαέρια. Η μέθοδος EGR είναι πολύ αποδοτική έχοντας τη δυνατότητα να μειώσει τον σχηματισμό των  $\text{NO}_x$  σε ποσοστό 50-60%, χωρίς να επηρεάζεται η ισχύς εξόδου της μηχανής. Όμως, έχει κριθεί πιο πρακτική η χρήση της μεθόδου σε πιο καθαρά καύσιμα (πχ MDO).



Σχήμα 2.34: Αναπαράσταση του συστήματος EGR της εταιρίας MAN Diesel για την ερευνητική αργόστροφη μηχανή 4T50ME-X [4].

Οι μηχανές που λειτουργούν με υψηλό ποσοστό θείου στο καύσιμο (HFO), μπορεί να υποστούν διαβρωτικές φθορές στον υπερπληρωτή, το intercooler και τους αγωγούς σάρωσης.

Ένα σύστημα EGR που επινόησε η εταιρία MAN για τις δίχρονες μηχανές φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Ουσιαστικά, μέσω ενός φυσητήρα υψηλής πίεσης (3,3 bar) τα καυσαέρια περνάνε από μια υγρή πλυντρίδα (wet scrubber) και απαλλάσσονται από τα SO<sub>x</sub> και τα PM. Επίσης, γίνεται και ψύξη μέσω ύγρανσης πριν τα καυσαέρια εισχωρήσουν στον χώρο σάρωσης. Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα να μειώσει τον σχηματισμό των NO<sub>x</sub> στο 70% (με 30% ανακυκλοφορία). Στα θετικά του συγκαταλέγονται η μικρή επίπτωση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου και οι μηδενικές επιπτώσεις στη φθορά του κυλίνδρου. Συνοψίζοντας, η εταιρία MAN πιστεύει ότι η αυτή η τεχνική μείωσης των NO<sub>x</sub>, θα είναι από τις πιο ανταγωνιστικές για χρήση σε δίχρονες βραδύστροφες μηχανές στο μέλλον.

Από την άλλη, η εταιρία Wärtsilä προτείνει τη τεχνική WaCoReg (water-cooled residual gas), η οποία αποτελεί συνδυασμό των τεχνικών DWI & EGR. Ουσιαστικά, μέσω της ηλεκτρονικά ελεγχόμενης βαλβίδας εξαγωγής, κάποιο ποσοστό καυσαερίων παραμένει στον θάλαμο καύσης και κατόπιν ψύχεται μέσω του άμεσου ψεκασμού νερού. Σχετικά με τον αέρα σάρωσης, η Wärtsilä έχει φροντίσει να μειώσει την ποιότητα της ροής χαμηλώνοντας το ύψος των θυρίδων εισαγωγής. Στα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής συγκαταλέγονται η ανάγκη μικρότερου υπερπληρωτή, καλύτερη εκτόνωση και βελτιωμένη κατανάλωση καυσίμου [4].

## **Σύστημα SCR**

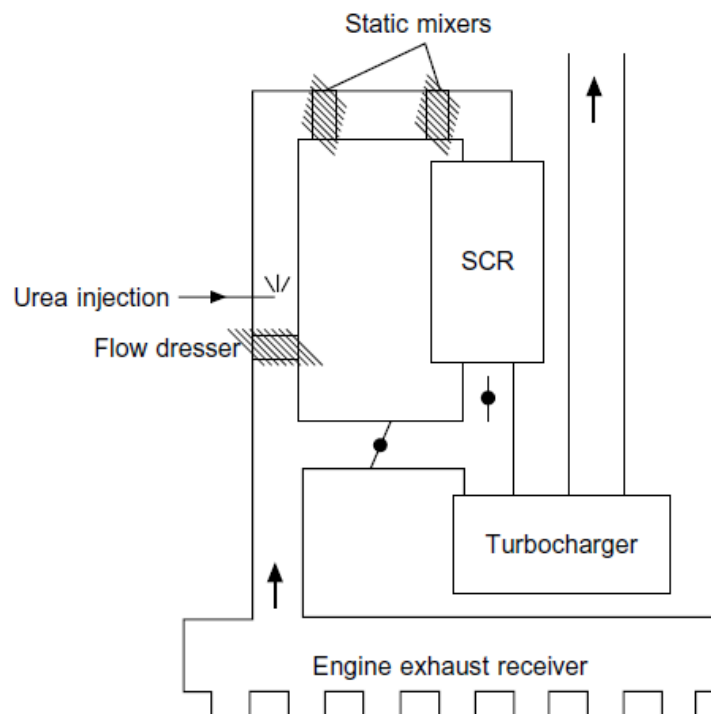
Σε περιπτώσεις αυστηρότερων ορίων εκπομπών των NO<sub>x</sub>, σε διεθνείς ή τοπικές περιοχές, χρησιμοποιούνται τα δευτερογενή μέτρα, δηλαδή τεχνικές μεταγενέστερης επεξεργασίας των καυσαερίων. Οι καταλύτες επιλεκτικής αναγωγής – SCR (Selective Catalyst Reduction) μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές των NO<sub>x</sub> παραπάνω από 90%. Επιπλέον, τα συστήματα SCR επιτρέπουν στους κατασκευαστές μηχανών να παραλείψουν κάποια από τα πρωτογενή μέτρα τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση της μηχανής (κατανάλωση, ισχύς κλπ).

Σε ένα σύστημα SCR, τα καυσαέρια αναμιγνύονται με αμμωνία (συγκεκριμένα σε μορφή 40% ουρίας σε νερό) πριν περάσουν από έναν ειδικό καταλύτη, σε θερμοκρασία 290 έως 450°C. Το κατώτερο όριο καθορίζεται κυρίως από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο, διότι σε θερμοκρασίες κάτω των 270°C η αμμωνία NH<sub>3</sub> και τα SO<sub>x</sub> θα αντιδράσουν και θα δημιουργηθούν αποθέσεις θεικού αμμωνίου (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ο καταλύτης θα υποβαθμιστεί ανάλογα και με τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Γενικότερα, για μια αξιόπιστη λειτουργία του SCR χρειάζονται καύσιμα με χαμηλό ποσοστό θείου.

Η ουρία αποσυντίθεται σε αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα κατά την έγχυση της στο ρεύμα των θερμών καυσαερίων. Η αμμωνία μετατρέπει τα NO<sub>x</sub> σε νερό και άζωτο, και επίσης τα soot & οι HC αφαιρούνται μέσω της οξείδωσης που γίνεται στον καταλυτικό μετατροπέα του συστήματος SCR.

Ο ρυθμός μετατροπής του καταλύτη SCR εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα έγχυσης ουρίας. Ωστόσο η υπερβολική έγχυση προκαλεί προβλήματα στον αντιδραστήρα, κάτι που έχει αρνητική συνέπεια στην ποιότητα και στην οικονομία του συστήματος. Η έγχυση ουρίας πρέπει να ελέγχεται με ακρίβεια, ανάλογα με την ταχύτητα και το φορτίο της μηχανής. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με τον αισθητήρα  $\text{NO}_x$  που βρίσκεται μετά τον αντιδραστήρα. Τα μετρητικά δεδομένα του αισθητήρα χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση του στοιχειομετρικού λόγου αμμωνίας/ $\text{NO}_x$  σε σταθερά επίπεδα.

Στις αργόστροφες δίχρονες μηχανές, λόγω των απαιτούμενων θερμοκρασιών της διαδικασίας, ο αντιδραστήρας πρέπει να βρίσκεται πριν τον στρόβιλο του υπερπληρωτή. Ωστόσο, στις βοηθητικές μεσόστροφες τετράχρονες μηχανές μπορεί να γίνει το αντίθετο λόγω της επαρκούς θερμοκρασίας μετά τον στρόβιλο του υπερπληρωτή. Εάν υπάρχει και λέβητας καυσαερίων, αυτός θα πρέπει να βρίσκεται μετά το σύστημα SCR.



Σχήμα 2.35: Αναπαράσταση του συστήματος SCR της εταιρίας Wärtsilä για τις αργόστροφες δίχρονες πετρελαιομηχανές [4].

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε ένα τυπικό σύστημα SCR που εφαρμόζεται στις βραδύστροφες μηχανές. Οι αναμίκτες (static mixers) χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση εξουδετέρωσης των  $\text{NO}_x$  σε ποσοστό 5-10% [7]. Εάν κριθεί απαραίτητη η μείωση των HC/CO στο μέλλον, αυτό μπορεί να γίνει εύκολα με την ενσωμάτωση ενός οξειδωτικού καταλύτη στον αντιδραστήρα SCR. Το πρόβλημα βρίσκεται στα PM, όπου τα σακκόφιλτρα (bag filters) είναι ογκώδη και τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (electrostatic precipitators) ογκώδη και ακριβά. Η μελλοντική λύση για το πρόβλημα αυτό, όπως και για τα  $\text{SO}_x$  βρίσκεται στα scrubbers (πλυντρίδες) [4].

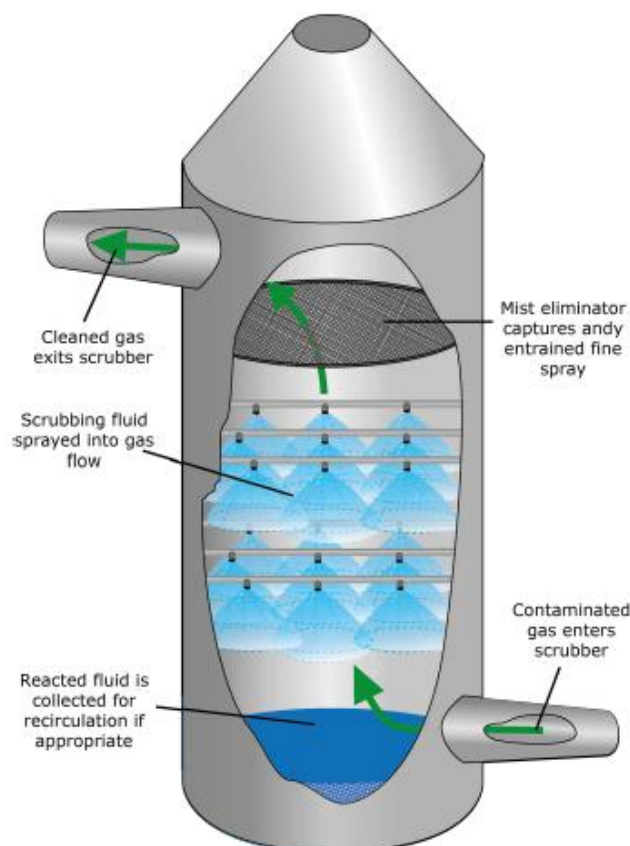


## 2.7.2 Τρόποι μείωσης των οξειδίων του θείου ( $SO_x$ )

Οι εκπομπές των  $SO_x$ , οι οποίες περιλαμβάνουν κυρίως διοξείδιο και τριοξείδιο του θείου, δε μπορούν να ελεγχθούν από τη διαδικασία της καύσης. Ο κύριος και βασικός παράγοντας του σχηματισμού των  $SO_x$  είναι η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο. Για παράδειγμα, εάν ένα καύσιμο έχει περιεκτικότητα S 3%, οι εκπομπές των  $SO_x$  θα είναι περίπου 64kg/τόνο καυσίμου. Αντίστοιχα, εάν το καύσιμο περιέχει 1% S, οι εκπομπές θα μειωθούν στα 21 kg/τόνο καυσίμου [4].

### Πλυντρίδες - Scrubbers

Ένας τρόπος αφαίρεσης των  $SO_x$  από τα καυσαέρια, είναι μέσω χημικών και καθαριστικών διεργασιών αποθείωσης (scrubbing desulphurization processes). Τα συστήματα αυτά, έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε ναυτικές εφαρμογές. Η ροή των καυσαερίων, έρχεται σε επαφή με αλκαλικό ρευστό (πχ ακατέργαστο θαλασσινό νερό και γλυκό νερό αναμειγμένο με καυστική σόδα). Ωστόσο, τα scrubbers είναι βαριά, ακριβά και χρειάζονται επιπλέον χώρο εγκατάστασης. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η παραγωγή μεγάλης ποσότητας αποβλήτων και γλίτσας (sludge). Τα απόβλητα πρέπει να περάσουν από μια φάση κατεργασίας πριν γίνει η απόθεση τους στη θάλασσα, και η γλίτσα θα πρέπει να μεταφέρεται σε ειδικές εγκαταστάσεις στη στεριά [4].



Σχήμα 2.36: Αναπαράσταση λειτουργίας μιας πλυντρίδας (scrubber) [11].

Υπάρχουν δύο είδη πλυντρίδας [11]:

- Υγρή πλυντρίδα (Wet scrubber) – Λειτουργεί μέσω της “επαφής” του στοχευόμενου ρύπου με το διάλυμα καθαρισμού. Τα διαλύματα αυτά μπορεί να είναι απλώς νερό (πχ για τα PM), ή διαλύματα χημικών αντιδραστηρίων που στοχεύουν σε ορισμένες χημικές ενώσεις (πχ SO<sub>x</sub>), ώστε μετά από μια σειρά χημικών αντιδράσεων να τις εξουδετερώνουν ή να τις μετατρέπουν σε λιγότερο ή μη επιβλαβή ενώσεις. Η απόδοση αφαίρεσης των ρύπων σε μια υγρή πλυντρίδα αυξάνεται με το χρόνο παραμονής σε αυτή των προς καθαρισμό καυσαερίων ή από την αύξηση του εμβαδού της επιφανείας του διαλύματος του διαχωριστή (χρήση ακροφυσίου ψεκασμού, πύργου, αναρροφητή κλπ).
- Ξηρή πλυντρίδα (Dry scrubber) – Η ξηρή πλυντρίδα σε αντίθεση με την υγρή, δεν οδηγεί σε κατάσταση κορεσμού το ρεύμα των απαερίων. Λειτουργεί μέσω της έγχυσης προσροφητικού αερίου στο ρεύμα των καυσαερίων, το οποίο περιλαμβάνει κάποιο αλκαλικό υλικό (συνήθως ενυδατωμένο ασβέστη, ανθρακικό νάτριο, ή διττανθρακικό νάτριο). Στη συνέχεια, τα όξινα αέρια (πχ SO<sub>x</sub>) αντιδρούν με τα αλκαλικά υλικά – προσροφητές για να σχηματίσουν στερεά άλατα, τα οποία απομακρύνονται από τη συσκευή ελέγχου σωματιδίων. Τα συστήματα ξηρής πλυντρίδας, μπορεί να χαρακτηριστούν και ως ξηρά μπεκ προσρόφησης (dry sorbent injectors – DSIs) ή ως ξηροί απορροφητές ψεκασμού (spray dryer absorbers – SDAs).

### **Καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο**

Ο πιο απλός τρόπος μείωσης εκπομπών των SO<sub>x</sub> στα καυσαέρια είναι με τη χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, πχ LSHFO (low sulphur HFO). Ωστόσο, κάτι τέτοιο χρειάζεται ειδική επεξεργασία αποθείωσης, κάτι που εκτός από την περιορισμένη διαθεσιμότητα, ανεβάζει σημαντικά το κόστος του καυσίμου [1]. Αξίζει να σημειώσουμε ότι, ένα σύστημα SCR (μέγιστη μείωση των NO<sub>x</sub>) χρειάζεται καύσιμο χαμηλού ποσοστού θείου για να λειτουργήσει. Επίσης η μείωση ή εξάλειψη του θείου από τα καύσιμα, συνεισφέρει στην μείωση του σχηματισμού των PM [4].

### **Εναλλακτικά καύσιμα**

Τέλος, υπάρχει και η λύση με τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων, όπως του LNG, ένα καύσιμο εξαιρετικής ποιότητας καύσης, φθηνό, και με μηδενικό ποσοστό θείου, με το οποίο και θα ασχοληθούμε στις επόμενες ενότητες [1].

### 3 ΤΟ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

Το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα συστατικών, που αποτελείται κατά κύριο λόγο από μεθάνιο (60% - 98%), με μικρές ποσότητες άλλων καυσίμων υδρογονανθράκων. Επίσης, περιέχει διάφορες ποσότητες N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, He και ίχνη άλλων αερίων. Η περιεκτικότητά του σε θείο ποικίλλει από πολύ μικρές τιμές μέχρι μεγαλύτερες. Το φυσικό αέριο αποθηκεύεται ως *συμπιεσμένο φυσικό αέριο* (compressed natural gas – CNG) υπό πίεση από 160 έως 250bar ή ως *υγροποιημένο φυσικό αέριο* (**liquefied natural gas – LNG**) υπό πίεση από 0,7 έως 21bar και θερμοκρασία περίπου -160°C. Ως καύσιμο η βέλτιστη λειτουργία του επιτυγχάνεται σε μηχανή με σώμα έγχυσης καυσίμου single throttle, ώστε ο χρόνος ανάμειξης μεταξύ αέρα και καυσίμου να μεγιστοποιείται, κάτι που είναι αναγκαίο για το καύσιμο αυτό.

Τα πλεονεκτήματα του Φυσικού Αερίου ως καυσίμου είναι:

- Αριθμός οκτανίων της τάξης του 120, γεγονός που το καθιστά άριστο καύσιμο για μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα. Αυτός ο υψηλός αριθμός οκτανίου επιτυγχάνεται λόγω και της υψηλής ταχύτητας διάδοσης του μετώπου της φλόγας του Φ.Α. και οι μηχανές που σχεδιάζονται για τη χρήση Φ.Α. μπορούν να λειτουργούν υπό υψηλούς λόγους συμπίεσεως.
- Χαμηλές εκπομπές ρύπων.
- Αφθονία σε όλες τις χώρες του κόσμου και δυνατότητα σύνθεσής του από άνθρακα.

Τα μειονεκτήματα του Φ.Α. ως καυσίμου είναι:

- Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα τη χαμηλή απόδοση στις μηχανές.
- Χαμηλός βαθμός πληρώσεως, επειδή είναι αέριο καύσιμο.
- Ανάγκη αποθήκευσης του υπό υψηλή πίεση. Η χρήση δοχείων υψηλής πίεσης εγείρει διάφορα θέματα ασφαλείας.
- Μη σταθερές ιδιότητες του καυσίμου.
- Αργός ανεφοδιασμός.

Οι μηχανές ανάφλεξης διά συμπίεσεως που καίνε μείγμα φυσικού αερίου και πετρελαίου είναι υπό εξέλιξη για χρήση σε φορτηγά και σε στατικές μονάδες ισχύος. Οι μηχανές χρησιμοποιούν Φ.Α. χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (ή και καθαρό μεθάνιο σε κάποιες περιπτώσεις) ως κύριο καύσιμο και μια μικρή ποσότητα πετρελαίου υψηλής ποιότητας (με χαμηλή συγκέντρωση σε θείο) για την ανάφλεξη. Αυτό γίνεται τόσο για οικονομικούς λόγους (το φυσικό αέριο είναι οικονομικότερο από το πετρέλαιο ανά μονάδα ενεργειακού περιεχομένου), αλλά και για περιβαλλοντικούς λόγους. Το Φ.Α. χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη θερμοκρασία καύσης σε σχέση με το καύσιμο diesel, ενώ με καθυστερημένη έγχυση η θερμοκρασία μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται σημαντικά οι εκπομπές NO<sub>x</sub>. Επιπλέον, λόγω της μικρότερης «ποσότητας» άνθρακα στο καύσιμο, παράγεται λιγότερο CO<sub>2</sub> και αμελητέοι σωματιδιακοί ρύποι. Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούν εγχυτήρες, οι οποίοι εγχύουν αμφότερα τα καύσιμα

ταυτοχρόνως. Το Φ.Α. εγγύεται περίπου υπό τη ταχύτητα του ήχου (343 m/s), γεγονός που του προσδίδει υψηλή τύρβη και συνεπώς υψηλή ταχύτητα φλόγας. Δοκιμές έχουν δείξει ότι η καθυστέρηση αναφλέξεως του μεικτού αυτού καυσίμου είναι σχεδόν ίδια με εκείνη του καθαρού καυσίμου diesel, ή ίσως ελάχιστα μεγαλύτερη [9].

Το φυσικό αέριο στην υγροποιημένη του μορφή, με το οποίο θα ασχοληθούμε στη παρούσα εργασία (το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο CH<sub>4</sub> & αιθάνιο C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), προσφέρει οικονομικότερη ναυτική μεταφορά μέσω ειδικά σχεδιασμένων κρυογονικών πλοίων (LNG carriers). Ο όγκος του είναι 600 φορές μικρότερος από την αέρια, φυσική, και ασυμπίεστη του μορφή. Είναι άχρωμο, άοσμο, μη τοξικό, και μη διαβρωτικό. Η διαδικασία υγροποίησης περιλαμβάνει την αφαίρεση ορισμένων συστατικών, όπως σκόνης, όξινων αερίων, ηλίου, νερού, και βαρέων υδρογονανθράκων, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν δυσκολία στη μεταγενέστερη επεξεργασία. Το Φ.Α. στη συνέχεια συμπυκνώνεται σε Υ.Φ.Α. (LNG), σε ατμοσφαιρική πίεση και μέσω ψύξης σε περίπου -162 °C (-260 °F). Η μέγιστη πίεση μεταφοράς ορίζεται περίπου στα 25 kPa (4 psi).

Το LNG χρησιμοποιείται κυρίως για τη μεταφορά του Φ.Α. στις αγορές, όπου επαναεριοποιείται και διανέμεται μέσω αγωγών. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οχήματα φυσικού αερίου, συνήθως στη συμπιεσμένη του μορφή (CNG). Το υψηλό κόστος υγροποίησης, καθώς και το υψηλό κόστος αποθήκευσης του LNG, έχουν εμποδίσει την ευρεία εμπορική του χρήση. Ωστόσο παρά τα μειονεκτήματά του, σε ενεργειακή βάση, η παραγωγή & εμπορική χρήση του LNG αναμένεται να φτάσει στο 10% της παγκόσμιας αγοράς μέχρι το 2020 [12].

### **ΑΤΜΟΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ - BOG**

Ατμούς υγροποιημένου φυσικού αερίου ή αλλιώς BOG (Boil-Off Gas), ονομάζουμε το φυσικό αέριο που τροφοδοτεί τις μηχανές πρόωσης LNG. Το φυσικό αέριο μεταφέρεται σε υγρή μορφή και σε πίεση ελαφρά ανώτερης από την ατμοσφαιρική. Όταν η θερμοκρασία διαπερνά τη μόνωση της δεξαμενής αποθήκευσης, η θερμοκρασία του LNG αυξάνεται, έχοντας ως συνέπεια τη μετατροπή ενός ποσοστού σε αέρια μορφή. Επίσης, όταν η θερμοκρασία εισρέει στη δεξαμενή, λόγω της εξάτμισης αυξάνεται και η πίεση της δεξαμενής. Η μόνωση των δεξαμενών αποθήκευσης LNG σχεδιάζεται από υλικά προηγμένης τεχνολογίας. Ωστόσο, όπως είναι αναπόφευκτο, ένα ποσοστό θερμότητας θα τη διαπερνά, έχοντας ως συνέπεια το παραπάνω φαινόμενο, το οποίο και συμβαίνει κατά τη διάρκεια ταξιδιού του πλοίου. Η ποσότητα του BOG κυμαίνεται ημερησίως περίπου στο 0,1% της συνολικής χωρητικότητας του πλοίου, ανάλογα με το σύστημα αποθήκευσης. Η πίεση στις δεξαμενές πρέπει να διατηρείται σταθερή, με τη βοήθεια εκτονωτικών βαλβίδων και δικλίδων ασφαλείας. Από θέμα οικονομίας, έχει αποδειχθεί ότι η επανυγροποίηση του φυσικού αερίου είναι ασύμφορη για τα περισσότερα πλοία. Έτσι για οικονομικούς λόγους, γίνεται εκμετάλλευση του φαινομένου BOG, για να χρησιμοποιηθεί το φυσικό αέριο στις μηχανές πρόωσης του πλοίου, που μπορεί να είναι ναυτικές στροβιλομηχανές ή ναυτικές μηχανές διπλού-καυσίμου. Ως συνέπεια προκύπτει η μείωση κατανάλωσης και κόστους του καυσίμου καθώς και το μειωμένο κόστος συντήρησης εξοπλισμού [14].

### 3.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ LNG

Στις μέρες μας, σε νέες κατασκευές πλοίων (new buildings), χρησιμοποιούνται συνήθως δύο είδη συστημάτων αποθήκευσης. Το ένα είδος είναι η ανεξάρτητη (self-supporting), ενώ το άλλο είδος είναι ο τύπος μεμβράνης (membrane). Οι πατέντες αυτές είναι ιδιοκτησία της εταιρίας Gaz Trasport & Technigaz (GTT).

Γενικά υπάρχει μια τάση να χρησιμοποιούνται περισσότερο οι τύποι μεμβράνης. Αυτό συμβαίνει διότι το πρισματικό σχήμα των δεξαμενών τύπου μεμβράνης, προσαρμόζεται καλύτερα στο σχήμα του κύτους του πλοίου (hull), και επίσης δημιουργούνται μικρότερα κενά μεταξύ των δεξαμενών φορτίου (cargo) και έρματος (ballast). Ως αποτέλεσμα και για την ίδια χωρητικότητα, η ανεξάρτητη δεξαμενή σε σχέση με τη δεξαμενή τύπου μεμβράνης προκύπτει ακριβότερη για τη μεταφορά του LNG. Ωστόσο οι ανεξάρτητες δεξαμενές είναι ανθεκτικότερες και έχουν μεγαλύτερη αντίσταση σε δυνάμεις παφλασμού, κάτι το οποίο τις κάνει πιο ελκυστικές σε περιπτώσεις δύσκολων καιρικών συνθηκών μεταφοράς [13].

Στις ανεξάρτητες δεξαμενές ο πιο διαδεδομένος είναι ο κλασικός σφαιρικός τύπος “Moss”, ενώ ο πρισματικός τύπος έχει χρησιμοποιηθεί πολύ σπάνια. Αντίθετα στις δεξαμενές τύπου μεμβράνης υπάρχουν πολλές διαφορετικές παραλλαγές, μιας και η τεχνολογία τα τελευταία χρόνια εξελίσσεται γύρω από αυτές, έχοντας ως στόχο τη περαιτέρω μείωση του ρυθμού ανάπτυξης ατμών φυσικού αερίου - BOR (boil-off rate).

#### 3.1.1 Ανεξάρτητες δεξαμενές

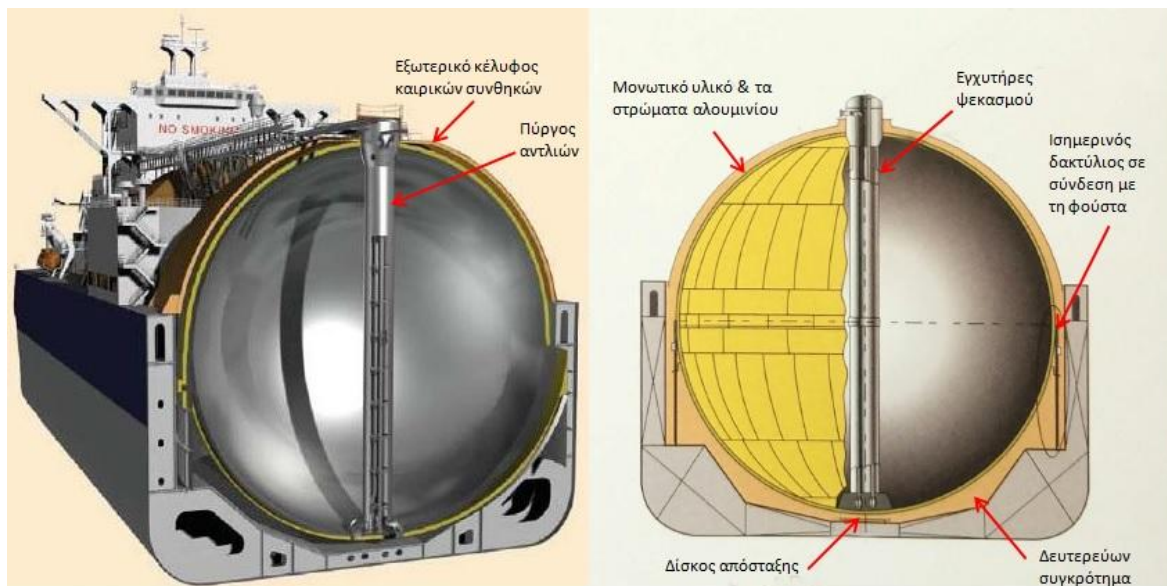
Πρόκειται για τον κλασικό “σφαιρικό” τύπο ανεξάρτητης δεξαμενής (moss type) - IMO type B (οι κωδικοποιήσεις A & C αφορούν άλλα είδη αερίων). Υπενθυμίζουμε ότι με τον όρο ανεξάρτητη δεξαμενή εννοούμε μια δεξαμενή η οποία δεν επηρεάζει τη μορφή του κύτους του πλοίου. Ωστόσο, δομικά παρουσιάζει φορτία και δυνάμεις που θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τη σχεδίαση του πλοίου.



Σχήμα 3.1: Πλοίο μεταφοράς LNG με ανεξάρτητες δεξαμενές τύπου Moss [13].

Το σφαιρικό κέλυφος της δεξαμενής κατασκευάζεται από αλουμίνιο, το οποίο καλύπτεται από αφρώδη μονωτικό υλικό (συνήθως πολυουρεθάνης). Το μονωτικό υλικό ενσωματώνεται γύρω από τη δεξαμενή είτε σε μορφή πλαισίων, είτε τυλίγεται γύρω από τη δεξαμενή (σε πιο σύγχρονες κατασκευές). Πάνω από τη μόνωση υπάρχει ένα λεπτό στρώμα αλουμινίου (tin foil), το οποίο συνεισφέρει στη στεγανότητα της μόνωσης μέσω αζωτούχας ατμόσφαιρας. Με ειδικό σύστημα καναλιών μεταξύ μόνωσης και κελύφους, γίνεται έλεγχος για τυχόν διαρροές και συνεχής καθαρισμός με άζωτο (το οποίο ως αδρανές αέριο αποτρέπει την ένωση μεθανίου – οξυγόνου).

Ένας ισημερινός δακτύλιος (equatorial ring), βρίσκεται στο μέσο ύψος της σφαίρας και συνδέει τις μεγάλες κυκλικές διατομές φούστες (circular skirts) με τον εσωτερικό πυθμένα του πλοίου. Οι φούστες είναι είδος συνδέσμου, γνωστές και ως «data-couple», οι οποίες κατασκευάζονται από έναν ιδιαίτερο συνδυασμό αλουμινίου & χάλυβα, και φέρουν το φορτίο της δεξαμενής στα δομικά στοιχεία του πλοίου. Επίσης η φούστα επιτρέπει και τη συστολή - διαστολή της δεξαμενής κατά τις διαδικασίες ψύξης και θέρμανσης (μπορεί να φτάσει και τα 60cm). Για το λόγο αυτό και οι σωληνώσεις της δεξαμενής διέρχονται από τον βόρειο πόλο (άνω μέρος) της δεξαμενής, όπου και συνδέονται με τις γραμμές του πλοίου [13].



Σχήμα 3.2: Διατομές ανεξάρτητης δεξαμενής τύπου Moss [15].

Οποιαδήποτε διαρροή λόγω αστοχίας του κελύφους θα διαγνωσθεί γρήγορα και θα συσσωρευτεί στο δίσκο απόσταξης (drip tray) που βρίσκεται κάτω από τον νότιο πόλο της σφαίρας. Ο δίσκος αυτός είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να περισυλλέξει την ποσότητα που θα δώσει την ένδειξη αστοχίας της δεξαμενής και είναι μέρος του δευτερεύοντος συγκροτήματος της κατασκευής. Όπως είπαμε προηγουμένως, ο χώρος μεταξύ κελύφους & μόνωσης καθαρίζεται με αδρανές αέριο. Ο χώρος συγκράτησης της δεξαμενής μαζί με το δευτερεύων

συγκρότημα (δηλαδή από το tinfoil και μετά), γεμίζει με αδρανές αέριο μόνο σε περίπτωση διαρροής. Γενικά, ο χώρος αυτός γεμίζει με ξηρό ατμοσφαιρικό αέρα, για λόγους αποφυγής της υγρασίας, η οποία μπορεί να δημιουργήσει κρύα σημεία (cold spots) στην εξωτερική επιφάνεια της δεξαμενής [15]. Κάθε τρεις μήνες γίνεται έλεγχος της εξωτερικής πλευράς της δεξαμενής για να μη προκληθεί θραύση του μονωτικού υλικού λόγω των κρύων σημείων. Επίσης, εσωτερικά της δεξαμενής υπάρχουν οι εγχυτήρες ψεκασμού, οι οποίοι ψεκάζουν LNG στα τοιχώματα της δεξαμενής με σκοπό να μειωθεί η θερμοκρασία [13].

Υπάρχουν μερικές παραλλαγές στον σχεδιασμό των σφαιρικών δεξαμενών τύπου B, ανάλογα με τον χρόνο και τον τόπο κατασκευής τους. Αξιοσημείωτες διαφορές που μπορούν να επηρεάσουν τους χρόνους ψύξης είναι [15]:

- Υποστήριξη από τον κεντρικό πύργο αντλιών και την άνω & κάτω διάταξη του συγκροτήματος.
- Το σχήμα της βάσης του πύργου των αντλιών.
- Το συγκρότημα της μόνωσης (σπειροειδές περιμετρικό ή από σταθερά πλαίσια).

Γενικά, λόγω της υψηλής αντοχής των δεξαμενών τύπου B, υπάρχει η δυνατότητα εκφόρτωσης σε πίεση των 2 bar. Κανονικά το όριο είναι 0,7 bar για συνθήκες ηρεμίας, λόγω του ότι αποτρέπονται οι μετακινήσεις – παφλασμοί που θα μπορούσαν να αναπτύξουν δυναμική πίεση του ρευστού στα δομικά στοιχεία της δεξαμενής.

Τέλος, υπάρχει και πρισματική δεξαμενή τύπου B, η οποία όμως έχει πολύ λίγα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες διατάξεις δεξαμενών (τύπου Moss & Membrane) και για το λόγο αυτό δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως. Επίσης σημαντικό μειονέκτημα της διάταξης είναι ότι ελάχιστα ναυπηγία έχουν άδεια να τις κατασκευάσουν [15].

### 3.1.2 Δεξαμενές τύπου μεμβράνης

Σε αντίθεση με τις ανεξάρτητες δεξαμενές, οι δεξαμενές τύπου μεμβράνης χρησιμοποιούν το εσωτερικό κύτος του πλοίου για τη διαμόρφωση τους (ουσιαστικά χτίζονται εσωτερικά στη δομή του πλοίου).

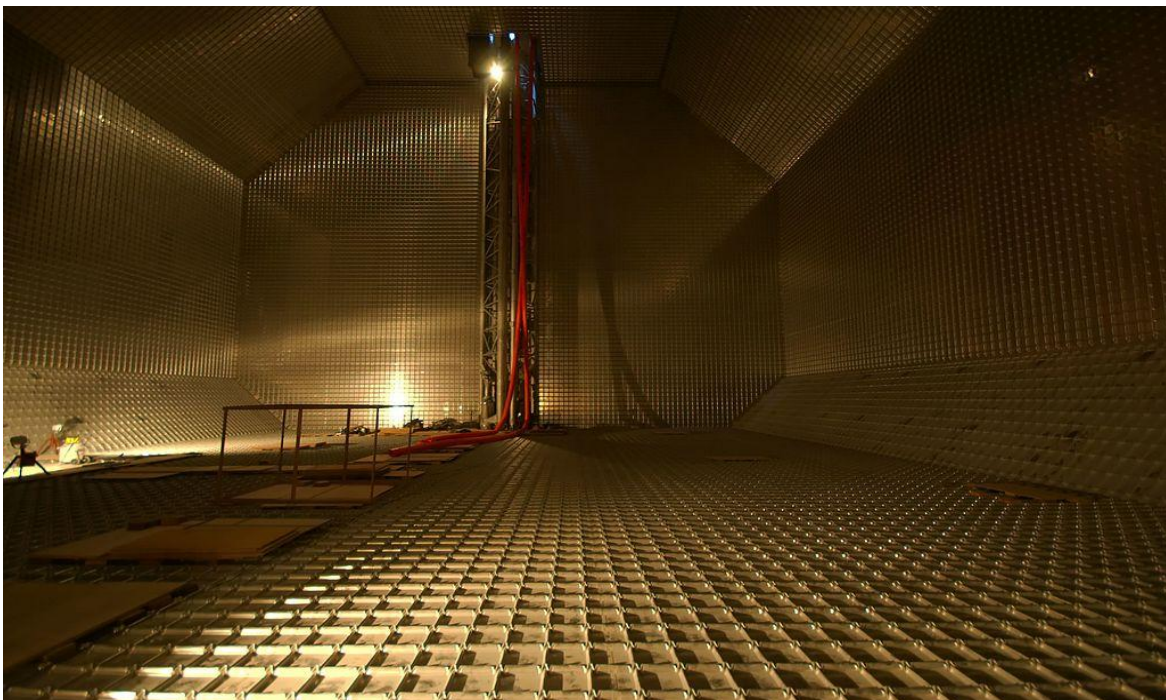


Σχήμα 3.3: Πλοίο μεταφοράς LNG με δεξαμενές τύπου μεμβράνης [17].

Το σύστημα αυτό φέρει διπλά φράγματα (barriers), τα οποία συνεισφέρουν στην ασφάλεια της κατασκευής, διότι αποτρέπουν το χαμηλής θερμοκρασίας LNG να έρθει σε επαφή με τη χαλύβδινη δομή του πλοίου και να προκαλέσει φθορά. Καθένα από τα φράγματα αυτά εμπεριέχει ένα λεπτό στρώμα μεμβράνης, από υλικό το οποίο έχει την ιδιότητα αντίστασης και απορρόφησης του φαινομένου θερμικής συστολής, καθώς επίσης και να υποστηρίζεται από ένα στρώμα μόνωσης. Η μεμβράνη σχεδιάζεται έτσι ώστε τα φυσικά φαινόμενα της θερμικής συστολής-διαστολής να αντισταθμίζονται και να μη προκαλείται παραμόρφωση.

Το πρωτεύον φράγμα της μεμβράνης (πάχος περίπου 0,7-1,5mm), είναι το εσωτερικό στοιχείο που έρχεται σε άμεση επαφή με το LNG. Να σημειώσουμε ότι το χαλύβδινο υλικό του εσωτερικού κύτους του πλοίου, επιλέγεται βάση των χειρότερων συνθηκών λειτουργίας (δυσμενείς καιρικές συνθήκες & το LNG να έχει περάσει το πρώτο φράγμα).

Το δευτερεύον φράγμα είναι σχεδιασμένο για να συγκρατεί την προβλεπόμενη ποσότητα διαρροής LNG από το πρωτεύον φράγμα (για περίοδο 15 ημερών), σύμφωνα με τον κώδικα IGC – International Gas Carrier Code. Κατά τη διάρκεια αυτή, η θερμοκρασία του διπλού κύτους δε πρέπει να πέσει κάτω από τη θερμοκρασία όπου το υλικό του χάλυβα της κατασκευής γίνεται ψαθυρό.

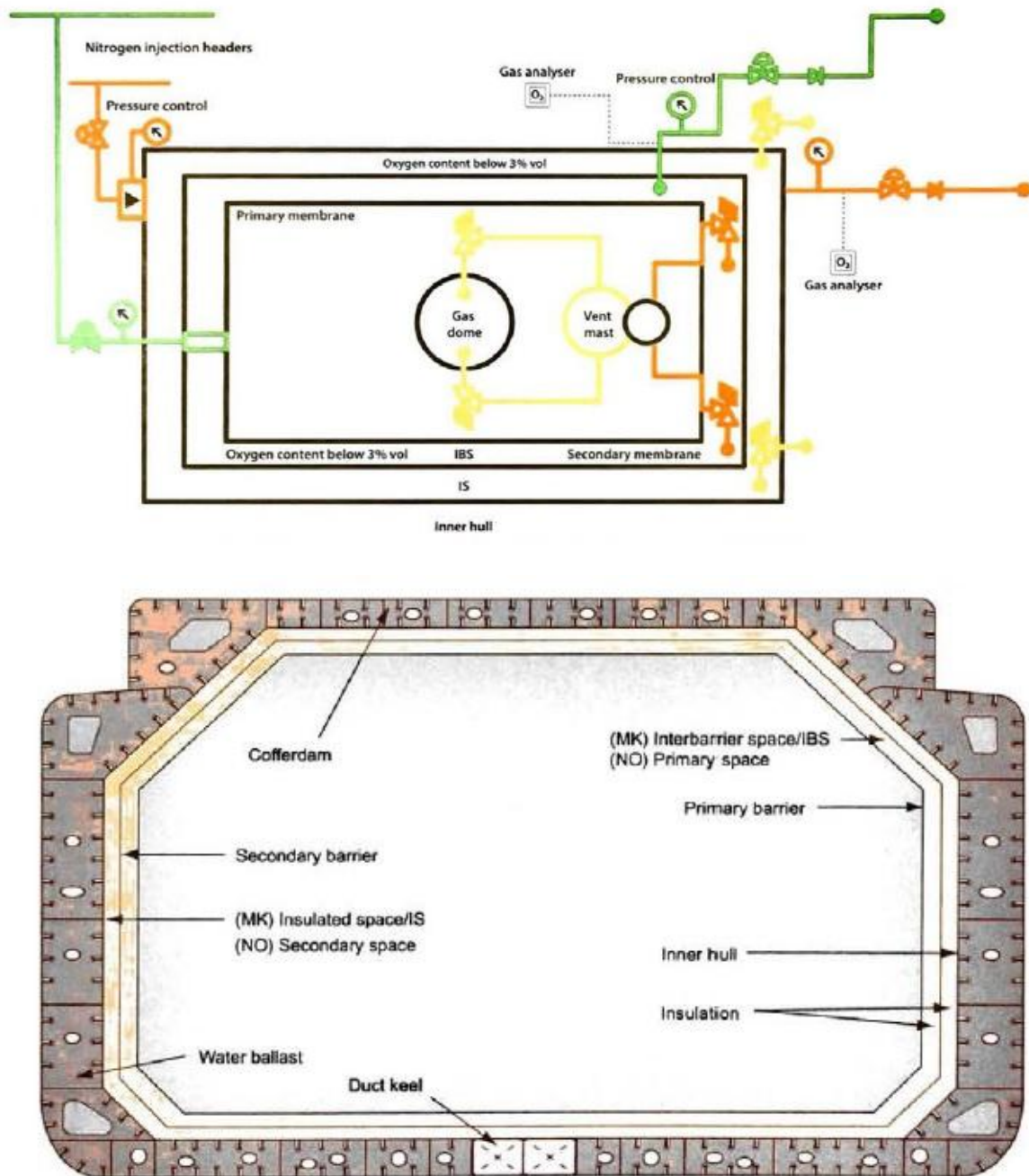


Σχήμα 3.3: Εσωτερικό πρισματικής δεξαμενής τύπου Μεμβράνης (Mk III) [13].

Οι χώροι των μονώσεων του συστήματος ελέγχονται από αισθητήρες θερμοκρασίας, για τη διάγνωση πιθανών ελαττωμάτων της μεμβράνης. Επιπρόσθετα, οι χώροι αυτοί διαρρέονται συνεχώς από άζωτο (για τον ίδιο λόγο που έχει αναφερθεί παραπάνω στη δεξαμενή τύπου B), όπου και γίνεται έλεγχος για τυχόν διαρροές μέσω ανιχνευτών αερίου (πριν το σύστημα εξαερισμού). Τα κύρια συστήματα τύπου μεμβράνης που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας



είναι το NO 96 και το MK III. Και τα δύο συστήματα είναι προϊόντα της εταιρίας GTT (NO 96 της Gaz-transport & MK III της Technigaz) [15].



Σχήμα 3.4: Εσωτερικό πρισματικής δεξαμενής τύπου Μεμβράνης [15].

## ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ NO 96

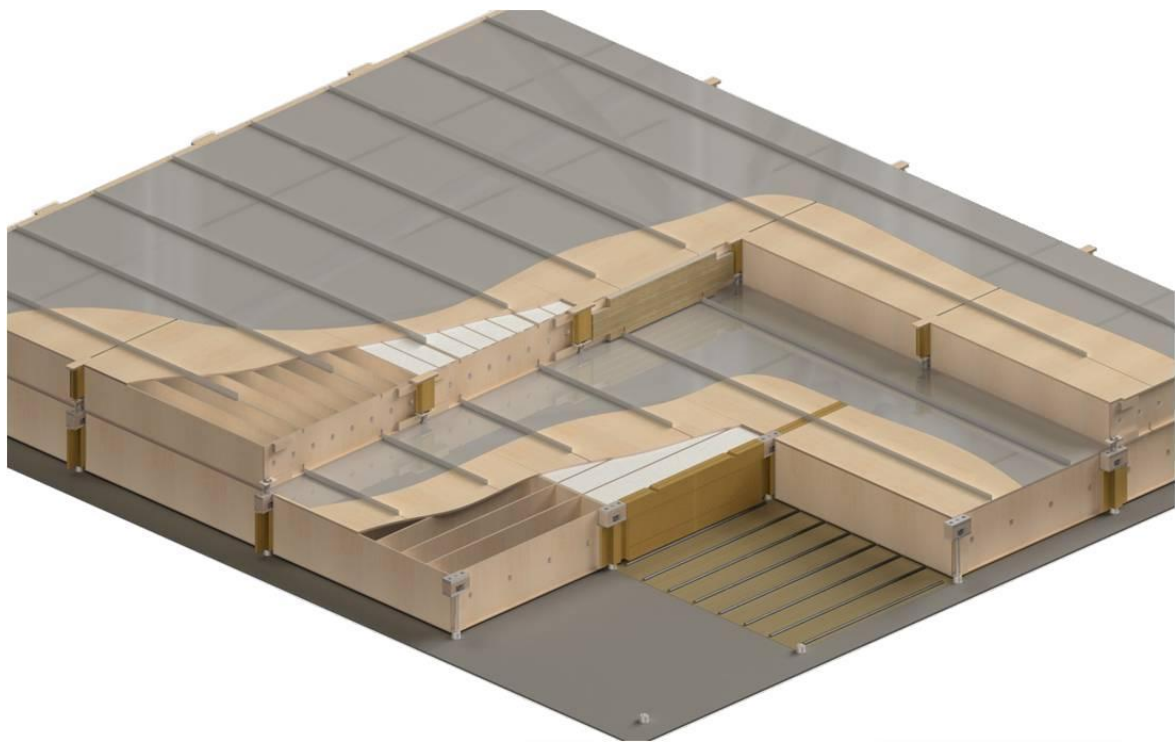
Το πρωτεύον και δευτερεύον φράγμα του συστήματος αυτού αποτελείται από το υλικό Invar. Πρόκειται για ένα κράμα χάλυβα με περιεκτικότητα 36% νικελίου και 0,2% άνθρακα, το οποίο συνδέεται με ξύλινα κουτιά τύπου κόντρα πλακέ (plywood), τα οποία και αποτελούν

τη πρώτη βαθμίδα της μόνωσης. Τα κουτιά αυτά, έχουν πάχος 200-300mm και συνδέονται με το δεύτερο στρώμα φράγματος και μόνωσης (πάλι Invar & plywood).

Το υλικό Invar, επιλέγεται λόγω του πολύ χαμηλού βαθμού θερμικής διαστολής, κάνοντας έτσι τις αρθρώσεις ή και αυλακώσεις διαστολής περιττές. Το πάχος του Invar είναι 0,7 mm και οι διαστάσεις του συνολικού πάνελ 500mm. Τα πάνελ συνδέονται μεταξύ τους με συγκολλήσεις και η συνολική κατασκευή, μέσω των συνδέσεων της, συνεισφέρει στην απορρόφηση των εγκάρσιων φορτίων του πλοίου.

Για λόγους βελτίωσης του συστήματος αυτού, έχουν εφαρμοστεί αρκετές τροποποιήσεις των επόμενων γενιών. Ιστορικά έχει χρησιμοποιηθεί ο περλίτης ως υλικό μόνωσης, ο οποίος εάν επεξεργαστεί με σιλικόνη, αποκτά αδιαπερατότητα σε νερό και υγρασία. Η σκόνη περλίτη μπορεί να αντικατασταθεί από υαλοβάμβακα για περαιτέρω βελτίωση του BOR (μεταξύ 0,125 – 0,13% / ανά ημέρα).

Τροποποιώντας το πάχος της μόνωσης μπορούμε να επιτύχουμε τον επιθυμητό BOR. Μια άλλη παραλλαγή γίνεται με αντικατάσταση των στρωμάτων μόνωσης των δύο κουτιών, ενώ το συνολικό της πάχος παραμένει το ίδιο.



Σχήμα 3.5: Μembrάνη τύπου NO 96 της GTT [16].

Συγκεκριμένα, η πρωτεύον μόνωση εμπεριέχει υαλοβάμβακα εντός των ξύλινων κουτιών, ενώ η δευτερεύον μόνωση αποτελείται από τον συνδυασμό του ίδιου πάλι στοιχείου (δηλαδή ξύλινο κουτί με υαλοβάμβακα), όμως αυτή τη φορά με ένα είδος πολυουρεθάνης,

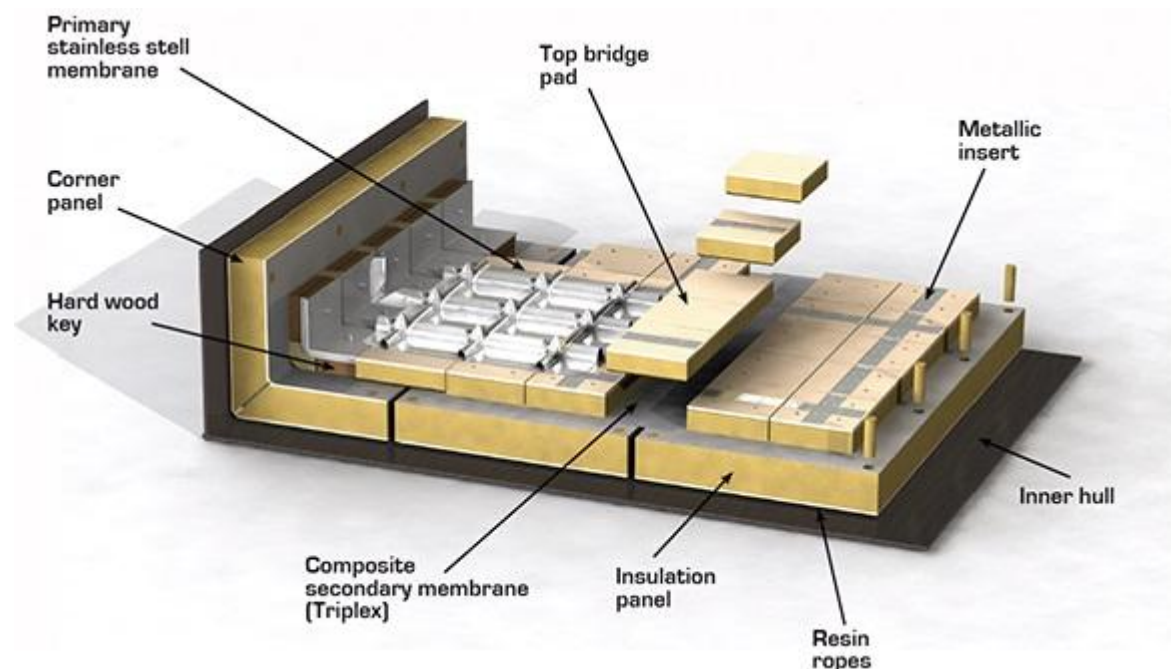
συγκεκριμένα - rigid polyurethane foam (RPU). Η παραλλαγή αυτή προσφέρει βελτίωση του BOR σε βαθμό (0,105 – 0,11% / ανά ημέρα).

Τέλος, για υψηλότερες απαιτήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές παραλλαγές, τροποποιώντας πάχη, νούμερα ή και αριθμό υλικών των ξύλινων κουτιών [15]. Μια άλλη ιδέα θα ήταν η χρήση του αδρανούς αερίου αργό (argon) αντί για το άζωτο, μιας και το αργό έχει μικρότερο συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και μπορεί να βελτιώσει επιπλέον τον BOR [13]. Το τελευταίας γενιάς NO 96 MAX έχει επιτύχει βελτίωση του BOR σε βαθμό 0,09% / ανά ημέρα [17].

### ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ MK III

Στο σύστημα MK ή αλλιώς Mark, το πρωτεύον φράγμα αποτελείται από ανοξείδωτο χάλυβα (πάχους 1,2 mm). Στο φράγμα αυτό υπάρχει ένας σχηματισμός αυλακώσεων που μοιάζει με “βάφλες”, οι οποίες και υπάρχουν για το φαινόμενο συστολής – διαστολής. Στην αγορά βγαίνουν σε μορφή πάνελ, τα οποία και συγκολλούνται μεταξύ τους κατά τον τελικό σχηματισμό της δεξαμενής.

Οι πρωτεύον και δευτερεύον μονώσεις είναι από πορώδη αφρό πολυουρεθάνης, όπως και στο σύστημα NO 96 (παλαιότερα χρησιμοποιούνταν το balsa wood). Μεταξύ των μονώσεων εφάπτονται λεπτές πλάκες ξύλου κόντρα πλακέ, και το υλικό Triplex ενδιάμεσα τους.



Σχήμα 3.6: Μembrάνη τύπου MK III της GTT [16].

Το Triplex είναι ουσιαστικά το δευτερεύον φράγμα του συστήματος, το οποίο και αποτελείται από ένα λεπτό φύλλο αλουμινίου μεταξύ δύο στρωμάτων υαλοβάμβακα και ρητίνης [15].

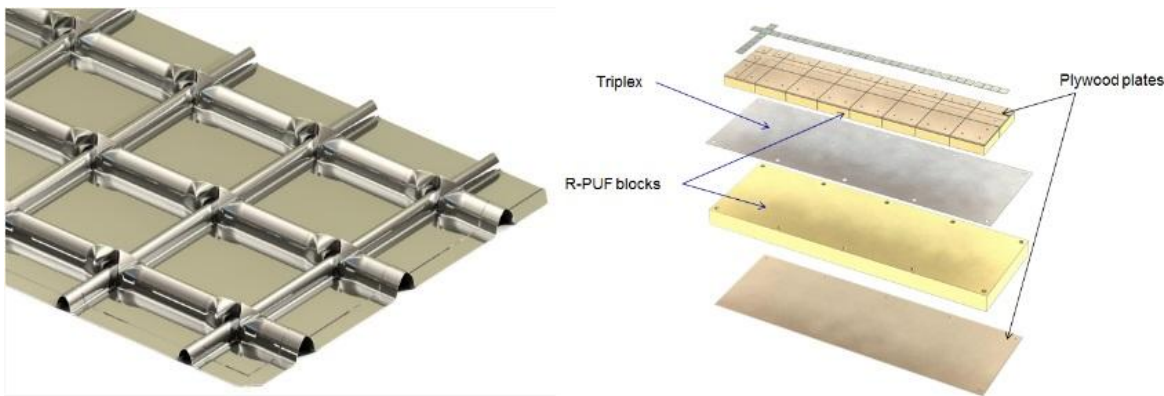
Τα στρώματα της μεμβράνης από το εσωτερικό της δεξαμενής έως την εσωτερική δομή του πλοίου είναι [13]:

- LNG
- Πρωτεύον φράγμα από αυλακωμένο / μορφής βράφλας ανοξείδωτο χάλυβα 304 L
- Πρωτεύον μόνωση πολυουρεθάνης
- Δευτερεύον φράγμα από Triplex
- Δευτερεύον μόνωση πολυουρεθάνης
- Εσωτερική δομή πλοίου

Το φορτίο της συνολικής κατασκευής μεταφέρεται στη δομή του πλοίου μέσω σιλικονούχας κόλλας που ενώνει τις μεμβράνες με το κύτος του πλοίου.

Για περαιτέρω μείωση του BOR, καθώς και διατήρηση μεγαλύτερων φορτίων LNG, έχει προταθεί ο όρος “flex” για το συγκεκριμένο σύστημα. Συγκεκριμένα, το πάχος της μόνωσης του συστήματος MK III μπορεί να αυξηθεί και το υλικό RPU μπορεί να ενισχυθεί με περισσότερες ίνες υαλοβάμβακα [15]. Το τελευταίας γενιάς σύστημα MK V, αποδίδει 0,085% BOR / ανά ημέρα [17].

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται καθαρά η “βράφλα” του πρωτεύοντος φράγματος, καθώς και το συνολικό “σάντουιτς” του συστήματος MK III.



Σχήμα 3.7: Λεπτομέρειες μεμβράνης τύπου MK III της GTT [16].

## 3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗΣ LNG

### 3.2.1 Σωληνώσεις & βαλβίδες

Τα LNG carrier, διαθέτουν δύο διαφορετικές και παράλληλες σωληνογραμμές. Την γραμμή του LNG (liquid/spray line), και την γραμμή του BOG (vapour line). Από τον κάθε συλλέκτη (header), οι σωληνώσεις καταλήγουν στις δεξαμενές μέσω διακλαδώσεων, αλλά και στις πλαϊνές διασυνδέσεις του πλοίου για τη φόρτωση-εκφόρτωση. Η σωληνογραμμή του LNG καταλήγει στον πάτο των δεξαμενών μέσω των πύργων αντλιών, ενώ του BOG στην κορυφή τους. Μερικά LNG carrier που διαθέτουν μονάδες επανυγροποίησης ή και επαναεριοποίησης, διαθέτουν επιπλέον σωληνώσεις & διακλαδώσεις.

Σύμφωνα με τον IGC κώδικα, όλες οι σωληνώσεις θα πρέπει να βρίσκονται πάνω από το επίπεδο του καταστρώματος. Για το λόγο αυτό και οι δεξαμενές πάντα προεξέχουν, έχοντας την “γραμμή σωληνώσεων” από πάνω τους. Επίσης, στις οροφές των δεξαμενών, βρίσκονται και οι ανακουφιστικές βαλβίδες (relief valves), οι οποίες και είναι συνδεδεμένες με τον ιστό εξαερισμού (vent riser ή mast riser), ο οποίος βρίσκεται σε ασφαλή ύψος και απόσταση πάνω από κάθε δεξαμενή (safe gas zone).

Για το φαινόμενο της θερμικής συστολής-διαστολής, χρησιμοποιούνται συνήθως βρόγχοι διαστολής (expansion loops) και καμπή διαστολής (expansion bends). Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμος χώρος στη γεωμετρία του πλοίου, χρησιμοποιούνται και οι αρμοί διαστολής (expansion bellows) [15]. Το υλικό κατασκευής, συνήθως είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας (stainless steel) 304L λόγω της υψηλής του αντοχής σε διάβρωση, αλλά και των μηχανικών του ιδιοτήτων σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες [18]. Η εισαγωγή αδρανούς αερίου στις σωληνογραμμές LNG ή και BOG, γίνεται με εφαρμογή συνδέσμων (spool pieces).

Οι σωληνογραμμές ενός LNG carrier μπορούν να διαθέτουν τα εξής [15]:

- Cargo manifold reducers (μειωτήρες πίεσης)
- Cargo valves (βαλβίδες παροχής) – Υδραυλική ενεργοποίηση
- Cargo strainers (φίλτρα) – Προστασία για τις αντλίες
- Emergency shutdown (ESD) systems – Συστήματα ασφαλείας - διακοπή παροχής
- Relief valves (ανακουφιστικές βαλβίδες) – τύπου “Pilot operated relief valves”

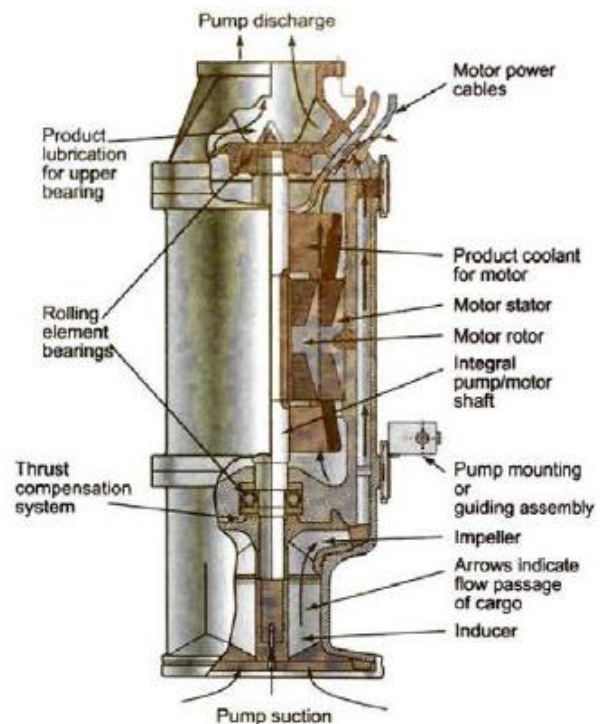
Να σημειώσουμε ότι για τις διασυνδέσεις σωληνώσεων με reducers, spool pieces, expansion bellows χρειάζονται ειδικές φλάντζες στεγανότητας. Οι διασυνδέσεις αυτές θα πρέπει να ελέγχονται από το προσωπικό του πλοίου για τυχόν φθορές-διαρροές και τα ανταλλακτικά θα πρέπει αυστηρά να είναι από το ίδιο προβλεπόμενο υλικό. Το ίδιο ισχύει και για τα cargo strainers, τα οποία και θα πρέπει να ελέγχονται και να καθαρίζονται για τυχόν υπολείμματα ή μεταλλικά αντικείμενα. Τέλος, καλό θα είναι να μη χρησιμοποιούνται τυχόν ανταλλακτικά της γραμμής του BOG (vapour line) στις γραμμές του LNG (liquid & spray lines) [15].

### 3.2.2 Αντλίες

Στο εσωτερικό μιας δεξαμενής LNG, βρίσκονται τρεις εμβαπτισμένες αντλίες (submerged pumps). Οι δύο κύριες αντλίες (main cargo pumps), οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκφόρτωση του LNG, καθώς και μια πολύ μικρότερη αντλία η οποία ονομάζεται αντλία ψεκασμού (spray pump). Η αντλία ψεκασμού χρησιμοποιείται για [13]:

- Τροφοδοσία καυσίμου για το σύστημα πρόωσης
- Ψύξη των δεξαμενών πριν από την φόρτωση
- Τελική “αποστράγγιση” (stripping) του LNG κατά την εκφόρτωση

Όλες αυτές οι αντλίες εμπεριέχονται στον “πύργο αντλιών”, ο οποίος ουσιαστικά «κρέμεται» από την κορυφή της δεξαμενής και έχει εύρος λειτουργίας για όλο το βάθος της. Επίσης, ο πύργος των αντλιών εμπεριέχει και τα διαγνωστικά συστήματα πλήρωσης, τα οποία βρίσκονται κοντά στον πάτο της δεξαμενής.



Σχήμα 3.8: Εμβαπτισμένη αντλία δεξαμενής LNG [15].

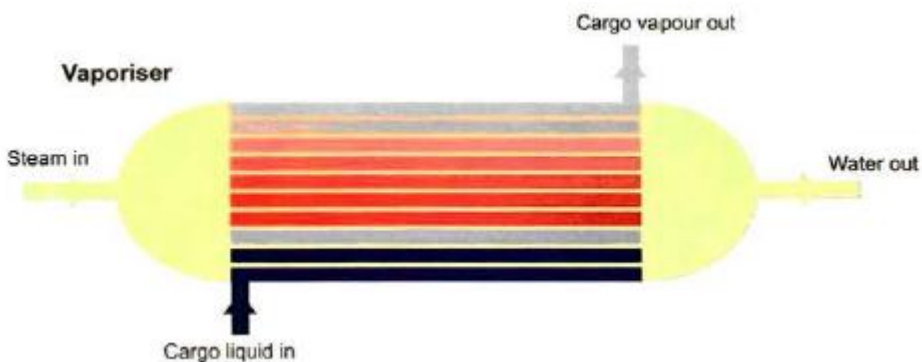
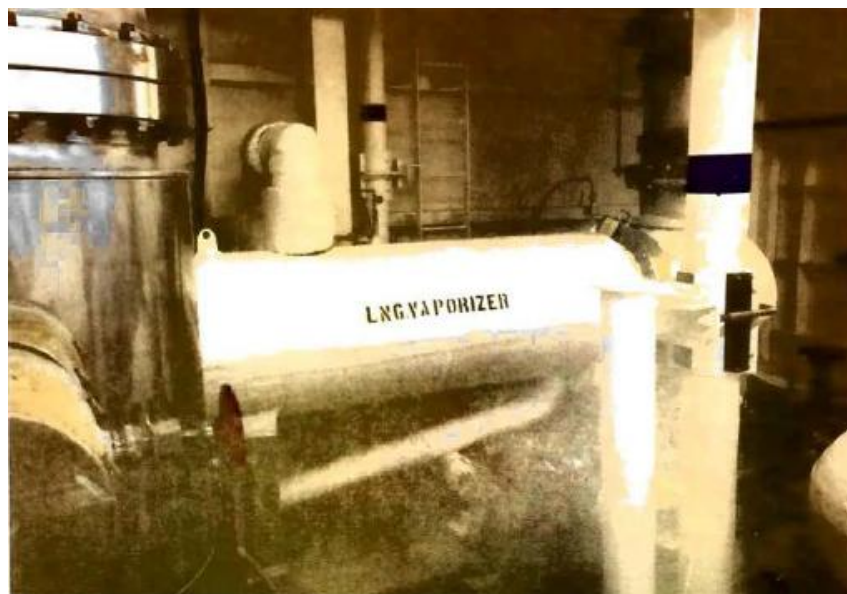
Τέλος, στις δεξαμενές τύπου μεμβράνης, υπάρχει και ένας άδειος σωλήνας με βαλβίδα ελατηρίου (spring loaded foot valve) στον πάτο, η οποία μπορεί να ανοίξει με το βάρος ή την πίεση. Πρόκειται για τον πύργο της αντλίας έκτακτης ανάγκης (emergency pump tower). Σε περίπτωση που οι κύριες αντλίες αστοχήσουν, ανοίγεται το άνω μέρος του σωλήνα και βυθίζεται μέχρι τον πάτο της δεξαμενής η αντλία έκτακτης ανάγκης (emergency pump). Στη συνέχεια και εφόσον κλείσει το άνω μέρος του σωλήνα, η αντλία πρεσάρεται και ανοίγει την βαλβίδα ελατηρίου. Έτσι μπορεί να πραγματοποιηθεί η εκφόρτωση του LNG [13].

### 3.2.3 Εξατμιστές & μονάδες επαναεριοποίησης

Για την πρόωση των LNG carrier, μπορεί να χρειαστεί “εξαναγκασμένος” σχηματισμός αερίου, εάν δεν υπάρχει ήδη διαθέσιμο BOG (λόγω των απωλειών θερμότητας). Τα LNG carrier συνήθως διαθέτουν δύο εξατμιστές (vaporisers), υψηλής & χαμηλής χωρητικότητας, για τις ανάγκες του πλοίου, οι οποίοι είναι:

- High Duty (H/D) vaporiser – για την πλήρωση των δεξαμενών
- Low Duty (L/D) vaporiser – για παροχή στα συστήματα πρόωσης

Πρόκειται για δεξαμενές, οι οποίες εμπεριέχουν εναλλάκτες θερμότητας στο εσωτερικό τους. Κατασκευαστικά, μοιάζουν με τους κλασσικούς θερμαντήρες (heaters), με μόνη διαφορά πως είναι σχεδιασμένοι να αλλάζουν τη μορφή του καυσίμου (από υγρή σε αέρια) και όχι απλά να το θερμαίνουν. Ως πηγή θερμότητας, συνήθως χρησιμοποιείται ο ατμός. Εναλλακτικά, χρησιμοποιούνται το θαλασσινό νερό και αντιψυκτικά, με προσοχή όμως ώστε να μη παγώσουν και φράξει η ροή στον εναλλάκτη. Τέλος, μερικά LNG carrier είναι εφοδιασμένα με συστήματα μεγαλύτερου μεγέθους, τις μονάδες επαναεριοποίησης (regasification units), για απευθείας παροχή Φ.Α. στο δίκτυο χωρίς την ανάγκη τερματικού σταθμού.



Σχήμα 3.9: Τυπικός εξατμιστής LNG με παροχή ατμού [15].

### 3.2.4 Χειρισμός & επανυγροποίηση του BOG

Οι ατμοί του υγροποιημένου φυσικού αερίου (Boil-Off Gas/vapour) – BOG, δημιουργούνται κατά τις διαδικασίες ψύξης και φόρτωσης των δεξαμενών αλλά και κατά το ταξίδι του πλοίου. Για τον έλεγχο της πίεσης του BOG στα LNG carrier, υπάρχουν οι εξής επιλογές:

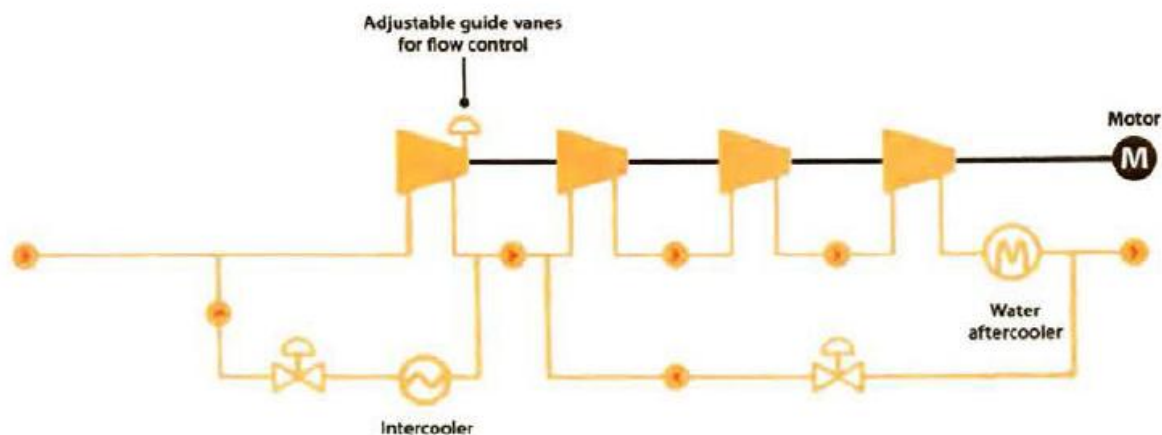
- Επιστροφή του BOG στους σταθμούς κατά τις διαδικασίες φόρτωσης-εκφόρτωσης
- Καύση του BOG μέσω του συστήματος πρόωσης ή μονάδας καύσης GCU
- Επανυγροποίηση του BOG με αντίστροφο κύκλο Brayton

### Συμπιεστές – Χειρισμός του BOG

Στον χώρο των συμπιεστών ενός πλοίου (compressor room), διακρίνουμε δύο ειδών συμπιεστές. Τους LD συμπιεστές (Low Duty Compressors), οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά το ταξίδι του πλοίου (για την καύση ή επανυγροποίηση του), καθώς και τους HD συμπιεστές (High Duty Compressors), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες ψύξης και φόρτωσης των δεξαμενών, όπου επιστρέφουν το BOG στον τερματικό σταθμό.

Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, οι LD συμπιεστές συλλέγουν το BOG από τον συλλέκτη των δεξαμενών (vapour header), και το προωθούν στον θερμαντήρα (LD heater) πριν εισέλθει στον χώρο της μηχανής (engine room). Οι σωληνώσεις από το engine room έως το σύστημα πρόωσης είναι διπλού τοιχώματος (double wall pipeline ή αλλιώς “jacked”) και ο ενδιάμεσος κενός χώρος πρεσσάρεται με άζωτο ή αερίζεται επαρκώς (τουλάχιστον 30 εναλλαγές αέρα ανά ώρα). Πριν και μετά τις λειτουργίες του συστήματος καύσης, οι σωληνώσεις αυτές καθαρίζονται με άζωτο. Επίσης, συμπεριλαμβάνονται προστατευτικά συστήματα τα οποία διαθέτουν αυτοματισμούς για τον έλεγχο διαρροών και την αυτόματη διακοπή παροχής σε περίπτωση δυσλειτουργίας.

Οι συμπιεστές διαθέτουν έλεγχο πάλμωσης (surge control) και άλλες προστατευτικές συσκευές. Μερικοί συμπιεστές χρησιμοποιούν το LNG ως μέσο πρόψυξης (precooling).



Σχήμα 3.10: Τυπικός 4-βάθμιος LD συμπιεστής για χρήση σε σύστημα πρόωσης DFDE [15].



Συνοψίζοντας, οι συμπιεστές στα LNG carrier χρησιμοποιούνται κυρίως για:

- Να στείλουν το BOG πίσω στην ακτή κατά τη διαδικασία φόρτωσης
- Κυκλοφορία θερμού BOG κατά τη διαδικασία θέρμανσης
- Παροχή κατάλληλης ροής καυσίμου στο σύστημα πρόωσης
- Παροχή ροής στη μονάδα καύσης GCU (εάν υπάρχει)
- Παροχή ροής στη μονάδα επανυγροποίησης (εάν υπάρχει)

Συνήθως στα LNG carrier, για τη μεταφορά του αερίου χρησιμοποιούνται στροβιλοσυμπιεστές (turbo-compressors), εάν και σε μερικά συστήματα πρόωσης διπλού καυσίμου υψηλής πίεσης χρησιμοποιούνται παλινδρομικοί συμπιεστές πολλαπλών βαθμίδων.

Στους στροβιλο-συμπιεστές συμπεριλαμβάνεται ένας ρότορας, ο οποίος συνήθως είναι τοποθετημένος οριζόντια και συνδέεται με μηχανικό σύστημα μετάδοσης κίνησης. Ο έλεγχος της παροχής γίνεται μέσω των μεταβλητών οδηγών περυγίων εισόδου (adjustable inlet guide vanes). Οι συμπιεστές μπορεί να είναι σταθερής ή μεταβλητής ταχύτητας, ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται. Η βαλβίδα ελέγχου πάλμωσης (surge control valve), προστατεύει τον συμπιεστή από τυχόν φθορές που μπορεί να προκληθούν από τις παλμώσεις.

Τα σύγχρονα LNG carrier χρησιμοποιούν ηλεκτροκινητήρες για τη λειτουργία των συμπιεστών. Οι βαθμίδες των συμπιεστών καθορίζονται ανάλογα με τη χρήση τους:

- HD Συμπιεστές (μονή βαθμίδα) – Στόχος η μεταφορά μεγάλης μάζας BOG, υπό χαμηλή πίεση.
- LD συμπιεστές (μία έως 6-βαθμίδες) – Στόχος η παροχή του BOG στο σύστημα πρόωσης με κατάλληλη πίεση και ρυθμό παροχής. Για τα συστήματα πρόωσης με αμοστροβίλους απαιτείται χαμηλή πίεση εισαγωγής, και έτσι χρησιμοποιούνται συμπιεστές μονής βαθμίδας. Αντίθετα, τα συστήματα πρόωσης παλινδρομικών μηχανών διπλού καυσίμου απαιτούν υψηλότερες πιέσεις εισαγωγής, και έτσι χρησιμοποιούνται περισσότερες βαθμίδες συμπίεσης. Επιπρόσθετα, τα διάφορα συστήματα επανυγροποίησης του BOG (εάν υπάρχουν στο πλοίο) μπορεί να απαιτούν επιπλέον βαθμίδες συμπίεσης.

### **Μονάδες καύσης του BOG – GCU**

Στα συμβατικά συστήματα πρόωσης με αμοστροβίλους, το περίσσιο BOG διοχετεύεται στους καυστήρες (boilers) και ο επιπλέον ατμός που παράγεται απορρίπτεται μέσω εκτόνωσης ατμού (steam dump) με μέσο ψύξης το θαλασσινό νερό. Ωστόσο κάτι τέτοιο δε μπορεί να γίνει σε συστήματα πρόωσης που χρησιμοποιούν MEK. Η πιο απλή λύση είναι η εγκατάσταση μιας μονάδας καύσης αερίου – GCU (Gas Combustion Unit). Σε κάποια νεότερα πλοία η μονάδα αυτή συνδυάζεται με μια γεννήτρια αδρανούς αερίου – IGG (Inert

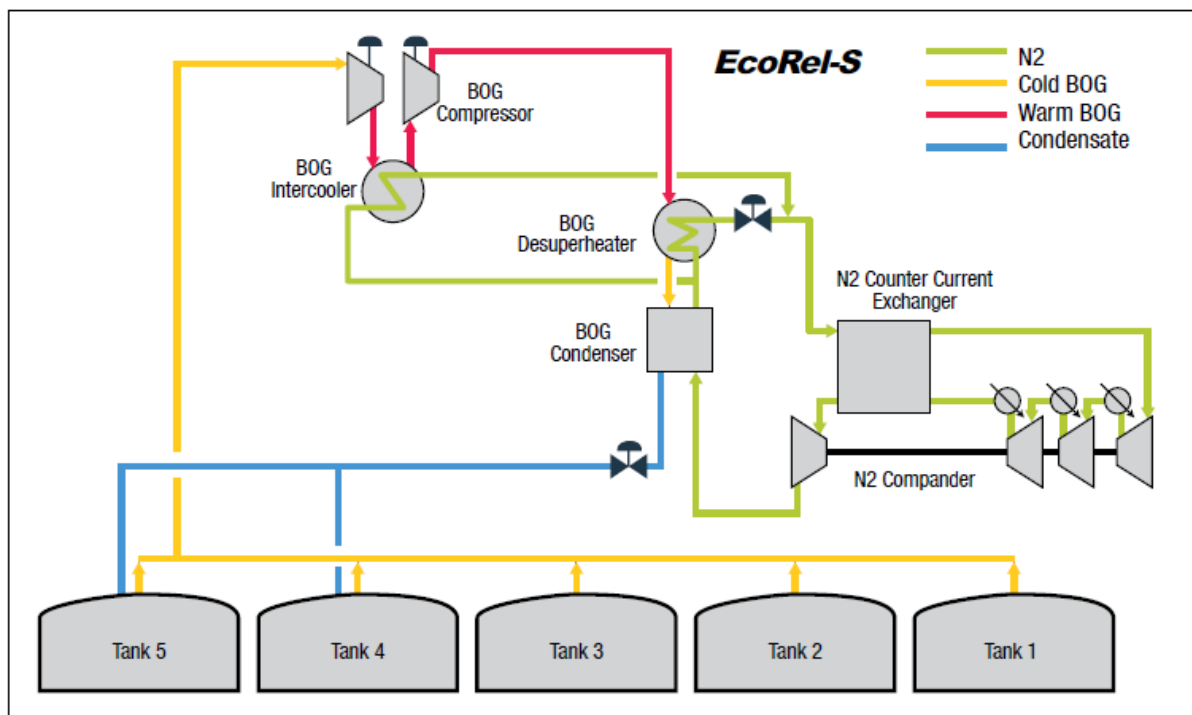
Gas Generator), όπου τα καυσαέρια της GCU χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αδρανούς αερίου [15]. Περισσότερες πληροφορίες για τις γεννήτριες αδρανούς αερίου θα δούμε παρακάτω.

### Επανυγροποίηση του BOG

Πρόκειται για μια πολύ σημαντική τεχνολογία, η οποία έκανε πιο ελκυστική την χρήση των εμβολοφόρων μηχανών για την πρόωση των LNG carrier [15]. Η επανυγροποίηση του BOG εν πλω, λειτουργεί με την αρχή του αντίστροφου ψυκτικού κύκλου αερίων Brayton [19]. Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται το άζωτο ( $N_2$ ), μιας και υπάρχει ήδη διαθέσιμο σε αυτά τα πλοία για τις υπόλοιπες χρήσεις που έχουμε προαναφέρει.

Το σύστημα επανυγροποίησης EcoRel της εταιρίας Cryostar (σχήμα 3.12) λειτουργεί ως εξής:

Το BOG συμπιέζεται σε 2-βάθμιο φυγόκεντρο συμπιεστή με οδηγούς πτερύγια (guide vanes) για τον έλεγχο της ροής. Ανάμεσα στις βαθμίδες συμπίεσης υπάρχει ένας εναλλάκτης θερμότητας (BOG Intercooler) με μέσο ψύξης το  $N_2$ . Μετά τον συμπιεστή, το BOG ψύχεται ξανά σε εναλλάκτη θερμότητας (BOG Desuperheater) τύπου κελύφους-αυλών (shell & tube) από ανοξείδωτο χάλυβα. Τελικά το BOG μετατρέπεται σε LNG, περνώντας από τον συμπυκνωτή (BOG Condenser) τύπου πλακών-πτερυγίων (plate-fin) [15]. Η προσθήκη του εναλλάκτη “Desuperheater” συνεισφέρει στη προστασία του “Condenser” από τις απότομες αλλαγές θερμοκρασίας (θερμικό σοκ), καθώς και στην γρηγορότερη εκκίνηση όλου του συστήματος [20].

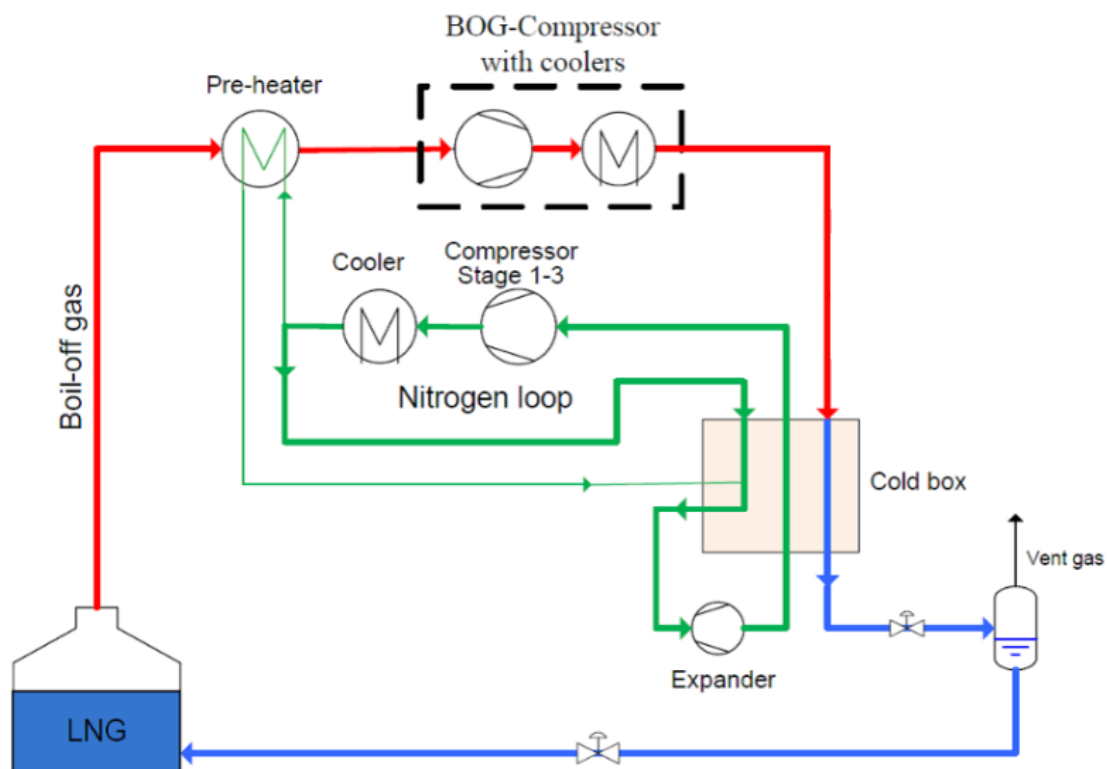


Σχήμα 3.11: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του συστήματος επανυγροποίησης EcoRel-S της εταιρίας Cryostar [20].

Από την άλλη μεριά στο κύκλωμα του  $N_2$ , μετά από τις τρεις βαθμίδες συμπίεσης, και πριν την εκτόνωση του  $N_2$  στον στρόβιλο, υπάρχει μια πρόψυξη σε εναλλάκτη θερμότητας τύπου πλακών-περυγίων με την ονομασία “Counter Current Exchanger”. Μετά τον στρόβιλο το άζωτο περνάει στον συμπυκνωτή (BOG Condenser), και μετέπειτα διακλαδώνεται για να στείλει άζωτο στον “Desuperheater” και μια μικρότερη ποσότητα στον “Intercooler”. Καταληκτικά, τα ρεύματα ενώνονται για να περάσουν από τον “Counter Current Exchanger” και να εισέλθει ξανά το άζωτο στη 1<sup>η</sup> βαθμίδα συμπίεσης [15]. Η προσθήκη του “Counter Current Exchanger” αυξάνει την απόδοση του ψυκτικού κύκλου [20]. Πρόκειται για εναλλάκτη αντιρροής, ο οποίος ονομάζεται και “Αναγεννητής” και σκοπό έχει τη μείωση της θερμοκρασίας στην είσοδο του συμπιεστή [19].

Το σύστημα MK III της Hamworthy (πλέον θυγατρική της Wärtsilä), είναι παρόμοιο με το σύστημα Cryostar, με τις εξής όμως διαφορές:

Έχει προστεθεί ένας προθερμαντήρας (preheater) που προθερμαίνει το BOG πριν αυτό εισέλθει σε 3-βάθμιο «συμβατικό» συμπιεστή. Η 3<sup>η</sup> επιπλέον βαθμίδα συμπίεσης καθιστά το συνολικό μέγεθος του συμπιεστή μικρότερο και την κατανάλωση ενέργειας χαμηλότερη. Επίσης η υψηλότερη πίεση, επιτρέπει τη συμπύκνωση του BOG σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, άρα και βελτιωμένο βαθμό απόδοσης του συστήματος. Ενώ στο σύστημα Cryostar είχαμε τους εναλλάκτες ξεχωριστά μονωμένους, στο σύστημα MK III υπάρχει ένας κοινός εναλλάκτης τύπου πλακών-περυγίων με την ονομασία “cold box”, στον οποίο εκτός από την συμπύκνωση του BOG, γίνεται και μια πρόψυξη του αζώτου πριν τη βαθμίδα εκτόνωσης [15].



Σχήμα 3.12: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του συστήματος επανυγροποίησης MK III της εταιρίας Hamworthy (πλέον Wärtsilä) [21].

### 3.2.5 Γεννήτρια αδρανούς αερίου & συστήματα αζώτου

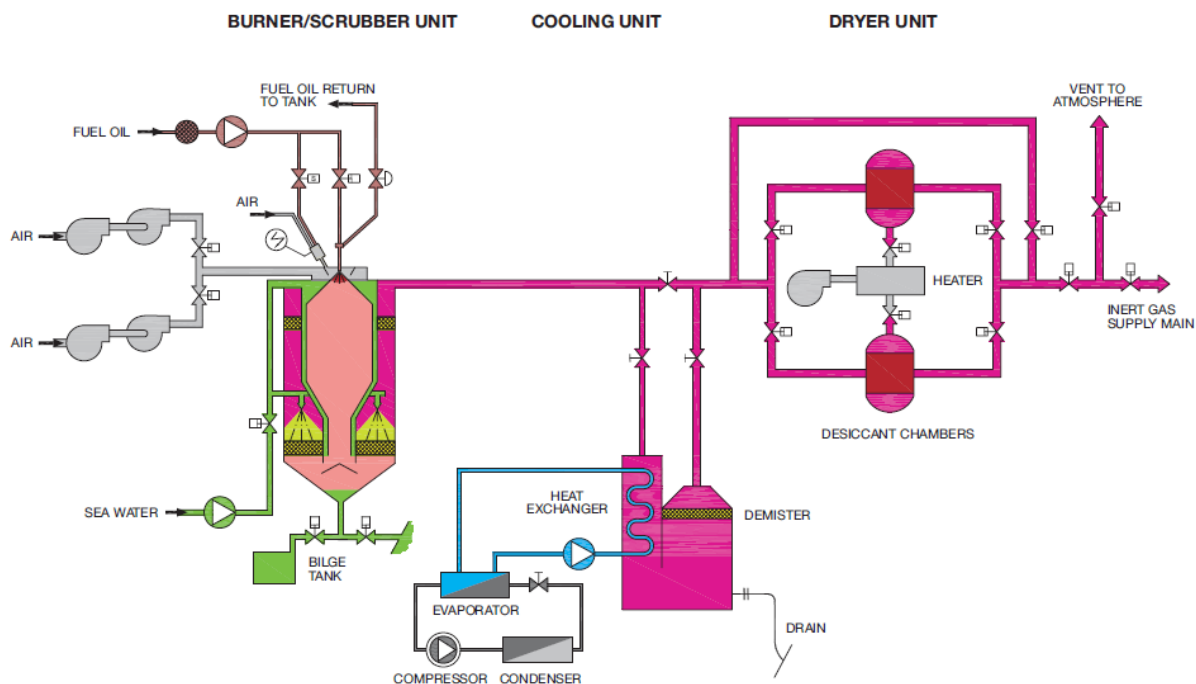
Τα LNG carrier διαθέτουν γεννήτρια αδρανούς αερίου – IGG (Inert Gas Generator) αλλά και σύστημα παραγωγής αζώτου ( $N_2$ ). Για την αδρανοποίηση (inerting) στις μονώσεις των δεξαμενών χρησιμοποιείται το  $N_2$ , διότι το αδρανές αέριο περιέχει  $CO_2$ , το οποίο πρακτικά θα πάγωνε και θα έφραζε τη ροή στους αυλούς κυκλοφορίας εάν ερχόταν σε κοντινή επαφή με το LNG. Για όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες αδρανοποίησης (στις σωληνώσεις και στο μηχανοστάσιο του πλοίου) χρησιμοποιείται το αδρανές αέριο - IG (Inert Gas).

#### Γεννήτρια Αδρανούς αερίου

Σύμφωνα με τον κώδικα IGC, η εγκατάσταση αυτή θα πρέπει να βρίσκεται στο μηχανοστάσιο του πλοίου. Το σύστημα θα πρέπει να περιλαμβάνει έλεγχο της περιεκτικότητας οξυγόνου, όπου η προβλεπόμενη ποσότητα δε πρέπει να ξεπερνάει το 5%. Τυχόν υψηλότερο ποσοστό οξυγόνου θέτει σε λειτουργία ένα συναγερμό και το αδρανές αέριο αποβάλλεται στην ατμόσφαιρα (μέσω του vent riser) [15].

Η γεννήτρια αδρανούς αερίου αποτελείται από τα εξής κύρια μέρη [21]:

- Μονάδα καυστήρα / πλυντρίδας – Burner / Scrubber Unit
- Μονάδα ψύξης – Cooling Unit
- Μονάδα ξήρανσης – Drier Unit



Σχήμα 3.13: Συνδυασμένη μονάδα IGG/GCU ονόματι “Moss” της εταιρίας Wärtsilä [21].

Σκοπός του καυστήρα είναι να πραγματοποιεί κατάλληλες συνθήκες καύσης, έτσι ώστε το αδρανές αέριο να περιέχει το ελάχιστο δυνατό ποσοστό οξυγόνου αλλά και να μη σχηματιστούν οι ανεπιθύμητοι ρύποι CO & soot. Ο χώρος καύσης διαθέτει μανδύα ψύξης (water jacketed). Στη συνέχεια το IG ψύχεται και καθαρίζεται από τα οξείδια του αζώτου & θείου, μέσω ψεκασμού με θαλασσινό νερό.

Έπειτα ακολουθούν τα στάδια ξήρανσης [15]:

- Στο πρώτο στάδιο (μονάδα ψύξης), το IG ψύχεται περίπου στους 5°C με το γνωστό σύστημα ψύξης συμπίεσης ατμών [19] και ψυκτικό μέσο το φρέον. Αυτό γίνεται για να φύγουν τα περισσότερα συμπυκνώματα χωρίς τον κίνδυνο φραγμού του κυκλώματος (από τυχόν πάγους).
- Στο δεύτερο στάδιο (μονάδα ξήρανσης) γίνεται περαιτέρω μείωση της υγρασίας και μειώνεται το σημείο δρόσου στους περίπου -40°C. Η μονάδα περιλαμβάνει δύο δοχεία με ενεργό αλουμίνα (activated alumina) ή τζελ πυριτίου (silica gel). Το ένα δοχείο βρίσκεται σε φάση ξήρανσης ενώ το άλλο σε φάση αναγέννησης, με τους κύκλους να εναλλάσσονται κάθε 6 ώρες.

## Συστήματα αζώτου

Το άζωτο μπορεί να συλλεχθεί από τη μονάδα IGG με μοριακό κόσκινο (molecular sieves), μέσω αφαίρεσης του CO<sub>2</sub> [21]. Ωστόσο τα πλοία μπορεί να διαθέτουν τα εξής συμβατικά συστήματα παραγωγής N<sub>2</sub> [15]:

1. Μεμβράνες διαχωρισμού (membrane separation) – Στο σύστημα αυτό, ο πεπιεσμένος αέρας περνάει μέσα από διάτρητες ινώδη μεμβράνες (hollow fibre membranes). Οι μεμβράνες ουσιαστικά διαχωρίζουν τον αέρα σε δύο ρεύματα, όπου το ένα περιλαμβάνει το άζωτο με μερικά ίχνη αερίων και το άλλο περιλαμβάνει O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> και υδρατμούς. Το σύστημα αυτό μπορεί να παράγει καθαρό N<sub>2</sub> σε ποσοστό 95-97%.
2. Προσρόφηση με εναλλαγή πίεσης (PSA – Pressure Swing Adsorption) – Πρόκειται για μια εναλλακτική μέθοδο, η οποία στηρίζεται στη “προσρόφηση” των αερίων πάνω σε στερεές επιφάνειες, όταν βρίσκονται υπό υψηλή πίεση. Όσο υψηλότερη είναι η πίεση, τόσο περισσότερο αέριο προσροφάται. Όταν μειωθεί η πίεση, το αέριο “απορρίπτεται”. Ουσιαστικά το σύστημα PSA συλλέγει το N<sub>2</sub>, μέσω μιας βάσης μοριακού προσροφητή (molecular adsorber bed). Η ροή πεπιεσμένου αέρα δια μέσω ενός δοχείου (vessel), διώχνει το O<sub>2</sub>. Εν συνεχεία, ακολουθεί η διαδικασία της αναγέννησης (regeneration) μέσω μείωσης της πίεσης και συλλογής του καθαρού πλέον αζώτου. Εναλλαγές κύκλων προσρόφησης-αναγέννησης μεταξύ δύο δοχείων, προσφέρουν συνεχή παραγωγή N<sub>2</sub>, και η εκτόνωση πεπιεσμένου αέρα μεταξύ των δοχείων αυξάνει τον βαθμό απόδοσης του συστήματος.

### 3.3 ΤΥΠΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ – ΕΚΦΟΡΤΩΣΗΣ

Ένας τυπικός κύκλος ξεκινάει με την κατάσταση “gas-free”, όπου οι δεξαμενές είναι γεμάτες με αέρα για λόγους επίβλεψης και συντήρησης από το προσωπικό της μηχανής.

Στην αρχή γίνεται αδρανοποίηση (inerting) των δεξαμενών, με χρήση αδρανούς αερίου (inert gas), και μετά ακολουθούν οι διαδικασίες “gas-up” & “cool-down”.

Στη διαδικασία gas-up το LNG περνάει από vaporiser & heater, για να αεριοποιηθεί και να ανέβει η θερμοκρασία του στους 20°C. Εν συνεχεία ωθεί το αδρανές αέριο προς τον τερματικό σταθμό έως ότου φύγει όλο το CO<sub>2</sub> από τη δεξαμενή. Πλέον η δεξαμενή είναι γεμάτη μεθάνιο αλλά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στη διαδικασία cool-down ψεκάζεται LNG στις δεξαμενές μέσω των spray pumps & spray lines έως ότου φτάσει η θερμοκρασία στους -140 °C. Η διαδικασία αυτή πρέπει να εκτελείται σταδιακά, διότι η απότομη ψύξη των δεξαμενών μπορεί να επιφέρει θερμικό σοκ (cold shock) στη δεξαμενή. Τυπικά, η διαδικασία διαρκεί περίπου 20 ώρες σε δεξαμενές τύπου Moss και 10-12 ώρες σε δεξαμενές τύπου μεμβράνης.

Έπειτα μπορεί να ξεκινήσει η φόρτωση του LNG και παράλληλα το BOG επιστρέφει πίσω στον σταθμό μέσω των HD συμπιεστών. Η φόρτωση συνεχίζεται μέχρι να γεμίσει το 98,5% της δεξαμενής (για λόγους συστολής-διαστολής).

Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού το BOG μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα πρόωσης ή να επανυγροποιηθεί, ανάλογα με τον σχεδιασμό του πλοίου.

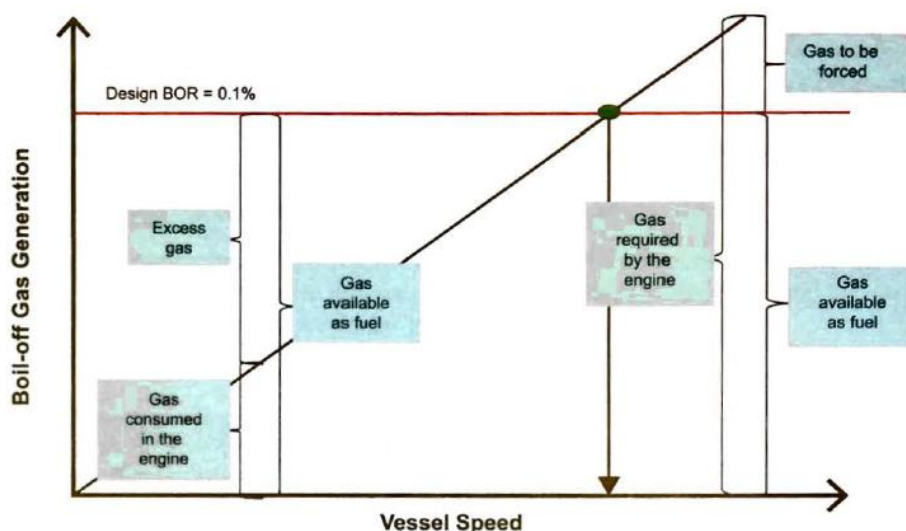
Στη διαδικασία της εκφόρτωσης, παράλληλα εισάγεται BOG στις δεξαμενές από τον σταθμό ή από το ίδιο το πλοίο μέσω των vaporisers. Οι δεξαμενές είτε εκκενώνονται πλήρως μέσω των spray pumps, είτε μένει μια μικρή ποσότητα LNG η οποία αποκαλείται “heel”. Αποτελεί συνηθισμένη πρακτική το να διατηρείται ένα ποσοστό 5-10% του LNG ως heel. Το heel ουσιαστικά χρησιμεύει στις διαδικασίες cool-down, όπου δίνεται η δυνατότητα εκκίνησης της διαδικασίας ψύξης των δεξαμενών πριν φτάσει το πλοίο στο λιμάνι, έχοντας ως συνέπεια την εξοικονόμηση χρόνου.

Σε περίπτωση που εκκενωθούν πλήρως οι δεξαμενές, για ένα ταξίδι χωρίς φορτίο (ballast passage) θα πρέπει εκτελείται η διαδικασία ψύξης των δεξαμενών στον σταθμό διότι θα έχουν φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τέλος, για την επιστροφή σε gas-free, θα πρέπει πρώτα να γίνει θέρμανση των δεξαμενών, έπειτα αφαίρεση του μεθανίου μέσω του αδρανούς αερίου, και καταληκτικά προσθήκη ξηρού αέρα (dry air) αλλάζοντας λειτουργία στην IGG. Οι δεξαμενές έχουν πλέον ασφαλή ατμόσφαιρα εργασίας [13].

## 4 ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΕΡΙΟΥ & ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Τα LNG carrier, εδώ και πολλά χρόνια χρησιμοποιούσαν το παραδοσιακό σύστημα πρόωσης με ατμοστρόβιλο, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα εμπορικά πλοία που χρησιμοποιούσαν τις μηχανές Diesel με τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης. Αυτό γινόταν κυρίως λόγω του BOG, διότι δεν υπήρχε τότε και η κατάλληλη τεχνολογία για την αξιοποίηση του στις παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 4.1: BOG & BOR σε συνάρτηση με την ταχύτητα του πλοίου [15].

Για την παραγωγή του ατμού, τα πλοία χρησιμοποιούσαν το BOG που σχηματιζόταν κατά το ταξίδι του πλοίου. Το BOG μπορούσε να καεί εξίσου καλά με το πετρέλαιο καύσιμο στους λέβητες της μηχανής. Ένας άλλος σημαντικός λόγος της υιοθέτησης ατμοστρόβιλου στα LNG carrier ήταν η απαλλαγή των ακριβών συστημάτων επανυγροποίησης του φυσικού αερίου, και των “μη ενεργειακών” συστημάτων καύσης του αερίου (GCUs). Επιπρόσθετα, μέσα από την ιστορία των LNG carrier, ο ατμοστρόβιλος έχει αποδείξει πως είναι ένα εξαιρετικά αξιόπιστο σύστημα πρόωσης, με μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης.

Ωστόσο, οι απαιτήσεις υψηλότερων βαθμών απόδοσης και χαμηλότερων εκπομπών ρύπων, οδήγησαν την βιομηχανία σε εναλλακτικές λύσεις, όπου το BOG πλέον μπορεί να χρησιμοποιείται και σε συστήματα παλινδρομικών MEK. Οι παραλλαγές είναι πολλές, και η τελική επιλογή του συστήματος γίνεται μετά από τεχνοοικονομική ανάλυση.

Τα συστήματα πρόωσης των πλοίων LNG που υπάρχουν σήμερα είναι τα εξής [15]:

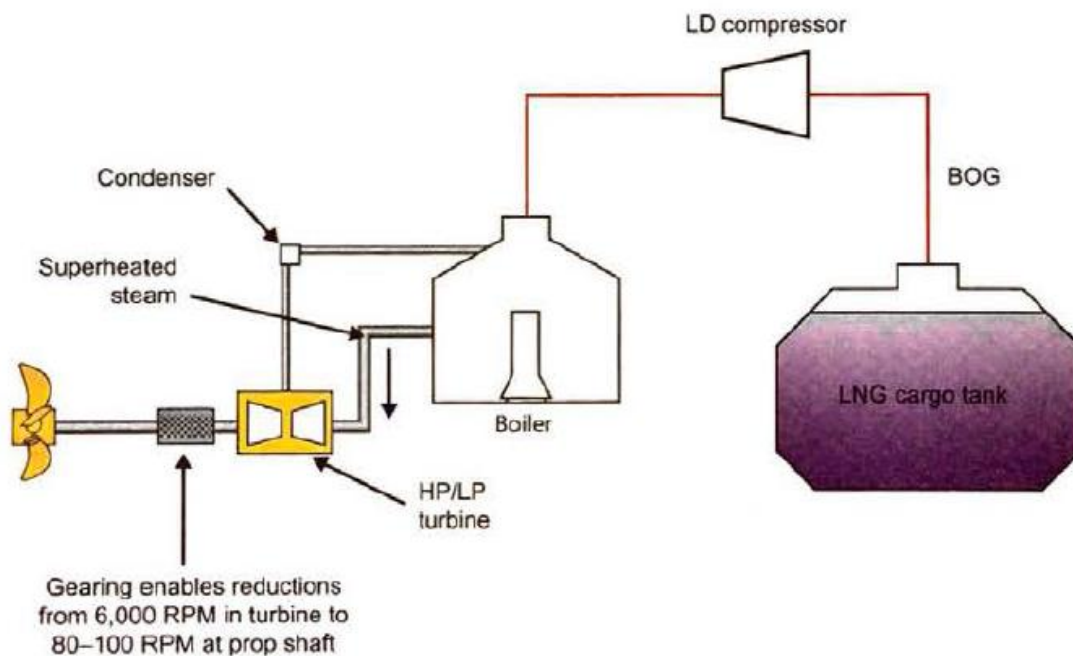
- Ατμοστρόβιλοι
- Αεριοστρόβιλοι
- Μεσόστροφες μηχανές διπλού καυσίμου
- Συνδυασμός των παραπάνω με ηλεκτρική πρόωση

- Αργόστροφες μηχανές διπλού καυσίμου

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα γίνει μια περιγραφή των συστημάτων αυτών με μεγαλύτερη έμφαση στα συστήματα υψηλότερης απόδοσης και προηγμένης τεχνολογίας.

#### 4.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Οι κλασσικοί ατμοστροβίλοι που συναντάμε σε πλοία, εργάζονται με πιέσεις των 60-70 bar και υπέρθερμο ατμό θερμοκρασίας 520°C. Μια τυπική εγκατάσταση περιλαμβάνει δύο κύριους λέβητες, οι οποίοι μπορούν να κάψουν πετρέλαιο αλλά και BOG. Στη συνέχεια, ο υπέρθερμος ατμός εκτονώνεται σε στροβίλους υψηλής (HP) και χαμηλής (LP) πίεσης, για τη πρόωση του πλοίου. Επίσης, υπάρχουν και δύο ατμοστροβιλογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και μια συμβατική τετράχρονη γεννήτρια τύπου Diesel για τις περιόδους ακινησίας του πλοίου.



Σχήμα 4.2: Αναπαράσταση κλασσικού συστήματος πρόωσης ατμοστροβίλου [15].

Για την παροχή του BOG από τις δεξαμενές καυσίμου στους λέβητες του ατμοστροβίλου, χρησιμοποιείται ένας μονοβάθμιος φυγοκεντρικός συμπιεστής χαμηλής κατανάλωσης (low duty – LD). Η διάταξη αυτή μπορεί να λειτουργήσει με πετρέλαιο, φυσικό αέριο, καθώς και με τον συνδυασμό τους. Ο προβλεπόμενος έλεγχος της πίεσης των δεξαμενών καυσίμου επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο λεβητών και ενός συστήματος εκτόνωσης ατμού (steam dump system), σύμφωνα με τον κώδικα IGC.

Τα συστήματα πρόωσης ατμοστροβίλου χρησιμοποιούν το περίσσιο BOG εκτονώνοντας ατμό στον συμπυκνωτή (ψύξης με θαλασσινό νερό) που υπάρχει στο μηχανοστάσιο. Εάν



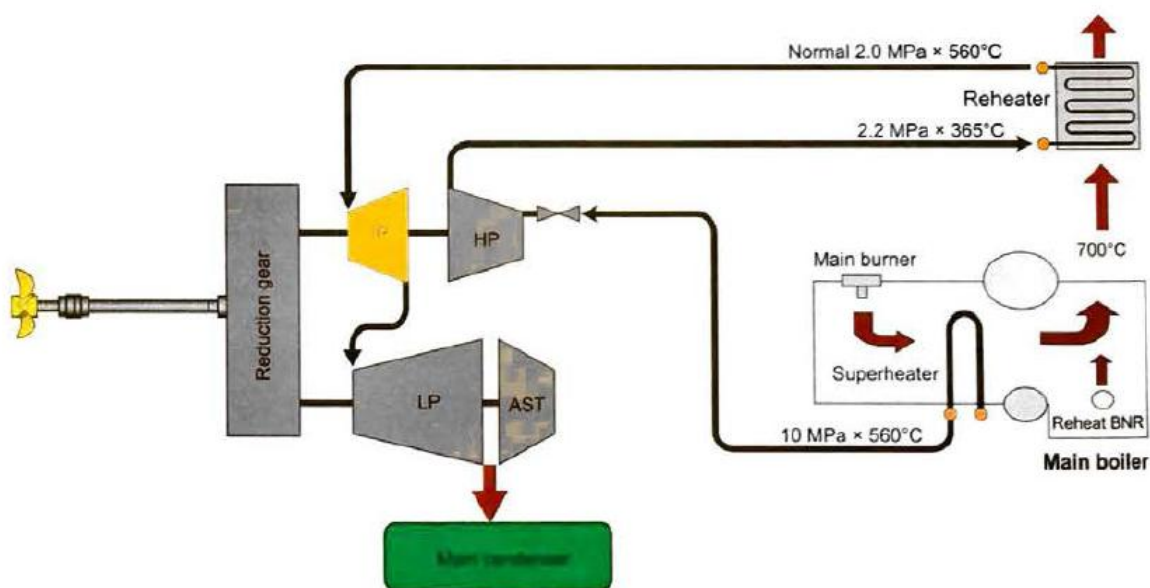
υπάρξει έλλειψη του φυσικού BOG κατά τη λειτουργία του συστήματος, χρησιμοποιείται ένας εξατμιστής (varogizer) φυσικού αερίου ή πετρέλαιο καύσιμο.

Τα συστήματα πρόωσης με αμοστρόβιλο παρά την υψηλή αξιοπιστία και απλότητα που διαθέτουν, εξακολουθούν να έχουν κάποια μειονεκτήματα. Οι αμοστρόβιλοι έχουν τον χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τις υπόλοιπες εναλλακτικές λύσεις. Ο βαθμός απόδοσης μειώνεται ακόμη περισσότερο στα χαμηλά φορτία, και η αποδοτικότητα των γεννητριών είναι χαμηλότερη από της κύριας τουρμπίνας πρόωσης.

Οι αμοστρόβιλοι έχουν περιορισμένη ανάποδη ισχύ πρόωσης (astern power), μέσω του τμήματος ανάποδης ώσης της τουρμπίνας χαμηλής πίεσης, σε σύγκριση με άλλες μηχανές (τυπικά 40% της εμπρόσθιας ισχύς – ahead power). Επιπρόσθετα, ο χρόνος απόκρισης κατά τις εναλλαγές (εμπρός και ανάποδη) είναι μεγαλύτερος από τα άλλα είδη μηχανών.

#### 4.1.1 Αμοστρόβιλοι με αναθέρμανση

Για την αύξηση του βαθμού απόδοσης στους αμοστρόβιλους, έχει προταθεί ένας κύκλος αναθέρμανσης (reheat cycle).



Σχήμα 4.3: Αναπαράσταση συστήματος πρόωσης αμοστρόβιλου με αναθέρμανση [15].

Η κύρια διαφορά βρίσκεται στην ύπαρξη του αναθερμαντήρα στον λέβητα της εγκατάστασης. Ουσιαστικά, μετά τον στρόβιλο υψηλής πίεσης (HP), ο ατμός αναθερμαίνεται και εκτονώνεται σε έναν ενδιάμεσης πίεσης (IP) στρόβιλο, πριν εκτονωθεί στον στρόβιλο χαμηλής πίεσης (LP). Ο βαθμός απόδοσης στο σύστημα αυτό είναι μεγαλύτερος λόγω των υψηλότερων πιέσεων και θερμοκρασιών που επικρατούν, σε σχέση με το παραδοσιακό σύστημα χωρίς αναθέρμανση.

## 4.2 ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ

Οι αεριοστρόβιλοι έχουν κυριαρχήσει στα συστήματα πρόωσης των πολεμικών πλοίων σχεδόν όλων των κατηγοριών. Η αξία των αεριοστρόβιλων όμως, αρχίζει να γίνεται αντιληπτή και από τους κατασκευαστές/χρήστες πολιτικών (επιβατηγών και εμπορικών) εκδόσεων πλοίων. Η πολιτική ναυπηγική βιομηχανία θέτει πλέον σε υψηλή προτεραιότητα χαρακτηριστικά όπως συμπαγές σύστημα πρόωσης, αυξημένη ισχύ, υψηλό βαθμό απόδοσης και περιορισμένη εκπομπή ρύπων. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα κατασκευής των αεριοστρόβιλων αναβάθμισαν σημαντικά τις επιδόσεις τους και την αξιοπιστία τους. Έτσι τα τελευταία χρόνια, μεγάλα κρουαζιερόπλοια και επιβατηγά/οχηματαγωγά (E/O) υψηλών ταχυτήτων έχουν υιοθετήσει τον αεριοστρόβιλο σαν κύρια μονάδα ισχύος των συστημάτων πρόωσης. Οι βασικοί υποψήφιοι τύποι πολιτικών πλοίων στα οποία ενδείκνυται η τοποθέτηση αεριοστρόβιλων είναι [22]:

- **Κρουαζιερόπλοια, (*large cruise ships*)**. Ο χώρος που εξοικονομείται από την χρήση αεριοστρόβιλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν επιπλέον ωφέλιμος ξενοδοχειακός ή κοινόχρηστος χώρος, ενώ η θερμότητα των καυσαερίων της εξαγωγής, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε άλλες ανάγκες του πλοίου. Για παράδειγμα μπορούν να κατασκευαστούν 20-100 (ανάλογα το αρχικό μέγεθος του πλοίου) επιπλέον καμπίνες στο ίδιο πλοίο, εάν αντικατασταθεί το σύστημα πρόωσης *diesel-electric* με κάποιο άλλο που βασίζεται στον αεριοστρόβιλο. Εκτός από το κέρδος σε χώρο που προσφέρει ο αεριοστρόβιλος σε σχέση με τους *diesel* κινητήρες, είναι και το όφελος που προκύπτει από την χρήση λιγότερων βοηθητικών μηχανημάτων –κατά 50% περίπου- που πρέπει να συνυπολογιστεί.
- **Επιβατηγά/οχηματαγωγά (E/O) υψηλών ταχυτήτων (*high speed ferries*)**. Τα πλοία αυτά εκμεταλλεύονται την υψηλή ισχύ των αεριοστρόβιλων και την σχετικά περιορισμένη εκπομπή ρύπων.
- **Φορτηγά υγροποιημένου φυσικού αερίου, (*LNG Carriers*)**. Τα σύγχρονα συνδυασμένα συστήματα αεριοστρόβιλων μπορούν να κάψουν μέρος από το LNG του φορτίου τους πιο αποδοτικά από τα παραδοσιακά συστήματα ατμοστρόβιλου/ατμολέβητα.
- **Γρήγορα φορτηγά εμπορευματοκιβωτίων, (*fast containerhips*)**. Ο χώρος που εξοικονομείται λόγω μικρότερου μηχανοστασίου, προστίθεται στην μεταφορική ικανότητα του πλοίου.

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά **χαρακτηριστικά-πλεονεκτήματα** των αεριοστρόβιλων ιδιαίτερα σημαντικά για την εξάπλωσή τους στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών [22]:

- Υψηλή συγκέντρωση ισχύος, δηλαδή υψηλοί λόγοι ισχύος/βάρους και ισχύος/όγκου. Ενδεικτικά οι λόγοι ισχύος/βάρους για αργόστροφους *diesel*, ατμοστρόβιλους και αεροπορικού τύπου αεριοστρόβιλους είναι 0,333, 0,067 και 3,572, αντίστοιχα.

- Χαμηλά επίπεδα θορύβου και δονήσεων.
- Εύκολη εγκατάσταση και εξυπηρέτηση που οφείλεται στην σπονδυλωτή (*modular*) κατασκευή του ολοκληρωμένου συστήματος πρόωσης με αεριοστρόβιλο.
- Υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα.
- Μέτριο κόστος συντήρησης, διατήρηση μικρών αποθεμάτων ανταλλακτικών και εύκολη άρση και επανατοποθέτηση του κινητήρα (*GT pack*).
- Λιγότερες εκπομπές αέριων ρύπων (ειδικά  $\text{NO}_x$  και  $\text{SO}_x$ ) και καπνού από τους *diesel* κινητήρες.
- Λειτουργία με υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης.
- Ευέλικτη λειτουργία. Γρήγορη εκκίνηση, μηδενική ανάγκη προθέρμανσης ή χρόνου λειτουργίας στο ρελαντί. Τυπικά, οι ναυτικοί αεριοστρόβιλοι χρειάζονται περίπου 30s για να φθάσουν στο ρελαντί (*idle*) και μετά μπορούν αμέσως να επιταχύνουν μέχρι τις μέγιστες στροφές. Η επιβράδυνση είναι το ίδιο γρήγορη και αμέσως μετά ο αεριοστρόβιλος μπορεί να σβήσει, χωρίς περιορισμούς που επιβάλλονται για λόγους ψύξης, (*cool down restrictions*).

Εκτός από τα πλεονεκτήματα των αεριοστρόβιλων που αναφέρθηκαν, οι αεριοστρόβιλοι παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα. Βασικότερα αυτών είναι [22]:

- Σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης (ειδικά οι αεριοστρόβιλοι απλού κύκλου *Brayton*), με αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (*sfc*) και την μείωση της αυτονομίας του πλοίου.
- Υψηλή ειδική κατανάλωση καυσίμου (*sfc*) για λειτουργία σε μερικό φορτίο. Το μεγαλύτερο ποσοστό του χρόνου λειτουργίας τους τα πλοία (περίπου 85% τα πολεμικά) κινούνται με μικρή ή μεσαία ταχύτητα, ενώ με την μέγιστη ταχύτητα για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα.
- Υψηλό κόστος κτήσης.
- Σε περίπτωση χρήσης HFO, ανάγκη προετοιμασίας πριν την καύση του.
- Ανάγκη χρήσης ακριβών συστημάτων μείωσης των στροφών, αφού η ταχύτητα περιστροφής είναι ιδιαίτερα υψηλή.
- Ανάγκη χρήσης προπελών μεταβλητού βήματος ή μειωτήρα με αναστροφή (ρεβέρσα), αφού οι αεριοστρόβιλοι δεν είναι αναστρεφόμενες μηχανές.
- Μεγάλος όγκος αγωγών εισαγωγής αέρα και εξαγωγής καυσαερίων.

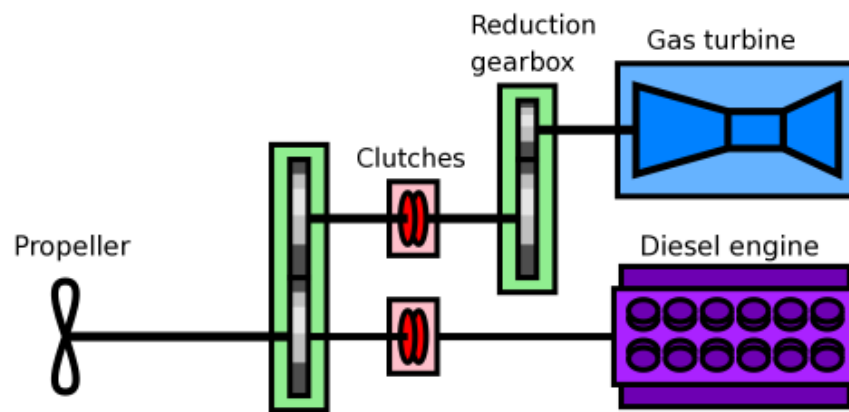
Τα δύο μειονεκτήματα που αφορούν την *sfc* αντιμετωπίστηκαν με συνδυασμό του αεριοστρόβιλου με άλλους κινητήρες ή με τη χρήση συνδυασμού μικρών και μεγάλων αεριοστρόβιλων ή τέλος με την χρήση σύνθετων διαμορφώσεων του απλού κύκλου *Brayton*.

#### 4.2.1 Συστήματα πρόωσης αεριοστρόβιλων

Οι δυνατοί συνδυασμοί προωστικών συστημάτων παρουσιάζονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν [22]:

##### **COmbined Diesel Or Gas turbine, CODOG**

Η αρχή του συστήματος πρόωσης CODOG έχει ως εξής: Για κάθε άξονα προπέλας, υπάρχει ένας κινητήρας *diesel* για *cruising speed*, ενώ για υψηλές ταχύτητες απεμπλέκεται ο κινητήρας *diesel* και εμπλέκεται ένας αεριοστρόβιλος, μέσω ενός συστήματος συμπλεκτών. Είναι απαραίτητη η χρήση κιβωτίου (*gear box*) για να μειωθούν οι στροφές του αεριοστρόβιλου. Έτσι, για κάθε στιγμή ένα μόνο είδος κινητήρα οδηγεί το πλοίο, σε αντίθεση με τα CODAG συστήματα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη συνδυασμένη ισχύ και των δύο ειδών κινητήρα που διαθέτουν.

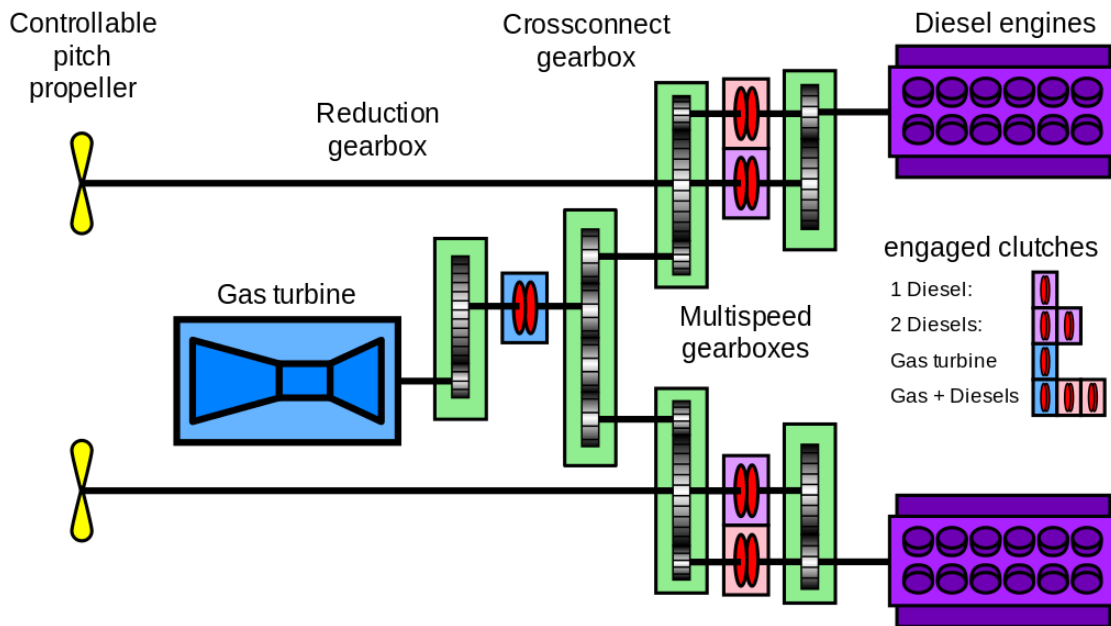


Σχήμα 4.4: Σύστημα CODOG για την καθοδήγηση μίας προπέλας [22].

Το πλεονέκτημα του CODOG είναι ότι χρειάζεται απλούστερο σύστημα μετάδοσης σε σχέση με το αντίστοιχο CODAG, όμως χρειάζεται πιο ισχυρό αεριοστρόβιλο (ή ακόμα και επιπλέον αεριοστρόβιλους) για την ίδια μέγιστη ωφέλιμη ισχύ με ένα σύστημα CODAG. Επίσης, η κατανάλωση καυσίμου στις υψηλές ταχύτητες είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το CODAG.

##### **COmbined Diesel And Gas turbine, CODAG**

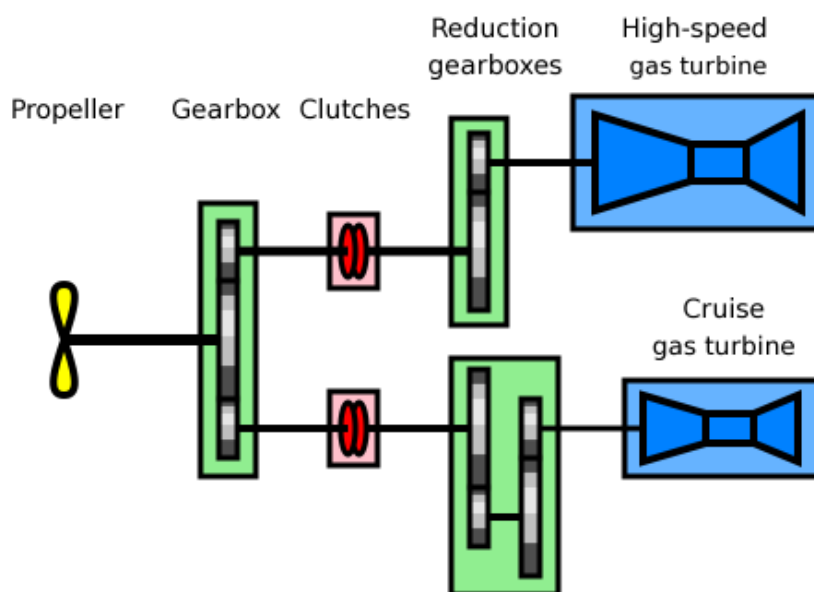
Το σύστημα πρόωσης CODAG έχει δύο τύπους κιβωτίων ταχυτήτων. Για ταχύτητες πλεύσης (*cruising speeds*) λειτουργούν μόνο οι κινητήρες *diesel*, ενώ για υψηλές ταχύτητες εμπλέκεται και ο αεριοστρόβιλος χωρίς να απεμπλακούν οι κινητήρες *diesel*. Τα συστήματα αυτά εκμεταλλεύονται τον υψηλό βαθμό απόδοσης των κινητήρων *diesel* όταν πλέουν με *cruising speed*, επιτυγχάνοντας χαμηλότερο κόστος καυσίμων και αυξάνοντας σημαντικά την εμβέλεια τους. Από την άλλη πλευρά είναι απαραίτητη μια πιο περίπλοκη, βαριά και δυνητικά προβληματική διάταξη μετάδοσης κίνησης.



Σχήμα 4.5: Σύστημα CODAG για την καθοδήγηση δύο προπελών, 4 operation mode με την κατάλληλη συνδυαστική χρήση του συστήματος κιβωτίων [22].

### COmBined Gas Or Gas turbine, COGOG

Στο σύστημα COGOG, για cruising speeds λειτουργεί μόνο ένας (ή δύο) αεριοστρόβιλος υψηλού βαθμού απόδοσης, αλλά μικρής ωφέλιμης ισχύος, ενώ για υψηλές ταχύτητες, αυτός απεμπλέκεται, και την ισχύ την δίνει ένας (ή δύο) άλλος μεγαλύτερος, καλύπτοντας τις αυξημένες ανάγκες ισχύος που απαιτούνται. Ένας συμπλέκτης επιτρέπει να εμπλακεί μόνο ένας αεριοστρόβιλος τη φορά, οπότε το κιβώτιο ταχυτήτων δεν είναι τόσο βαρύ και περίπλοκο, αυξάνοντας την αξιοπιστία και μειώνοντας το κόστος κτήσης.

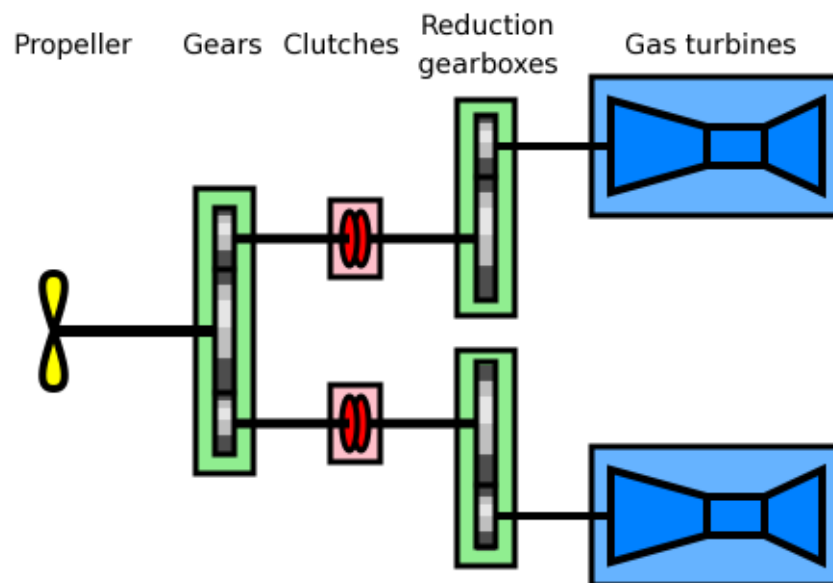


Σχήμα 4.6: Σύστημα COGOG με μικρό και μεγάλο αεριοστρόβιλο [22].

Ο λόγος για τον οποίο ο ένας αεριοστρόβιλος είναι μικρότερος είναι γιατί χρησιμοποιείται για ταχύτητες cruising και ως γνωστό είναι προτιμότερο (πιο αποδοτικό) να λειτουργεί ένας αεριοστρόβιλος σε πλήρες φορτίο παρά ένας μεγαλύτερος σε λειτουργία μερικού φορτίου (part load). Το σύστημα COGOG απαιτεί μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ από το COGAG αφού στην μέγιστη ισχύ ο μικρός αεριοστρόβιλος δεν παρέχει ισχύ.

### COMBINED Gas and Gas turbine, COGAG

Πρόκειται για συνδυασμό ενός συνήθως μικρού αεριοστρόβιλου για μικρές ταχύτητες και ενός μεγαλύτερου (όχι όμως τόσο μεγάλου όσο του δεύτερου στο σύστημα COGOG) αεριοστρόβιλου για τις υψηλές ταχύτητες που συνδέονται σε ενιαίο άξονα/προπέλα. Δηλαδή, ένα σύστημα κιβωτίου ταχυτήτων και συμπλεκτών επιτρέπουν είτε τον ένα αεριοστρόβιλο από μόνο του, είτε και τους δύο μαζί να οδηγούν τον άξονα της προπέλας. Δεδομένου ότι η απόδοση των αεριοστρόβιλων είναι καλύτερη κοντά στην περιοχή μέγιστης ισχύος, το σύστημα διαχείρισης και ελέγχου του συστήματος πρόωσης ανάλογα το φορτίο εμπλέκει τον ένα ή τον άλλο αεριοστρόβιλο είτε και τους δύο μαζί έτσι ώστε αυτοί να λειτουργούν το δυνατότερο κοντά στο σημείο σχεδιασμού τους επιτυγχάνοντας έτσι την μέγιστη δυνατή απόδοση κάθε στιγμή.



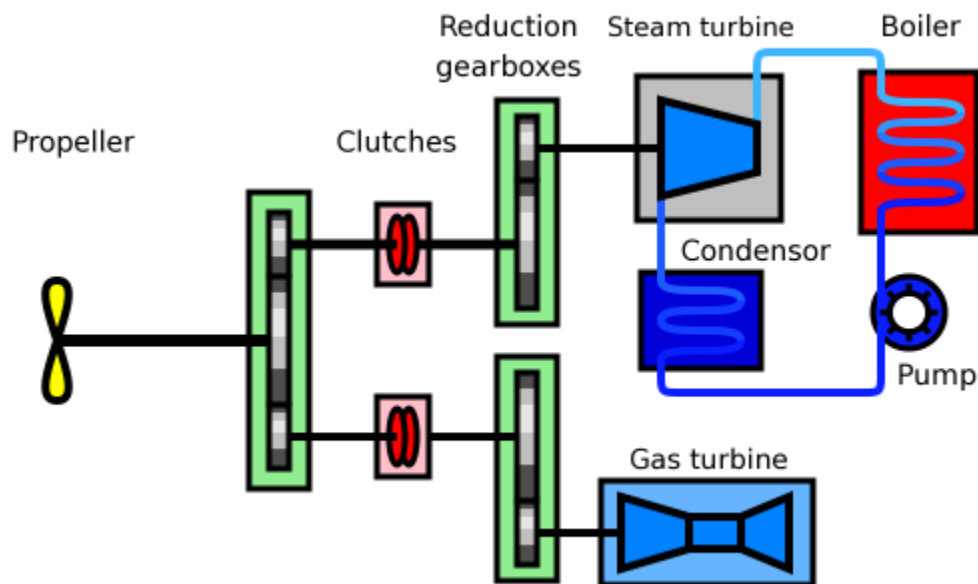
Σχήμα 4.7: Σύστημα COGAG με δύο παρόμοιου μεγέθους αεριοστρόβιλους [22].

Η χρήση του πρώτου, ή του δεύτερου, ή και των δύο αεριοστρόβιλων μαζί, έχει το πλεονέκτημα της ύπαρξης τριών διαφορετικών ρυθμίσεων ισχύος, ενώ το σύστημα GOGOG έχει μόνο δύο. Επίσης, το σύστημα GOGAG γενικά μπορεί να δώσει πολύ μεγαλύτερη ισχύ στις υψηλές ταχύτητες (μέγιστη ταχύτητα 32kts). Σε σύγκριση όμως με τα συστήματα CODAG ή CODOG, τα συστήματα COGAG καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο και απαιτούν μικρότερο κόστος εγκατάστασης. Επίσης, παρουσιάζει μικρότερη κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με

το COGOG, γιατί για μεσαίο έως μέγιστο φορτίο στο σύστημα COGOG λειτουργεί τον μεγάλο αεριοστρόβιλο σε μερικό φορτίο, ενώ το COGAG για αντίστοιχες συνθήκες μπορεί ο ένας μόνο να λειτουργήσει σε μερικό φορτίο και ο άλλος σε πλήρες.

### **COmbined Steam and Gas turbine, COSAG**

Το σύστημα πρόωσης COSAG είναι ένας συνδυασμός ατμοστρόβιλου και αεριοστρόβιλου. Ένα σύστημα κιβωτίων ταχυτήτων και συμπλεκτών επιτρέπει οποιαδήποτε από τις δύο μηχανές ή και τις δύο μαζί να οδηγούν τον άξονα. Το σύστημα αυτό εκμεταλλεύεται την υψηλή απόδοση και αξιοπιστία του ατμοστρόβιλου και την γρήγορη επιτάχυνση και τους μικρούς χρόνους εκκίνησης του αεριοστρόβιλου. Το σύστημα μειονεκτεί λόγω του μεγάλου όγκου, βάρους και χαμηλού βαθμού απόδοσης. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιούνταν παλαιότερα από πλοία κλάσης αντιτορπιλικού ή καταδρομικού ή ακόμα και από μικρά αεροπλανοφόρα, και πλέον δεν προτιμάται.



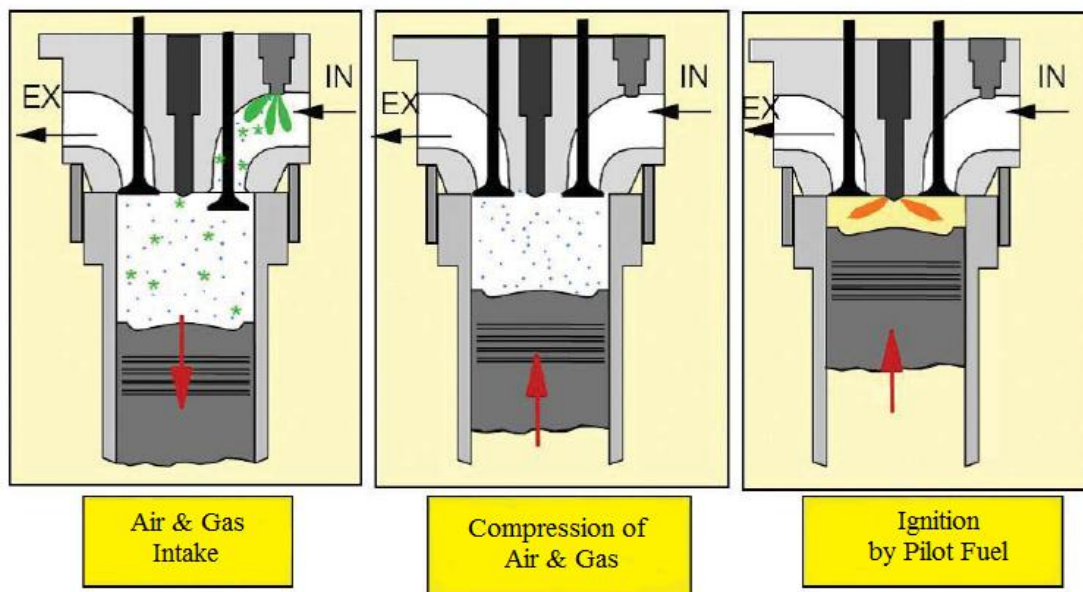
Σχήμα 4.8: Σύστημα COSAG με συνδυασμό ατμοστρόβιλου/αεριοστρόβιλου [22].

Οι ναυτικοί αεριοστρόβιλοι συνήθως εφοδιάζονται με διατάξεις μεταβλητής γεωμετρίας (variable geometry), βαλβίδες απομάστευσης (bleed valves) ή και με περισσότερους άξονες (multishaft) που οδηγούν τον χαμηλής και τον υψηλής πίεσης συμπιεστή, για καλύτερη συμπεριφορά σε συνθήκες μερικού φορτίου. Ο θάλαμος καύσης των ναυτικών αεριοστρόβιλων είναι σχεδόν πάντα δακτυλιοειδής, ένδειξη της αεροπορικής του προέλευσης.

### 4.3 ΜΕΣΟΣΤΡΟΦΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι τετράχρονοι μηχανές της Wärtsilä μπορούν να λειτουργήσουν είτε με φυσικό αέριο, είτε με υγρό πετρέλαιο καύσιμο. Κατά τη λειτουργία φυσικού αερίου (gas mode), οι μηχανές λειτουργούν με βάση τον κύκλο Otto. Δηλαδή, ένα φτωχό προ-αναμεμιγμένο μίγμα αέρα καυσίμου εισέρχεται στο χώρο καύσης. Με το φτωχό μίγμα επιτυγχάνεται μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου, άρα και μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Επίσης, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης, λόγω του υψηλότερου λόγου συμπίεσης και της βελτιστοποίησης του χρονισμού ψεκασμού. Το φτωχό μίγμα είναι απαραίτητο και για την αποφυγή της κρουστικής καύσης.

Το φυσικό αέριο τροφοδοτείται στον κύλινδρο, από την πολλαπλή εισαγωγής κατά τον χρόνο εισαγωγής, όπως φαίνεται και παρακάτω (σχήμα 4.9). Η ανάφλεξη επιτυγχάνεται με έγχυση μικρής ποσότητας καυσίμου diesel (pilot fuel) στο χώρο της καύσης, αντί για τους κλασσικούς αναφλεκτήρες (μπουζί) που χρησιμοποιούνται σε μηχανές αερίου φτωχού μίγματος. Αυτές οι μηχανές χρειάζονται μια ενεργειακά ισχυρή πηγή, για να αποδώσουν μια αξιόπιστη και ισχυρή ανάφλεξη του μίγματος. Για την διασφάλιση των μειωμένων εκπομπών  $\text{NO}_x$ , η ποσότητα πιλοτικής έγχυσης του καυσίμου θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή. Οι μηχανές DF (Dual Fuel) της Wärtsilä, χρησιμοποιούν μια μικρο-πιλοτική (micro-pilot) έγχυση με λιγότερο από 1% καύσιμο diesel του ονομαστικού φορτίου. Έτσι επιτυγχάνεται δεκαπλάσια μείωση των  $\text{NO}_x$  σε σχέση με τις συμβατικές μηχανές diesel.



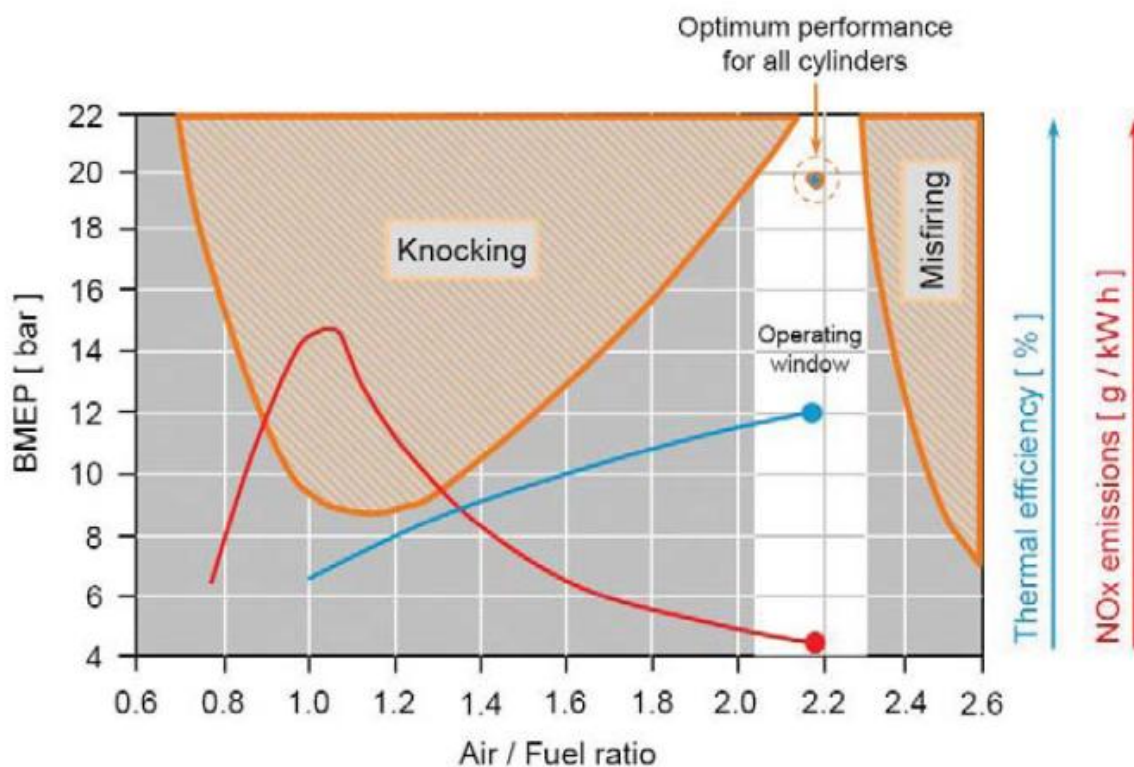
Σχήμα 4.9: Λειτουργία διπλού καυσίμου των μεσόστροφων μηχανών της Wärtsilä [23].

Πρέπει να γίνεται ένας συνεχής έλεγχος της καύσης των μηχανών DF κατά τη λειτουργία φυσικού αερίου, για την αποφυγή κρουστικής καύσης (knocking) και αστοχίας έναυσης καύσης (misfiring). Η Wärtsilä επισημαίνει ότι για να γίνει αυτό, χρειάζεται ένας πλήρης ηλεκτρονικός έλεγχος της πιλοτικής έγχυσης καυσίμου και φυσικού αερίου στην κεφαλή



κάθε κυλίνδρου. Ο λόγος αέρα-καυσίμου (AFR) ελέγχεται από μια βαλβίδα διαφυγής (wastegate), η οποία και επιτρέπει σε κάποιο ποσοστό καυσαερίων να παρακάμψει τον στρόβιλο του συστήματος υπερπλήρωσης. Έτσι εξασφαλίζεται η σωστή τιμή του λόγου AFR, ανεξάρτητα από εξωτερικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία.

Η ποσότητα και ο χρονισμός έγχυσης του καυσίμου πιλοτικής έγχυσης, ρυθμίζονται ανάλογα των τεχνικών προδιαγραφών του κυλίνδρου και του λόγου AFR, έτσι ώστε η λειτουργία να γίνεται στο σωστό σημείο, δηλαδή μεταξύ των ορίων knocking και misfiring (σχήμα 4.10). Η Wärtsilä εξηγεί ότι αυτό είναι ένας βασικός παράγοντας για την αξιόπιστη λειτουργία της μηχανής σε λειτουργία φυσικού αερίου.



Σχήμα 4.10: Βέλτιστο σημείο λειτουργίας κατά τη λειτουργία φυσικού αερίου [23].

Κατά τη λειτουργία πετρελαίου (diesel mode), η μηχανή λειτουργεί με βάση τον κύκλο Diesel, δηλαδή έγχυση υψηλής πίεσης στο χώρο καύσης πριν το ΑΝΣ. Η παροχή φυσικού αερίου είναι κλειστή, ωστόσο το pilot fuel εξακολουθεί να λειτουργεί σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να αλλάξει τη λειτουργία σε gas mode [4]. Επίσης, προστατεύεται το ακροφύσιο του πιλοτικού καυσίμου από εναποθέσεις άνθρακα.

Η πίεση του φυσικού αερίου είναι περίπου στα 5 bar. Συνήθως χρησιμοποιούνται σωληνώσεις διπλού τοιχώματος, με επαρκή αερισμό και αισθητήριες διατάξεις για τον έλεγχο τυχόν διαρροής [23]. Η εισαγωγή του αερίου γίνεται με μια απλή ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα που βρίσκεται σε κάθε μια κυλινδροκεφαλή ξεχωριστά, προσφέροντας υψηλή αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Η πιλοτική έγχυση καυσίμου γίνεται με ένα σύστημα CR (common rail) πίεσης 900 bar. Λόγω της υψηλής πίεσης του συστήματος, απαιτείται αγωγός διπλού τοιχώματος με σύστημα διάγνωσης διαρροής. Ο εγχυτήρας έχει διπλό ακροφύσιο (σχήμα 4.11). Η έγχυση του μικρού ακροφυσίου του καυσίμου πιλοτικής έγχυσης είναι πλήρη ηλεκτρονικά ελεγχόμενη από το σύστημα ελέγχου, ενώ το κύριο ακροφύσιο λειτουργεί με τον συμβατικό τρόπο (μηχανικά ελεγχόμενες αντλίες).



Σχήμα 4.11: Εγχυτήρας διπλού ακροφυσίου των μεσόστροφων μηχανών DF [23].

Όλα τα υπόλοιπα μέρη της μηχανής είναι ίδια με τις συμβατικές μεσόστροφες μηχανές diesel τελευταίας τεχνολογίας, προσφέροντας την απαραίτητη αξιοπιστία και στις μηχανές διπλού καυσίμου.

Οι μηχανές DF της εταιρίας Wärtsilä έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν με φυσικό αέριο, MDO & HFO. Κατά τη λειτουργία φυσικού αερίου, η μηχανή έχει τη δυνατότητα απευθείας εναλλαγής σε λειτουργία diesel, εάν διακοπεί η παροχή φυσικού αερίου ή υπάρξει κάποια δυσλειτουργία στο σύστημα. Η διαδικασία της “εναλλαγής” αυτής διαρκεί λιγότερο από 1 sec και δεν έχει επιπτώσεις στη ταχύτητα και το φορτίο της μηχανής. Ωστόσο, κάτι τέτοιο δεν ισχύει κατά την εναλλαγή από diesel σε φυσικό αέριο. Πρόκειται για μια αργή και σταδιακή διαδικασία, όπου η έγχυση πετρελαίου μειώνεται και παράλληλα αυξάνεται η παροχή φυσικού αερίου. Οι διακυμάνσεις στη ταχύτητα και το φορτίο της μηχανής κατά τη διαδικασία αυτή είναι μικρές, αναφέρει η Wärtsilä.

Η εκκίνηση της μηχανής DF γίνεται με πιλοτική έγχυση καυσίμου έως περίπου το 60% της ονομαστικής ταχύτητας. Η ενεργοποίηση της παροχής φυσικού αερίου γίνεται εφόσον διαγνωστεί η ανάφλεξη σε όλους τους κυλίνδρους της μηχανής. Με αυτό το μέτρο ασφαλείας διασφαλίζεται ότι δε θα περάσει άκαυστο μίγμα στην πολλαπλή εξαγωγής της μηχανής [4].

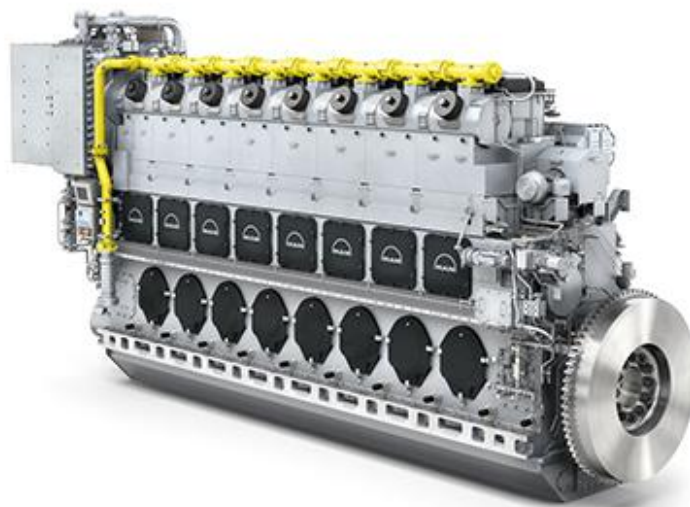
Η εταιρία Wärtsilä, διαθέτει στην αγορά μια σειρά από μηχανές DF, για λόγους ευελιξίας κατά την μελέτη και εκλογή των μηχανών ενός πλοίου. Συγκεκριμένα, υπάρχουν οι μηχανές 20DF, 31DF, 34DF, 46DF & 50DF, όπου ο αριθμός συμβολίζει τη διάμετρο κυλίνδρων των μηχανών. Για παράδειγμα η μηχανή 20DF έχει διάμετρο κυλίνδρου 200mm. Υπάρχει

ποικιλία και στην επιλογή του αριθμού κυλίνδρων όπου υπάρχουν διατάξεις σε σειρά και V. Για παράδειγμα η μηχανή 50DF διατίθεται σε 6L, 8L & 9L (σε σειρά), καθώς και 12V, 16V & 18V.



Σχήμα 4.12: Μηχανή 50DF V12 της εταιρίας Wärtsilä για πρόωση LNG carrier [4].

Αντίστοιχα, η εταιρία MAN Diesel, διαθέτει στην αγορά τις μηχανές 50/60 DF & 34/44 DF. Η αρχή λειτουργίας είναι ίδια με των μηχανών της Wärtsilä, με μικρές διαφοροποιήσεις σε κάποιες βαλβίδες και στο σύστημα ελέγχου, το οποίο λέγεται SaCoS, αντί για WECS. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τη μηχανή 50DF της Wärtsilä.



Σχήμα 4.13: Μηχανή 51/60 DF της εταιρίας MAN Diesel για πρόωση LNG carrier [24].

## Μηχανή 50DF της Wärtsilä

Βασισμένη στη συμβατική πετρελαιομηχανή Wärtsilä 46, αλλά με πρόσθετα τα παρελκόμενα για τη λειτουργία διπλού καυσίμου, η μηχανή αυτή αποδίδει 950kW ανά κύλινδρο στις 500 rpm, και θερμικό βαθμό απόδοσης 47%. Η ίδια ισχύς αποδίδεται και στις δύο διαθέσιμες λειτουργίες (gas mode/diesel mode).

Πίνακας 4.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής Wärtsilä 50DF [21].

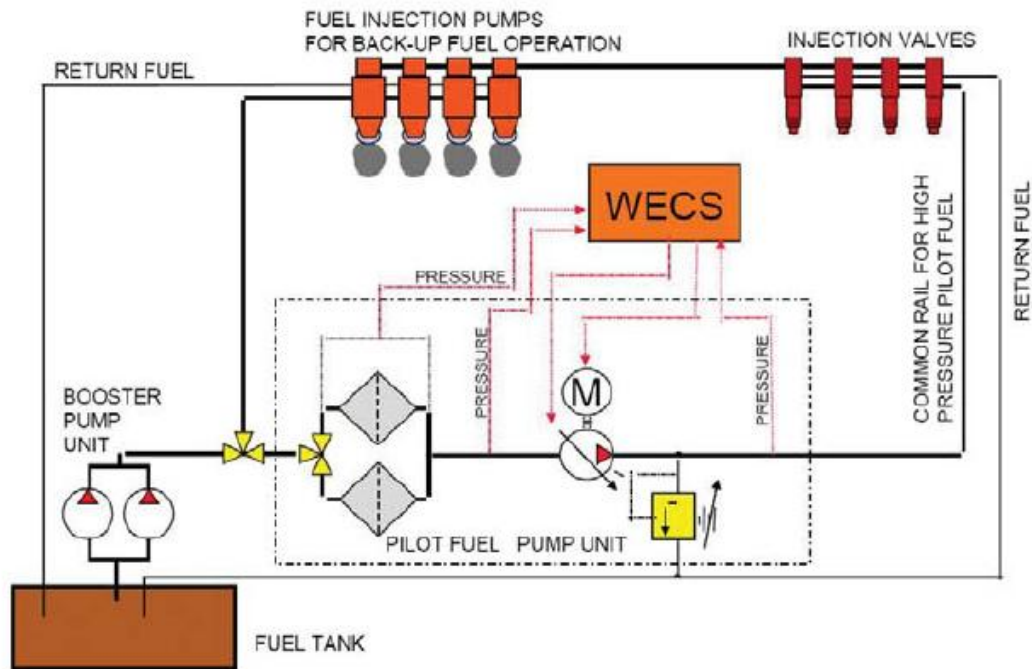
Wärtsilä 50DF	
Cylinder bore	500 mm
Piston stroke	580 mm
Cylinder output	950, 975 kW/cyl
Speed	500, 514 rpm
Mean effective pressure	20.0 bar
Piston speed	9.7, 9.9 m/s

Η σχετική αναλογία αέρα-καυσίμου ( $\lambda$ ) είναι πολύ υψηλή, τυπικά 2,2:1 και για το λόγο αυτό η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου είναι μειωμένη, συνεπώς και ο σχηματισμός των  $\text{NO}_x$ . Το μίγμα αέρα-καυσίμου είναι ομοιόμορφο, και για το λόγο αυτό δε παρουσιάζονται τοπικοί σχηματισμοί  $\text{NO}_x$  κατά τη διεργασία της καύσης.

Η μηχανή ξεκινάει πάντα σε diesel mode, χρησιμοποιώντας και τα δύο ακροφύσια του εγχυτήρα. Στις 300rpm η έγχυση του μεγάλου ακροφυσίου έχει διακοπεί, και η μηχανή έχει μπει σε gas mode. Η εισαγωγή φυσικού αερίου ενεργοποιείται μόνο όταν υπάρχει σταθερή ανάφλεξη σε όλους τους κυλίνδρους, για λόγους ασφάλειας και αξιοπιστίας. Κατά τη λειτουργία φυσικού αερίου, το ποσοστό pilot fuel που ψεκάζεται είναι μικρότερο του 1% της κατανάλωσης κατά το πλήρες φορτίο, και η ποσότητα αυτή ελέγχεται από το σύστημα ελέγχου WECS.

Η παροχή του φυσικού αερίου γίνεται μέσω μιας βαλβίδας, αφού πρώτα περάσει από φίλτρο για την εξασφάλιση μιας καθαρής παροχής. Η πίεση του εξαρτάται από το φορτίο της μηχανής και ελέγχεται από μια βαλβίδα. Κατά το πλήρες φορτίο η πίεση είναι 3,6 bar για καύσιμο με LHV  $36\text{MJ/m}^3\text{N}$ . Για περιπτώσεις χαμηλότερης LHV η πίεση θα πρέπει να αυξηθεί. Το σύστημα περιλαμβάνει και ασφαλιστικές βαλβίδες διακοπής και εξαερισμού για ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία. Η παροχή του αερίου γίνεται με αγωγό CR (συνήθως κίτρινου χρώματος) ο οποίος βρίσκεται παράλληλα με τον διαμήκη άξονα της μηχανής. Στη συνέχεια το αέριο εισέρχεται σε διαφορετικό αγωγό για κάθε κύλινδρο, ο οποίος και συνδέεται με τη βαλβίδα εισαγωγής αερίου της κυλινδροκεφαλής.

Η τροφοδοσία πετρελαίου της μηχανής χωρίζεται σε δύο συστήματα, ένα για το pilot fuel, και ένα για το back-up fuel (σχήμα 4.14). Η πίεση του pilot fuel αυξάνεται μέσω αντλητικού συστήματος που περιλαμβάνει διπλά φίλτρα, ρυθμιστή πίεσης, και εμβολοφόρα αντλία που παίρνει κίνηση από το στρόφαλο. Το υψηλής πίεσης πιλοτικό καύσιμο, διανέμεται στους εγχυτήρες των κυλίνδρων μέσω ενός αγωγού CR, σε πίεση περίπου 900bar, και με ηλεκτρονικό έλεγχο χρονισμού και διάρκειας ψεκασμού.



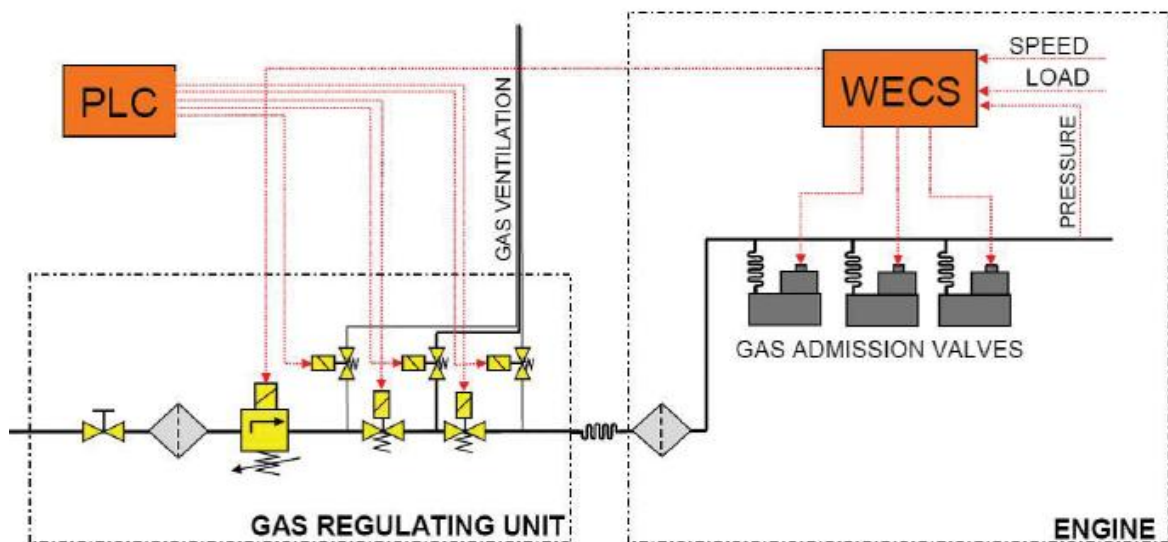
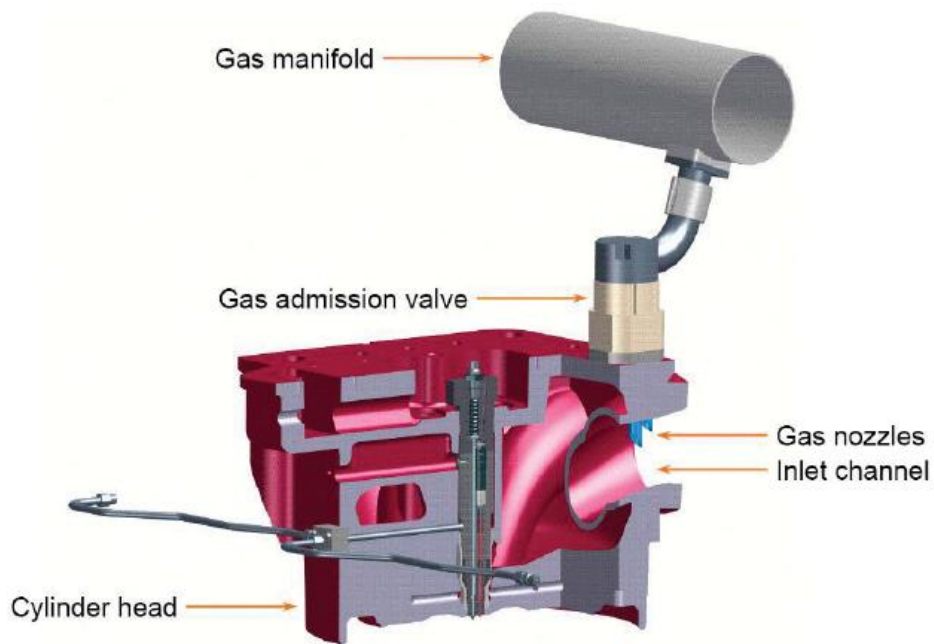
Σχήμα 4.14: Διπλό σύστημα τροφοδοσίας πετρελαίου των μηχανών DF της Wärtsilä [23].

Η τροφοδοσία του εφεδρικού καυσίμου επιτυγχάνεται μέσω κλασσικού συστήματος έγχυσης των μηχανών diesel, δηλαδή εγχυτήρες οδηγούμενοι από τον εκκεντροφόρο της μηχανής. Το μεγάλο ακροφύσιο χρησιμοποιείται σε diesel mode, ενώ το μικρό ακροφύσιο χρησιμοποιείται για το pilot fuel σε gas mode. Η πιλοτική έγχυση είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενη, ενώ η κύρια έγχυση του μεγάλου ακροφυσίου είναι υδραυλικά-μηχανικά ελεγχόμενη.

Κατά τη λειτουργία αερίου επιτυγχάνεται πλήρης έλεγχος της έγχυσης pilot fuel σε κάθε κύλινδρο, μέσω των ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων. Επίσης, ο σχηματισμός των NO<sub>x</sub> είναι πολύ μικρός λόγω της πολύ μικρής ποσότητας του pilot fuel. Συνεπώς, το σύστημα DF προσφέρει σταθερή και αξιόπιστη πηγή καύσης για το φτωχό μίγμα αέρα καυσίμου που εισέρχεται στον κύλινδρο.

Η εισαγωγή του αερίου στους κυλίνδρους γίνεται πριν τη βαλβίδα εισαγωγής. Οι βαλβίδες εισαγωγής αερίου είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενες από το σύστημα WECS. Συνεπώς, η διαδικασία της καύσης είναι πλήρη ελεγχόμενη, λόγω των βαλβίδων αερίου οι οποίες ελέγχονται ανεξάρτητα από τις συμβατικές βαλβίδες εισαγωγής της μηχανής. Για το λόγο αυτό δεν υπάρχει και ο κίνδυνος διαρροής άκαυστου αερίου στο σύστημα εξαγωγής της

μηχανής (αισθητήρας καύσης). Ο ανεξάρτητος έλεγχος της βαλβίδας αερίου διασφαλίζει τον σωστό AFR για τη βέλτιστη απόδοση και τις μειωμένες εκπομπές ρύπων της μηχανής. Επίσης, εξασφαλίζεται και η σωστή λειτουργία της μηχανής χωρίς δυσλειτουργίες όπως knocking, misfiring κλπ. Οι βαλβίδες εισαγωγής αερίου (GAV – Gas Admission Valves) έχουν μικρή διαδρομή και είναι κατασκευασμένες από ειδικά υλικά για αντοχή σε φθορά και μεγάλα διαστήματα συντήρησης.

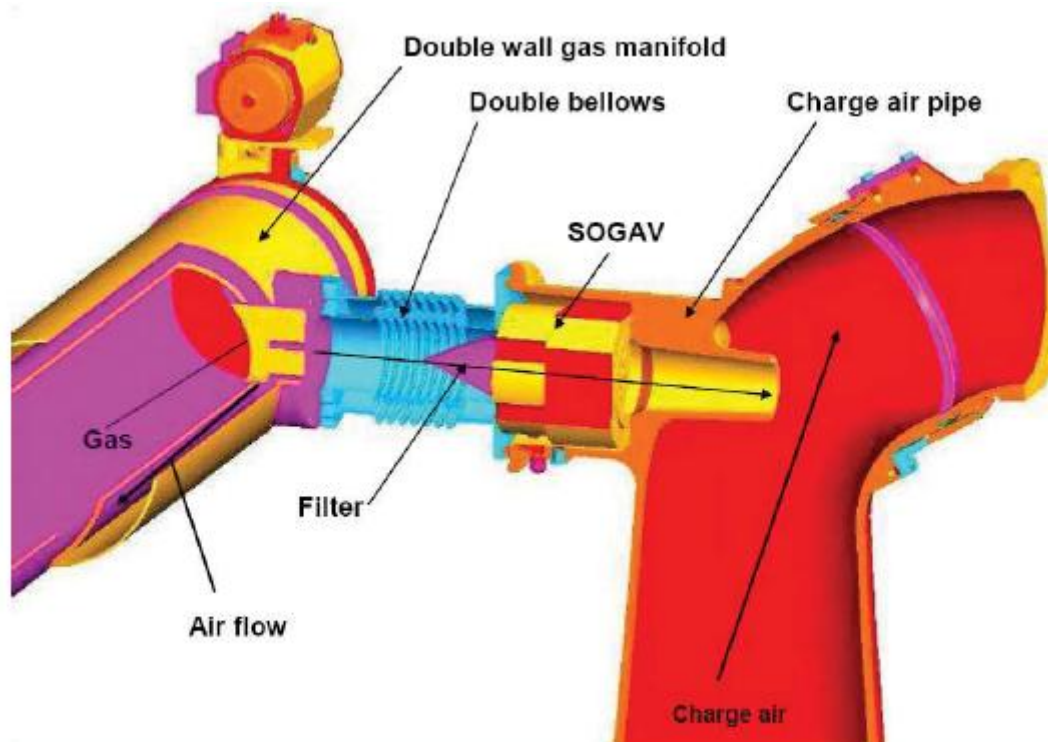


Σχήμα 4.15: Σύστημα τροφοδοσίας φυσικού αερίου των μηχανών DF της Wärtsilä [23].

Η αντλία που έχει επιλεγεί για την έγχυση καυσίμου, είναι ειδικά σχεδιασμένη για να ανταπεξέρχεται στις υψηλές πιέσεις. Είναι εξοπλισμένη με ανακουφιστική βαλβίδα για την

αποφυγή σπληαίωσης, και ειδική επένδυση για αντοχή σε φθορά. Επίσης είναι διαθέσιμη για λειτουργία σε όλες τις φάσεις της μηχανής (gas mode/diesel mode).

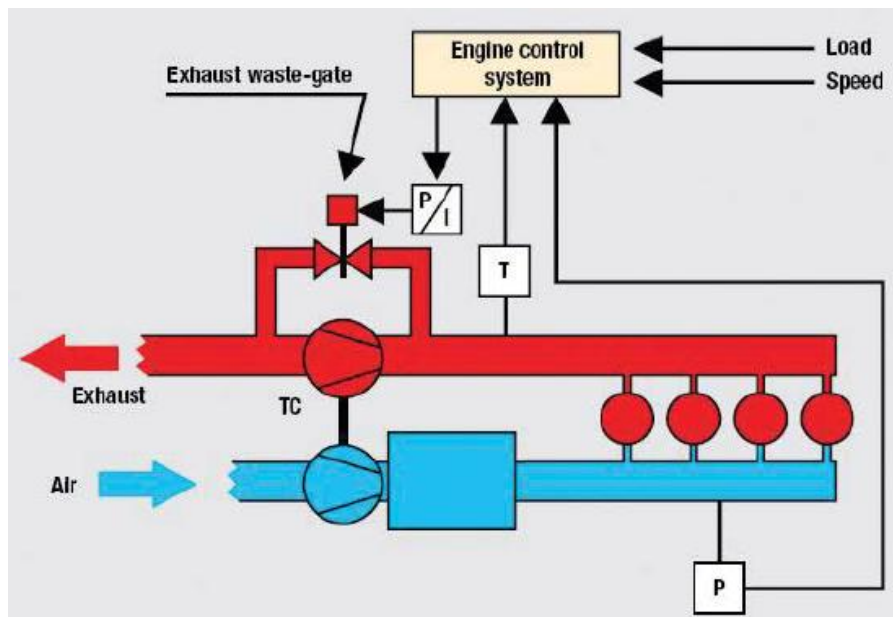
Για την άντληση του pilot fuel στον CR χρησιμοποιείται ένα ανεξάρτητο αντλητικό σύστημα που περιλαμβάνει μια παλινδρομική αντλία, τα απαραίτητα φίλτρα, βαλβίδες και το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου. Λαμβάνει σήμα για την απαιτούμενη πίεση από τον ECU, και κατόπιν ρυθμίζει και διατηρεί την πίεση αυτή, στέλνοντας ανάλογο σήμα στον ECU. Το υψηλής πίεσης πετρέλαιο διανέμεται στους εγχυτήρες της μηχανής από τον αγωγό CR, ο οποίος και συσσωρεύει και αποσβένει τους παλμούς πίεσης του συστήματος. Η σωληνώσεις έχουν διπλά τοιχώματα και αισθητήριες διατάξεις για διάγνωση διαρροών.



Σχήμα 4.16: Σωληνώσεις τροφοδοσίας φυσικού αερίου των μηχανών DF της Wärtsilä [23].

Οι μηχανές αυτές μπορούν αυτόματα να αλλάξουν λειτουργία από diesel mode σε gas mode. Το φορτίο πρέπει να είναι κάτω από το 80% του μέγιστου, και η διαδικασία διαρκεί περίπου ένα λεπτό. Ουσιαστικά ελαττώνεται βαθμιαία η έγχυση του πετρελαίου και ξεκινάει σταδιακά η έγχυση φυσικού αερίου. Ωστόσο η αλλαγή από gas mode σε diesel mode γίνεται απευθείας και σε οποιαδήποτε στιγμή χρειαστεί. Για το βέλτιστο βαθμό απόδοσης καθώς και τη συμμόρφωση με τα όρια εκπομπών των  $\text{NO}_x$  θα πρέπει να γίνεται συνεχώς ο έλεγχος του AFR. Αυτή η διαδικασία γίνεται μέσω της βαλβίδας διαφυγής (wastegate), η οποία βρίσκεται στην εξαγωγή των καυσαερίων. Ουσιαστικά, μέρος των καυσαερίων προσπερνάει τον στρόβιλο του συστήματος υπερπλήρωσης για να περάσει από τη βαλβίδα αυτή (σχήμα 4.17).

Η βαλβίδα λειτουργεί ηλεκτρο-πνευματικά και έχει ήδη γίνει η περιγραφή της (υποενότητα 2.5.4).



Σχήμα 4.17: Έλεγχος της πίεσης υπερπλήρωσης & του AFR μέσω βαλβίδας διαφυγής [23].

Σχετικά με το σύστημα ψύξης της μηχανής, χρησιμοποιείται ένα διπλό κύκλωμα υψηλής (HT) και χαμηλής (LT) θερμοκρασίας. Το HT κύκλωμα ψύχει τα χιτώνια και την κυλινδροκεφαλή, ενώ το LT κύκλωμα ψύχει το λιπαντικό της μηχανής. Το ψυκτικό ψύχεται με παροχή βεβιασμένου αέρα διπλής βαθμίδας, και οι αντλίες παίρνουν κίνηση από τον στρόφαλο της μηχανής.

Όλες οι λειτουργίες της μηχανής ελέγχονται από το WECS, το οποίο είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου μικροεπεξεργαστή καταμεμημένο στη μηχανή. Ο πυρήνας του συστήματος WECS είναι η κύρια μονάδα ελέγχου – MCM (Main Control Module), η οποία και είναι υπεύθυνη για την σωστή λειτουργία της μηχανής για όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Η MCM λαμβάνει πληροφορίες (σήματα αισθητήρων) από τις δευτερεύουσες μονάδες ελέγχου του συστήματος – CCM (Cylinder Control Module) και στέλνει εντολές (σήματα ενεργοποιητών) για τη κατάλληλη ρύθμιση της ταχύτητας και του φορτίου της μηχανής. Αυτό γίνεται μέσω προσδιορισμού τιμών αναφοράς (έτοιμους αλγόριθμους) για την παροχή φυσικού αερίου, τον λόγο AFR, και τον χρονισμό & την ποσότητα της έγχυσης του πιλοτικού καυσίμου. Η CCM ελέγχει την ένταση της κρουστικής καύσης, μια πληροφορία που απαιτεί την κατάλληλη ρύθμιση της παροχής του αερίου και του πιλοτικού καυσίμου [4].



#### 4.4 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΩΩΣΗ

Στη διεθνή βιβλιογραφία ο συνδυασμός ενός αμοστροβίλου ή αεριοστροβίλου και ηλεκτρογεννήτριας ονομάζεται *turbogenerator*, ενώ ο συνδυασμός ενός παλινδρομικού κινητήρα και ηλεκτρογεννήτριας ονομάζεται *alternator*. Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών με τη χρήση ηλεκτρικής πρόωσης είναι τα εξής [22]:

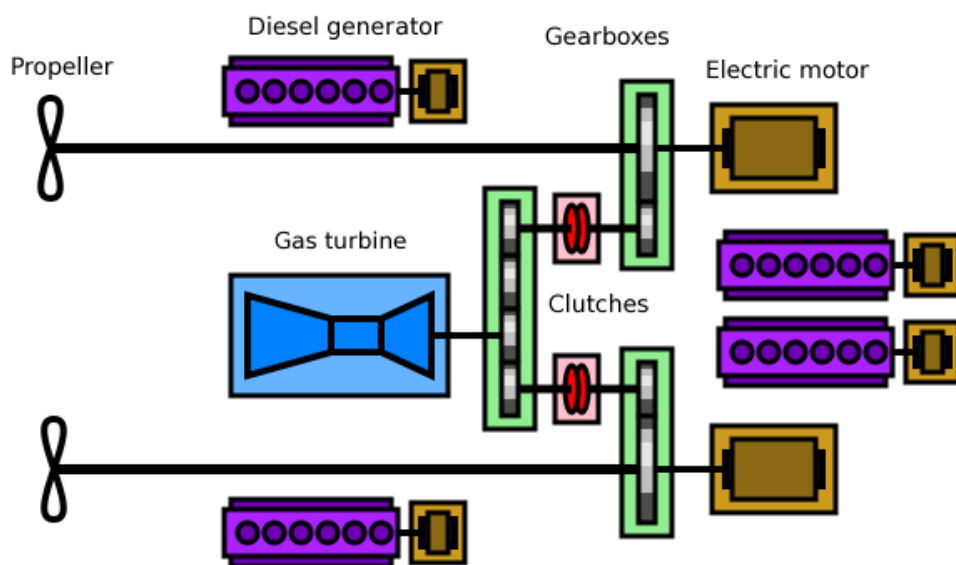
- Μειωμένος αριθμός μηχανών λόγω παράλληλης πρόωσης και παραγωγής ρεύματος
- Μειωμένο κόστος λειτουργίας για το παραπάνω λόγο
- Πολύ μικρή απαίτηση συντήρησης των ηλεκτροκινητήρων
- Αποδοτική λειτουργία σε ευρύ φάσμα στροφών
- Χρήση πολύ απλού κιβωτίου ή και άμεση σύνδεση με τον ελικοφόρο άξονα
- Χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και καπνού σε σχέση με άλλα συστήματα πρόωσης

Τα συστήματα αυτά θα αναλυθούν παρακάτω.

##### 4.4.1 Ηλεκτρική πρόωση με θερμικές στροβιλομηχανές

Το πιο απλό σύστημα είναι ο συνδυασμός αμοστροβίλου με ηλεκτρική πρόωση. Πρόκειται για εφαρμογή αμοστροβίλου με αναθέρμανση (υποενότητα 4.1.1) σε συνδυασμό με γεννήτρια και ηλεκτρικούς κινητήρες. Το σύστημα αυτό χρειάζεται και κάποιες μεσόστροφες μηχανές diesel ή διπλού καυσίμου για τα χαμηλά φορτία (ελιγμούς). Αν και χρησιμοποιείται σε παλαιότερα LNG carrier, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυτού είναι πολύ χαμηλός (κάτω του 30% λόγω ηλεκτρικών απωλειών) και δε θα γίνει περαιτέρω ανάλυση.

##### Combined Diesel Electric And Gas turbine, CODLAG



Σχήμα 4.18: Σύστημα CODLAG με ηλεκτρογεννήτριες diesel & αεριοστροβίλο [22].

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος CODLAG έχει ως εξής: Για cruising speed λειτουργεί κινητήρας diesel που οδηγεί μια ηλεκτρογεννήτρια που παράγει ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο τροφοδοτεί ηλεκτροκινητήρα που τελικά οδηγεί την προπέλα. Για υψηλές ταχύτητες εμπλέκεται και αεριοστρόβιλος ο οποίος ενισχύει κατευθείαν το έργο του ηλεκτροκινητήρα μέσω πολύπλοκου κιβωτίου ταχυτήτων.

Ένα σύστημα CODLAG χρησιμοποιεί συνήθως δύο ηλεκτροκινητήρες (electric motors) που είναι συνδεδεμένοι μέσω αξόνων στις αντίστοιχες προπέλες. Για χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες, κάθε ηλεκτροκινητήρας τροφοδοτείται από μία κύρια alternator, ενώ υπάρχει συνήθως και μια βοηθητική alternator. Το σύστημα των alternators παρέχει ηλεκτρική ισχύ εκτός από το σύστημα πρόωσης και στα υπόλοιπα συστήματα του πλοίου. Για υψηλότερες ταχύτητες, όπως είπαμε, ένας αεριοστρόβιλος συνδέεται με τη βοήθεια πολύπλοκου συστήματος κιβωτίων και με τους δύο άξονες παρέχοντας έτσι επιπλέον ισχύ.

### **Intergrated Full Electric Drive, IFED**

Πρόκειται για μοντέρνο συνδυασμένο σύστημα για σκάφη ή υποβρύχια. Σύμφωνα με αυτό ο αεριοστρόβιλος οδηγεί μια ηλεκτρογεννήτρια (turbogenerator), η οποία με την σειρά της παρέχει ισχύ για πρόωση (μέσω ηλεκτροκινητήρα) και ηλεκτρική ισχύ για όλα τα βοηθητικά συστήματα του πλοίου. Παράλληλα, εκτός από τον turbogenerator στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου συνδέονται και (ένας ή και περισσότεροι) κινητήρες diesel που οδηγούν αντίστοιχες ηλεκτρογεννήτριες (alternators) ή και την μία και μοναδική ηλεκτρογεννήτρια. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει καμία μηχανική σύνδεση των κύριων κινητήρων με τις προπέλες. Το σύστημα IFED δίνει τις εξής δυνατότητες:

- Να τοποθετηθούν οι ηλεκτροκινητήρες πιο κοντά στην προπέλα, μειώνοντας έτσι το μήκος του άξονα της, καταργώντας την ανάγκη για κιβώτιο ταχυτήτων και προπέλας με μεταβλητό βήμα, μειώνοντας παράλληλα την πιθανότητα εμφάνισης βλαβών.
- Να τοποθετηθούν οι κύριες μηχανές (turbogenerators, alternators) σε «βολικές» θέσεις μακριά από τον άξονα κίνησης, μειώνοντας έτσι τον χώρο που θα καταλάμβαναν οι καπνοδόχοι, ενώ την ίδια στιγμή βελτιώνεται η πρόσβαση για συντήρηση των κινητήρων.
- Εάν για κάποιο λόγο μια κύρια μηχανή βγει εκτός λειτουργίας, τότε εύκολα απομονώνεται και το πλοίο συνεχίζει να λειτουργεί. Παράλληλα η διασπορά των μηχανών έχει αντίκτυπο στην επιβιωσιμότητα ενός πολεμικού πλοίου, γιατί ένα και μόνο πλήγμα δεν θα σταματήσει την παροχή ισχύος στο πλοίο.
- Να παρέχεται ενέργεια σε όλο το πλοίο από ένα μόνο πακέτο ισχύος, που μπορεί να επιλέγει ποιοι από τους κινητήρες χρειάζονται να λειτουργούν αυξάνοντας τον χρόνο ζωής τους και μειώνοντας έτσι δραματικά τις εκπομπές ρύπων και των δονήσεων/θορύβου.
- Να χρησιμοποιηθούν συστήματα ώσης τύπου εξωτερικού λοβού (propulsion pods).

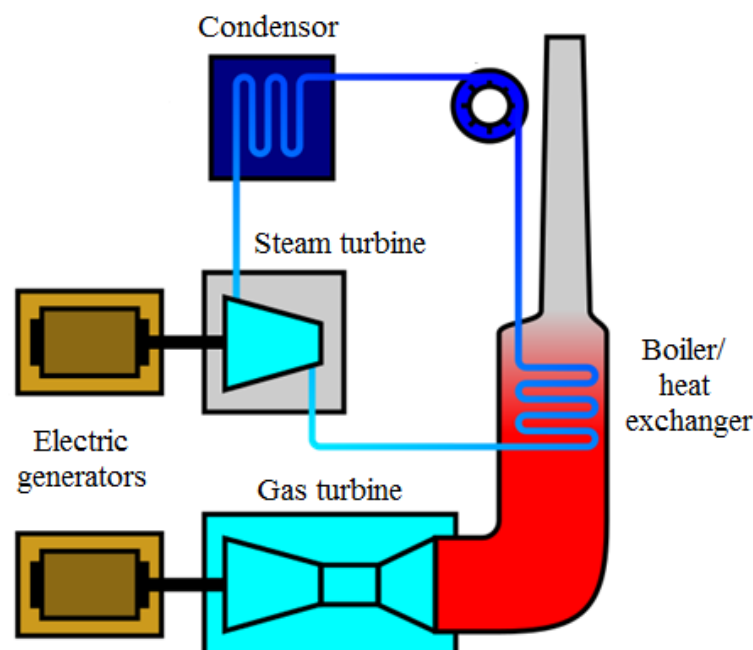
- Καθιστά μη αναγκαία την χρήση προπέλας μεταβλητού βήματος της οποίας ο υδραυλικός μηχανισμός είναι αρκετά ευαίσθητος. Ανάποδη πρόωση μπορεί να επιτευχθεί με ηλεκτρική αναστροφή της λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα.

Κλειδί για την αποδοτική χρήση ενός μόνο κύριου κινητήρα είναι η επιλογή ενός αεριοστρόβιλου που λειτουργεί με υψηλό βαθμό απόδοσης σε ένα μεγάλο εύρος φορτίου, δηλαδή με καλά χαρακτηριστικά λειτουργίας και εκτός σημείου σχεδιασμού. Λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η εγκατάσταση περισσότερων της μιας turbogenerator με διαφορετική ισχύ. Οι ηλεκτρογεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) τάσης περίπου 4.000V, που ανορθώνεται σε συνεχές (DC) για να τροφοδοτήσει όλες τις συσκευές του πλοίου.

### COmbined Gas turbine and Steam turbine integrated Electric drive system, COGES

Πρόκειται στην ουσία για εφαρμογή της αρχής του συνδυασμένου κύκλου των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας CCGP. Στόχος βέβαια είναι επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής απόδοσης του συστήματος ισχύος. Η διαφορά του συστήματος COGES από το COSAG είναι ότι στην περίπτωση του COGES τόσο ο αεριοστρόβιλος όσο και ο ατμοστρόβιλος παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα μέσω ηλεκτρογεννητριών (turbogenerators) που στη συνέχεια δίνουν ισχύ εκτός των άλλων και στους ηλεκτροκινητήρες των προπελών. Δηλαδή, δεν υπάρχει καμία μηχανική σύνδεση των κύριων κινητήριων μηχανών με τις προπέλες, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του συστήματος COSAG.

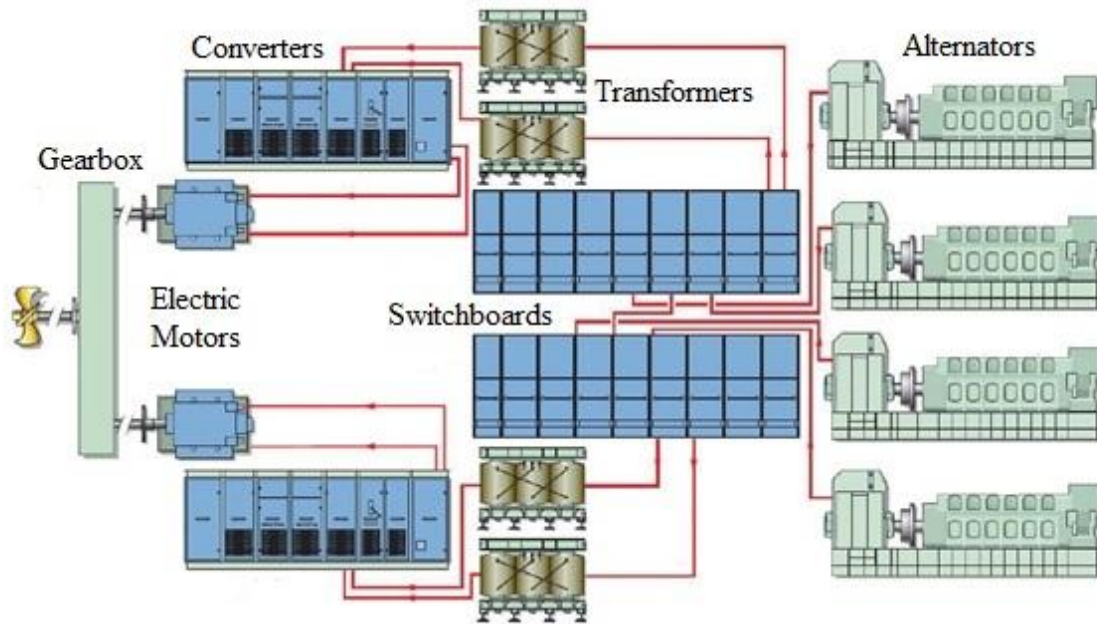
Το σύστημα βρίσκει εφαρμογή σε σύγχρονα πλοία αναψυχής μεγάλου μεγέθους, όπου οι ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα υψηλές, ενώ απαιτείται και χαμηλό επίπεδο θορύβου και καπνού.



Σχήμα 4.19: Σύστημα COGES συνδυασμένου κύκλου Brayton & Rankine [22].

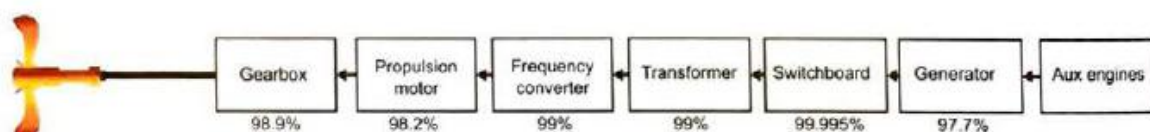
#### 4.4.2 Ηλεκτρική πρόωση με παλινδρομικές μηχανές

Γνωστά ως συστήματα *Dual Fuel Diesel Electric* – DFDE ή καλύτερα *Tri-Fuel Diesel Electric* – TFDE. Ο όρος *tri-fuel* σημαίνει ότι το σύστημα αυτό μπορεί να κάψει τρία είδη καυσίμων (φυσικό αέριο, MDO & HFO) [15]. Πρόκειται για τα πλέον διαδεδομένα συστήματα πρόωσης των LNG carrier, τα οποία συνδυάζουν τον υψηλό βαθμό απόδοσης των μεσόστροφων μηχανών διπλού καυσίμου με ένα ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.20: Σύστημα TFDE για την πρόωση LNG carrier [23].

Τα παρελκόμενα του συστήματος αυτού φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. Οι alternators μπορούν να βρίσκονται οπουδήποτε στο μηχανοστάσιο του πλοίου, προσφέροντας έτσι μια ευελιξία κατά τη σχεδίαση του πλοίου [15]. Ουσιαστικά οι ηλεκτρογεννήτριες (*Generators*) παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα (τάσης 6,6kV) για την πρόωση αλλά και για το ηλεκτρικό ρεύμα του πλοίου, όπου ο διαχωρισμός αυτός γίνεται στους πίνακες διανομής (*Switchboards*). Στη συνέχεια το ρεύμα περνάει από μετασχηματιστές (*Transformers*), ανορθωτές (*Converters*), και τελικά καταλήγει σε ηλεκτροκινητήρες DC, οι οποίοι συνδέονται με κιβώτιο ταχυτήτων και την προπέλα. Το σύστημα αυτό έχει μειωμένο βαθμό απόδοσης λόγω των ηλεκτρικών απωλειών που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.21: Ηλεκτρικές απώλειες συστήματος TFDE [15].

## 4.5 ΒΡΑΔΥΣΤΡΟΦΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Τα τελευταία χρόνια, μέσω του R&D των εταιριών MAN Diesel & WIN GD, έχουν βγει στην αγορά νέες βραδύστροφες δίχρονες ναυτικές μηχανές διπλού καυσίμου. Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί η κάθε εταιρία είναι διαφορετική. Η εταιρία MAN Diesel με τις μηχανές της σειράς ME-GI χρησιμοποιεί έγχυση φυσικού αερίου σε υψηλή πίεση, σε αντίθεση με τις μηχανές της WIN GD (πρώην Wärtsilä) που χρησιμοποιούν εισαγωγή φυσικού αερίου χαμηλής πίεσης. Οι τεχνολογίες θα περιγραφούν αναλυτικά παρακάτω.

### 4.5.1 Μηχανές υψηλής πίεσης

Οι σειρά των μηχανών MC/ME υπάρχει στην αγορά από το 1982. Οι μηχανές αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί ως μηχανές πρόωσης σχεδόν για όλα τα είδη πλοίων (όπως containers, tankers, bulk carriers κλπ). Η επιλογή μιας τέτοιας δίχρονης μηχανής προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως ο υψηλός θερμοκός βαθμός απόδοσης (περίπου 50%), αξιοπιστία και ασφάλεια, καθώς προσφέρει την ίδια ανταπόκριση κατά τη λειτουργία φυσικού αερίου.

Η έγχυση φυσικού αερίου – GI (Gas Injection) για αυτές τις μηχανές, ξεκίνησε να αναπτύσσεται κατά τη δεκαετία του 1990, σε πειραματικές και επίγειες εφαρμογές. Η τελευταία έκδοση της μηχανής ME-GI εγκρίθηκε για χρήση σε ναυτικές εφαρμογές το 2012. Τεχνικά, υπάρχει πολύ μικρή διαφορά μεταξύ των συμβατικών μηχανών ME-B/C και των μηχανών ME-GI [20]. Πρόκειται για όμοιες μηχανές, όπου οι διαφοροποιήσεις και τα έξτρα παρελκόμενα της μηχανής για τη χρήση Φ.Α. θα αναφερθούν παρακάτω.



Σχήμα 4.22: Η μηχανή ME-GI της εταιρίας MAN Diesel & Turbo [24].

## Γενικά χαρακτηριστικά της μηχανής ME-GI

Η γραμμή παροχής αερίου είναι σχεδιασμένη με κίτρινες σωληνώσεις διπλού-τοιχώματος όπου στον ενδιάμεσο κενό χώρο κυκλοφορεί αέρας. Η κυκλοφορία του αέρα συνεισφέρει ως σύστημα ασφαλείας για περίπτωση διαρροής, έτσι ώστε να γίνει η έγκαιρη διάγνωση από τους αισθητήρες υδρογονανθράκων (HC sensors). Για τον έλεγχο της μηχανής χρησιμοποιείται το ηλεκτρονικό σύστημα των συμβατικών πετρελαιομηχανών της σειράς ME, με ένα επιπλέον “add-on” για το σύστημα λειτουργίας και ασφάλειας φυσικού αερίου. Τα υπόλοιπα σημαντικά βοηθητικά συστήματα της μηχανής ME-GI είναι [20]:

- Σύστημα αερισμού (ventilation system), για τον χώρο μεταξύ των εσωτερικών & εξωτερικών τοιχωμάτων των αγωγών διπλού-τοιχώματος.
- Σύστημα λιπαντικού στεγανοποίησης (sealing oil system), το οποίο παρέχει λιπαντικό στεγανοποίησης στους εγχυτήρες αερίου για τον διαχωρισμό του λαδιού ελέγχου και του φυσικού αερίου. Το σύστημα αυτό είναι πλήρη ενσωματωμένο στη μηχανή και τα ναυπηγεία δεν αναλαμβάνουν την εγκατάσταση του.
- Σύστημα αδρανούς αερίου (inert gas system), το οποίο παρέχει αδρανές αέριο στα συστήματα του κινητήρα όταν κριθεί απαραίτητο.
- Σύστημα ελέγχου και ασφαλείας (control & safety system), που περιλαμβάνει έναν αναλυτή υδρογονανθράκων, για τον έλεγχο της περιεκτικότητας HC του αέρα των αγωγών διπλού-τοιχώματος.

Το σύστημα ελέγχου και ασφαλείας είναι σχεδιασμένο να “αποτυγχάνει” με ασφαλή τρόπο. Δηλαδή, όλες οι δυσλειτουργίες που εντοπίζονται, συμπεριλαμβανομένου των δυσλειτουργιών του ίδιου του συστήματος ελέγχου, οδηγούν σε μετάβαση λειτουργίας πετρελαίου. Έπειτα ακολουθεί καθαρισμός των αγωγών υψηλής πίεσης και του συστήματος παροχής φυσικού αερίου με αδρανές αέριο. Η αλλαγή σε λειτουργία πετρελαίου γίνεται απευθείας και χωρίς κάποια απώλεια ισχύος κατά τη λειτουργία της μηχανής. Επίσης, μέσω πρόσφατων δοκιμών, δε γίνεται να αντιληφθεί κάποιος από τον ήχο τη διαφορά στη καύση της μηχανής.

Το υψηλής πίεσης αέριο ρέει μέσα από τον κύριο “αλυσιδωτό” αγωγό (main “chain” pipe), ο οποίος και ενώνει καθεμία από τις μονάδες βαλβίδων αερίου (gas valve blocks) που διαθέτει ο κάθε κύλινδρος ξεχωριστά. Ο σχεδιασμός του “αλυσιδωτού” αγωγού συνεισφέρει σε δύο σημαντικά καθήκοντα [20]:

- Διαχωρίζει την κάθε μία ξεχωριστή μονάδα κυλίνδρου για λόγους δυναμικής (gas dynamics), υιοθετώντας έτσι την αποδεδειγμένα αξιόπιστη φιλοσοφία του συστήματος τροφοδοσίας πετρελαίου των μηχανών της σειράς ME.
- Δρα ως μια ευέλικτη σύνδεση μεταξύ του δύσκαμπτου κύριου συστήματος αγωγών και της μηχανής, προσφέροντας προστασία από τις επιπρόσθετες τάσεις που δημιουργούνται αναπόφευκτα, λόγω των θερμικών διαστολών μεταξύ σωληνώσεων αερίου και μηχανής.



Σχήμα 4.23: Η νέα & επιπρόσθετη μονάδα αερίου της μηχανής ME-GI [20].

Ο συσσωρευτής (accumulator), που τον συναντάμε στη βιβλιογραφία και ως δεξαμενή αντιστάθμισης (buffer tank), εμπεριέχει περίπου 20πλάσια ποσότητα έγχυσης ανά χρόνο λειτουργίας (stroke) στην MCR (Maximum Continuous Rating) της μηχανής. Επιπρόσθετα συνεισφέρει σε δύο σημαντικές εργασίες [20]:

- Παροχή αερίου έγχυσης σε μικρή αλλά προκαθορισμένη πτώση πίεσης
- Σημαντικό μέρος του συστήματος ασφαλείας

Οι εγχυτήρες αερίου πρέπει να ελέγχονται από ένα βοηθητικό σύστημα υδραυλικού λαδιού (control oil), διότι ο σχεδιασμός των σωληνώσεων παροχής είναι τύπου CR - Common Rail (κοινής γραμμής). Για το λόγο αυτό, η μηχανή ME-GI περιλαμβάνει τα συστήματα ELGI & ELWI, εκτός από τα συμβατικά υδραυλικά συστήματα λαδιού (ELFI, ELVA) των μηχανών ME B/C. Συνεπώς υπάρχει πλήρης ηλεκτρονικός έλεγχος του εγχυτήρα αερίου στη ρύθμιση του χρονισμού & στο άνοιγμα [20].

### **Σύστημα έγχυσης της μηχανής ME-GI**

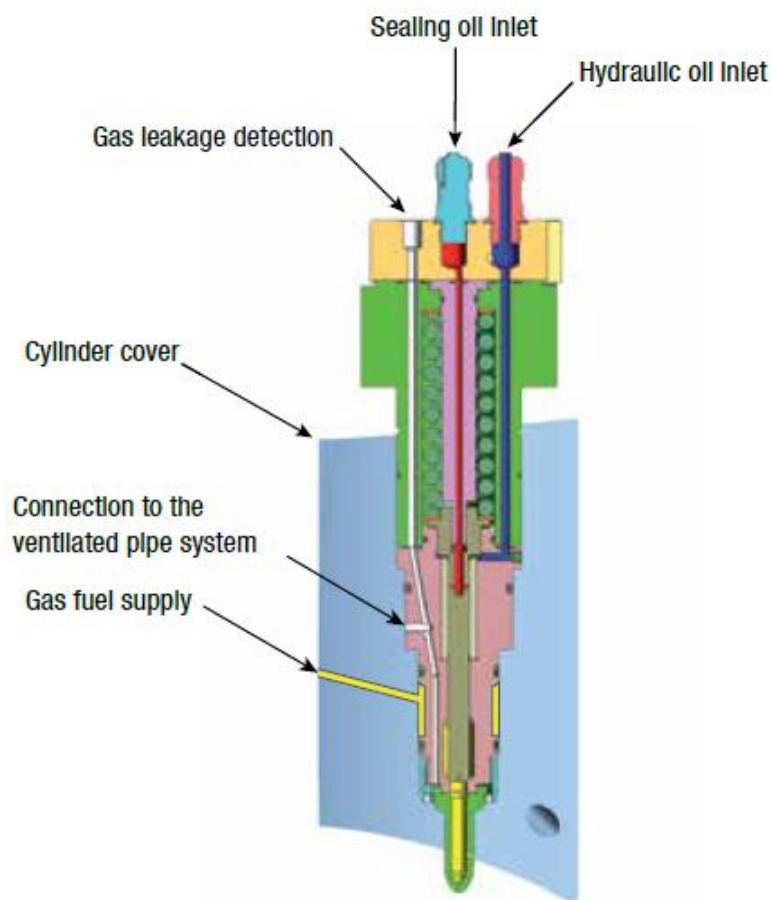
Η λειτουργία διπλού καυσίμου απαιτεί πιλοτική έγχυση πετρελαίου καθώς και έγχυση φυσικού αερίου στον θάλαμο καύσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά

είδη εγχυτήρων. Τα βοηθητικά μέσα που απαιτούνται για τις δύο αυτές λειτουργίες είναι τα ακόλουθα [20]:

- Παροχή αερίου υψηλής πίεσης
- Παροχή πετρελαίου (καύσιμο πιλοτικής έγχυσης)
- Παροχή λαδιού υδραυλικού συστήματος (control oil) για την ενεργοποίηση των εγχυτήρων αερίου.

Το αέριο εισάγεται στον εγχυτήρα μέσα από οπές (bores) του πώματος κυλίνδρων. Για την αποτροπή διαρροής του αερίου, μεταξύ πώματος κυλίνδρου και εγχυτήρα, καθώς και περιβλήματος βαλβίδας (valve housing) και οδηγού άξονα βαλβίδας (valve spindle guide), έχουν εγκατασταθεί δακτύλιοι στεγανότητας (sealing rings) υψηλής ανθεκτικότητας. Τυχόν διαρροή από τους δακτυλίους στεγανότητας, θα οδηγείται μέσω των αυλών του εγχυτήρα, στον ενδιάμεσο κενό χώρο των αγωγών διπλού τοιχώματος. Συνεπώς η διαρροή θα διαγνωσθεί έγκαιρα από τους αισθητήρες υδρογονανθράκων.

Το αέριο ασκεί συνεχώς πίεση στο ακροφύσιο με μέγιστη πίεση τα περίπου 300bar. Για την αποτροπή εισροής του αερίου στο υδραυλικό σύστημα λαδιού (μέσω των ανοχών του άξονα της βαλβίδας), ο άξονας στεγανοποιείται μέσω του λιπαντικού στεγανοποίησης (sealing oil) σε πίεση υψηλότερη του αερίου (25-50bar υψηλότερη).



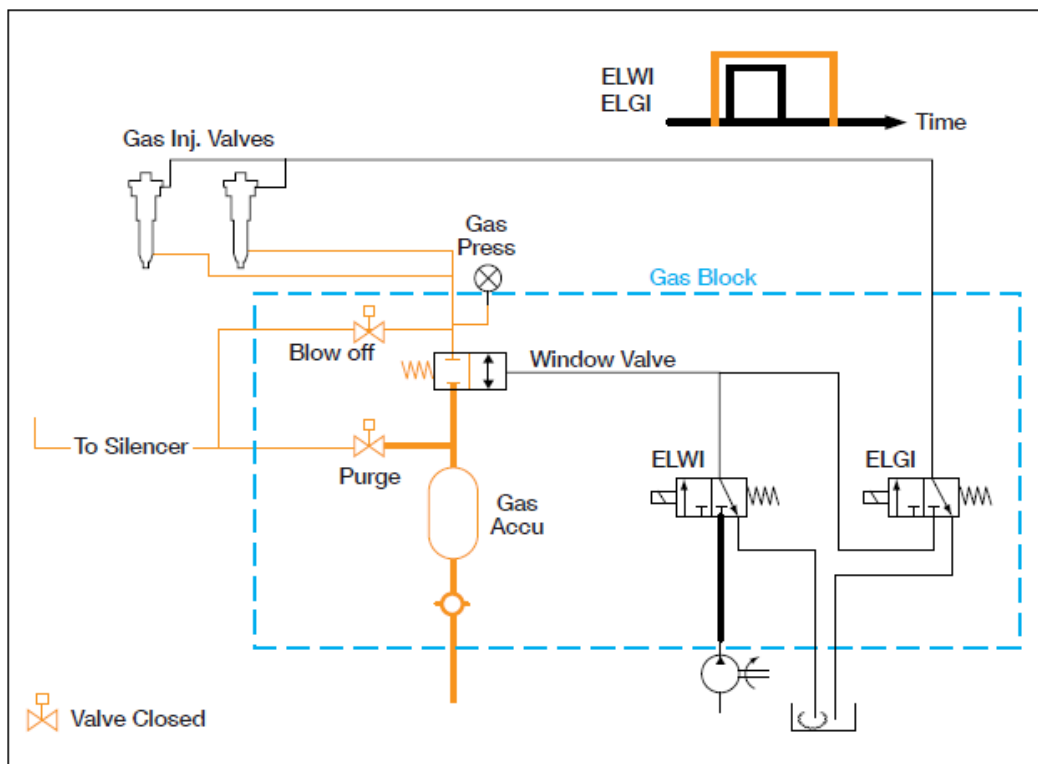
Σχήμα 4.24: Εγχυτήρας φυσικού αερίου της μηχανής ME-GI [20].



Οι εγχυτήρες του pilot fuel είναι οι συμβατικοί εγχυτήρες πετρελαίου, των μηχανών της σειράς ME, με διαφορετικό όμως ακροφύσιο. Ως πιλοτικό καύσιμο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το HFO, MDO & MGO (Marine Gas Oil). Ο σχεδιασμός των εγχυτήρων πετρελαίου, επιτρέπει την χρήση τους για έως και πλήρη φορτίο χωρίς να χρειαστεί διακοπή λειτουργίας της μηχανής. Ωστόσο, για παρατεταμένη λειτουργία πετρελαίου, προτείνεται η αλλαγή του ακροφυσίου, έτσι ώστε να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης σε ποσοστό 1% για το πλήρες φορτίο.

Το σύστημα έγχυσης διπλού καυσίμου της μηχανής ME-GI, περιλαμβάνει τα εξής [20]:

- Δύο εγχυτήρες πετρελαίου
- Δυο εγχυτήρες αερίου
- Το σύστημα ELGI (Electronic Gas Injection) για το άνοιγμα-κλείσιμο των βαλβίδων των εγχυτήρων αερίου
- Τον ενεργοποιητή FIVA (Fuel Injection Valve Actuator) για τον έλεγχο της βαλβίδας έγχυσης πετρελαίου
- Το σύστημα ELWI (Electrical Windows and gas shutdown) ως επιπρόσθετο μέτρο προστασίας για την αποφυγή τυχόν διαρροών. Με χρήση της βαλβίδας ασφαλείας (window valve), επιτυγχάνεται διπλή φραγή του αερίου ως προς τον θάλαμο καύσης.



Σχήμα 4.25: Το σύστημα έγχυσης αερίου της μηχανής ME-GI [20].

Επιπρόσθετα, συμπεριλαμβάνει τον συμβατικό ενισχυτή πίεσης (pressure booster) του καυσίμου πιλοτικής έγχυσης για την λειτουργία διπλού καυσίμου [20].

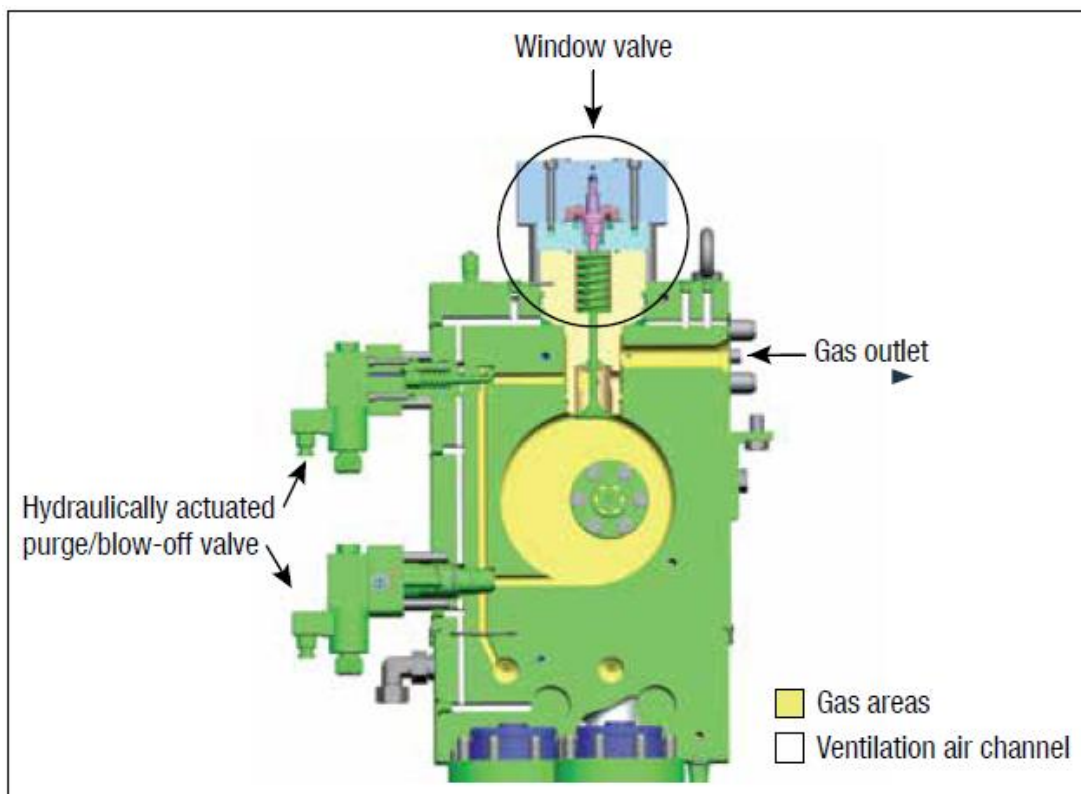
## Χαρακτηριστικά ασφαλείας

Κάτω από φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, το αέριο εγχύεται άμεσα στον θάλαμο της καύσης και η βαλβίδα ανοίγει στη σωστή θέση στροφάλου. Συνεπώς θεωρείται απίθανο το άκαυστο αέριο να περάσει από τα ελατήρια του εμβόλου στο χώρο σάρωσης της μηχανής. Ωστόσο, ο έλεγχος πίεσης και έναυσης του χώρου σάρωσης συνεισφέρει στη διάγνωση τυχόν τέτοιας δυσλειτουργίας.

Η βαλβίδα ασφαλείας (window valve) προσφέρει τις εξής λειτουργίες ασφαλείας του συστήματος [20]:

1. εξασφαλίζει έγχυση αερίου στον σωστό χρονισμό
2. Μπλοκάρει την εισαγωγή αερίου στο χώρο καύσης, σε περίπτωση δυσλειτουργίας

Ο αισθητήρας πίεσης βρίσκεται μεταξύ της βαλβίδας ασφαλείας και των εγχυτήρων. Η μικρή ποσότητα αερίου στο πάμα κάθε κυλίνδρου, δίνει μια προκαθορισμένη τιμή πίεσης. Συνεπώς, οποιαδήποτε δυσλειτουργία του εγχυτήρα (φράξιμο, κόλλημα, διαρροή) θα διαγνωσθεί έγκαιρα. Σε μια τέτοια περίπτωση γίνεται διακοπή της ροής του αερίου, και το κύκλωμα καθαρίζεται με αδρανές αέριο. Επιπρόσθετα, ελέγχεται συνεχώς και η πίεση καύσης των κυλίνδρων της μηχανής, και σε περίπτωση που διαγνωσθεί πολύ υψηλή πίεση σε κάποιο κύλινδρο, τερματίζεται η λειτουργία αερίου. Και στις δύο περιπτώσεις η μηχανή εξακολουθεί να λειτουργεί κανονικά με λειτουργία πετρελαίου και μηδαμινή απώλεια ισχύος [20].



Σχήμα 4.26: Η μονάδα βαλβίδων αερίου (gas valve control block) της μηχανής ME-GI [20].

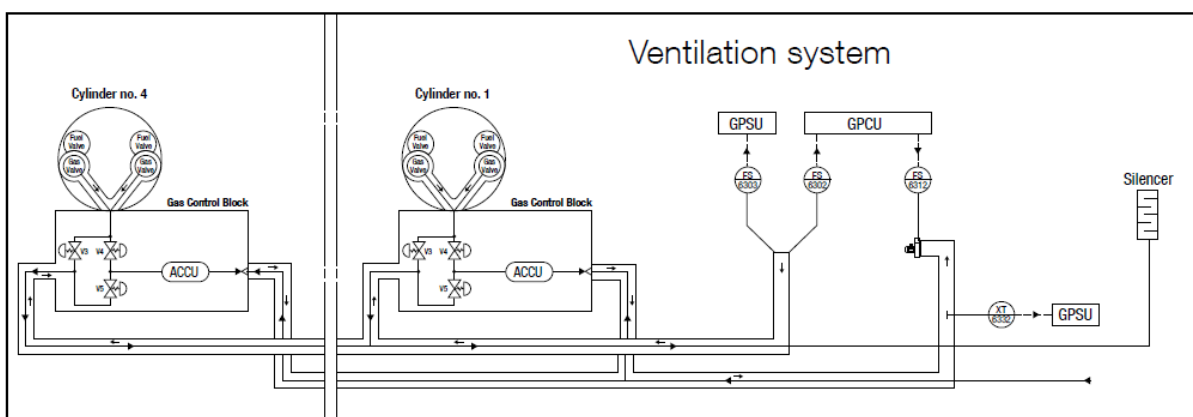
## Σωληνώσεις υψηλής πίεσης & διπλού τοιχώματος

Το σύστημα παροχής αερίου της μηχανής, είναι τύπου Common-Rail, και διανέμεται στη μονάδα αερίου του κάθε κυλίνδρου. Ο σχεδιασμός των διπλών τοιχωμάτων γίνεται για λόγους ασφαλείας του μηχανοστασίου, σε περίπτωση τυχόν διαρροής του εσωτερικού αγωγού. Ο ενδιάμεσος κενός χώρος των σωληνώσεων, συμπεριλαμβανομένου και του χώρου γύρω από βαλβίδες & φλάτζες, είναι εξοπλισμένος με μηχανικό σύστημα αερισμού. Το σύστημα αυτό εκτελεί περίπου 30 εναλλαγές αέρα ανά ώρα σε αυτούς τους χώρους και η πίεση είναι χαμηλότερη από αυτή του μηχανοστασίου. Οι ανεμιστήρες του συστήματος, καθώς και η εισαγωγή του αέρα βρίσκονται σε ασφαλή περιοχή του πλοίου.

Η διάταξη των σωληνώσεων είναι τέτοια, ώστε ο αέρας να εισάγεται από ασφαλή σημείο, και να περνάει από κάθε μονάδα αερίου μέσω του κύριου αλυσιδωτού αγωγού. Κατά την επιστροφή του, ο αέρας εξάγεται στην ατμόσφαιρα και σε ασφαλή πάλι σημείο, μέσω των φυσητήρων αναρρόφησης. Κάθε μέρος και σύνδεσμος του συστήματος υψηλής πίεσης, αερίζεται έτσι ώστε να περάσει η ροή από τους αισθητήρες υδρογονανθράκων.

Οι σωληνώσεις, έχουν σχεδιασθεί και ελεγχθεί για να λειτουργούν σε πίεση 50% υψηλότερη της κανονικής (300bar). Σημαντικός παράγοντας κατά τη σχεδίαση τους είναι και η αποφυγή των μηχανικών ταλαντώσεων. Επιπρόσθετα, υπάρχει πρόβλεψη για προστασία σε πτώση μεγάλων αντικειμένων που θα μπορούσε να τύχει. Η τοποθεσία τους στη μηχανή, βρίσκεται κάτω από τις μονάδες αερίου των κυλίνδρων, και σε αλυσιδωτή διάταξη. Η διάταξη αυτή είναι τέτοια, έτσι ώστε να υπάρχει ευελιξία στο φαινόμενο της θερμικής διαστολής, που θα μπορούσαν να υποστούν οι σωληνώσεις, καθώς και την αποφυγή των διακυμάνσεων πίεσης κατά τη λειτουργία της μηχανής. Τέλος, οι σύνδεσμοι είναι συνήθως συγκολλητοί, με λιγοστές εξαιρέσεις στα σημεία που χρειάζεται να γίνει κάποια επίβλεψη ή συντήρηση, και τα οποία είναι εξοπλισμένα με φλάτζες.

Οι σωληνώσεις είναι συνδεδεμένες και με το σύστημα αδρανούς αερίου σε πίεση των 9 bar. Κατά τη δυσλειτουργία, πρώτα πέφτει η πίεση των αγωγών και μετέπειτα καθαρίζονται με το αδρανές αέριο αυτόματα. Κατά τη διακοπή λειτουργίας αερίου χειροκίνητα από το προσωπικό της μηχανής, ο αυτόματος καθαρισμός ξεκινάει μετά από 30 λεπτά, έτσι ώστε να δοθεί χρόνος για τυχόν επανεκκίνηση λειτουργίας αερίου [20].



Σχήμα 4.27: Οι διακλαδώσεις των αγωγών αερίου της μηχανής ME-GI [20].

## Τρόποι λειτουργίας της μηχανής

Ένα από τα πλεονεκτήματα της μηχανής ME-GI είναι η ευελιξία του καυσίμου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η θερμογόνος δύναμη του BOG μπορεί να διαφέρει σε ένα LNG carrier, κάτι που όμως δεν επηρεάζει τον κύκλο Diesel της μηχανής αυτής. Συγκεκριμένα, σε ένα ταξίδι με ελάχιστο φορτίο LNG (laden voyage), υπάρχει μεγάλη περιεκτικότητα N<sub>2</sub> στο BOG, άρα και μικρή LHV. Αντίστοιχα, κατά τον βεβιασμένο σχηματισμό του BOG (μέσω των εξατμιστών), μπορεί να σχηματιστεί αιθάνιο & προπάνιο, αρά και υψηλότερη LHV. Μια δίχρονη μηχανή υψηλής πίεσης μπορεί να κάψει οποιοδήποτε από τα παραπάνω καύσιμα, δίχως απώλεια θερμικής ισχύος.

Η μηχανή ME-GI μπορεί να λειτουργήσει με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

1. Λειτουργία πετρελαίου – Fuel-oil-only mode
2. Λειτουργία αερίου με ελάχιστο δυνατό πετρέλαιο πιλοτικής έγχυσης – Minimum pilot oil
3. Ειδική λειτουργία διπλού καυσίμου – Specified DF operation

Η λειτουργία πετρελαίου είναι γνωστή από τις συμβατικές πετρελαιομηχανές της σειράς ME. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι μόνο το πετρέλαιο και η λειτουργία της μηχανής θεωρείται ασφαλής (gas safe).

Η λειτουργία αερίου μπορεί να ξεκινήσει μόνο χειροκίνητα από τον χειριστή που βρίσκεται στο control room, με χρήση του GMOP (Gas Main Operating Panel). Σε αυτή τη λειτουργία το σύστημα χρησιμοποιεί την ελάχιστη δυνατή ποσότητα πετρελαίου πιλοτικής έγχυσης. Η προκαθορισμένη ποσότητα αυτή, φτάνει το μέγιστο ποσοστό 3% κατά το πλήρες φορτίο της μηχανής (100%). Στο χαμηλότερο φορτίο (10%), πέφτει σε ποσοστό 1,5%.

Κατά τη λειτουργία DF, ο χειριστής της μηχανής επιλέγει το ποσοστό έγχυσης του αερίου, και το σύστημα ME ρυθμίζει αυτόματα το ανάλογο ποσοστό πετρελαίου.

Τέλος, η MAN προτείνει κυλινδρέλαιο TBN40 για λειτουργία αερίου, και TBN 70 για λειτουργία με πετρέλαιο υψηλής περιεκτικότητας σε θείο. Συνεπώς, τα πλοία που επιθυμούν να λειτουργούν για παρατεταμένο χρονικό διάστημα με τα δύο αυτά καύσιμα, θα πρέπει να διαθέτουν δύο διαφορετικές δεξαμενές κυλινδρέλαιου και να εναλλάσσουν τη παροχή του [20].

## Έλεγχος των ρύπων

Σε σύγκριση με τη χρήση καυσίμου HFO, το φυσικό αέριο αποδίδει καθαρότερα καυσαέρια. Έχοντας πολύ μικρά ποσοστά θείου στο καύσιμο, οι εκπομπές των SO<sub>x</sub> γίνονται αμελητέες, και παράλληλα με τη χρήση του αερίου μειώνονται και οι ρύποι PM, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>.

Τυπικά, όλες οι τεχνικές μείωσης των NO<sub>x</sub> μπορούν να εφαρμοσθούν στη μηχανή ME-GI, εκτός από τη τεχνική FWE (γαλακτοποίηση νερού-καυσίμου). Ένα σύστημα SCR μπορεί να μειώσει τις εκπομπές των NO<sub>x</sub> σε ποσοστό 98%. Ωστόσο σε αυτές τις μηχανές είναι περισσό-

τερο διαδεδομένο το σύστημα EGR, το οποίο μπορεί εύκολα να καλύψει τις προδιαγραφές Tier III, μιας και οι εκπομπές των NO<sub>x</sub> έχουν ήδη μειωθεί σε ποσοστό 30% από τη λειτουργία αερίου.

Πίνακας 4.2: Σύγκριση εκπομπών ρύπων συμβατικής πετρελαιομηχανής ME-C και της μηχανής αερίου ME-GI [20].

**Comparison of emissions from an HFO burning and a gas burning 70ME type engine**

Estimated emissions 6S70ME-C		Estimated emissions 6S70ME-GI	
Load 100%	g/kWh	Load 100%	g/kWh
CO <sub>2</sub>	577	CO <sub>2</sub>	446
O <sub>2</sub> (%)	1359	O <sub>2</sub> (%)	1340
CO	0.64	CO	0.79
NO <sub>x</sub>	11.58	NO <sub>x</sub>	8.76
HC	0.19	HC	0.39
SO <sub>x</sub>	10.96	SO <sub>x</sub>	0.88
PM (mg/m <sup>3</sup> )	0.54	PM (mg/m <sup>3</sup> )	0.34

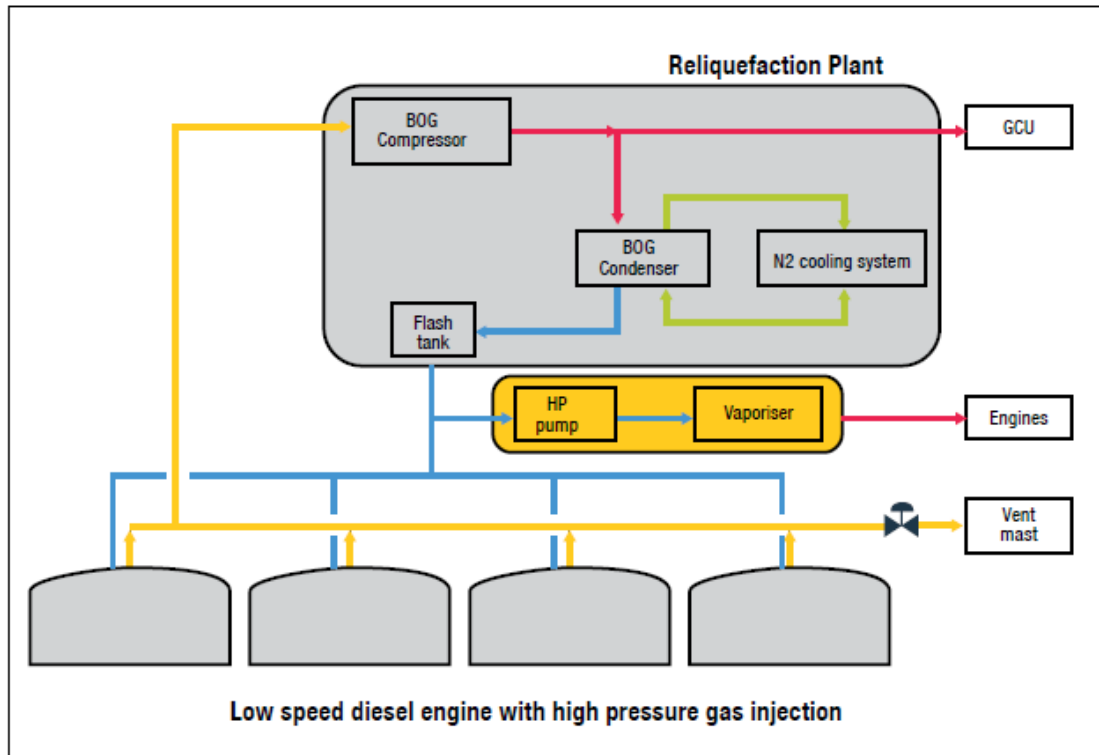
Στις περιοχές των προδιαγραφών, η λειτουργία αερίου προσφέρει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τη λειτουργία πετρελαίου, λόγω της μικρότερης ποσότητας ανακυκλοφορίας καυσαερίων που χρειάζεται. Επιπρόσθετα, απαιτείται λιγότερος καθαρισμός του συστήματος EGR (scrubber water), λόγω καθαρότερης καύσης (μικρότερα ποσοστά PM & SO<sub>x</sub>).

Τέλος, η εταιρία MAN έχει προσθέσει στη χαρτογράφηση του συστήματος για τη λειτουργία μειωμένων εκπομπών NO<sub>x</sub>, μια επιπλέον ρύθμιση του χρονισμού της βαλβίδας εξαγωγής, η οποία ρύθμιση βελτιώνει τον συνολικό βαθμό απόδοσης σε ποσοστό 3,5% [20].

### Συστήματα παροχής φυσικού αερίου

Η μηχανή ME-GI χρειάζεται παροχή αερίου σε πίεση 150-300bar.

Σύμφωνα με την εταιρία Cryostar, σε τόσο υψηλές πιέσεις ο φυγόκεντρος συμπιεστής κρίνεται ασύμφορος, και συνήθως χρησιμοποιείται αντλία θετικής μετατόπισης (positive displacement pump). Επίσης, η ισχύς που χρειάζεται μια τέτοια αντλία για να συμπιέσει το φυσικό αέριο στην υγρή του μορφή (LNG) είναι σχεδόν αμελητέα, συγκριτικά με την αέρια μορφή. Συνεπώς, η εταιρία Cryostar προτείνει χρήση αντλίας LNG υψηλής πίεσης, όπου το LNG θα λαμβάνεται από το σύστημα επανυγροποίησης ή και απευθείας από τις δεξαμενές. Η Cryostar συνδυάζει το σύστημα επανυγροποίησης EcoRel (υποενότητα 3.2.4, σχήμα 3.12) με την αντλία αυτή, καθώς και έναν εξατμιστή, έτσι ώστε το καύσιμο να έρθει σε αέρια μορφή και κατάλληλη θερμοκρασία για το σύστημα έγχυσης.



Σχήμα 4.28: Συνδυασμός συστήματος επανυγροποίησης EcoRel-S και αντλίας υψηλής πίεσης για το σύστημα έγχυσης από την εταιρία Cryostar [20].

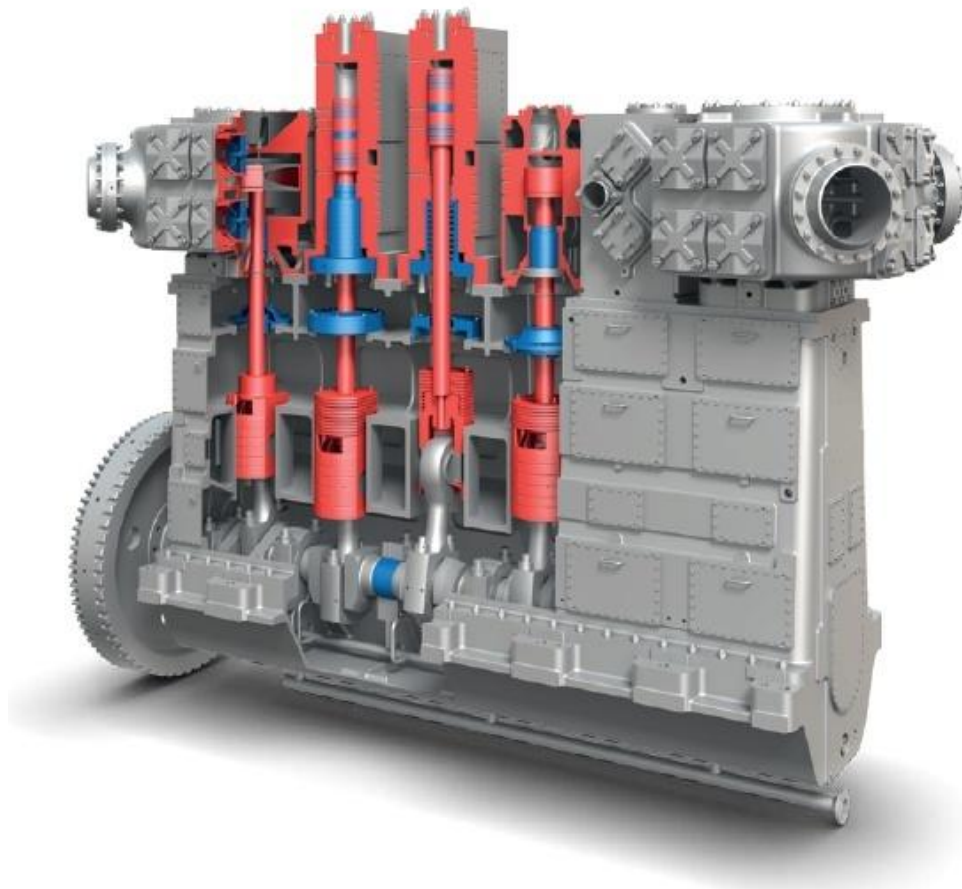
Οι αντλίες αυτές, παίρνουν κίνηση από τον στρόφαλο της μηχανής (σύνδεση με καδένα ή και γρανάζια) και ο έλεγχος της πίεσης γίνεται με ρύθμιση της ταχύτητας τους.



Σχήμα 4.29: Η παλινδρομική αντλία θετικής μετατόπισης της εταιρίας Cryostar [20].

Τέλος, επισημαίνεται ότι το σύστημα αυτό χρειάζεται αποσβεστήρα παλμών (pulsation damper), μιας και πρόκειται για παλινδρομικής μορφής αντλία, καθώς επίσης και διαδικασίες ψύξης, εξαέρωσης και καθαρισμού πριν τη χρήση και τη συντήρηση [20].

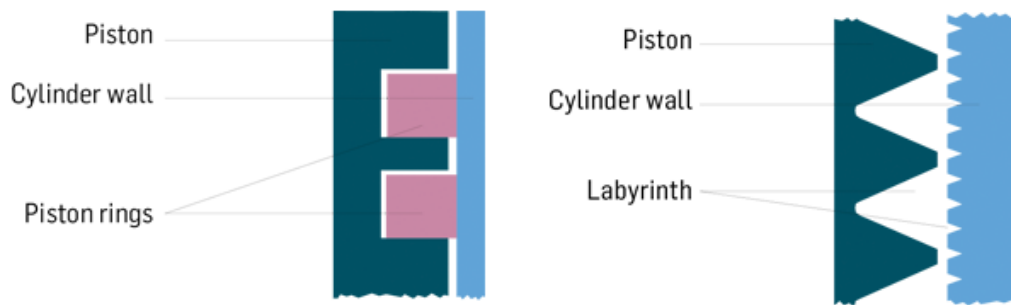
Η εταιρία Burckhardt Compression, προσφέρει μια εναλλακτική λύση για τη μηχανή ME-GI. Πρόκειται για τον 5-βάθμιο, βραδύστροφο και παλινδρομικό συμπιεστή Laby-GI. Η διάταξη του είναι κατακόρυφη, σε σειρά και διαθέτει τεχνολογία στεγανοποίησης λαβυρίνθου (labyrinth sealing).



Σχήμα 4.30: Ο συμπιεστής Laby-GI της εταιρίας Burckhardt Compression [25].

Ο συμπιεστής είναι πλήρως ζυγοσταθμισμένος από δυνάμεις και ροπές, λόγω του 6<sup>ου</sup> στροφάλου (6-crank) που έχει προστεθεί, και έτσι εξασφαλίζεται μια ομαλή λειτουργία χωρίς κραδασμούς.

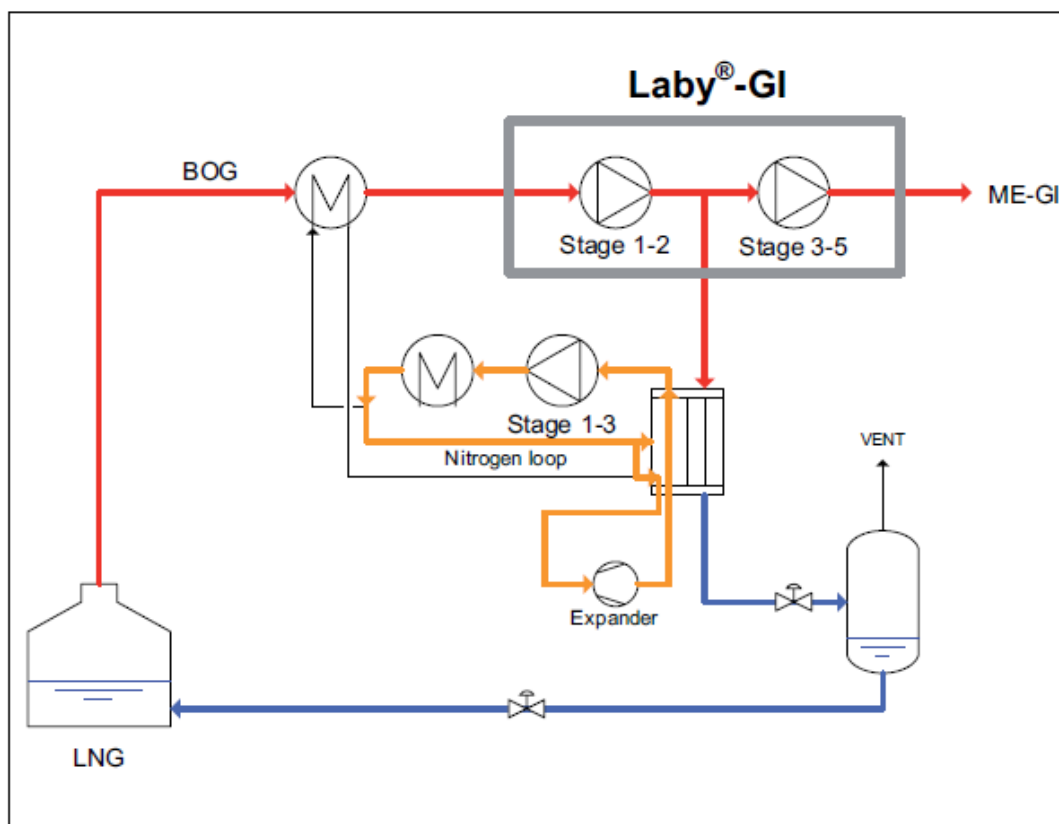
Στις τρεις πρώτες βαθμίδες του συμπιεστή, η στεγανότητα επιτυγχάνεται με την “άτριβη” τεχνολογία λαβυρίνθου, δίχως λίπανση, ανέπαφα και δίχως φθορά. Οι τελευταίες δύο βαθμίδες διαθέτουν τα συμβατικά ελατήρια εμβόλου (piston rings) και λιπαντικό [26]. Ο συνδυασμός ελατηρίων και λαβυρίνθων στεγανότητας αυξάνει πάρα πολύ τον χρόνο ζωής των στοιχείων. Ο συμπιεστής είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να μη χρειάζεται πρόψυξη ή προθέρμανση του αερίου, λόγω των υλικών που έχουν επιλεγεί.



Σχήμα 4.31: Μέθοδοι στεγανοποίησης ελατηρίων και λαβυρίνθου του Laby-GI [26].

Ανάμεσα στις βαθμίδες του συμπιεστή υπάρχουν ψυγεία (intercoolers) για τον πλήρη έλεγχο των θερμοκρασιών, καθώς και βαλβίδες παράκαμψης (bypass valves) για την ρύθμιση της ροής, ανάλογα με την πίεση που χρειάζεται το σύστημα του πλοίου .

Ο συμπιεστής Laby-GI μπορεί εύκολα να συνδυασθεί με συστήματα επανυγροποίησης, όπως το σύστημα Mark III της Hamworthy (υποενότητα 3.2.4, σχήμα 3.13), με παράκαμψη στις 2 πρώτες βαθμίδες (πίεση 56bar) και χρήση περαιτέρω βαθμίδων για την έγχυση αερίου της μηχανής, όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα [20].



Σχήμα 4.32: Συνδυασμός συστήματος επανυγροποίησης Mark III της εταιρίας Hamworthy και του συμπιεστή Laby-GI της εταιρίας Burekhardt Compression [20].



#### 4.5.2 Μηχανές χαμηλής πίεσης

Πρόκειται για τη σειρά X-DF της εταιρίας WIN GD (Winterthur Gas & Diesel Ltd). Η εταιρία αυτή δημιουργήθηκε το 2015 μέσω συγχώνευσης του μέρους της παλιάς Sulzer (που άνηκε στη Wärtsilä) με την εταιρία China State Shipbuilding Corporation (CSSC). Πλέον η παλιά Sulzer ανήκει εξολοκλήρου στην CSSC.

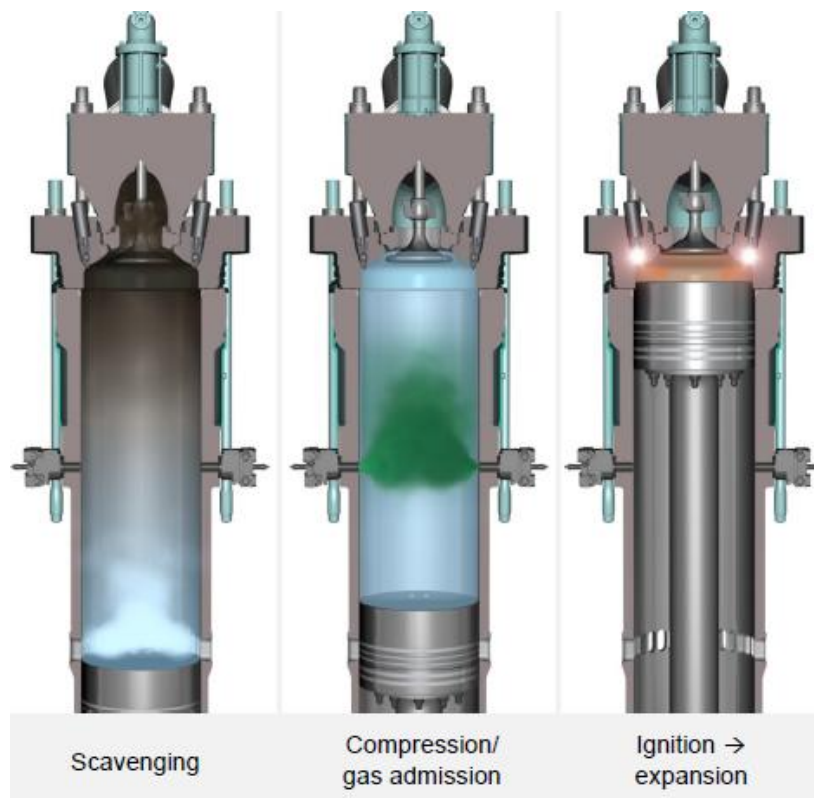
Η αρχή λειτουργίας των μηχανών αυτών, ακολουθεί τον κύκλο Otto, με φτωχό προαναμιγμένο μίγμα, όπως στις μεσόστροφες μηχανές που είδαμε στην υποενότητα 4.3, και πίεση έγχυσης που δε ξεπερνάει τα 16bar [27]. Οι κύριες διαφορές σε σχέση με τις μεσόστροφες μηχανές είναι οι εξής:

- Εισαγωγή του αερίου στη μέση του εμβολισμού
- Ανάφλεξη με το καύσιμο πιλοτικής έγχυσης σε προθάλαμο

Το κύριο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μηχανής, είναι η μείωση των εκπομπών  $\text{NO}_x$ , λόγω του κύκλου Otto που ακολουθεί. Συνεπώς, δεν απαιτεί σύστημα EGR/SCR όπως οι μηχανή ME-GI, κατά τη λειτουργία αερίου. Ωστόσο η ισχύς είναι χαμηλότερη, λόγω περιορισμών της BMEP για την αποφυγή κρουστικής καύσης [28]. Συγκεκριμένα η BMEP έχει περιορισθεί στα 17,3 bar, ενώ οι σύγχρονες μηχανές Diesel λειτουργούν με 21bar [27].



Σχήμα 4.33: Η μηχανή X-DF της εταιρίας WIN GD [29].



Σχήμα 4.34: Η αρχή λειτουργίας της μηχανής X-DF [28].

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι με τη παροχή αερίου σε χαμηλές πιέσεις, δεν απαιτούνται περίπλοκα και δαπανηρά συστήματα συμπίεσης, όπως της μηχανής ME-GI που είδαμε στη προηγούμενη υποενότητα.

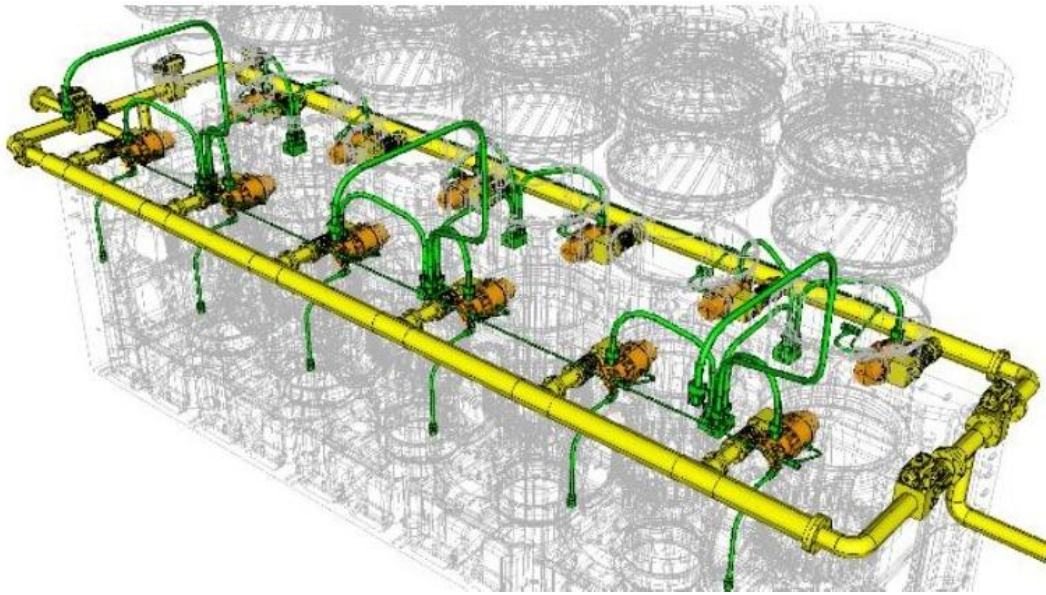
Τέλος, η μηχανή αυτή παρουσιάζει το φαινόμενο “methane slip” (διαφυγή μεθανίου). Το  $\text{CH}_4$  ως άκαυστος υδρογονάνθρακας, συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και είναι 20-25 φορές ισχυρότερο από το  $\text{CO}_2$ . Ωστόσο, οι μηχανές X-DF έχουν ήδη μειωμένες εκπομπές  $\text{CO}_2$  συγκριτικά με τις μηχανές Diesel, και δεν υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί και όρια για τον συγκεκριμένο ρύπο. Το methane slip μπορεί να μειωθεί με [28]:

- Ακριβή ρύθμιση του χρονισμού εισαγωγής αερίου
- Χρήση τεχνολογίας προέγχυσης για τη πληρότητα της καύσης
- Βελτιστοποίηση του χώρου καύσης για την αποφυγή επιζήμιου όγκου (dead volume)

### Σύστημα εισαγωγής αερίου & ρυθμιστής πίεσης

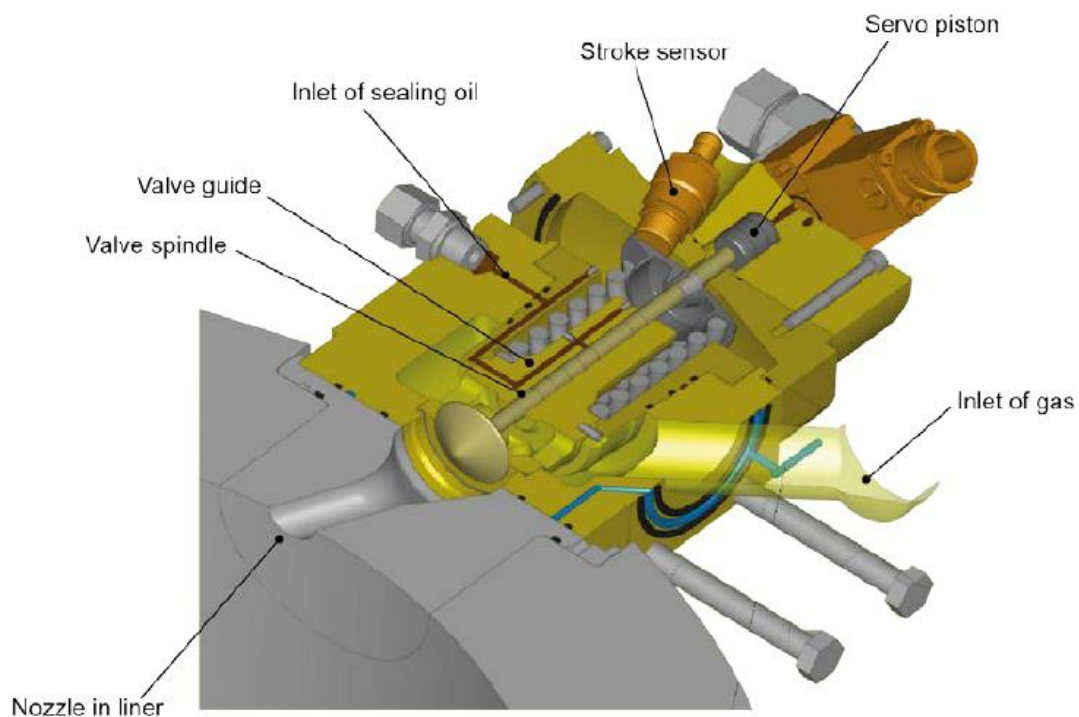
Το σύστημα διανομής και εισαγωγής αερίου, είναι ειδικά σχεδιασμένο για τις απαιτήσεις μιας δίχρονης μηχανής. Η διανομή του αερίου στους κυλίνδρους της μηχανής γίνεται μέσω δύο κύριων αγωγών που περνάνε από τις δύο πλευρές της μηχανής. Για λόγους ασφαλείας σε περίπτωση δυσλειτουργίας, οι αγωγοί είναι εξοπλισμένοι με βαλβίδα διακοπής λειτουργίας (shut-off valve) στη μεριά της εισαγωγής, και βαλβίδα αερισμού (vent valve) στην άλλη

άκρη του δικτύου. Οι σωληνώσεις είναι διπλού τοιχώματος με ενδιάμεσο κενό χώρο αερισμού, όπως και στις άλλες μηχανές αερίου που έχουμε δει.



Σχήμα 4.35: Σωληνώσεις διανομής αερίου της μηχανής X-DF [27].

Κάθε κύλινδρος είναι εξοπλισμένος με δύο βαλβίδες εισαγωγής αερίου (Gas Admission Valves – GAV), οι οποίες ενεργοποιούνται υδραυλικά και εισάγουν το αέριο μέσα από το χιτώνιο του κυλίνδρου. Η πίεση της εισαγωγής κυμαίνεται περίπου στα 10-12 bar, για τον σχηματισμό ενός ομογενούς μίγματος αέρα-καυσίμου. Ωστόσο, το σύστημα μπορεί να λειτουργεί μέχρι τα 16 bar για καύσιμα με LHV έως και 28 MJ/Nm<sup>3</sup>.



Σχήμα 4.36: Βαλβίδα εισαγωγής αερίου (GAV) της μηχανής X-DF [30].

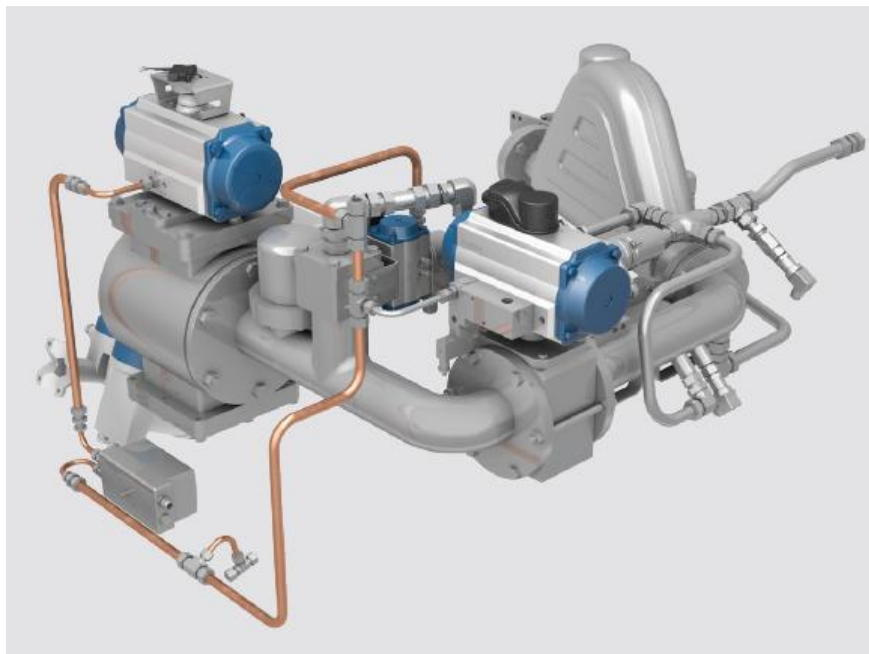
Η υδραυλική ενέργεια για την ενεργοποίηση της βαλβίδας, προέρχεται από το ήδη υπάρχον σύστημα “servo oil” των βραδύστροφων μηχανών RT-flex της Wärtsilä (υποενότητα 2.4). Επίσης, χρησιμοποιείται και λιπαντικό στεγανοποίησης (sealing oil) για τον διαχωρισμό αερίου/servo oil, καθώς και τη λίπανση του οδηγού της βαλβίδας (valve guide) [27]. Η βαλβίδα κλείνει μέσω ελατηρίου, όταν δεν δέχεται υδραυλική πίεση. Επίσης υπάρχει κ ένας αισθητήρας ανοίγματος βαλβίδας (stroke sensor), για το σύστημα ελέγχου [30].

Μετά τη βαλβίδα εισαγωγής, το αέριο εισάγεται στον κύλινδρο μέσω των οπών εισαγωγής (admission bores) του χιτωνίου. Για την επίτευξη της κατάλληλης ομοιογένειας του μίγματος αέρα-καυσίμου, οι οπές αυτές σχεδιάζονται λεπτομερώς μέσω προσομοίωσης CFD και δοκιμών [27].

Ο ρυθμιστής πίεσης αερίου – iGPR (intergrated Gas Pressure Regulation) περιλαμβάνει τα εξής:

- Ρυθμιστική βαλβίδα για την ακριβή ρύθμιση της πίεσης του αερίου
- Φίλτρο αερίου & μετρητή ροής
- Αυτόματες βαλβίδες αερισμού & αναστροφής του αερίου
- Μονάδα ηλεκτρονικού ελέγχου
- Αυτόματη βαλβίδα διακοπής παροχής αερίου

Το σύστημα αυτό προσφέρει μειωμένη εργασία εγκατάστασης στο ναυπηγείο, ευελιξία θέσης εγκατάστασης, καθώς και μείωση χώρου στο μηχανοστάσιο. Διαθέτει απλοποιημένο σύστημα ελέγχου και η εισαγωγή του αέρα για τον αερισμό του συστήματος, γίνεται από δύο σημεία: ένα από το μέρος της μηχανής και το άλλο έξω από το μηχανοστάσιο [29].



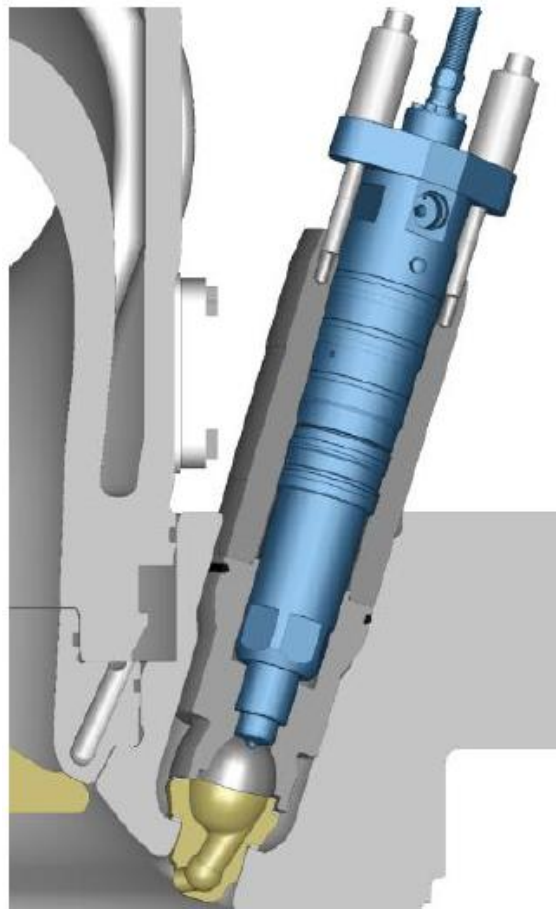
Σχήμα 4.37: Ρυθμιστής πίεσης αερίου iGPR της μηχανής X-DF [29].

## Σύστημα ανάφλεξης με πιλοτική έγχυση καυσίμου

Για την ανάφλεξη του φτωχού μίγματος αέρα-καυσίμου, δεν επαρκεί η συμπίεση και υψηλή θερμοκρασία της μηχανής. Έχει αποδειχθεί ότι η άμεση πιλοτική έγχυση καυσίμου με σύστημα CR, είναι μια αξιόπιστη πηγή ανάφλεξης για τις μεσόστροφες και τετράχρονες μηχανές διπλού καυσίμου. Το σύστημα αυτό προσφέρει μια επαρκή και σταθερή ανάφλεξη, χρησιμοποιώντας παράλληλα και την ελάχιστη δυνατή ποσότητα pilot fuel.

Στις δίχρονες μηχανές διπλού καυσίμου, η αρχή λειτουργίας είναι ίδια, όπως είδαμε και στην υποενότητα 4.3, με μόνη διαφορά τη χρήση προθάλαμου. Ο προθάλαμος συγκεντρώνει την ενέργεια του pilot fuel, οδηγώντας έτσι σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τον κύριο χώρο καύσης. Το περιθώριο αυτανάφλεξης αυξάνεται και παράλληλα μικραίνει η διάρκεια καύσης, έχοντας ως αποτέλεσμα μια ραγδαία αύξηση πίεσης στον προθάλαμο. Έτσι, δημιουργείται μια ισχυρή φλόγα, η οποία και διεισδύει καλά στον κύριο χώρο καύσης.

Αυτός ο σχεδιασμός προσφέρει μια καλά κατανομημένη πηγή ανάφλεξης στον χώρο καύσης, με ελαχιστοποίηση του pilot fuel σε ποσοστό μικρότερο του 1% της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας για πλήρη φορτίο. Το ποσοστό αυτό είναι μικρότερο από κάθε άλλη διαθέσιμη τεχνολογία. Τέλος, η παροχή του pilot fuel σε κάθε εγχυτήρα γίνεται μέσω ενός μικρού συστήματος CR [27]. Κάθε κύλινδρος διαθέτει από δύο σετ εγχυτήρα με προθάλαμο καθώς και ξεχωριστούς συμβατικούς εγχυτήρες για τη λειτουργία πετρελαίου.



Σχήμα 4.38: Εγχυτήρας καυσίμου πιλοτικής έγχυσης με προθάλαμο της μηχανής X-DF [27].

## Σύστημα ελέγχου & ασφαλείας

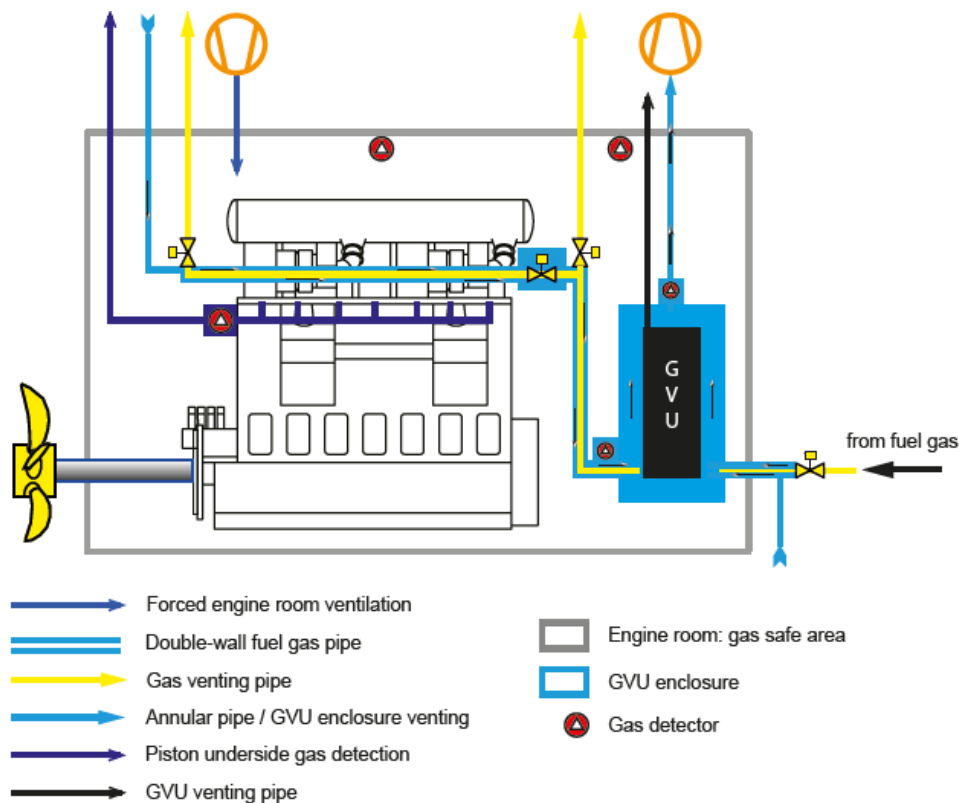
Οι μηχανές τις σειράς X-DF διαθέτουν πλήρη ηλεκτρονικό έλεγχο των βαλβίδων αερίου, καυσίμου πιλοτικής έγχυσης, καθώς και των βαλβίδων εξαγωγής. Το σύστημα ελέγχου & ασφαλείας περιλαμβάνει:

- Αισθητήρες HC
- Αισθητήρες κρουστικής καύσης
- Αισθητήρες πίεσης κυλίνδρου

Σε περίπτωση δυσλειτουργίας, ο εγκέφαλος της μηχανής ρυθμίζει παραμέτρους ή γυρνάει τη μηχανή σε Diesel Mode. Εάν σβήσει η μηχανή, γίνεται καθαρισμός όλης της μηχανής με βοηθητικούς φυσητήρες (auxiliary blowers) από τις θυρίδες εισαγωγής.

Το σύστημα αερισμού του κυκλώματος αερίου, λειτουργεί με περίπου 30 εναλλαγές/ώρα. Σε περίπτωση εντοπισμού HC, αυτόματα μπαίνει σε λειτουργία ένας συναγερμός, η μηχανή γυρνάει σε diesel mode και γίνεται καθαρισμός του κυκλώματος με αδρανές αέριο. Επίσης, για την προστασία της εξαγωγής από τυχόν έκρηξη (μέσω διαρροής μεθανίου), έχουν τοποθετηθεί αναλώσιμα ασφαλιστικά με δίσκους διάτρησης (rupture disks) [28].

Η διάγνωση για διαρροές γίνεται και με το σύστημα DCC – Dynamic Combustion Control, μέσω μετρήσεων της MEP και αυτανάφλεξης. Επίσης, το σύστημα περιλαμβάνει αισθητήρα εντός του εγχυτήρα αερίου (stroke sensor) αλλά και κάτω από το έμβολο (gas concentration sensor) [31].



Σχήμα 4.39: Σύστημα ελέγχου & ασφαλείας της μηχανής X-DF με iGPR [31].

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικότερα, με τη χρήση του φυσικού αερίου στις μηχανές πρόωσης των σύγχρονων εμπορικών πλοίων, έχουμε μια καθαρότερη καύση. Το θείο στο HFO, εκτός από τα προβλήματα που προκαλεί στην υγεία και στο περιβάλλον, προκαλεί και φθορές στο εσωτερικό μιας μηχανής. Τα προβλήματα που εντοπίζουμε στις συμβατικές πετρελαιομηχανές λόγω του θείου στο καύσιμο είναι τα εξής:

- Οξειδωτική διαβρωτική φθορά στην επιφάνεια των χιτωνίων
- Επικαθήσεις στις βαλβίδες εξαγωγής και στον στρόβιλο υπερπλήρωσης
- Αυξημένη πιθανότητα πυρκαγιάς χώρου σάρωσης λόγω των κατάλοιπων καύσης

Μια μηχανή που λειτουργεί με τέτοιο καύσιμο χρειάζεται ειδικό κυλινδρέλαιο με αλκαλικά πρόσθετα. Επίσης, μια μηχανή που λειτουργεί με τον κύκλο Diesel χρειάζεται πολλαπλή εξαγωγή με σύστημα παλμών, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων.

Σχετικά με τα συστήματα αποθήκευσης του καυσίμου LNG, προτιμώνται οι δεξαμενές τύπου μεμβράνης, λόγω του πρισματικού τους σχήματος το οποίο και προσαρμόζεται καλύτερα στο κύτος του πλοίου. Με τα μικρότερα κενά που σχηματίζονται μεταξύ δεξαμενών φορτίου και έρματος, έχουμε αύξηση της χωρητικότητας ενός LNG carrier. Οι δεξαμενές αυτές, σε σύγκριση με τις ανεξάρτητες σφαιρικές δεξαμενές τύπου Moss, είναι πιο απλές και οικονομικές. Το μοναδικό τους μειονέκτημα βρίσκεται στη μειωμένη ανθεκτικότητα που παρουσιάζουν σε δυνάμεις παφλασμού, κάτι το οποίο μελετάται.

Η επιλογή του τύπου της δεξαμενής, καθώς και επιπρόσθετων συστημάτων διαχείρισης, εξαρτάται από τη σχεδιομελέτη ενός LNG carrier. Ένας καλός σχεδιασμός του LNG carrier, σε συνδυασμό με τον κατάλληλο προγραμματισμό των ταξιδιών, θα μπορούσε να μειώσει τον σχηματισμό του BOG στο ελάχιστο δυνατό. Οι δεξαμενές τύπου NO 96 και MK III κρίνονται ικανοποιητικές. Για ακόμη μικρότερο BOR θα μπορούσαν να συνδυασθούν τα υλικά Invar & Triplex. Σύμφωνα με την GTT το BOR μπορεί να μειωθεί στο 0,07%. Θα πρέπει να μελετηθεί από οικονομικής άποψης εάν αξίζει η εγκατάσταση ενός συστήματος επανυγροποίησης. Εξάλλου το BOG που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα συστήματα πρόωσης αλλά και στη παραγωγή του αδρανούς αερίου. Ένα σύστημα πρόωσης φυσικού αερίου σε συνδυασμό με μια μονάδα IGG/GCU, κρίνεται ως η βέλτιστη ενεργειακή λύση για την αντιμετώπιση του περίσσιου BOG. Η μονάδα IGG/GCU (σχήμα 3.14) καίει το περίσσιο BOG, σχηματίζοντας το αδρανές αέριο που χρειάζεται στο μηχανοστάσιο, καθώς και στις σωληνώσεις και γενικότερα στα συστήματα ασφαλείας του πλοίου. Με την χρήση μοριακού κόσκινου (molecular sieves), μπορεί να αφαιρεθεί το CO<sub>2</sub> από το IG, σχηματίζοντας έτσι το άζωτο για τις δεξαμενές του πλοίου.

Σχετικά με τα συστήματα πρόωσης, ο ατμοστρόβιλος ακόμη και με την υψηλή αξιοπιστία που διαθέτει, έχει τον χαμηλότερο βαθμό απόδοσης. Γενικότερα, οι στροβιλομηχανές έχουν περιορισμούς σε ανάποδη ισχύ πρόωσης, καθώς και μειωμένο χρόνο απόκρισης εναλλαγής.

Εκτός από την μικρή αποδοτικότητα σε χαμηλά φορτία, χρειάζονται και μειωμένες ταχυτήτων λόγω των υψηλών στροφών λειτουργίας. Ο αεριοστρόβιλος έχει ως μειονέκτημα και το υψηλό κόστος κτήσης. Ακόμη και με το συνδυασμένο σύστημα COGES, ο βαθμός απόδοσης εξακολουθεί να είναι μικρότερος από τις παλινδρομικές μηχανές. Η χρήση ενός συστήματος COGES θα ήταν προσιτή μόνο σε κρουαζιερόπλοια, λόγω εξοικονόμησης χώρου, μειωμένου θορύβου και υψηλότερων απαιτήσεων σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα συστήματα DFDE/TFDE, εκτός από την πολυπλοκότητα που διαθέτουν, έχουν και ηλεκτρικές απώλειες που μειώνουν τον βαθμό απόδοσης του συστήματος πρόωσης. Γενικότερα, οι μεσόστροφες μηχανές αποδίδουν καλύτερα ως βοηθητικές μηχανές για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου. Σχετικά με τον συνδυασμό στροβιλομηχανών με ηλεκτρική πρόωση, ο βαθμός απόδοσης κρίνεται ιδιαίτερα χαμηλός για τους παραπάνω λόγους που αναφέραμε.

Η βέλτιστη λύση για την πρόωση των LNG carrier βρίσκεται στις νεότερες βραδύστροφες μηχανές διπλού καυσίμου. Ο υψηλότερος βαθμός απόδοσης που διαθέτουν σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα πρόωσης, καθώς και η απευθείας σύζευξη με τον ελικοφόρο, κάνει την επιλογή τους ιδιαίτερα ελκυστική.

Προσεγγιστικά οι βαθμοί απόδοσης των παραπάνω συστημάτων είναι οι εξής [17]:

- Σύστημα ατμοστρόβιλου – 30%
- Σύστημα ατμοστρόβιλου με αναθέρμανση – 36%
- Σύστημα COGES – 38%
- Συστήματα DFDE/TFDE – 41%
- Μηχανές ME-GI – 51%
- Μηχανές X-DF – 48%

Σχετικά με τις δύο επιλογές στις βραδύστροφες μηχανές, βέλτιστη κρίνεται η τεχνολογία χαμηλής πίεσης της WIN-GD. Αν και η μηχανή ME-GI έχει τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης, διαθέτει περιπλοκότητα και κάποια μειονεκτήματα, που κάνουν τη μηχανή X-DF πιο προσιτή. Με την χαμηλή πίεση του αερίου, δεν απαιτείται πολύπλοκος μηχανισμός συμπίεσης όπως στις μηχανές ME-GI, και έχουμε λιγότερες φθορές καθώς και έξοδα συντήρησης της μηχανής. Συνεπώς, στο αρχικό κόστος επένδυσης μιας μηχανής υψηλής πίεσης, εκτός από το κόστος εγκατάστασης του συστήματος συμπίεσης, υπάρχει και το κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος EGR. Κύριο πλεονέκτημα μιας μηχανής X-DF είναι οι μειωμένες εκπομπές NO<sub>x</sub> λόγω του κύκλου Otto που λειτουργεί, καλύπτοντας έτσι τα όρια εκπομπών χωρίς την εφαρμογή επιπλέον μέτρων. Επίσης, η μηχανή αυτή απαιτεί και απλή πολλαπλή εξαγωγής σταθερής πίεσης, λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας των καυσαερίων του κύκλου Otto. Μοναδικό μειονέκτημα της τεχνολογίας χαμηλής πίεσης είναι η διαφυγή μεθανίου (methane slip). Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρία δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την ατμόσφαιρα και δεν υπάρχουν όρια μείωσης εκπομπών. Λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης των βραδύστροφων μηχανών, το ποσοστό εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου



είναι εξαιρετικά χαμηλό. Ωστόσο, μιας και πρόκειται για νέα τεχνολογία, είναι κάτι το οποίο θα πρέπει να μελετηθεί σε βάθος χρόνου.

Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να επιβεβαιωθούν και με τον πίνακα (7.4) όπου φαίνονται οι επιλογές συστημάτων πρόωσης για newbuildings μιας ελληνικής ναυτιλιακής εταιρίας. Επίσης, η εταιρία MAN Diesel έχει ανακοινώσει την παρουσίαση μιας νέας τεχνολογίας το 2022 ονόματι ME-GA. Πιθανώς, λόγω των μειωμένων πωλήσεων της μηχανής ME-GI, θα πρόκειται για τεχνολογία χαμηλής πίεσης και τα αρχικά προέρχονται από το Gas Admission.

Οι επιλογές της ελληνικής ναυτιλίας κρίνονται από οικονομικά και στρατηγικά κριτήρια. Τα παλαιότερα πλοία θα μπορούν να χρησιμοποιούν LSHFO με μηδενικό κόστος επένδυσης στο πλοίο. Σε νεότερα πλοία θα μπορούν να εγκατασταθούν scrubbers ή να γίνει μετατροπή των μηχανών σε διπλού καυσίμου. Οι κατασκευάστριες εταιρίες των ναυτικών μηχανών έχουν ήδη έτοιμα πακέτα μετατροπών των μηχανών (retrofit). Συγκεκριμένα, οι μηχανές της σειράς RT-flex & ME, μπορούν πολύ εύκολα να μετατραπούν σε μηχανές διπλού καυσίμου. Η μετατροπή μπορεί να γίνει σε ένα τυπικό dry-docking του πλοίου όπου θα προστεθούν-τροποποιηθούν τα εξής:

- Διατρήσεις στα πάματα ή και στα χιτώνια για την προσαρμογή των νέων μπέκ
- Προσαρμογή των σωληνώσεων των συστημάτων αερίου & αερισμού
- Προσαρμογή των νέων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, διατάξεων & αισθητήρων
- Νέο λογισμικό για τη λειτουργία και το σύστημα ασφαλείας του αερίου

Σύμφωνα με τις κατασκευάστριες εταιρίες, το κόστος της μετατροπής προσεγγιστικά αγγίζει το 20% του αρχικού κόστους κτήσης της μηχανής. Ωστόσο οι δεξαμενές του LNG αποτελούν το κύριο εμπόδιο, μιας και πρόκειται για πιο χρονοβόρα & περίπλοκη διαδικασία, με αυξημένο κόστος επένδυσης. Η ναυτιλιακή εταιρία θα πρέπει να μελετήσει και να αποφασίσει μετά από οικονομική ανάλυση για τις επιλογές που θα κάνει.

Συνοψίζοντας, προτείνουμε τα εξής για την κατασκευή νέων LNG carrier αλλά και γενικότερα εμπορικών πλοίων που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το LNG:

- Δεξαμενές καυσίμου τύπου μεμβράνης και με την υψηλότερη δυνατή μείωση του BOR, ανάλογα με τον σχεδιασμό και τις απαιτήσεις του πλοίου
- Συνδυασμένη μονάδα IGG/GCU για το περίσσιο BOG
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μεσόστροφες μηχανές DF της Wärtsilä
- Πρόωση με βραδύστροφες μηχανές X-DF της WIN GD

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Λιάπης, Ν., 2018, “Τα ναυτιλιακά καύσιμα μετά το 2020 | naftemporiki.gr.”
- [2] Μιχάλης, Μ., 2018, “Η Μετάβαση Της Ναυτιλίας Στο LNG,” energypress.gr.
- [3] Press, B., 2020, “Αλεξανδρούπολη: Υψηλές οι προοπτικές του Τερματικού Σταθμού LNG”
- [4] Woodyard, D., 2009, *Pounder’s Marine Diesel Engines and Gas Turbines*, Butterworth-Heinemann.
- [5] Κυρτάτος, Ν. Π., 1993, *ΝΑΥΤΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ DIESEL - Θέματα Σχεδίασης Και Λειτουργίας*, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.
- [6] Θεοδωρακάκος, Α., 2018, “ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ Μ.Ε.Κ. (ΘΕΩΡΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ).”
- [7] Θεοδωρακάκος, Α., 2018, “ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ Μ.Ε.Κ.”
- [8] Κυρτάτος, Ν. Π., 2016, “Ναυτικοί Κινητήρες Diesel.”
- [9] Willard, W. P., 2017, *Τεχνικές Αρχές Των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης*, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.
- [10] “Emission Standards: IMO Marine Engine Regulations” [Online]. Available: <https://www.dieseln.net/standards/inter/imo.php>. [Accessed: 17-Mar-2019].
- [11] Μουστρής, Κ. Π., 2017, “Ατμοσφαιρική Ρύπανση - Τεχνολογίες Αντιρρύπανσης (Σημειώσεις Μαθήματος).”
- [12] 2018, “Liquefied Natural Gas.” Wikipedia.
- [13] 2018, “LNG Carrier,” Wikipedia.
- [14] 2019, “Marine LNG Engine,” Wikipedia.
- [15] SIGGTO, 2016, *Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals (LGHP4)*.
- [16] “GTT | Expert in LNG” [Online]. Available: <https://www.gtt.fr/en>. [Accessed: 03-Dec-2018].

- [17] Χατζηγηρηγόρης, 2016, “Maran Gas Maritime Inc. An Update on LNG Propulsion and Peripheral Systems.”
- [18] “Richard Hammond on LNG Super Tanker Engineering Connections - BBC Documentary - YouTube” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=CkgCF64QLgg>. [Accessed: 28-Mar-2020].
- [19] Αλέξης, Γ. Κ., 2007, *Η Τεχνολογία Της Ψύξης*, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΤΑΜΟΥΛΗ.
- [20] MAN Diesel & Turbo, “ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines A Technical, Operational and Cost-Effective Solution for Ships Fuelled by Gas.”
- [21] “Wärtsilä Corporation” [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [22] Πολυζάκης, Α. Λ., 2016, *Λειτουργία Αεριοστροβίλων Και Παραγωγή Ενέργειας - Προώθηση (Θεωρία)*, “P.H.C” (Power Heat Cool).
- [23] Dvornik Josko, and Dvornik Srdan, 2014, “Dual-Fuel-Electric Propulsion Machinery Concept on LNG Carriers.”
- [24] “MAN Diesel & Turbo” [Online]. Available: <https://marine.man-es.com/>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [25] Burckhardt Compression, “LABY®-GI FUEL GAS COMPRESSOR SYSTEMS LUBRICATED AND NON-LUBRICATED SOLUTIONS FOR MAN ME-GI POWERED LNG CARRIERS.”
- [26] “Laby®-GI Compressors,” Burckhardt Compression.
- [27] Marcel Ott, Winterthur Gas & Diesel, 2016, “The 2-Stroke Low-Pressure Dual-Fuel Technology: From Concept to Reality.”
- [28] CIMAC NMA NORGE ANNUAL MEETING, 2014, “WÄRTSILÄ 2-STROKE DUAL FUEL TECHNOLOGY.”
- [29] WIN GD, 2019, “Low-Speed Engines.”
- [30] WIN GD, 2019, “2-Stroke Dual-Fuel Safety Concept.”
- [31] WIN GD, 2018, “Low-Pressure X-DF Engines FAQ.”

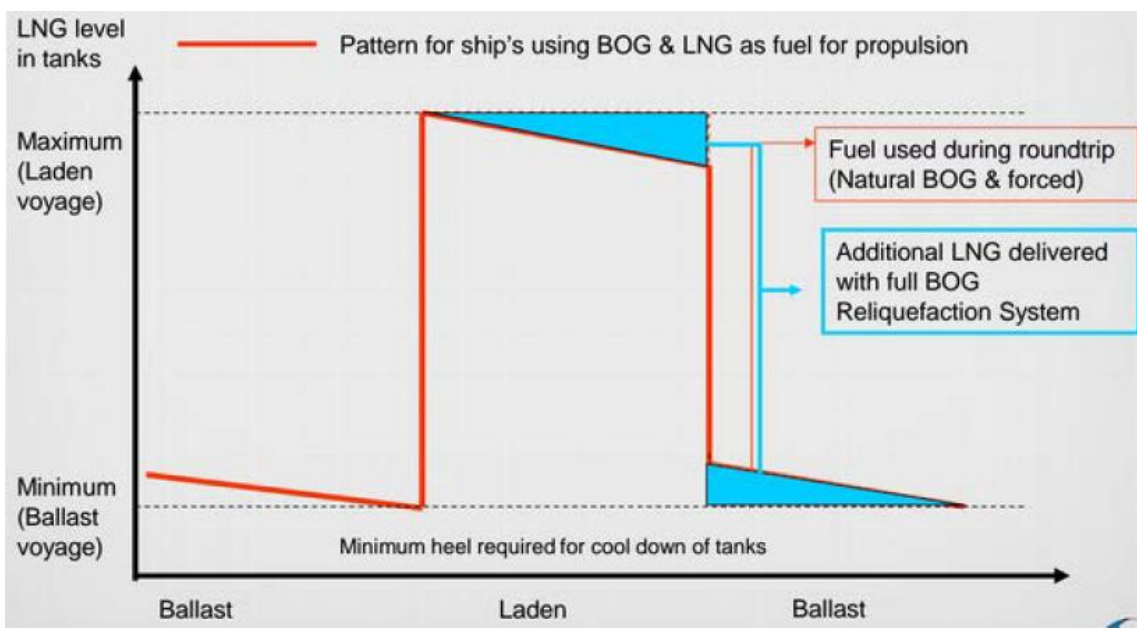
[32] WIN GD, 2019, “X-DF the Gas Engine for Merchant Marine Ships.”

[33] “GasLog Ltd.,” GasLog [Online]. Available: <https://www.gaslogltd.com/>.  
[Accessed: 28-May-2020].

## 7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 7.1: Ιδιότητες των ναυτικών καυσίμων [9].

Καύσιμα		Βαρύ πετρέλαιο (HFO)	Ελαφρύ πετρέλαιο (MDO)	Προπάνιο (LPG)	Μεθάνιο (LNG)
Χημικός τύπος		$C_{14,6}H_{24,8}$	$C_{12,3}H_{22,2}$	$C_3H_8$	$CH_4$
Μοριακή μάζα (kg/kmol)		200	170	44	16
Θερμογόνος δύναμη (kJ/kg)	HHV	43800	44800	50180	55260
	LHV	41400	42500	46190	49770
Στοιχειομετρικοί λόγοι	$AF_{st}$	14,5	14,5	15,7	17,2
	$FA_{st}$	0,069	0,069	0,064	0,058
Αριθμοί Οκτανίου	MON			97	120
	RON			112	120
Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης (kJ/kg)		230	270	426	509
Αριθμός κετανίου		35-50	40-55		



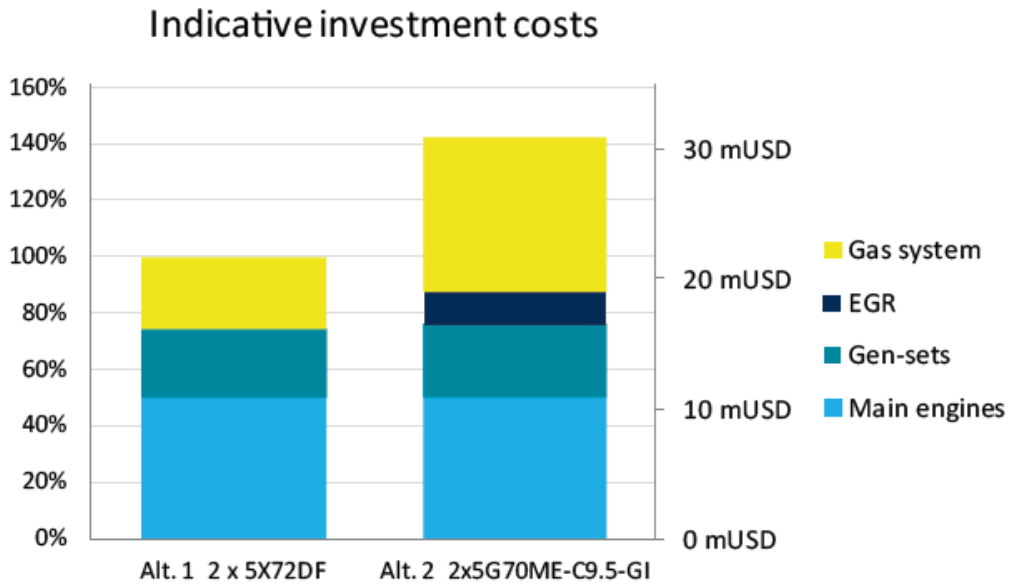
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα σχηματισμού του BOG κατά τη διάρκεια ταξιδιών του πλοίου [17].

Πίνακας 7.2: Τυπική κατανάλωση αερίου των συστημάτων πρόωσης [17].

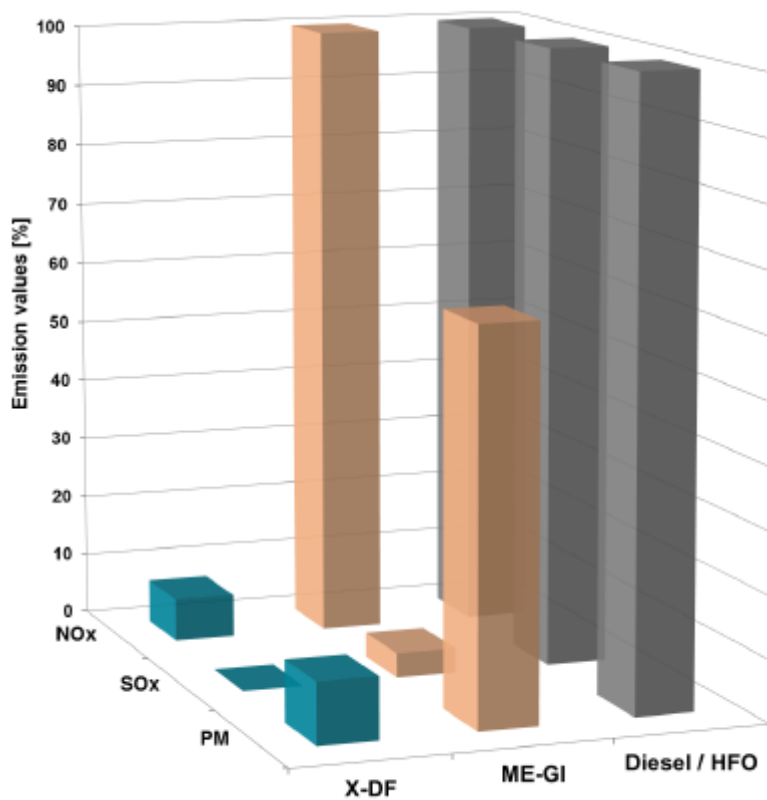
	DFDE / TFDE	MEGI	X-DF	UST	STEAM
GAS Consumption for propulsion and Hotel load @ 19.5 Knots for 174k with 20% Sea Margin	94 tons LNG /day	80 tons LNG /day	85 tons LNG /day	127,5 tons LNG /day	150 tons LNG /day
HFO Consumption for steam generation (Aux. Boilers) and pilot	0 tons/day Covered by EGE	10 tons/day	5 tons/day	0 tons/day Included in the above consumptions	0 tons/day Included in the above consumptions
MDO Pilot fuel consumption	1.0 tons/day	0.5 tons/day	1.5 tons/day	0 tons/day	0 tons/day
Total <b>EQUIVALENT HFO</b> consumptions based on HFO (corrected for calorific value only).	108 tons/day	101 tons/day	103 tons/day	144,5 tons/day	170 tons/day

Πίνακας 7.3: Σύγκριση συστημάτων πρόωσης για LNG carrier χωρητικότητας 174k [17].

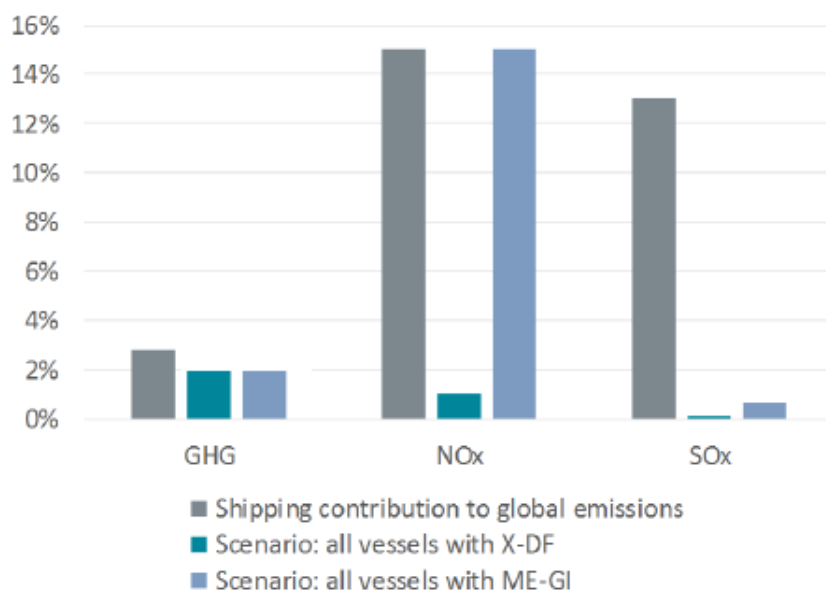
Item	TFDE	ME-GI	Wartsila 2-Stroke
Main Engines	2 x 12 V 50 DF 2 x 8 L 50 DF Elec motor =10,700 kW out @ 68.8 RPM	2 x 5G70ME - GI NCR = 10,700 kW 65.5 RPM	2 x 72 DF (derated) NCR = 10,700 kW (85.6% MCR) 65.5 RPM
Auxiliary Generators	N/A	4 x 4-stroke ~3,200 kW DF	4 x 4-stroke ~3,200 kW DF
Gas Pressure	6 Bar	300 Bar	16 Bar
Re-Liq Plant	No	Yes (Brayton or JT)	No
Tier III	Yes – in gas	Needs SCR or EGR	Yes – in gas Need SCR or EGR in oil mode
Operation	Otto Cycle	Diesel Cycle	Otto Cycle



Σχήμα 7.2: Σύγκριση κόστους αρχικής επένδυσης (CAPEX) των μηχανών X-DF & ME-GI για εγκατάσταση σε LNG carrier [31].



Σχήμα 7.3: Συγκριτικό διάγραμμα εκπομπών ρύπων των βραδύστροφων μηχανών διπλού καυσίμου σε σχέση με τις συμβατικές πετρελαιομηχανές [32].



Σχήμα 7.4: Διάγραμμα που δείχνει το ποσοστό των παγκόσμιων εκπομπών ρύπων του κλάδου της ναυτιλίας και το πολύ μικρό ποσοστό των αερίων του θερμοκηπίου [32].

Πίνακας 7.4: Νέες παραγγελίες πλοίων LNG ελληνικής ναυτιλιακής εταιρίας [33].

Αριθμός κύτους	Μηχανές πρόωσης	Χωρητικότητα	Έτος κατασκευής
Hull No. 2213	X-DF	180,000	2020
Hull No. 2262	X-DF	180,000	2020
Hull No. 2274	X-DF	180,000	2020
Hull No. 2300	X-DF	174,000	2020
Hull No. 2301	X-DF	174,000	2020
Hull No. 2311	X-DF	180,000	2021
Hull No. 2312	X-DF	180,000	2021