

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία:

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΙΚΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ  
ΣΕ ΔΙΧΡΟΝΟΥΣ ΝΑΥΤΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΝΤΙΖΕΛ**

**COMPARATIVE EVALUATION OF DUAL FUEL COMBUSTION  
TECHNIQUES IN MARINE TWO – STROKE DIESEL ENGINES**

**ΔΗΜΟΣ ΜΙΧΑΛΗΣ**

Επιβλέπων:

Δ. Χουντάλας

Αθήνα

Οκτώβριος 2017

Ευχαριστίες:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή του Ε.Μ.Π. , Δημήτριο Χουντάλα, για την ανάθεση του θέματος. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με στήριξαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αλλά και κατά τη διάρκεια όλων των σπουδών μου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου που με βοήθησε σε όλη την πορεία των σπουδών μου.

Στη γιαγιά μου

Αγγελική Δήμου.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Σκοπός.....	8
1.2 Διεθνείς κανονισμοί για την ατμοσφαιρική ρύπανση.....	8
1.3 Φυσικό αέριο.....	11
1.4 Περιβάλλον και φυσικό αέριο.....	12
1.5 LNG.....	13
1.6 Αποθήκευση LNG και σύστημα αερίου καυσίμου.....	14
1.7 Μεικτή καύση.....	15
System A.....	16
System B.....	16
1.8 Εκπομπές.....	17
1.9 Αποτελέσματα μεικτής καύσης.....	18
1.11 Retrofit.....	23
2 Σύστημα υψηλής πίεσης (stoichiometric).....	25
2.1 Κύκλος Diesel.....	25
2.2 Χαρακτηριστικά κινητήρων.....	26
2.3 Λειτουργία κινητήρα.....	26
2.4 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα.....	27
2.5 Σύγκριση κινητήρα διπλού καυσίμου σε σχέση με τον αρχικό πετρελαίου.....	28
2.6 Εκπομπές.....	29
2.7 Επεξεργασία καυσαερίων – EGR.....	30
2.8 Μετατροπή κινητήρα.....	33
2.9 Σύστημα παροχής LNG.....	36
2.10 Σύστημα έγχυσης καυσίμου.....	39
2.10.1. Βαλβίδες έγχυσης καυσίμου.....	39
2.10.2. Κάλυμμα κυλίνδρου.....	40
2.11. Σύστημα λίπανσης κινητήρα.....	42
2.12. Ασφάλεια-σωλήνες διπλού τοιχώματος.....	42
2.13 Τεχνολογία καθαρισμού καυσαερίων ( scrubbers).....	45
2.14 Χρήση καταλύτη SCR.....	46
2.15 Τεχνολογία ανάκτησης θερμότητας (WHR).....	47
2.16 Χρόνος αποπληρωμής.....	48

3. Σύστημα χαμηλής πίεσης (lean burn) .....	51
3.1 Κύκλος Otto .....	51
3.2 Χαρακτηριστικά κινητήρων.....	52
3.3 Περιοχή λειτουργίας.....	54
3.4 Εξάρτηση λειτουργίας με αριθμό μεθανίου .....	55
3.5 Λειτουργία κινητήρα σε μεικτή καύση .....	55
3.6 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα.....	56
3.7 Εκπομπές .....	57
3.8 Μετατροπή κινητήρα πετρελαίου σε μεικτής καύσης .....	58
3.9 Διαρροή μεθανίου .....	59
3.10 Ανίχνευση αερίου ( gas detection).....	60
3.11 Φαινόμενο Knocking .....	61
3.12 Βασική δομή του συστήματος εξαερισμού του κυλίνδρου της μηχανής.....	62
3.13 Διαδικασία παροχής LNG .....	63
3.14 Σύστημα τροφοδοσίας αερίου χαμηλής πίεσης .....	64
3.15 Σύστημα εισαγωγής αερίου στον κύλινδρο.....	64
3.16 Σύστημα πιλοτικού καυσίμου .....	65
3.17 Μονάδα GVU .....	67
3.18 Έλεγχος κινητήρα και σύστημα αυτοματισμού .....	68
3.19 Σύστημα εξάτμισης (rupture discs) .....	69
3.20 LNG ραc .....	69
3.21 Οικονομικά στοιχεία .....	70
4. Συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων .....	74
4.1 Σύγκριση low vs high pressure Winterthur gas and diesel (23) .....	74
4.1.1 Προκλήσεις για ανάπτυξη .....	74
4.1.2 Ασφάλεια.....	74
4.1.3 Απόδοση κινητήρα (ισχύς εξόδου).....	75
4.1.4 Απόδοση κινητήρα ( εξάρτηση από το methane number) .....	75
4.1.5 Αποδοτικότητα .....	76
4.1.6 Σύστημα διαχείρισης αερίου καυσίμου.....	77
4.2 Μελέτες εταιρίας Winterthur gas and diesel .....	77
4.2.1 Μελέτη για LNG carrier.....	78
4.2.2 Μελέτη για πλοίο που κινείται με LNG.....	82
4.2.3 Συμπεράσματα μελετών.....	86
4.3 Συγκριτικοί πίνακες του συστήματος έγχυσης καυσίμου για τις δύο τεχνικές .....	88
5. Συμπεράσματα .....	90

Συντομογραφίες.....	91
Βιβλιογραφία .....	92

## Περιεχόμενα εικόνων, σχημάτων και πινάκων

Εικόνα 1 Χάρτης ορίων εκπομπών (7) .....	10
Εικόνα 2 Σταθμοί LNG (12) .....	14
Εικόνα 3 EGR (3) .....	31
Εικόνα 4 Εξαρτήματα κινητήρα (stoichiometric) (15).....	33
Εικόνα 5 Σωλήνας διπλού τοιχώματος (15).....	35
Εικόνα 6 Σύστημα παροχής LNG (stoichiometric) (3) .....	36
Εικόνα 7 Σύστημα παροχής αερίου (stoichiometric) (3).....	37
Εικόνα 8 Συμπίεση αερίου(stoichiometric) (5) .....	38
Εικόνα 9 Βαλβίδα έγχυσης καυσίμου (stoichiometric) (5) .....	39
Εικόνα 10 Σύστημα έγχυσης καυσίμου (stoichiometric) (5) .....	40
Εικόνα 11 Κάλυμμα κυλίνδρου (stoichiometric) .....	41
Εικόνα 12 Gas control block (stoichiometric) .....	41
Εικόνα 13 Σύστημα λίπανσης κινητήρα (stoichiometric) (3) .....	42
Εικόνα 14 Σωλήνας διπλού τοιχώματος (stoichiometric) (6).....	43
Εικόνα 15 Gas control block (stoichiometric) (5) .....	44
Εικόνα 16 Σύστημα σωληνώσεων (stoichiometric) (5) .....	44
Εικόνα 17 Scrubber installation on Ficaria Seaways (13).....	45
Εικόνα 18 Σύστημα καταλύτη SCR (19) .....	47
Εικόνα 19 WHR system (13) .....	48
Εικόνα 20 Κύλινδρος - διαδικασία καύσης (21) .....	51
Εικόνα 21 Εξαρτήματα που αλλάζουν (lean burn) (11) .....	58
Εικόνα 22 Εξαρτήματα που προστίθενται (lean burn) (11) .....	59
Εικόνα 23 Μηχανοστάσιο (lean burn) (17) .....	60
Εικόνα 24 Σωλήνας διπλού τοιχώματος (lean burn) (17) .....	61
Εικόνα 25 Εξαερισμός κυλίνδρου (17) .....	62
Εικόνα 26 Σύστημα παροχής LNG (lean burn).....	63
Εικόνα 27 Σύστημα τροφοδοσίας αερίου (lean burn).....	64
Εικόνα 28 Σύστημα εισαγωγής αερίου στον κύλινδρο (lean burn) (10) .....	65
Εικόνα 29 Σύστημα πιλοτικού καυσίμου (lean burn) (8) .....	65
Εικόνα 30 Εγχυτήρες καυσίμου (lean burn) (8) .....	66
Εικόνα 31 Σύστημα αντλίας καυσίμου (lean burn) (8) .....	66
Εικόνα 32 Μονάδα GVU στο μηχανοστάσιο (11) .....	67
Εικόνα 33 Μονάδα GVU με κάλυμμα (11) .....	68
Εικόνα 34 Σύστημα ελέγχου κινητήρα (lean burn) (9) .....	69
Εικόνα 35 LNG ρας (11) .....	70
Σχήμα 1 Ειδική κατανάλωση καυσίμου (27).....	19
Σχήμα 2 Εκπομπές οξειδίου του αζώτου (27).....	20
Σχήμα 3 Εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα CO (27) .....	20
Σχήμα 4 Εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων ( HC ) (27).....	21

Σχήμα 5 Εκπομπές αιθάλης (soot) (27).....	22
Σχήμα 6 Κύκλος Diesel.....	25
Σχήμα 7 Λειτουργίες κινητήρα (stoichiometric) (5).....	27
Σχήμα 8 Εκπομπές NOx (stoichiometric) (14).....	30
Σχήμα 9 Εκπομπές CO(stoichiometric) (14).....	30
Σχήμα 10 Εκπομπές CO2 (stoichiometric) (14).....	30
Σχήμα 11 Ειδική κατανάλωση (stoichiometric) (3).....	32
Σχήμα 12 Εκπομπές NOx (stoichiometric) (3).....	32
Σχήμα 13 Κόστος λειτουργίας scrubber (13).....	46
Σχήμα 14 Χρόνος αποπληρωμής για διάφορα πλοία (13).....	49
Σχήμα 15 Χρόνος αποπληρωμής 2500 TEU (13).....	49
Σχήμα 16 Χρόνος αποπληρωμής 4600 TEU (13).....	50
Σχήμα 17 Χρόνος αποπληρωμής 14000 TEU (13).....	50
Σχήμα 18 Κύκλος Otto (21).....	52
Σχήμα 19 Περιοχή λειτουργίας (lean burn) (11).....	54
Σχήμα 20 Ισχύς εξόδου (lean burn) (8).....	55
Σχήμα 21 Πίεση κυλίνδρου- κανονική καύση (8).....	61
Σχήμα 22 Πίεση κυλίνδρου- knocking (8).....	62
Σχήμα 23 Ετήσια κατανάλωση- κόστος καυσίμου (21).....	71
Σχήμα 24 Ετήσιες καταναλώσεις (21).....	71
Σχήμα 25 Κόστη εγκατάστασης (21).....	72
Σχήμα 26 Ετήσια κόστη λειτουργίας (21).....	72
Σχήμα 27 Χρόνος αποπληρωμής (21).....	73
Σχήμα 28 Καταναλισκόμενη ενέργεια κύκλου Otto (23).....	76
Σχήμα 29 Καταναλισκόμενη ενέργεια κύκλου Diesel (23).....	76
Σχήμα 30 Περιοχή λειτουργίας κινητήρων (24).....	78
Σχήμα 31 Επίδραση κόστους καυσίμου (24).....	79
Σχήμα 32 Κατανάλωση καυσίμου (24).....	80
Σχήμα 33 Ετήσια κατανάλωση καυσίμου (24).....	81
Σχήμα 34 Επίδραση κόστους καυσίμου (24).....	81
Σχήμα 35 Κόστος επένδυσης (24).....	82
Σχήμα 36 Περιοχή λειτουργίας κινητήρων (24).....	83
Σχήμα 37 Τιμές καυσίμων (24).....	83
Σχήμα 38 Επίδραση κόστους καυσίμου (24).....	84
Σχήμα 39 Κατανάλωση καυσίμου (24).....	84
Σχήμα 40 Ετήσιο κόστος καυσίμου (24).....	85
Σχήμα 41 Επίδραση κόστους καυσίμου (24).....	85
Σχήμα 42 Κόστος επένδυσης (24).....	86
Πίνακας 1 Κατηγορία ορίων εκπομπής.....	10
Πίνακας 2 Εκπομπές (stoichiometric) (14).....	29
Πίνακας 3 Τιμές καυσίμων (24).....	79
Πίνακας 4 Σύγκριση τεχνολογιών (24).....	87
Πίνακας 5 Συγκριτικός πίνακας (6).....	88
Πίνακας 6 Συγκριτικός πίνακας (6).....	88
Πίνακας 7 Συγκριτικός πίνακας (6).....	89

## Περίληψη

Λόγω της παγκόσμιας κατάστασης που επικρατεί σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση, και τις καταστροφικές συνέπειες που έχει αυτή στο περιβάλλον αλλά και στον ίδιο τον άνθρωπο και με δεδομένο ότι τα πλοία είναι από τους κυριότερους παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτήν, είχε δημιουργηθεί η ανάγκη να δοθεί μια λύση για τον περιορισμό της. Έτσι τέθηκαν σε ισχύ κάποιοι κανονισμοί για να περιορίσουν τα επίπεδα εκπομπών των βλαβερών ουσιών από τις εξατμίσεις των πλοίων. Για να καταφέρουν όμως τα πλοία να συμμορφωθούν με τους κανονισμούς αυτούς, και λαμβάνοντας υπόψη ότι απλές ρυθμίσεις του κινητήρα δεν είναι αρκετές, η ναυτιλία στράφηκε στην λύση της μεικτής καύσης. Στην λειτουργία ενός κινητήρα σε μεικτή καύση, ο κινητήρας χρησιμοποιεί σαν κύριο καύσιμο το φυσικό αέριο. Στην παρούσα διπλωματική αρχικά παρουσιάζονται οι διεθνείς κανονισμοί που επιβάλλονται στα πλοία για τον περιορισμό των εκπομπών τους. Στη συνέχεια δίνεται μια γενική εικόνα για τη μεικτή καύση και τη χρήση φυσικού αερίου και την επίδραση που έχει αυτό στις εκπομπές των ρυπαντών. Στη συνέχεια αναφέρονται οι δύο τεχνικές εισαγωγής αερίου καυσίμου χαμηλής και υψηλής πίεσης, καθώς και μια περιγραφή κύριων συστημάτων φυσικού αερίου στα πλοία. Έπειτα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι δύο αυτές τεχνικές, καθώς και στοιχεία όπως η αρχή λειτουργίας του κινητήρα, χαρακτηριστικά του, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ακόμα παρουσιάζονται τα εξαρτήματα που χρειάζεται να αντικατασταθούν αλλά και να προστεθούν ώστε να μετατραπεί ένας απλός κινητήρας σε διπλού καυσίμου, τα εξαρτήματα που απαιτούνται για τη χρήση φυσικού αερίου και κάποια οικονομικά στοιχεία όπως ο χρόνος αποπληρωμής ενός τέτοιου συστήματος. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των κινητήρων διπλού καυσίμου σε σχέση με τους αρχικούς κινητήρες πετρελαίου, σύγκριση των δύο τύπων κινητήρων διπλού καυσίμου ως προς την απόδοση, την ασφάλεια αλλά και ως προς διάφορα εξαρτήματα που χρησιμοποιούν. Τέλος παρουσιάζονται δύο μελέτες που συγκρίνουν τους δύο κινητήρες σε λειτουργία σε ίδιες συνθήκες, δηλαδή στο ίδιο πλοίο, καθώς και τα συμπεράσματα που βγαίνουν από τη σύγκριση.

## Abstract

Due to the global situation regarding air pollution, and its devastating effects on the environment and on human beings, and given that ships are one of the main contributors to it, there was born a need to give a solution to limit it. Thus, some regulations came into force to limit the emission levels of harmful substances from ship exhausts. But in order for ships to comply with these regulations, and given that simple engine settings are not enough, shipping has turned to the dual fuel solution. When an engine operates according to dual fuel solution, the engine uses natural gas as the main fuel.

On this thesis, are presented the international regulations imposed on ships to limit their emissions. Also it is describing an overview of dual fuel combustion and use of natural gas and its effect on pollutant emissions. Then it is mentioning the two fuel

injection techniques of high and low pressure, as well as a description of the main gas systems on ships. These two techniques are then presented separately, and some data as the engine operating principle, its features, advantages and disadvantages. It also shows the components that need to be replaced or added to convert a simple engine to a dual-fuel engine, the components that are needed to use the natural gas as a fuel, and some economic data such as the payback time of such a system. Furthermore, it is given a comparison of the two dual fuel engine types as to the diesel ones, a comparison between the two systems in terms of performance, safety and the main components they use. At the end two studies are presented comparing the two engines in operation under the same conditions, on the same ship, and also the conclusions from the comparison.



# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να διερευνήσει και να συγκρίνει τις τεχνικές της μεικτής καύσης σε δίχρονους κινητήρες. Πιο συγκεκριμένα, λόγω του μεγάλου προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, είναι φρόνιμο να υπάρχει πλήρης γνώση της κατάστασης που επικρατεί, του τρόπου με τον οποίο οι κινητήρες μολύνουν την ατμόσφαιρα, των κανονισμών που εφαρμόζονται για τις εκπομπές βλαβερών ουσιών, αλλά και τι προβλέπεται στο μέλλον να εφαρμοστεί στους ναυτικούς κινητήρες σχετικά με το θέμα αυτό. Στην αγορά αυτή τη στιγμή, υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κινητήρων μεικτής καύσης, ο υψηλής και ο χαμηλής πίεσης. Μέσω της διπλωματικής αυτής, γίνεται ενημέρωση σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας τους, τις αρχές που ακολουθούν, τα εξαρτήματα που αποτελούν το κάθε σύστημα, τα βασικά χαρακτηριστικά τους αλλά και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Με αυτόν τον τρόπο παρουσιάζεται μια πιο σφαιρική εικόνα της κατάστασης στην αγορά, αλλά και ξεχωριστά για κάθε σύστημα όλες οι βασικές γνώσεις για την κατανόηση της λειτουργίας του, τον τρόπο με τον οποίο ένας κινητήρας πετρελαίου μπορεί να μετατραπεί σε κινητήρα μεικτής καύσης, τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το κάθε σύστημα, αλλά και πώς πρόκειται να κινηθεί στο μέλλον. Ύστερα, είναι ανάγκη να γίνει μια σύγκριση των δύο συστημάτων, ώστε να γνωρίζουμε πού πλεονεκτεί και πού υστερεί το καθένα, αλλά και ποιες είναι οι βασικές διαφορές τους ως προς τη λειτουργία τους, αλλά και ως προς τα εξαρτήματά που χρησιμοποιούν. Η διπλωματική αυτή, παρουσιάζει κάποιες συγκριτικές μελέτες των δύο συστημάτων, αλλά και συγκριτικούς πίνακες έτσι ώστε να δοθεί, όσο το δυνατόν καλύτερα, μια συγκριτική εικόνα των δύο συστημάτων και να βγουν τα απαραίτητα συμπεράσματα ( ποιοτικά ) για τις δύο τεχνικές, τα οποία παρουσιάζονται στο τέλος.

## 1.2 Διεθνείς κανονισμοί για την ατμοσφαιρική ρύπανση

Παρόλο που η ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία δεν έχει άμεσες αιτίες και συνέπειες που συνδέονται για παράδειγμα με ένα περιστατικό πετρελαιοκηλίδας, προκαλεί σωρευτικό αποτέλεσμα που συμβάλλει στα συνολικά προβλήματα ποιότητας του αέρα που αντιμετωπίζουν οι πληθυσμοί σε πολλούς τομείς και επηρεάζει επίσης το φυσικό περιβάλλον, όπως για παράδειγμα όξινη βροχή.

Τα καυσαέρια των πλοίων θεωρούνται σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τόσο για συμβατικούς ρύπους όσο και για αέρια θερμοκηπίου. Υπάρχει η αντίληψη ότι η μεταφορά εμπορευμάτων με πλοίο είναι χαμηλή σε ατμοσφαιρικούς ρύπους, διότι για το ίδιο βάρος και την απόσταση είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος μεταφοράς, σύμφωνα με τη έρευνήτή Amy Bows-Larkin. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε σχέση με τις αεροπορικές μεταφορές εμπορευμάτων. Ωστόσο, επειδή η θάλασσα αποστολή αντιπροσωπεύει πολύ μεγαλύτερη ετήσια χωρητικότητα και οι αποστάσεις είναι συχνά μεγάλες, οι εκπομπές της ναυτιλίας είναι παγκοσμίως σημαντικές. Μια δυσκολία είναι ότι το αυξανόμενο από έτος σε έτος ποσό της ναυτιλίας υπερβαίνει τα κέρδη στην αποδοτικότητα, όπως από τον αργό ατμό.

Η ανάπτυξη των θαλάσσιων αποστολών τονοχιλιόμετρων ανήλθε κατά μέσο όρο σε 4% ετησίως από τη δεκαετία του 1990. Και έχει αυξηθεί κατά ένα συντελεστή 5 από τη δεκαετία του 1970. Υπάρχουν πλέον πάνω από 100.000 πλοία μεταφοράς στη θάλασσα, εκ των οποίων περίπου 6.000 είναι μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

Η σύμβαση MARPOL 73/78 είναι η διεθνής σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία του 1973, όπως τροποποιήθηκε από το πρωτόκολλο του 1978. ("MARPOL" είναι η συντομία για marine pollution και 73/78 σύντομη για τα έτη 1973 και 1978). Η MARPOL 73/78 είναι μία από τις σημαντικότερες διεθνείς συμβάσεις για το θαλάσσιο περιβάλλον. Αναπτύχθηκε από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization – IMO) σε μια προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί η ρύπανση των ωκεανών και των θαλασσών. Σκοπός της σύμβασης αυτής είναι η διατήρηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος με σκοπό την πλήρη εξάλειψη της ρύπανσης από πετρέλαιο και άλλες επιβλαβείς ουσίες και την ελαχιστοποίηση της τυχαίας διαρροής τέτοιων ουσιών. Η MARPOL χωρίζεται σε παραρτήματα σύμφωνα με διάφορες κατηγορίες ρύπων, καθένα από τα οποία αφορά τη ρύθμιση μιας συγκεκριμένης ομάδας εκπομπών πλοίων.

Το παράρτημα VI της MARPOL, εγκρίθηκε πρώτα το 1997, περιορίζει τους κύριους ατμοσφαιρικούς ρύπους που περιέχονται στα καυσαέρια της εξάτμισης των πλοίων, συμπεριλαμβανομένων των οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) και οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>), και απαγορεύει ηθελημένες εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το όζον (ODS). Ρυθμίζει επίσης τις εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC) από tankers. Μετά την έναρξη ισχύος του παραρτήματος VI της MARPOL στις 19 Μαΐου 2005, η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC), κατά την 53η σύνοδό της (Ιούλιος 2005), συμφώνησε να αναθεωρήσει το παράρτημα VI της MARPOL με στόχο την ενίσχυση σημαντικά στα όρια εκπομπών υπό το φως των τεχνολογικών βελτιώσεων. Ως αποτέλεσμα τριών ετών εξέτασης, MEPC 58 (Οκτώβριος 2008), υιοθέτησε το αναθεωρημένο παράρτημα VI της MARPOL και των συνδεδεμένων NO<sub>x</sub> Τεχνικό Κώδικα του 2008, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιουλίου 2010.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αναθεωρημένο Παράρτημα VI της MARPOL. Οι κύριες αλλαγές της MARPOL παράρτημα VI είναι μια προοδευτική μείωση σε παγκόσμιο επίπεδο των εκπομπών SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και σωματιδίων και η εισαγωγή των περιοχών ελέγχου των εκπομπών (ECAs) ώστε να μειωθούν περαιτέρω οι εκπομπές σε ορισμένες θαλάσσιες περιοχές. Σύμφωνα με το αναθεωρημένο παράρτημα VI της MARPOL, τα παγκόσμια όρια για SO<sub>x</sub> θα μειωθούν από το σημερινό επίπεδο 3,50% σε 0,50%, με ισχύ από 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2020, υπόκεινται σε επανεξέταση σκοπιμότητας που θα ολοκληρωθεί το αργότερο το 2018. Η προοδευτική μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> από τους ναυτικούς κινητήρες ντίζελ, επιτυγχάνεται με όριο εκπομπής «Tier II» για κινητήρες που εγκαταστάθηκαν σε πλοία από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2011 και μετά, και όριο «Tier III» για κινητήρες που εγκαταστάθηκαν σε πλοία από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2016 και μετά και λειτουργούν σε περιοχές ECAs. Οι

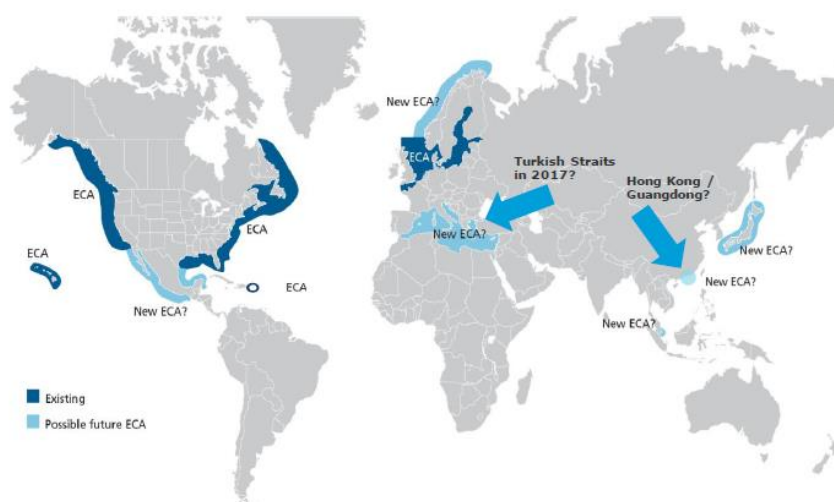
κινητήρες που έχουν κατασκευαστεί από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1990 και μετά , αλλά πριν από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2000 και μετά οφείλουν να συμμορφώνονται με «Tier I» όρια εκπομπών.

Οι απαιτήσεις ελέγχου των NOx του παραρτήματος VI της MARPOL εφαρμόζονται σε εγκατεστημένο ναυτικό κινητήρα ντίζελ άνω των 130 kW ισχύος εξόδου, εκτός από εκείνα που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά και μόνο για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Όπως προαναφέραμε, ανάλογα με την ημερομηνία κατασκευής του κινητήρα, αυτός κατατάσσεται σε διαφορετική κατηγορία ορίων εκπομπής ( Tier ) , και ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του καθορίζεται η πραγματική οριακή τιμή εκπομπής. Παρακάτω παρουσιάζεται ένας χαρακτηριστικός πίνακας:

Tier	Ship construction date on or after	Total weighted cycle emission limit (g/kWh) n = engine's rated speed (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1 January 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 January 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ e.g., 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 January 2016*	3.4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 2.4	2.0

Πίνακας 1 Κατηγορία ορίων εκπομπής

Οι έλεγχοι Tier III ισχύουν μόνο για τα συγκεκριμένα πλοία που ταξιδεύουν σε περιοχές ελέγχου των εκπομπών (ECAs), που συστάθηκε για τον περιορισμό των εκπομπών NOx. Εκτός των περιοχών αυτών εφαρμόζεται το Tier II. Παρακάτω φαίνεται ο χάρτης που εφαρμόζονται τα όρια Tier III :



Εικόνα 1 Χάρτης ορίων εκπομπών (7)

Επιπλέον, οι απαιτήσεις Tier III δεν ισχύουν για κινητήρα ντίζελ πλοίων που είναι εγκατεστημένος σε πλοίο που κατασκευάστηκε πριν από την 1η Ιανουαρίου 2021

και έχει ολική χωρητικότητα μικρότερη των 500 GT, μήκους 24 μέτρων ή περισσότερο, το οποίο έχει ειδικά σχεδιαστεί και χρησιμοποιείται αποκλειστικά για ψυχαγωγικούς σκοπούς. Αναθεωρήθηκαν οι κανονισμοί για τις ουσίες που καταστρέφουν το όζον, τις πτητικές οργανικές ενώσεις, τις εγκαταστάσεις παραλαβής και την ποιότητα του πετρελαίου καυσίμου, καθώς και κανονισμούς για τη διαθεσιμότητα του καυσίμου. Τα αναθεωρημένα μέτρα αναμένεται να έχουν σημαντικό ευεργετικό αντίκτυπο στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία, ιδίως για τα άτομα που ζουν σε λιμάνια και στις παράκτιες κοινότητες.

Για να μεταβεί ένας κινητήρας από την τρέχουσα Tier II μέχρι την Tier III σε επίπεδα εκπομπών NOx, όπως ορίζεται στον κανονισμό του IMO παράρτημα VI της MARPOL, οι εκπομπές αυτές πρέπει να μειωθούν κατά περίπου 75%. Αυτό σημαίνει ότι η ρύθμιση του κινητήρα δεν είναι αρκετή. Πολλές τεχνολογίες, ή ένας συνδυασμός τεχνολογιών, μπορεί να μειώσει τις εκπομπές στις κατηγορίες Tier III. Ο πιο επίκαιρος τρόπος είναι η μεικτή καύση ( dual fuel ) όπου η μηχανή λειτουργεί με πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Σε περίπτωση μη συμμόρφωσης με την κατηγορία Tier III σε λειτουργία στις ειδικές περιοχές ECAs, κάθε παραβίαση θα τιμωρείται με πρόστιμο 25000 \$ . **(28)**

### **1.3 Φυσικό αέριο**

Το φυσικό αέριο είναι ένα φυσικό μείγμα αερίων υδρογονανθράκων που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, αλλά συνήθως συμπεριλαμβάνονται κυμαινόμενες ποσότητες άλλων ανώτερων αλκανίων, και μερικές φορές ένα μικρό ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα, αζώτου, υδροθείου, ή ήλιου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο σημαντικοί λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιείται για μεικτή καύση σε ναυτικούς κινητήρες ( ντίζελ ) :

- Το μεθάνιο που είναι το κύριο συστατικό του, του προσδίδει μεγάλο αριθμό οκτανίων, και το καθιστά ιδανικό για κινητήρες μεγάλου βαθμού συμπίεσης όπως οι κινητήρες ντίζελ
- Έχει υψηλότερη ειδική θερμοχωρητικότητα το μείγμα Φ.Α- αέρας σε σχέση μόνο με αέρα
- Ο ρυθμός με τον οποίο καίγεται είναι βραδύτερος σε σχέση με το πετρέλαιο
- Έχει μεγαλύτερη θερμαντική αξία ( heating value ) σε σχέση με το πετρέλαιο
- Αναμειγνύεται ομοιόμορφα με τον αέρα με αποτέλεσμα την αποδοτική καύση και την ουσιαστική μείωση εκπομπών
- Έχει μεγαλύτερη ενθαλπία καύσης ανά μάζα καυσίμου (κατώτερη θερμογόνο ικανότητα) σε σχέση με πετρέλαιο και βενζίνη
- Δεν είναι τοξικό
- Περιορίζει τις εκπομπές αιθάλης

Υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης σε σχέση με άλλα αέρια με αποτέλεσμα να μπορούμε να διατηρήσουμε το βαθμό συμπίεσης του κυλίνδρου

Τα υγρά καύσιμα για πλοία και το Φ.Α. κοστολογούνται με διαφορετικές μονάδες. Τα HFO, MDO, MGO κοστολογούνται με βάση United states dollars per ton of liquid fuel ( USD/ton ). Το Φ.Α. κοστολογείται με βάση την ενέργεια που περιέχει. Δηλαδή United states dollars per million British thermal units ( USD/MMBTU). Τα υγρά καύσιμα περιέχουν συγκεκριμένη ενέργεια στη σύστασή τους σε αντίθεση με το Φ.Α. το οποίο ποικίλει ανάλογα με τη σύστασή του. Η τιμή του Φ.Α. είναι φθηνότερη από κάθε άλλο υγρό καύσιμο.

#### **1.4 Περιβάλλον και φυσικό αέριο**

Το φυσικό αέριο θεωρείται το πιο φιλικό ως προς το περιβάλλον ορυκτό καύσιμο, επειδή έχει τις χαμηλότερες εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα ενέργειας και επειδή είναι κατάλληλο για χρήση σε σταθμούς υψηλής απόδοσης συνδυασμένου κύκλου ισχύος. Για μία ισοδύναμη ποσότητα της θερμότητας, η καύση του φυσικού αερίου παράγει περίπου 30% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα από την καύση του πετρελαίου και περίπου το 45% λιγότερο από ό, τι η καύση άνθρακα. Οι εκπομπές από τη διακίνηση του LNG (εννοείται από τα καύσιμα που δαπανώνται για τη μεταφορά) είναι ακόμη χαμηλότερες από ότι μέσω σωληνώσεων φυσικού αερίου (κατανάλωση ενέργειας για τη συμπίεση του ΦΑ στο δίκτυο), το οποίο είναι ένα υπαρκτό πρόβλημα στην Ευρώπη, όπου σημαντικές ποσότητες φυσικού αερίου διακινούνται μέσω σωληνώσεων για μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα από τη Ρωσία.

Το πρόβλημα των εκπομπών που παράγονται κατά την μεταφορά του ΦΑ από την παραγωγή του, στους τελικούς καταναλωτές, προέρχεται από την σημαντική κατανάλωση ενέργειας, προκειμένου να διατηρηθεί η πίεση από 70-90 bar στους αγωγούς. Την ενέργεια αυτή καταναλώνουν οι μονάδες αεροσυμπιεστών που λειτουργούν κατά μήκος του αγωγών και είναι ευθέως ανάλογη της απόστασης που χωρίζει τον παραγωγό από τον τόπο κατανάλωσης. Ωστόσο, οι εκπομπές από το φυσικό αέριο που μεταφέρεται ως LNG είναι υψηλότερες από ότι για το φυσικό αέριο που παράγεται τοπικά και κοντά στο σημείο κατανάλωσης, καθώς οι εκπομπές που σχετίζονται με τη μεταφορά είναι χαμηλότερες στην περίπτωση αυτή.

Παρόλα αυτά στη δυτική ακτή των Ηνωμένων Πολιτειών, όπου είχε γίνει πρόταση για τη δημιουργία τριών νέων τερματικών σταθμών εισαγωγής υδροποιημένου φυσικού αερίου, περιβαλλοντικές ομάδες, όπως η Pacific Environment, η Ratepayers for Affordable Clean Energy (RACE) και η Rising Tide αντιτάχθηκαν στην κατασκευή τους και υποστήριξαν ότι, ενώ οι μονάδες παραγωγής ενέργειας φυσικού αερίου εκπέμπουν περίπου το ήμισυ του διοξειδίου του άνθρακα ενός ισοδύναμου σταθμού άνθρακα, για την καύση φυσικού αερίου που απαιτείται για την παραγωγή και τη μεταφορά υδροποιημένου φυσικού αερίου για τα εργοστάσια προστίθενται από 20 μέχρι 40% περισσότερο διοξείδιο άνθρακα από την καύση του φυσικού αερίου και μόνο.

Βέβαια δε θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι, το ΦΑ και πιο σωστά το μεθάνιο, που είναι το κύριο συστατικό του, αν και παραγόμενο στη φύση σε μεγάλες ποσότητες, σαν προϊόν της αναερόβιας ζήμωσης είναι ισχυρό αέριο του

θερμοκηπίου, οπότε η διαρροή του στη φύση από τη διακίνησή του θα πρέπει προλαμβάνεται για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος αλλά και ασφαλείας, με την αυτανάφλεξή του όταν δημιουργούνται εκρηκτικά μίγματα με τον ατμοσφαιρικό αέρα.

### 1.5 LNG

Το LNG είναι το φυσικό αέριο, το οποίο ψύχεται στους -163 βαθμούς κελσίου, σε ατμοσφαιρική πίεση και μεταφέρεται σε υγρή μορφή. Υπάρχουν δύο τύποι φυσικού αερίου που παίρνονται από LNG, ανάλογα με τον τρόπο που εξάγεται.

1) “Natural boil of gas”, το οποίο παίρνεται από την κορυφή της δεξαμενής πάνω από το υγρό LNG. Έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε μεθάνιο και άζωτο συνεπώς όταν καίγεται έχει μεγάλη αντίσταση σε φαινόμενα όπως knocking. Έχει ποιότητα μεθανίου MN 100 και ενεργειακή αξία LCV 33 – 35MJ/nm<sup>3</sup>.

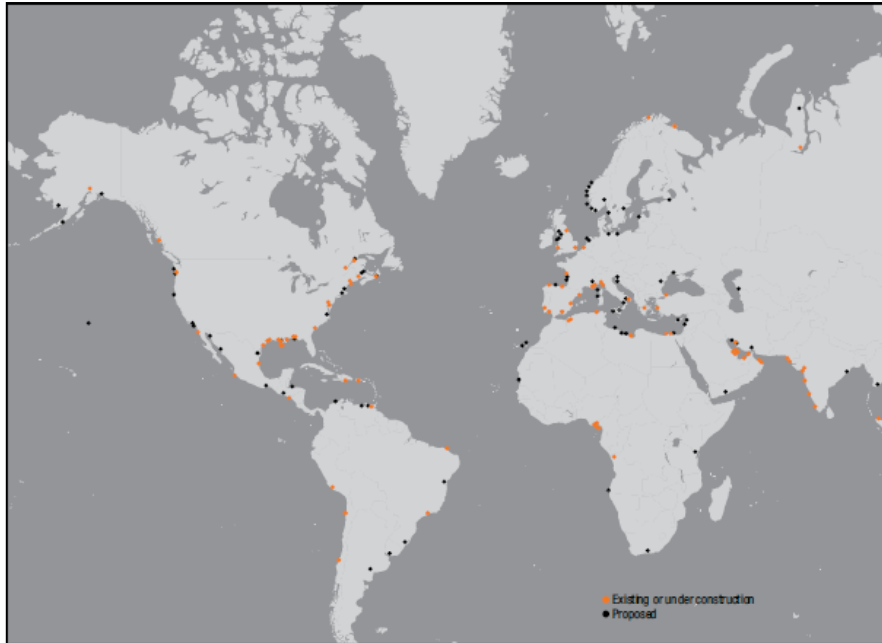
2) “Forced boil of gas” όπου το LNG εξάγεται από τον πυθμένα της δεξαμενής και ατμοποιείται ξεχωριστά. Αυτό περιέχει ένα μείγμα από όλους τους υδρογονάνθρακες και η αντίστασή του σε knocking μπορεί να διαφέρει από φορτίο σε φορτίο με MN 70-80 και LCV 38-39 MJ/nm<sup>3</sup>.

Η χρήση του Natural b.o.g εγγυάται υψηλό αριθμό μεθανίου, και σταθερή καύση, και για το λόγο αυτό ταιριάζει για καύσιμο. Ωστόσο, όταν ένα σύστημα πρόωσης το χρησιμοποιεί, πρέπει να διασφαλίσει ότι υπάρχει αρκετή ποσότητα, με επαρκώς υψηλό αριθμό μεθανίου, ώστε να μην χρειαστεί να αναμειχθεί με Forced boil of gas από τον πυθμένα της δεξαμενής. Κάθε εγκατάσταση κινητήρα που σχεδιάζεται να λειτουργεί με φυσικό αέριο, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσει Forced boil of gas όπου θα αναμειχθεί καλά πριν την εισαγωγή στον ατμοποιητή. Αυτό διασφαλίζει καλή ομοιογένεια, και κατ'επέκταση καλή ποιότητα. Αυτού του τύπου κινητήρες χρησιμοποιούν φυσικό αέριο με μικρότερο αριθμό μεθανίου, σε σχέση με τους Natural boil of gas, αλλά εξασφαλίζουν λειτουργία χωρίς φαινόμενα knocking. Το μέγεθος του ατμοποιητή πρέπει να είναι μεγάλο, ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα εισέρχονται σταγονίδια στον κινητήρα. **(2)**

Τα πλοία που ενδείκνυνται για να χρησιμοποιούν LNG, είναι τα εξής :

- Πλοία που μεταφέρουν LNG
- Διάφορα πλοία που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου
- Ferries, passenger vessels, workboats, container “feeder” vessels

Στον παρακάτω χάρτη έχουν σημειωθεί οι παραθαλάσσιοι σταθμοί εισαγωγής και εξαγωγής υγροποιημένου φυσικού αερίου ( LNG). Με πορτοκαλί κουκίδα σημειώνονται οι ήδη υπάρχοντες, ή οι υπό κατασκευή, ενώ με μαύρη κουκίδα σημειώνονται εκείνοι που έχουν προταθεί. **(12)**



Εικόνα 2 Σταθμοί LNG (12)

### 1.6 Αποθήκευση LNG και σύστημα αερίου καυσίμου

Το σύστημα αποθήκευσης του υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι ίδιο για κινητήρες χαμηλής και υψηλής πίεσης, καθώς διαφορετικά σχέδια δεξαμενών μπορούν να εφαρμοστούν ανάλογα με την αντοχή, το διαθέσιμο χώρο, καθώς και τις συνθήκες λειτουργίας. Ωστόσο, το σύστημα διαχείρισης του αερίου καυσίμου, και το σύστημα ασφαλείας, πρέπει να σχεδιαστούν είτε για σύστημα χαμηλής είτε για υψηλής πίεσης το οποίο οδηγεί σε διαφορετικές απαιτήσεις χώρου και ασφάλειας. Υψηλότερα CAPEX και OPEX αναμένονται για συστήματα υψηλής πίεσης.

Συνήθως, ως δεξαμενές αερίου καυσίμου πάνω στο πλοίο χρησιμοποιούνται δεξαμενές με μόνωση κενού αέρος, υπό πίεση, κυλινδρικές τύπου C. Το πλεονέκτημά τους είναι η άμεση διαθεσιμότητα, ευελιξία και ευκολία στη λειτουργία. Για εγκαταστάσεις διπλού καυσίμου απαιτείται μόνο μία δεξαμενή υγροποιημένου φυσικού αερίου.

Οι ατμοποιητές, θερμαίνονται από ένα σύστημα γλυκόλης, το οποίο θερμαίνεται είτε από το νερό ψύξης του κινητήρα, είτε ηλεκτρικά, είτε σε συνδυασμό. Οι ατμοποιητές τοποθετούνται σε ένα κουτί συγκολλημένο στο εξωτερικό της δεξαμενής LNG, που ονομάζεται "cold box". Σε αυτό μέσα περιέχονται όλες οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής, και οι ατμοποιητές που χρειάζονται για να τροφοδοτήσουν τους κινητήρες με αέριο υπό τις καθορισμένες συνθήκες. Υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις στους κανονισμούς για την δεξαμενή καθώς και για το δωμάτιο

του ατμοποιητή σε σχέση με τη θέση του στο πλοίο, τον εξαερισμό, την ανίχνευση διαρροής αερίου, την απελευθέρωση πίεσης, τον ανεφοδιασμό καυσίμων, κ.ά.

Πριν από τον κινητήρα, μια μονάδα ελέγχου πίεσης αερίου με τις απαραίτητες βαλβίδες διακοπής είναι εγκατεστημένα. Αυτή η μονάδα πρέπει να είναι ειδικά κλεισμένη, αεριζόμενη και προστατευμένη με αισθητήρες αερίου, όπως προβλέπεται από τους κανόνες. Οι εξελίξεις προχωρούν, ώστε να καταλήξουν σε πιο αποδοτικά ως προς το χώρο σχέδια των δεξαμενών, ενσωματώνοντάς τες στη δομή του πλοίου ( δεξαμενές τύπου A ή B ). Σχετικά με τις απαιτήσεις χώρου των δεξαμενών, οι δεξαμενές LNG απαιτούν περίπου το διπλάσιο χώρο σε σχέση με αυτές του πετρελαίου, για ίδια ποσότητα ενέργειας καυσίμου. Ανάλογα με την επιλογή της δεξαμενής LNG, ο συνολικός χώρος που θα καταλαμβάνει μπορεί να είναι 3-4 φορές μεγαλύτερος του αντίστοιχου χώρου για δεξαμενή πετρελαίου. Κάποιοι κινητήρες διπλού καυσίμου, απαιτούν ένα ειδικό σύστημα παροχής αερίου καυσίμου μπροστά από τον κινητήρα, το οποίο είναι ικανό να παράγει την υψηλή πίεση που απαιτείται ( 300 bar). Αυτό θα είναι είτε συμπιεστής αερίου υψηλής πίεσης, αν το φυσικό αέριο είναι σε αέρια μορφή, είτε αντλία υψηλής πίεσης εάν το φυσικό αέριο είναι σε υγρή μορφή ( LNG). Διπλά τοιχώματα και ειδικές βαλβίδες ασφαλείας απαιτούνται για το σύστημα που περιγράφηκε. **(12)**

### 1.7 Μεικτή καύση

Στη μεικτή καύση Φ.Α. με πετρέλαιο , ποσοστό έως και 95% του πετρελαίου αναπληρώνεται με Φ.Α. στο πλήρες φορτίο. Το Φ.Α. εισάγεται στο θάλαμο καύσης με δύο τρόπους:

- Σε αέρια μορφή μαζί με τον αέρα ( dual fuel mode with NG fumigation)
- Σε υγρή μορφή στην έναρξη της συμπίεσης ( dual fuel mode with NG injection)

Το Φ.Α. εισάγεται στο θάλαμο καύσης ανάλογα με τη μορφή του είτε στη φάση της αναρρόφησης , ή εγχύεται κατά την έναρξη της συμπίεσης. Μικρή παροχή μάζας πετρελαίου (pilot fuel), 5-15% της ολικής των δυο καυσίμων εγχύεται λίγο πριν το άνω νεκρό σημείο ώστε να αναφλεγεί το μείγμα. Το ποσοστό αυτό πετρελαίου είναι σταθερό για όλες τις συνθήκες λειτουργίας και καλύπτει πολύ μικρό ποσοστό φορτίου.**(26)**

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα πλοία για μεικτή καύση είναι οι Compression Ignition (CI) – LNG & Diesel Dual Fuel όπου η έναυση του μίγματος γίνεται με συμπίεση. Σε αυτού του τύπου κινητήρες, το αέριο καύσιμο δεν μπορεί να αναμειχθεί με τον εισερχόμενο αέρα γιατί θα προκληθεί έκρηξη. Υπάρχουν λοιπόν δύο τρόποι για να εισέλθει το αέριο καύσιμο στον κύλινδρο:

-Direct low pressure LNG injection ( system A)

-Direct high pressure LNG injection (system B)



### System A

Λειτουργεί όπως ένας κινητήρας Otto με τεχνολογία pre mixed lean burn και η έναυση γίνεται με πιλοτικό καύσιμο ( pilot fuel ) σε προ θάλαμο καύσης.

Παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά:

- Ο αέρας και το αέριο καύσιμο αναμειγνύονται πριν την καύση με αποτέλεσμα να υπάρχει περισσότερος αέρας από ότι χρειάζεται για στοιχειομετρική καύση, χαμηλότερη θερμοκρασία φλόγας, λιγότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου και λιγότερες απώλειες θερμότητας από τα τοιχώματα.
- Χαμηλή πίεση έγχυσης αερίου στα πρώτα στάδια της συμπίεσης ( <16 bar )
- Έναρξη καύσης στον προ θάλαμο η οποία παρέχει την κατάλληλη ενέργεια ώστε να καεί το αέριο. Έτσι γίνεται καλή καύση με πιλοτικό καύσιμο λιγότερο από 1%
- Μείωση των εκπομπών οξειδίου του αζώτου ώστε να πληρεί τα στάνταρ IMO Tier III χωρίς περεταίρω διορθώσεις
- Σε χαμηλό φορτίο μπορεί να "γυρίσει" σε καύση μόνο πετρελαίου
- Ο κινητήρας διατηρεί το σύστημα έγχυσης πετρελαίου, με πιθανόν μικρές αλλαγές στην αντλία έγχυσης και στο στόμιο, ώστε να αυξηθεί η απόδοσή του σε χαμηλούς ρυθμούς έγχυσης καυσίμου.
- Αναλόγως την ποιότητα του καυσίμου, ο βαθμός συμπίεσης μπορεί να μειωθεί ώστε να αποφύγουμε φαινόμενα όπως μικρές εκρήξεις ( detonation ), αλλά ακόμα να είναι τόσο υψηλός ώστε να επιτυγχάνεται αυτανάφλεξη του καυσίμου. Η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι περίπου 10% μικρότερη αυτής μόνο πετρελαίου.

### System B

Λειτουργεί όπως ένας κινητήρας diesel με την αντικατάσταση του πετρελαίου με Φ.Α . Το μείγμα αέρα-αερίου αναφλέγεται λόγω αυτανάφλεξης του πιλοτικού καυσίμου πετρελαίου ( HFO ) το οποίο εγχύεται μαζί με το LNG στο άνω νεκρό σημείο της διαδρομής του εμβόλου.

- Το μείγμα αέρα-αερίου δεν είναι προανεμειγμένο κατά τη συμπίεση, έτσι η καύση του αερίου είναι ελεγχόμενη και διαχυόμενη.
- Το πιλοτικό καύσιμο είναι 3-5%. Η ελεγχόμενη- διαχυόμενη καύση οδηγεί σε υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα
  - Όχι μείωση των εκπομπών NOx. Χρειαζόμαστε χρήση καταλύτη ( SCR ) και ανακυκλοφορία των καυσαερίων ( EGR ) για να ικανοποιούνται τα επίπεδα IMO Tier III
  - Χαμηλές εκπομπές μεθανίου και σωματιδίων ( particular matter PM )
- Ο αέρας είναι τελείως συμπιεσμένος κατά τη φάση της συμπίεσης οπότε το αέριο εγχύεται σε υψηλή πίεση ( >300 bar )

-Επειδή η καύση είναι διαχυόμενη και όχι προανεμειγμένη, προβλήματα όπως κρουστική καύση, έχουν εξαλειφθεί

-Ο κινητήρας μπορεί να λειτουργεί είτε με συμπιεσμένο Φ.Α. ( CNG ), είτε με μαζούτ (HFO), είτε με MDO ( marine diesel oil )

-Ο κινητήρας χρειάζεται σύστημα τροφοδοσίας υψηλής πίεσης ( 250-350 bar ) και τα συστήματα που χρειάζεται είναι συμπιεστής αερίου και ειδικά συστήματα αντλιών ( cryogenic pump systems) **(25)**

### **1.8 Εκπομπές**

Η εξάτμιση από έναν ναυτικό κινητήρα αποτελείται από διαφορετικές ουσίες οι οποίες χωρίζονται σε επτά κατηγορίες:

-άζωτο, οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα, ατμός νερού και υδρογόνο

-μονοξείδιο του άνθρακα

-οξειδία του αζώτου ( NOx ). Δημιουργούνται στην καύση σε υψηλή θερμοκρασία, από το άζωτο και το οξυγόνο στον αέρα. Συνεισφέρουν στην δημιουργία της τρύπας του όζοντος (smog), όξινη βροχή, κ.ά.

-οξειδία του θείου (Sox). Δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της καύσης, καθώς το θείο οξειδώνεται. Η νομοθεσία επικεντρώνεται στο ποσοστό % του θείου που περιέχεται στο καύσιμο. Ωστόσο η χρήση καθαρισμού καυσαερίων είναι εναλλακτική της χρήσης καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

-υδρογονάνθρακες

-αλδεΐδες

-σκόνη άνθρακα και στερεά σωματίδια (PM). Όσο λιγότερο αποτελεσματική είναι η καύση, τόσο περισσότερα PM εκπέμπονται.

Εκτός από την πρώτη κατηγορία, όλες οι υπόλοιπες είναι καρκινογόνες και βλαβερές για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Το διοξείδιο του άνθρακα είναι υπεύθυνο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τις κλιματικές αλλαγές. Οι εκπομπές επιβλαβών στοιχείων χαρακτηρίζονται από :

-σύνθεση %

-ταχύτητα εκπομπής

-ποσότητα ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας ( kg/kwh)

-εκπομπή βλαβερής ουσίας ανά 1 kg καυσίμου ( kg/kg fuel )

## **1.9 Αποτελέσματα μεικτής καύσης**

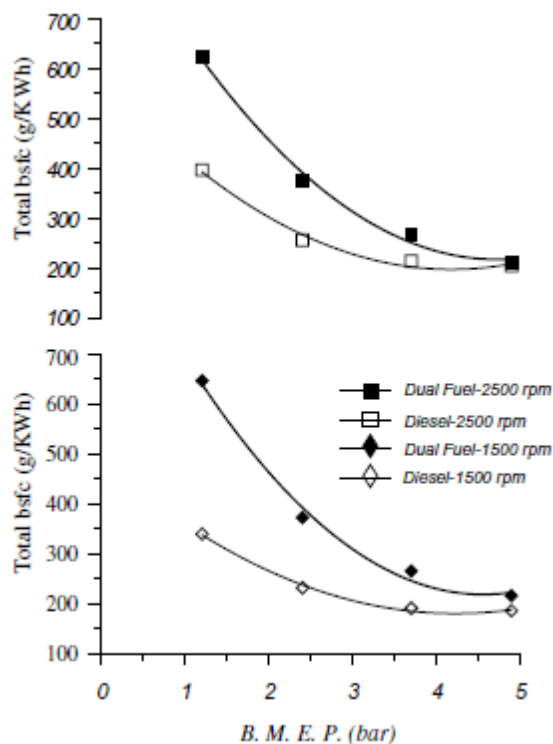
Παρακάτω παρουσιάζονται αποτελέσματα μελέτης τεχνικής μεικτής καύσης όπου πραγματοποιήθηκε σε μονοκύλινδρο κινητήρα πετρελαίου, ο οποίος μετατράπηκε σε κινητήρα μεικτής καύσης. Τα αποτελέσματα δίνονται σε διαφορετικές ταχύτητες του κινητήρα, ώστε να μπορέσουν να παρουσιάσουν αποτελεσματικά τις επιπτώσεις της μεικτής καύσης.

### **1) Πίεση κυλίνδρου και έκλυση θερμότητας (σύγκριση με καύση μόνο πετρελαίου)**

Σε μερικό φορτίο, η παρουσία Φ.Α. επηρεάζει την πίεση κυλίνδρου. Παρατηρείται μικρότερη πίεση κυλίνδρου σε σχέση με καύση μόνο πετρελαίου, λόγω της υψηλότερης ειδικής θερμικής χωρητικότητας του μείγματος αέρα-Φ.Α. Στα αρχικά στάδια της καύσης, παρατηρείται μικρότερη πίεση λόγω του χαμηλότερου ρυθμού καύσης του Φ.Α. σε σχέση με το πετρέλαιο. Διαφορά παρατηρείται σε αργές ταχύτητες όπου η διάρκεια της καύσης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με μεγαλύτερες ταχύτητες, όπου η μηχανή είναι πιο ζεστή και υπάρχει γρηγορότερη διάδοση της φλόγας. Ο ολικός βαθμός έκλυσης θερμότητας είναι λίγο υψηλότερος σε σχέση με πετρέλαιο. Σε υψηλό φορτίο η πίεση διαφέρει σε σχέση με καύση μόνο πετρελαίου στα στάδια της συμπίεσης και στα αρχικά στάδια της καύσης. Αυτή η διαφορά είναι πιο εμφανής σε μικρές ταχύτητες όπου ο ρυθμός καύσης είναι μικρότερος. Στη δεύτερη φάση της καύσης (διάχυση φλόγας) ο ολικός βαθμός διάδοσης θερμότητας είναι αρκετά υψηλότερος. Το φαινόμενο είναι εντονότερο σε χαμηλές ταχύτητες. Η διάρκεια καύσης είναι μεγαλύτερη. Με αύξηση του φορτίου η διαφορά αυτή μικραίνει έως ότου μπορεί και να γίνει και μικρότερη. Η μέγιστη πίεση κυλίνδρου είναι μικρότερη σε όλες τις περιπτώσεις.

### **2) Ειδική κατανάλωση καυσίμου (BSFC)**

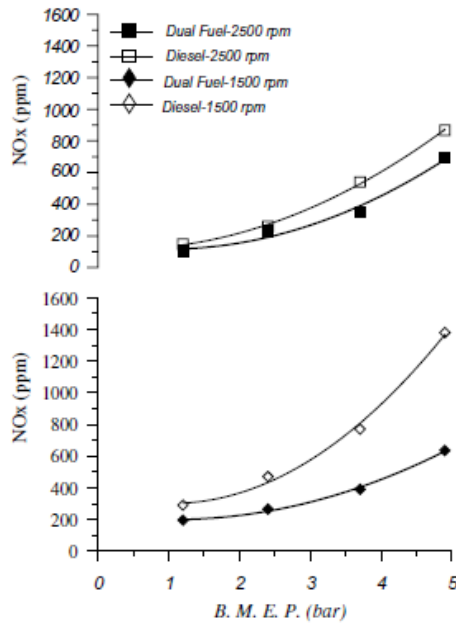
Σε χαμηλό φορτίο η κατανάλωση αυτή είναι υψηλότερη. Αυτό δείχνει όχι καλή εκμετάλλευση του Φ.Α. λόγω κυρίως της χαμηλότερης θερμοκρασίας καύσης και του λόγου αέρα-καύσης, έχοντας ως αποτέλεσμα πιο αργή καύση. Σε υψηλό φορτίο η καλύτερη αξιοποίηση του Φ.Α. οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης αυτής, σε επίπεδα που είναι πιο κοντά πλέον στις τιμές εκείνες της καύσης μόνο πετρελαίου ( ακόμα υψηλότερες όμως). Πρέπει να τονισθεί ότι η θερμαντική ικανότητα του Φ.Α. είναι υψηλότερη αυτής του πετρελαίου.



Σχήμα 1 Ειδική κατανάλωση καυσίμου (27)

### 3) Εκπομπές οξειδίου του αζώτου NOx

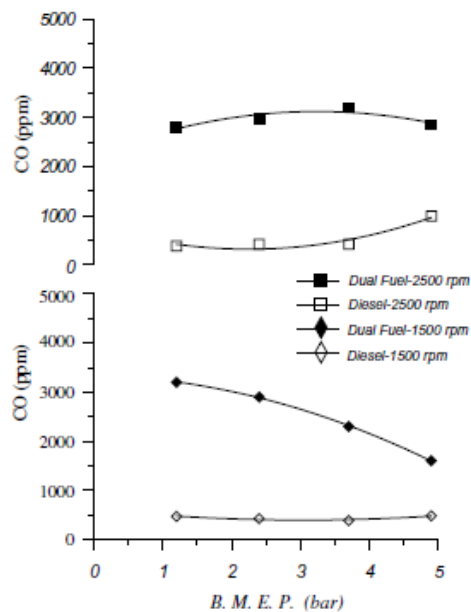
Σε ίδιες συνθήκες μεικτής καύσης με καύση μόνο πετρελαίου στον ίδιο κινητήρα, στη μεικτή καύση τα NOx που εκπέμπονται είναι λιγότερα. Σε χαμηλό φορτίο τα NOx είναι ελαφρώς λιγότερα, σαν συνέπεια κυρίως του μικρότερου βαθμού προ αναμειγμένης ελεγχόμενης καύσης το οποίο έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης. Σε υψηλό φορτίο, τα NOx είναι εμφανώς μικρότερα με εξήγηση τη λιγότερο έντονη προ αναμειγμένη καύση, τη χαμηλότερη θερμοκρασία λόγω υψηλού ποσοστού Φ.Α. και τη μικρότερη ποσότητα οξυγόνου λόγω αντικατάστασης με Φ.Α. . Γενικά, αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, οδηγεί σε περεταίρω μείωση των εκπομπών NOx .



Σχήμα 2 Εκπομπές οξειδίου του αζώτου (27)

#### 4) Εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα CO

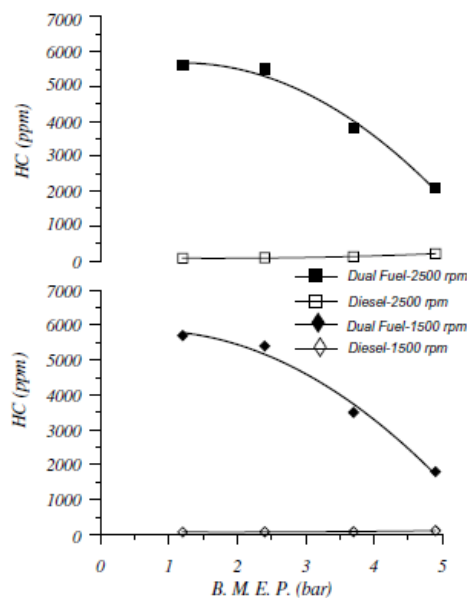
Γενικά στη μεικτή καύση οι εκπομπές CO είναι αρκετά υψηλότερες. Σε χαμηλές στροφές οι εκπομπές αυτές μειώνονται εμφανώς καθώς αυξάνεται το φορτίο, ως αποτέλεσμα της καλύτερης εκμετάλλευσης του αερίου καυσίμου, ειδικά στη δεύτερη φάση της καύσης. Σε υψηλές στροφές, η αύξηση του φορτίου δεν επηρεάζει τις εκπομπές CO, πιθανόν λόγω του λιγότερου χρόνου καύσης.



Σχήμα 3 Εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα CO (27)

## 5) Εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων ( HC )

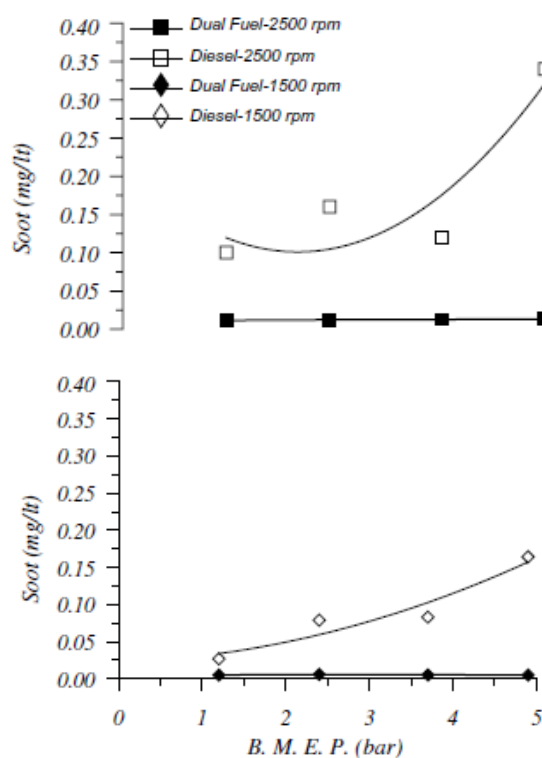
Σε χαμηλό φορτίο, οι εκπομπές HC είναι εμφανώς υψηλότερες, λόγω του ότι έχουμε χαμηλότερες θερμοκρασίες και λόγω αέρα-καύσης με αποτέλεσμα πιο αργή καύση και την διαφυγή μικρών ποσοτήτων καυσίμου από τη διαδικασία καύσης. Με αύξηση του φορτίου παρατηρείται απότομη μείωση των εκπομπών HC, σαν αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας καύσης Φ.Α. η οποία βοηθάει στην αποδοτικότερη οξείδωση των HC. Γενικά σε όλες τις περιπτώσεις οι εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων είναι αισθητά υψηλότερες σε σχέση με καύση μόνο πετρελαίου.



Σχήμα 4 Εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων ( HC ) (27)

## 6) Εκπομπές αιθάλης (soot)

Σε λειτουργία μόνο με πετρέλαιο, οι εκπομπές αιθάλης αυξάνουν καθώς αυξάνει το φορτίο. Σε λειτουργία μεικτής καύσης παρατηρείται ακριβώς το αντίθετο. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η αύξηση του φορτίου συνδέεται με αύξηση του ποσού του Φ.Α. το οποίο δεν δημιουργεί αιθάλη, ενώ ταυτόχρονα η αύξηση της θερμοκρασίας συμβάλλει στην οξείδωσή του. Οπότε η μεικτή καύση είναι πολύ αποδοτική στη μείωση των εκπομπών αιθάλης σε όλες σχεδόν τις συνθήκες. **(27)**



Σχήμα 5 Εκπομπές αιθάλης (soot) (27)

### 1.10 Ασφάλεια και θέματα ταξινόμησης

Το παρακάτω θέμα καταρτίστηκε από την CIMAC WG 2 και σύμφωνα με τους κανονισμούς της IMO. Η κυρίαρχη φιλοσοφία για τα πλοία που λειτουργούν με αέριο είναι η αποφυγή του κινδύνου έκρηξης καθώς και η διατήρηση του πλοίου σε λειτουργία. Δηλαδή πλεονασμός ισχύος πρόωσης σε περίπτωση διακοπής του συστήματος παροχής αερίου (λόγω διαρροής ή για άλλους λόγους). Απαιτούνται ανιχνευτές για φαινόμενα όπως misfiring/ knocking , ώστε να λειτουργεί ο κινητήρας σε ασφαλή κατάσταση. Τα ακόλουθα βασικά σημεία πρέπει να αντιμετωπιστούν προσεκτικά κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του μηχανοστασίου και της εγκατάστασης κινητήρων διπλού καυσίμου, ώστε να παρέχεται ασφάλεια κατά τη λειτουργία με φυσικό αέριο.

- **Πρόληψη για έκρηξη και εξαερισμός δωματίων**

Είναι ένα βασικό θέμα σε όλους τους κανονισμούς ασφαλείας, οι οποίοι θέτουν ορισμένες απαιτήσεις στον εξαερισμό, όπως τον αριθμό των αλλαγών του αέρα ανά ώρα, καθώς και τον αριθμό και την τοποθεσία των ανιχνευτών αερίου στο δωμάτιο του κινητήρα, τη δεξαμενή, κτλ. Οι κινητήρες θα πρέπει να έχουν σωληνώσεις με διπλά τοιχώματα, και εξαερισμό μεταξύ αυτών, καθώς και ανιχνευτές αερίου. Εναλλακτικά ο χώρος αυτός ( μεταξύ των διπλών σωληνών) μπορεί να συμπιεστεί με άζωτο και να ελέγχεται με σένσορες πίεσης. Αυτό επιτρέπει σε άλλα στοιχεία του εξοπλισμού μέσα στο μηχανοστάσιο να έχουν πιο συμβατικό σχεδιασμό.

Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι η τοποθέτηση των κινητήρων σε ξεχωριστά δωμάτια, το καθένα από τα οποία έχει τη δική του παροχή αερίου, τον δικό του απαιτούμενο εξαερισμό, προστατεύεται με ανιχνευτές αερίου και έχει τους δικούς του αγωγούς για εξισορρόπηση πίεσης ( pressure relief) . Αυτό απαιτεί την εγκατάσταση δύο ή περισσότερων κινητήρων κατά προτίμηση με ηλεκτρική μετάδοση. Ο εξοπλισμός στο μηχανοστάσιο μπορεί επίσης να είναι συμβατικού σχεδιασμού. Σε περίπτωση διαρροής αερίου εντός ενός αεροστεγούς θαλάμου κινητήρα, ο πλήρης χώρος, εκτός του ειδικού εξοπλισμού ( που έχει πιστοποιηθεί με EX), στη συνέχεια απενεργοποιείται και εξαερίζεται με τον αέρα να οδηγείται σε ασφαλή χώρο. Κάθε τέτοιο δωμάτιο, θεωρείται ως μηχανοστάσιο "έκτακτης διακοπής (ESD) -προστατευμένο" ή "ασφαλές".

- **Χρήση EX-proof ηλεκτρονικού εξοπλισμού.**

Αυτό είναι άλλο ένα από τα θέματα που συνήθως αντιμετωπίζονται στους ισχύοντες κανόνες, και το οποίο επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον εξαερισμό του μηχανοστασίου και από τις απαιτήσεις αισθητήρων αερίου όπως περιγράφεται πριν. Απαιτήσεις όπως τα όρια θερμοκρασίας επιφανειών, απαιτήσεις εξαερισμού του στροφαλοθαλάμου, κ.ά, έχουν ήδη εφαρμοστεί στους γενικούς κανόνες των κινητήρων.

- Σχεδιασμός κατάλληλου συστήματος εξαερισμού και συστήματος έκτακτης ανάγκης
- Κατάλληλα μέτρα πυρόσβεσης και μέτρα ασφαλείας της ανθρώπινης ζωής
- Διαθεσιμότητα τουλάχιστον δύο διαφορετικών (κατά προτίμηση αντίθετων) εξόδων κινδύνου από περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ως περιοχές LNG.
- Ίδρυση και συνεχής παρακολούθηση της "Ζώνης Ασφαλείας" κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων ανεφοδιασμού LNG. **(12)**

### **1.11 Retrofit**

Retrofit είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα πλοίο που λειτουργεί με έναν κινητήρα πετρελαίου κάνει τις απαραίτητες ενέργειες όπως μετατροπές του κινητήρα, και προσθήκη επιπλέον εξαρτημάτων ώστε να μπορεί να λειτουργεί με φυσικό αέριο ως κύριο καύσιμο. Οι αλλαγές που πρέπει να γίνουν στον κινητήρα εξαρτώνται από το είδος του κινητήρα που είναι ήδη σε λειτουργία. Υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη σε κάθε πλοίο που κάνει retrofit, και αφορούν τα συστήματα αποθήκευσης και χρήσης του υγροποιημένου φυσικού αερίου. Αυτοί οι παράγοντες είναι οι ακόλουθοι:

- Πρέπει να δοθεί προσοχή στο μέρος όπου θα τοποθετηθούν οι δεξαμενές LNG.
- Οι δεξαμενές πρέπει να τοποθετηθούν με σεβασμό στους τρέχοντες, αλλά και στους μελλοντικούς κανονισμούς
- Οι δεξαμενές οι οποίες βρίσκονται στο κατάστρωμα, συνήθως χρειάζονται ένα πλήρως κλειστό προστατευτικό κάλυμμα από ατσάλι, το οποίο να τις



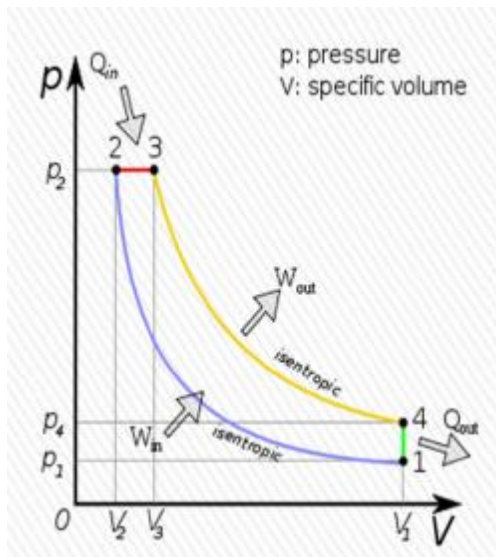
προστατεύει από τυχόν πτώση κιβωτίων. Κιβώτια μπορούν να τοποθετηθούν και πάνω και δίπλα στο κάλυμμα αυτό.

- Το δωμάτιο της δεξαμενής πρέπει να έχει επαρκή χώρο για να γίνονται οι απαραίτητοι έλεγχοι
- Εγκατάσταση σωλήνων διπλού τοιχώματος με κενό αέρος
- Σταθμό ανεφοδιασμού με βαλβίδες και συνδέσεις με την ακτή
- Ειδικοί υπολογισμοί σταθερότητας του πλοίου πρέπει να πραγματοποιηθούν, λόγω του ότι με την αντικατάσταση των δεξαμενών HFO με το σύστημα LNG, μπορεί να υπάρξει αλλαγή στο κέντρο βάρους του πλοίου. **(18)**

## 2 Σύστημα υψηλής πίεσης (stoichiometric)

### 2.1 Κύκλος Diesel

Όπως προαναφέραμε, οι κινητήρες υψηλής πίεσης λειτουργούν σύμφωνα με τον κύκλο Diesel. Παρακάτω δίνεται το θερμοδυναμικό διάγραμμα πίεσης-ειδικού όγκου του κύκλου αυτού:



Σχήμα 6 Κύκλος Diesel

Η διεργασία 1-2 είναι ισηντροπική συμπίεση του υγρού. Η διαδικασία 2-3 είναι αναστρέψιμη θέρμανση, με σταθερή πίεση. Η διαδικασία 3-4 είναι ισηντροπική εκτόνωση, ενώ η 4-1 αναστρέψιμη ψύξη με σταθερό όγκο. Η μηχανή εσωτερικής καύσης πετρελαίου, διαφέρει από τον κύκλο Otto στην χρήση μεγαλύτερου βαθμού συμπίεσης, ώστε το καύσιμο να αυτανάφλεγεί, χωρίς να χρησιμοποιήσει πιλοτικό καύσιμο. Στον κύκλο Diesel, ο αέρας συμπιέζεται αδιαβατικά, με λόγο συμπίεσης ανάμεσα στο 15 με 20. Αυτή η συμπίεση, αυξάνει τη θερμοκρασία του μίγματος ( το οποίο σχηματίζεται με έγχυση καυσίμου όταν ο αέρας έχει συμπιεστεί), στη θερμοκρασία ανάφλεξής του. Η μηχανή μεικτής καύσης, με τη χρήση της έγχυσης αερίου υψηλής πίεσης, επιτρέπει να διατηρηθούν τα πολυάριθμα θετικά χαρακτηριστικά των αρχικών μηχανών πετρελαίου χαμηλής ταχύτητας.

## 2.2 Χαρακτηριστικά κινητήρων

Τα κύρια χαρακτηριστικά των κινητήρων υψηλής πίεσης είναι τα ακόλουθα:

- Λειτουργεί σύμφωνα με τη διαδικασία Diesel. Το σύστημα έγχυσης φυσικού αερίου υψηλής πίεσης λειτουργεί με την ίδια αρχή με έναν κανονικό κινητήρα ντίζελ, με το πετρέλαιο να αντικαθίσταται από φυσικό αέριο.
- Τεχνολογία καύσης με ελεγχόμενη διάχυση. Η ανάφλεξη του μίγματος αέρα-καυσίμου, οφείλεται στην αυτανάφλεξη του πιλοτικού καυσίμου HFO, το οποίο εγχύεται μαζί με το LNG, κοντά στο άνω νεκρό σημείο.
- Η αναγκαία ποσότητα πιλοτικού καυσίμου είναι περίπου 3-5% επί της συνολικής ποσότητας του καυσίμου.
- Η καύση με ελεγχόμενη διάχυση οδηγεί σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα :
  - Αυξημένες εκπομπές NO<sub>x</sub>, με συνέπεια τη χρήση EGR ή SCR ώστε να ικανοποιούνται τα επίπεδα IMO Tier III.
  - Χαμηλές εκπομπές μεθανίου και σωματιδίων (PM )
- Η θερμική απόδοση διατηρείται όπως η λειτουργία με HFO και η λειτουργία είναι σε μεγάλο βαθμό ανεπηρέαστη από την ποιότητα του φυσικού αερίου.
- Κατά τη διαδικασία συμπίεσης, ο αέρας είναι πλήρως συμπιεσμένος, οπότε απαιτείται παροχή αερίου υψηλής πίεσης ( 300 bar).
- Επειδή η καύση είναι τύπου διάχυσης και όχι προανεμειγμένη, προβλήματα όπως κρουστική καύση και προβλήματα με το λόγο αέρα-καυσίμου σε μερικό φορτίο, έχουν εξαλειφθεί.
- Το σύστημα μπορεί να λειτουργεί 100% συνεχόμενα με CNG, HFO αλλά και MDO.
- Το σύστημα απαιτεί τροφοδοσία αερίου υψηλής πίεσης (250 έως 350 bar). Τα ειδικά συστήματα παροχής φυσικού αερίου που προσφέρονται βασίζονται σε:
  - Συμπιεστές αερίου
  - Σύστημα αντλίας κρυογενικού τύπου **(25)**

## 2.3 Λειτουργία κινητήρα

Ο δίχρονος κινητήρας υψηλής πίεσης μπορεί να λειτουργήσει με διαφορετικά καύσιμα χωρίς να αλλάξει ο θερμικός βαθμός απόδοσης. Υπάρχουν τρία είδη λειτουργίας του κινητήρα:

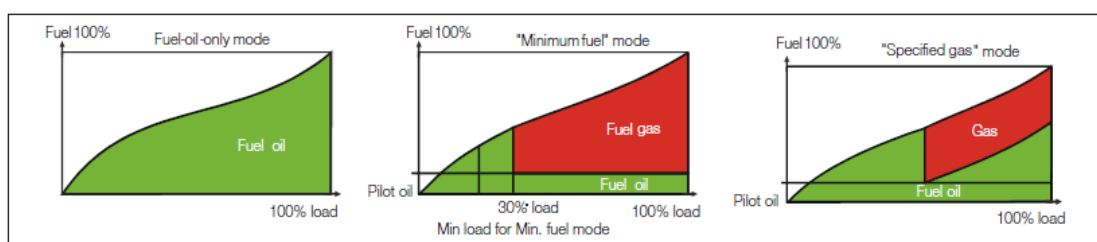
- Fuel oil only mode
- Minimum fuel mode
- Mixed gas mode

Fuel only mode: Ο κινητήρας όταν λειτουργεί σε αυτή τη λειτουργία καταναλώνει μόνο πετρέλαιο. Σε περίπτωση βλάβης του συστήματος αερίου, κλείνει τελείως η παροχή του αερίου και τότε λειτουργεί μόνο με πετρέλαιο.

Minimum fuel mode: Σε αυτήν την λειτουργία καταναλώνεται και αέριο και πετρέλαιο. Μπορεί να υπάρξει οποιαδήποτε αναλογία μεταξύ των δύο καυσίμων αλλά με συγκεκριμένη ελάχιστη ποσότητα πετρελαίου. Η ελάχιστη ποσότητα πιλοτικού καυσίμου κυμαίνεται μεταξύ 5-8% και είναι ανάλογη της ποιότητάς του. Σαν πιλοτικό καύσιμο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και HFO και MDO. Κάτω από το 30% του φορτίου δεν μπορεί να εγγυηθεί σταθερή καύση του μίγματος οπότε ο κινητήρας αλλάζει σε λειτουργία μόνο υγρού καυσίμου.

Mixed gas mode : Στην μηχανή εισάγεται οποιαδήποτε επιθυμητή ποσότητα αερίου καυσίμου, και στη συνέχεια το σύστημα ελέγχου του κινητήρα προσθέτει την απαραίτητη ποσότητα πετρελαίου μέχρι να φτάσει στο επιθυμητό φορτίο.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι τρεις λειτουργίες, σαν συνάρτηση καυσίμου με φορτίο του κινητήρα (επί τοις εκατό)



Σχήμα 7 Λειτουργίες κινητήρα (stoichiometric) (5)

Με έγχυση αερίου καυσίμου σε υψηλή πίεση, ο κινητήρας διατηρεί την υψηλή αποδοτικότητα της διαδικασίας των κινητήρων diesel. Το σύστημα έγχυσης αερίου καυσίμου, εισάγει αέριο σε πίεση 300 bar μέσα στον κύλινδρο, αφού το πιλοτικό καύσιμο έχει αρχίσει να καίγεται. Η υψηλή πίεση έγχυσης υπερνικά την πίεση στον κύλινδρο. Τα πλεονεκτήματα των δίχρονων μηχανών υψηλής πίεσης, έχουν αντίκτυπο στην οικονομία καυσίμου. (5)

## 2.4 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα

Κάποια από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής υψηλής πίεσης σε δίχρονους κινητήρες μεικτής καύσης παρατίθενται παρακάτω:

- Η διαδικασία της καύσης diesel μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως, και οι γενικές αρχές για τους δίχρονους κινητήρες παραμένουν αμετάβλητες.
- Το αέριο καύσιμο εισέρχεται στον κύλινδρο, όταν η καύση έχει αρχίσει ήδη. Έτσι σπρέι αερίου καυσίμου καίγεται και δημιουργεί διάχυση καύσης. Αυτό εξαλείφει τον κίνδυνο για φαινόμενα όπως knocking ή misfiring, με μια σταθερή καύση χωρίς διακυμάνσεις πίεσης.

- Χάρη στην υψηλή αναλογία συμπίεσης-διαστολής, μπορεί να υπάρξει η ίδια θερμική αποδοτικότητα όπως με καύση μόνο μαζούτ ( HFO ).
- Βελτιωμένη κατανάλωση SFOC με χρήση CNG σε σχέση με καύση μόνο diesel
- Χαμηλότερες εκπομπές NOx ( περίπου κατά 30% ) χάρη στη χαμηλότερη θερμοκρασία της φλόγας
- Σε αντίθεση με άλλους κινητήρες διπλού καυσίμου ( dual fuel ), δεν υπάρχει περιορισμός στην ποιότητα του φυσικού αερίου, εκτός του ότι δεν μπορεί να συμπυκνωθεί
- Έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης από οποιοδήποτε σύστημα πρόωσης με χρήση LNG
- Μπορεί να λειτουργήσει με HFO/GO/DO και φυσικό αέριο, με οποιαδήποτε αναλογία καυσίμων εφόσον υπάρχει πιλοτικό καύσιμο
- Δεν υπάρχει μέγιστο όριο στην περιεκτικότητα του καυσίμου σε υδρογόνο
- Υπάρχει η δυνατότητα να γίνει retrofit σε ήδη υπάρχοντες κινητήρες
- Μειώνονται οι εκπομπές NOx, CO<sub>2</sub>, Sox, PM
- Μπορεί να λειτουργήσει σε συνδυασμό με σύστημα ανάκτησης θερμότητας αποβλήτων

Επίσης αναφέρονται τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των κινητήρων αυτών:

- Για να ικανοποιεί τις προδιαγραφές του IMO Tier III, πρέπει να κάνει χρήση επανακυκλοφορίας καυσαερίων EGR ή καταλύτη SCR
- Το ποσό του πιλοτικού καυσίμου, είναι ουσιαστικά υψηλότερο από ενός κινητήρα χαμηλής πίεσης διπλού καυσίμου
- Σε χειρισμούς όπως μανούβρες και στο ρελαντί, το ποσό του πιλοτικού καυσίμου πρέπει να παρέχει το 100% της ενέργειας που απαιτείται, οπότε έχουμε ίδιες εκπομπές με καύση μόνο πετρελαίου
- Το σύστημα αποθήκευσης του LNG είναι ίδιο είτε σε κινητήρες υψηλής, είτε σε χαμηλής πίεσης. Ο χειρισμός όμως του αερίου και το σύστημα ασφαλείας πρέπει να σχεδιαστούν για υψηλής πίεσης ( 300 bar ) το οποίο οδηγεί σε διαφορές στον όγκο των εγκαταστάσεων και στα μέτρα ασφαλείας. Αυτό σημαίνει υψηλότερες δαπάνες (CAPEX).

## **2.5 Σύγκριση κινητήρα διπλού καυσίμου σε σχέση με τον αρχικό πετρελαίου**

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές ομοιότητες και διαφορές ενός κινητήρα διπλού καυσίμου σε σύγκριση με τον βασικό κινητήρα πετρελαίου.

Ομοιότητες:

- Αποδεδειγμένη ισχύς
- Καλή ειδική κατανάλωση καυσίμου ( SFOC ) στο μερικό φορτίο
- Καλή απόκριση του κινητήρα
- Κανένα πρόβλημα με την ποιότητα του καυσίμου ( ανεξάρτητο με Methane Number)

- Δεν παρατηρούνται προβλήματα όπως knocking ή misfiring
- Απλό σύστημα λίπανσης κυλίνδρων, και γνωστοί τύποι λιπαντικών

Διαφορές:

- Τα επίπεδα εκπομπών οξειδίων του αζώτου NOx μειώνονται στο 25%
- Το SFOC σε συμμόρφωση με IMO TIER II βελτιώνεται κατά 1-3%
- Σχεδόν μηδενικές εκπομπές σωματιδίων ( particulate matter PM )
- 20% μειωμένες εκπομπές αερίων υπεύθυνων για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, λόγω της αναλογίας H/C του μεθανίου (3)

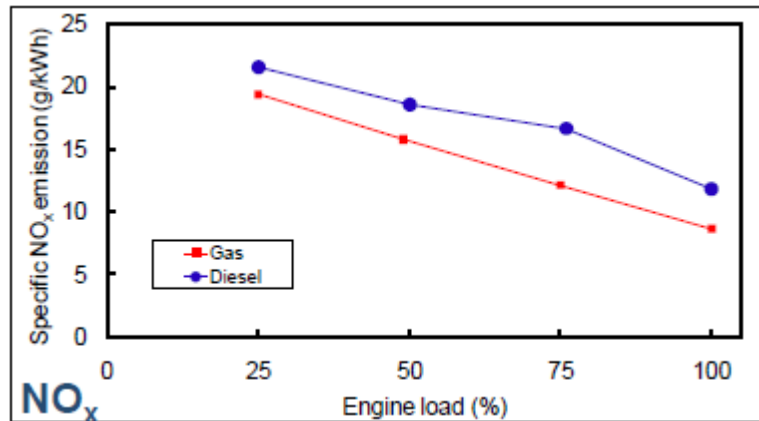
## 2.6 Εκπομπές

Στο παρακάτω πίνακάκι παρατηρούμε την μείωση των πιο βασικών ρυπαντών που περιέχονται στα καυσαέρια του κινητήρα. Στην πρώτη στήλη παρατηρούμε την μείωσή τους σε λειτουργία μεικτής καύσης, σε σχέση με τον κλασικό κινητήρα diesel. Όπως προαναφέραμε, οι κινητήρες αυτοί, χρειάζονται επεξεργασία καυσαερίων ( όπως EGR, WHR ) για να τηρούν τους κανονισμούς για τις εκπομπές. Στη δεύτερη στήλη φαίνεται η μείωση των εκπομπών (σε σχέση με τον κινητήρα diesel) με χρήση WHR ενώ στην τρίτη στήλη με χρήση WHR και EGR. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε πόσο ευεργετική είναι η χρήση της τεχνολογίας WHR στην μείωση του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η χρήση της τεχνολογίας EGR στη μείωση των οξειδίων του αζώτου NOx και των σωματιδίων PM.

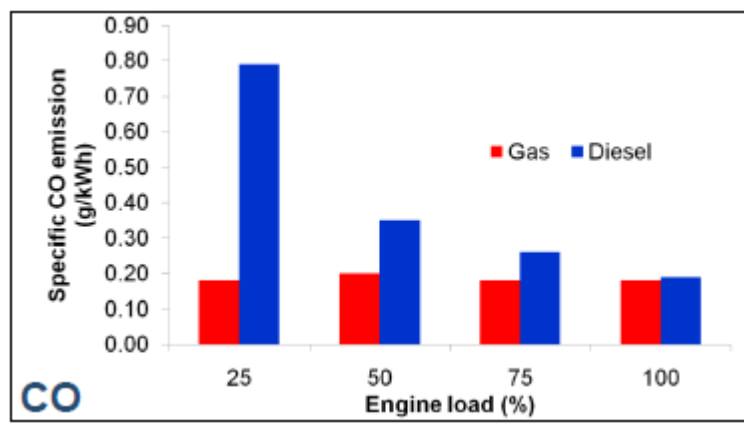
	Reduction with ME-GI	Reduction with ME-GI + WHR	Reduction with ME-GI + WHR+EGR
CO <sub>2</sub> (gram per tonne mile)	23%	35%	33%
NO <sub>x</sub> (gram per tonne mile)	13%	13%	80%
SO <sub>x</sub> (gram per tonne mile)	95%	95%	97%
Particulate matter (mg per m <sup>3</sup> )	37%	37%	48%

Πίνακας 2 Εκπομπές (stoichiometric) (14)

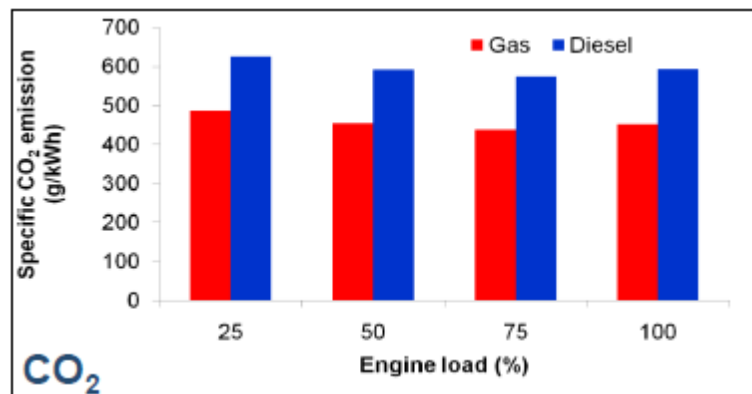
Πιο αναλυτικά μπορούμε να δούμε στα παρακάτω διαγράμματα τη μείωση των εκπομπών (σε σχέση με λειτουργία με πετρέλαιο) των βασικών ρυπαντών ( CO, CO<sub>2</sub>, NOx) σαν συνάρτηση του φορτίου του κινητήρα. (14)



Σχήμα 8 Εκπομπές NO<sub>x</sub> (stoichiometric) (14)



Σχήμα 9 Εκπομπές CO (stoichiometric) (14)



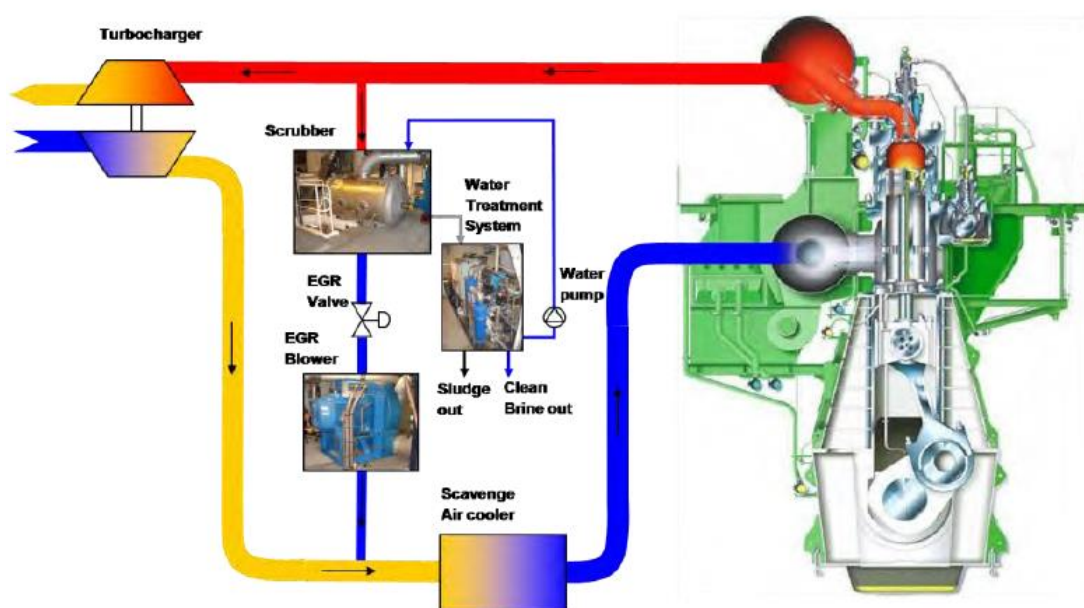
Σχήμα 10 Εκπομπές CO<sub>2</sub> (stoichiometric) (14)

## 2.7 Επεξεργασία καυσαερίων – EGR

Η δημιουργία οξειδίων του αζώτου NO<sub>x</sub>, εμφανίζεται από αντιδράσεις αζώτου και οξυγόνου στην καύση, κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι κινητήρες υψηλής πίεσης διατηρούν την υψηλή θερμοκρασία που απαιτείται για υψηλή απόδοση, οπότε έχουμε δημιουργία περισσότερων NO<sub>x</sub>. Το να μην υπάρχει επεξεργασία καυσαερίων, συνεπάγεται πιο επικίνδυνη διαδικασία καύσης, χαμηλότερη

απόδοση, υψηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου και περισσότερες διαρροές μεθανίου.

Η τεχνική ανακυκλοφορίας των καυσαερίων (exhaust gas recirculation) χρησιμοποιείται για την μείωση των οξειδίων του αζώτου (NOx) στα καυσαέρια. Ένα μέρος των καυσαερίων εισάγεται μέσα στον κύλινδρο και αντικαθιστά μια ποσότητα του εισερχόμενου αέρα με αποτέλεσμα μια ποσότητα οξυγόνου να αντικαθίσταται από διοξείδιο του άνθρακα. Το διοξείδιο του άνθρακα έχει μεγαλύτερη θερμική χωρητικότητα οπότε μειώνονται οι μέγιστες θερμοκρασίες καύσης. Το μειωμένο οξυγόνο μειώνει την ταχύτητα καύσης, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι μέγιστες θερμοκρασίες άρα και μειωμένες εκπομπές NOx. Επίσης αυξάνεται η αποδοτικότητα του κινητήρα, και μειώνεται η κατανάλωση. Παρακάτω φαίνεται η εγκατάσταση του EGR, καθώς και η ροή του αέρα εισαγωγής, αλλά και των καυσαερίων μέρος των οποίων εισάγεται ξανά στον κινητήρα. **(4)**



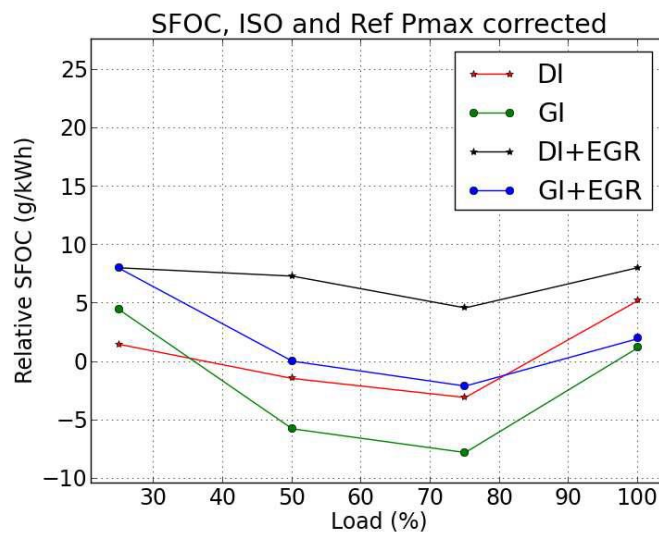
Εικόνα 3 EGR (3)

Ο κινητήρας 4T50ME-GI είναι ένας πειραματικός κινητήρας diesel υψηλής πίεσης, στον οποίο έγιναν τεστ με και χωρίς χρήση επανακυκλοφορίας καυσαερίων ( EGR ). Τα συμπεράσματα για χρήση EGR παρουσιάζονται παρακάτω:

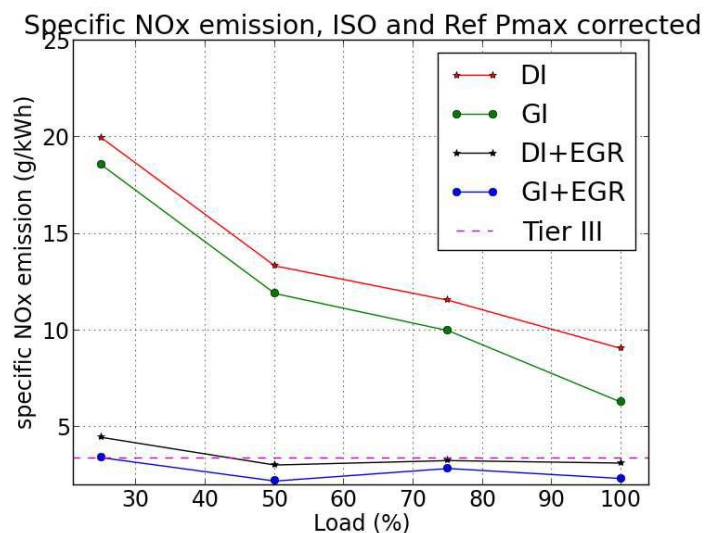
- Το EGR εγγυάται επίπεδα εκπομπών NOx εντός προδιαγραφών IMO Tier III και για κινητήρες που λειτουργούν με αέριο καύσιμο ( GI )
- Το EGR έχει τα ίδια αποτελέσματα και για κινητήρες GI και για DI
- Η αύξηση στην κατανάλωση SFOC με χρήση EGR είναι ίδια και για GI και για DI
- Για κινητήρες GI με χρήση EGR, οι εκπομπές NOx, CO και τα επίπεδα καπνού, είναι πολύ χαμηλά.



Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFOC) και για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου ανά μονάδα ενέργειας (NOx), συναρτήσει του φορτίου. Στο δεύτερο διάγραμμα φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή το όριο στις εκπομπές ώστε να τηρείται το TIER III. Όπου DI εννοείται η χρήση πετρελαίου (diesel injection), και όπου GI εννοείται χρήση φυσικού αερίου (gas injection). Από το πρώτο διάγραμμα παρατηρούμε ότι αυξάνεται η ειδική κατανάλωση με χρήση EGR στη λειτουργία DI, ενώ στη λειτουργία GI αυξάνεται για φορτίο μεγαλύτερο του 35%. Ακόμα παρατηρούμε ότι οι εκπομπές NOx μειώνονται με χρήση EGR, για λειτουργία και των δύο διαφορετικών καυσίμων. Επίσης στη λειτουργία GI, οι εκπομπές μετά τη χρήση EGR, μειώνονται κάτω από τα όρια TIER III. (3)



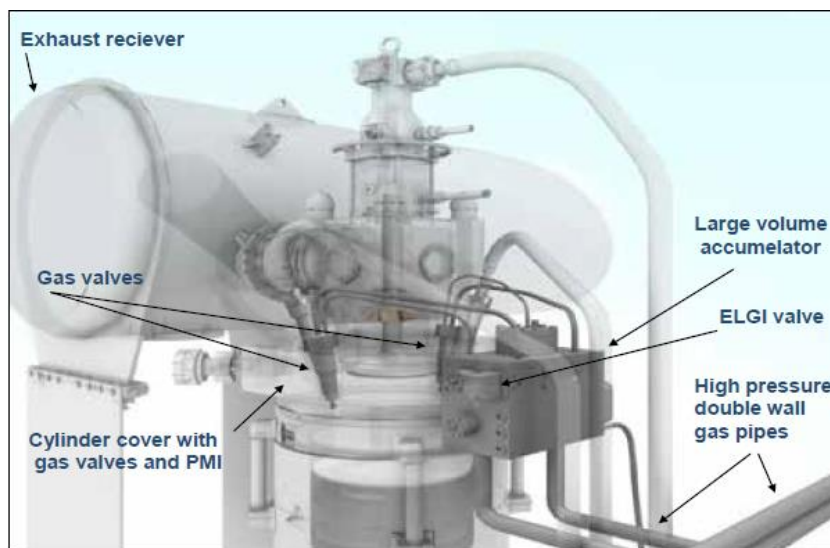
Σχήμα 11 Ειδική κατανάλωση (stoichiometric) (3)



Σχήμα 12 Εκπομπές NOx (stoichiometric) (3)

## 2.8 Μετατροπή κινητήρα

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους επιλέγονται κινητήρες υψηλής πίεσης. Από τεχνικής άποψης υπάρχει ελάχιστη διαφορά στους κινητήρες πετρελαίου και αυτούς φυσικού αερίου, αλλά οι κινητήρες τύπου GI παρέχουν τη βέλτιστη ευελιξία καυσίμου. Το επόμενο σχήμα δείχνει τα εξαρτήματα τα οποία πρέπει να τροποποιηθούν και να προστεθούν στον ήδη υπάρχων κινητήρα πετρελαίου, για να μπορέσει να λειτουργήσει με αέριο.



Εικόνα 4 Εξαρτήματα κινητήρα (stoichiometric) (15)

Η γραμμή παροχής φυσικού αερίου έχει σχεδιαστεί με αεριζόμενες σωληνώσεις διπλού τοιχώματος, συμπεριλαμβανομένων αισθητήρων για διακοπή σε περίπτωση ανάγκης. Για τον έλεγχο του κινητήρα με αέριο, το σύστημα ελέγχου και ασφαλείας GI, έχει ένα πρόσθετο σύστημα στο ήδη αξιόπιστο σύστημα. Εκτός από αυτά τα συστήματα στον κινητήρα, ο κινητήρας και τα βοηθητικά εξαρτήματα περιλαμβάνουν ορισμένες νέες μονάδες. Οι πιο σημαντικές παρατίθενται παρακάτω:

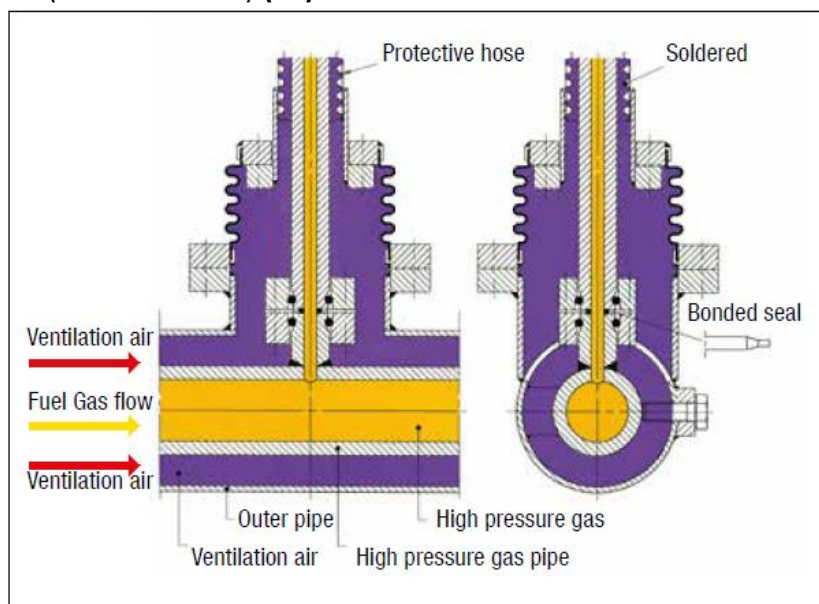
Αρχικά πρέπει τα μηχανικά και τα ηλεκτρικά εξαρτήματα για τη λειτουργία με φυσικό αέριο να εγκατασταθούν και να ενεργοποιηθεί το αντίστοιχο λογισμικό. Είναι σημαντικό στον σχεδιασμό να περιληφθούν οι σωληνώσεις, το περίβλημα και οι απαιτήσεις του συστήματος έγχυσης αερίου (GI), ώστε να μπορούν να εξεταστούν όλοι οι τρόποι σχεδιασμού του δωματίου του κινητήρα.

- Σχεδιασμός πλοίου: Για να σχεδιαστεί ένα πλοίο που λειτουργεί με φυσικό αέριο πρέπει ο μηχανικός να γνωρίζει όλο το βοηθητικό εξοπλισμό που απαιτείται για τη λειτουργία με φυσικό αέριο. Αυτό ξεκινά από το σταθμό ανεφοδιασμού LNG, και ακολουθεί όλη την διαδικασία για την εισαγωγή του φυσικού αερίου στον κινητήρα. Πρέπει επίσης να ικανοποιούνται οι σχετικοί κώδικες ασφαλείας της IMO για πλοία με αέρια και με άλλα καύσιμα. Στο

σχεδιασμό του πλοίου πρέπει να φαίνονται όλες οι επικίνδυνες περιοχές στο σκάφος.

- LNG bunker station : Στο σχεδιασμό του πλοίου πρέπει να ληφθεί υπόψη η θέση του σταθμού ανεφοδιασμού καυσίμων. Περεταίρω μπορεί να χρειαστεί να καθοριστούν λεπτομερώς οι σωληνώσεις, και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στο σταθμό. Κατά το σχεδιασμό του σταθμού, ένας σημαντικός παράγοντας είναι η χωρητικότητά του σε καύσιμο η οποία πρέπει να ταιριάζει με το πλοίο ανεφοδιασμού ( bunker barge ) και με το χρόνο που απαιτείται για να ανεφοδιαστεί με καύσιμο το πλοίο. Ακόμα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι πιέσεις στη δεξαμενή του πλοίου, και πώς αυτό θα επηρεάσει τη διαδικασία ανεφοδιασμού. Η χωρητικότητα σε καύσιμο του σταθμού, έχει συνέπεια στο είδος του ανεφοδιασμού που θα γίνει. Υπάρχουν δύο είδη ανεφοδιασμού, ανάλογα με την ταχύτητα που γίνεται.
- Δεξαμενές LNG: Δεδομένου ότι είναι το πιο ακριβό εξάρτημα στο πακέτο LNG, δεν αναμένεται ότι οι δεξαμενές θα τοποθετηθούν στο πλοίο, αλλά ότι το πλοίο θα σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι έτοιμο για την εγκατάστασή τους, συμπεριλαμβανομένου ενός σχεδίου εγκατάστασης για τοποθέτησή τους αργότερα. Οι δεξαμενές LNG, θα έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στο σχεδιασμό του πλοίου, και θα απαιτεί λεπτομερή έρευνα ως προς το μέγεθος, τη ρύθμιση και τη θέση τους σε αυτό το πρώιμο στάδιο. Αυτός είναι ίσως ο πιο δύσκολος παράγοντας που πρέπει να εκτιμηθεί ώστε το πλοίο να είναι έτοιμο να λειτουργήσει με φυσικό αέριο, καθώς πρέπει να γνωρίζεται η διαδρομή του πλοίου για τα επόμενα 5-10 χρόνια. Εάν το πλοίο κινείται πρωτίστως εκτός περιοχών ECA, τότε το μέγεθος των δεξαμενών πρέπει να υπολογιστεί βάσει αυτού. Μια βασική παράμετρος για την επιλογή των δεξαμενών, είναι ο αναμενόμενος χρόνος παραμονής. Αυτό θα επηρεάσει τόσο την τιμή, όσο και το μέγεθος της δεξαμενής LNG σημαντικά ανάλογα με τις απαιτήσεις. Μόλις η χωρητικότητα και ο τύπος δεξαμενών έχουν προσδιοριστεί, πρέπει να αναλυθεί ο χώρος όπου θα τοποθετηθούν. Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση, οι ακόλουθοι παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη:
  - Ο χώρος που απαιτείται για τις δεξαμενές
  - Ο χώρος για τον εξοπλισμό του LNG
  - Ο χώρος για τις σωληνώσεις και τις καλωδιώσεις
  - Σκάλες και άλλα εξαρτήματα για τις δεξαμενές
  - Βάσεις για το σύστημα των σωλήνων του LNG
  - Διάφορα εξαρτήματα για περίπτωση πυρκαγιάςΕπίσης πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιες απαιτήσεις για τις δεξαμενές όπως:
  - Βαλβίδες ασφαλείας
  - Ένα είδος συναγερμού για μέγιστη πίεση
  - Μετρήσεις για το επίπεδο της στάθμης, την θερμοκρασία, και την πίεση
  - Βάσεις για την αντλία
  - Πρόσβαση στη δεξαμενή

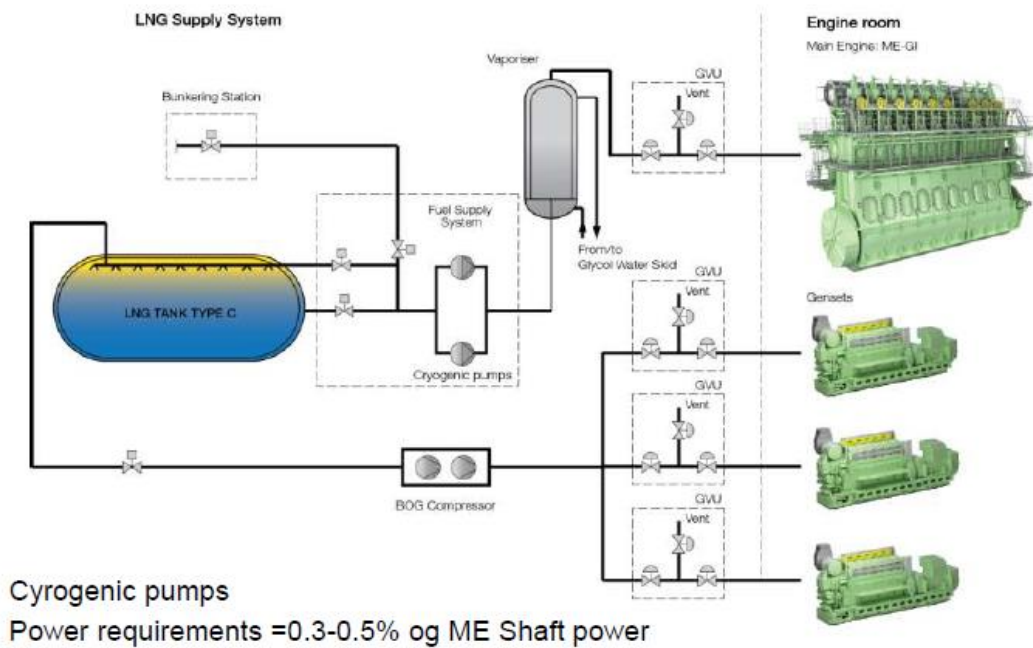
- Inert gas system: Το inert gas είναι ένα αέριο, με ποσοστό οξυγόνου μικρότερο από 8%, που χρησιμοποιείται ώστε να καταστέλλεται η καύση, ώστε να γίνεται καύση μόνο σε επιθυμητά όρια. Ψεκάζεται μέσα στο μείγμα με το καύσιμο. Κάποια πλοία ίσως έχουν ήδη, οπότε πρέπει απλά να ενσωματώσουν τον πρόσθετο όγκο που απαιτείται για την μεικτή καύση.
- Σύστημα λαδιού μόνωσης, το οποίο παραδίδει λάδι στις βαλβίδες αερίου. Το σύστημα αυτό είναι πλήρως ολοκληρωμένο στον κινητήρα, και το ναυπηγείο δεν χρειάζεται πλέον να λαμβάνει υπόψιν αυτήν την εγκατάσταση.
- Σωληνώσεις: Η “διαδρομή” που θα ακολουθήσουν οι σωληνώσεις, συνίσταται να ξεκινάει από το σταθμό ανεφοδιασμού, ύστερα να περνάει από τις δεξαμενές του LNG, στη συνέχεια από το σύστημα παροχής καυσίμου (FGS ) και τέλος να καταλήγει στον κινητήρα. Αναλόγως το μέρος όπου θα τοποθετηθούν, επιλέγονται και οι κατάλληλοι σωλήνες:
  - Σωλήνες μονού τοιχώματος: Όλοι οι σωλήνες σε εξωτερικούς χώρους, στο κατάστρωμα, σε δωμάτια που έχουν χαρακτηριστεί ως επικίνδυνες περιοχές μπορούν να είναι μονού τοιχώματος. Πρέπει να ληφθούν υπόψη επιτρεπτές πτώσεις πίεσης από το σύστημα παροχής καυσίμου FGS, που επηρεάζουν τη διάμετρο του κινητήρα. Επιτρέπεται πτώση πίεσης κάτω από 5 bar στο σύνολο.
  - Σωλήνες διπλού τοιχώματος: Όταν οι σωλήνες βρίσκονται σε κλειστούς χώρους, τότε πρέπει να έχουν διπλά τοιχώματα. Ο σχεδιασμός τους είναι πιο περίπλοκος, διότι πρέπει να ληφθούν υπόψη πιέσεις και δονήσεις και για τον εσωτερικό αλλά και για τον εξωτερικό σωλήνα, και ταυτόχρονα τα στηρίγματά τους αν θα είναι εύκαμπτα ή σταθερά. Παρακάτω φαίνεται ο σωλήνας διπλού τοιχώματος σε δύο τομές. Με κίτρινο βέλος φαίνεται η ροή του αερίου ( fuel gas flow), ενώ με κόκκινο η ροή του αέρα εξαερισμού των σωλήνων ( ventilation air).(15)



Εικόνα 5 Σωλήνας διπλού τοιχώματος (15)

## 2.9 Σύστημα παροχής LNG

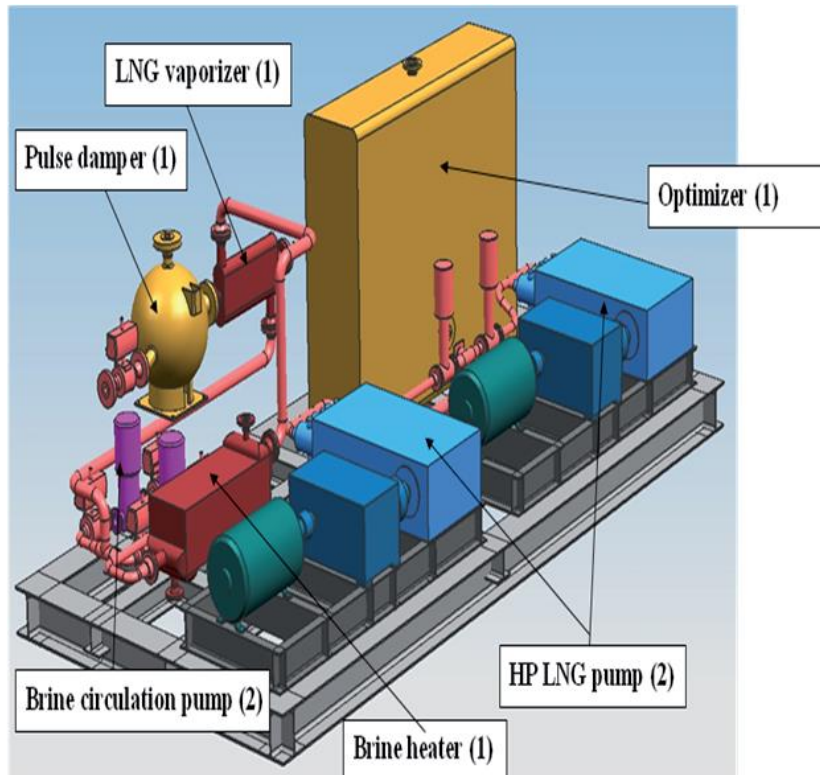
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το σύστημα παροχής LNG



Εικόνα 6 Σύστημα παροχής LNG (stoichiometric) (3)

Όπως φαίνεται από το σχήμα, το υγροποιημένο φυσικό αέριο, που προμηθεύεται από το σταθμό ανεφοδιασμού, αποθηκεύεται στη δεξαμενή LNG. Από αυτήν παίρνεται το NBOG, το οποίο αφού συμπιεστεί οδηγείται στους κινητήρες. Επίσης αναρροφάται από τη δεξαμενή και το LNG μέσω κρυογενικού τύπου αντλιών, περνάει από το σύστημα παροχής καυσίμου, ατμοποιείται στον ατμοποιητή και μέσω του GUV οδηγείται στον κινητήρα. **(3)**

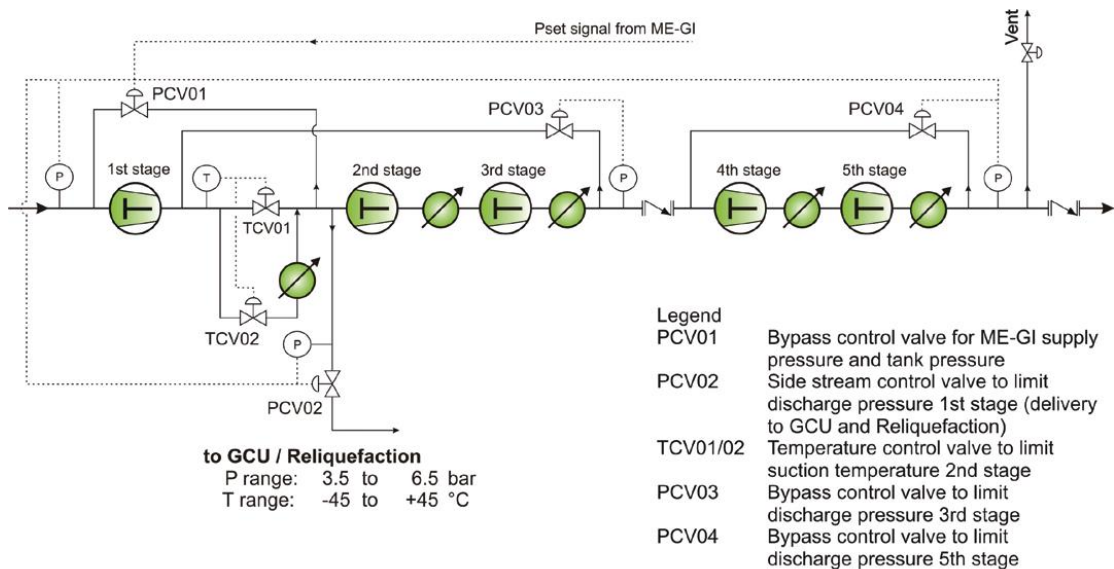
Το σύστημα παροχής αερίου καυσίμου, περιέχει το υγροποιημένο φυσικό αέριο LNG το οποίο παίρνεται είτε σε μορφή συμπυκνώματος υγροποιημένου BOG (boil of gas) είτε σαν LNG από τις δεξαμενές. Αυτό το σύστημα αποτελείται από μια αντλία (booster), από μια δεύτερη αντλία υψηλής πίεσης, και από εναλλάκτη θερμότητας. Αφού αντλείται το LNG στην πίεση που απαιτείται, το LNG οδηγείται πάνω από την υπερκρίσιμη πίεση, θερμαίνεται και ατμοποιείται στον εναλλάκτη στην θερμοκρασία που απαιτείται. Τότε το αέριο υψηλής πίεσης τροφοδοτείται στον κινητήρα. Η πίεση αερίου της αντλίας υψηλής πίεσης είναι 300 bar. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχήμα συστήματος παροχής αερίου υψηλής πίεσης, το οποίο αποτελείται από δύο αντλίες LNG, και έναν ατμοποιητή:



Εικόνα 7 Σύστημα παροχής αερίου (stoichiometric) (3)

Για να χρησιμοποιηθεί το BOG, είναι απαραίτητη η χρήση συμπιεστή αερίου Laby®-GI compressor από την Burckhardt Compression. Το εύρος πίεσης 150-300bar καλύπτει την περιοχή λειτουργίας του κινητήρα. Υπάρχουν διάφορες επιλογές σχεδίασης του συστήματος συμπίεσης. Παρακάτω παρουσιάζεται σύστημα εγκατάστασης δύο συμπιεστών Laby®-GI, κάθε ένας από τους οποίους είναι ικανός να χειριστεί το 100% του b.o.g. . Πιο συγκεκριμένα ο ένας συμπιεστής λειτουργεί συνεχόμενα και ο άλλος τίθεται σε λειτουργία σε περίπτωση βλάβης του πρώτου. Η συμπίεση γίνεται σε πέντε στάδια με βαλβίδες εκτόνωσης σε κάθε στάδιο. Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο σχήμα:





Εικόνα 8 Συμπίεση αερίου(stoichiometric) (5)

Υπάρχουν πολλές παράμετροι όπου επηρεάζουν το σχεδιασμό ενός αποδοτικού συστήματος παροχής καυσίμου. Για παράδειγμα, το συνολικό ποσό του b.o.g. εξαρτάται από τον κύκλο λειτουργίας ( φορτίου ή έρματος) και από τα επίπεδα πίεσης της δεξαμενής. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας για το συμπιεστή, από πολύ κρύες σε ζεστές θερμοκρασίες εκκίνησης. Άλλοι παράγοντες μπορεί να είναι η σύνθεση του φυσικού αερίου, η επιλογή n.b.o.g ή f.b.o.g, η ταυτόχρονη παροχή αερίου χαμηλής πίεσης στην μονάδα GCU, η παράλληλη επανυγροποίηση του b.o.g , και πολλοί άλλοι.

Η τεχνική του συστήματος συμπίεσης είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα όταν αυτό έρχεται σε βέλτιστη απόδοση και αξιοπιστία. Στατική και δυναμική μηχανική ανάλυση, ανάλυση θερμικής καταπόνησης καθώς και θέματα παλμών και κραδασμών του συμπιεστή και του σχετικού εξοπλισμού όπως οι σωληνώσεις αερίου, ψύξη αερίου, κλπ είναι σπάντα διαδικασίες κατά την αξιολόγηση. Κάθε στάδιο συμπίεσης ακολουθείται από ένα ψυγείο, ώστε να ελέγχεται η θερμοκρασία εισόδου στο επόμενο στάδιο. Οι βαλβίδες παράκαμψης ρυθμίζουν τη ροή του συμπιεστή, σύμφωνα με την πίεση του κινητήρα, εντός των καθορισμένων ορίων του συστήματος. Βαλβίδες ασφαλείας παρέχονται μετά από κάθε συμπίεση, ώστε να προστατέψουν τους κυλίνδρους και το σύστημα από προβλήματα υπερπίεσης. Συσκευές παρακολούθησης πίεσης και θερμοκρασίας τοποθετούνται σε κάθε στάδιο ώστε να εξασφαλίζεται συνεχής έλεγχος, συναγερμός και αναγκαστική διακοπή σε περίπτωση ανάγκης. Διαδικασίες έκτακτης ανάγκης επιτρέπουν ασφαλές κλείσιμο, απομόνωση και εξαερισμό του συστήματος συμπίεσης. **(16)**

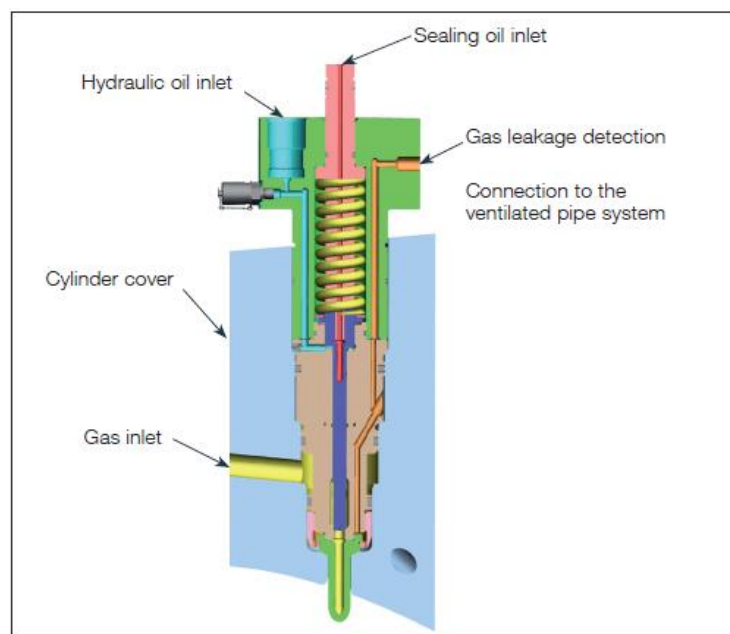
## 2.10 Σύστημα έγχυσης καυσίμου

### 2.10.1. Βαλβίδες έγχυσης καυσίμου

Η λειτουργία διπλού καυσίμου απαιτεί την έγχυση δύο καυσίμων. Έτσι χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι βαλβίδων. Δύο για έγχυση αερίου καυσίμου, και δύο για έγχυση πιλοτικού. Τα βοηθητικά μέσα που απαιτούνται για λειτουργία με διπλό καύσιμο, είναι τα εξής:

- Παροχή αερίου υψηλής πίεσης
- Παροχή πιλοτικού καυσίμου
- Έλεγχος της παροχής λαδιού για την ενεργοποίηση των βαλβίδων έγχυσης αερίου
- Παροχή λαδιού στεγανοποίησης

Για την αποφυγή διαρροής αερίου μεταξύ καλύμματος κυλίνδρου, και βαλβίδας έγχυσης αερίου, εγκαθίστανται δακτύλιοι στεγανοποίησης ανθεκτικοί σε υψηλές θερμοκρασίες. Τυχόν διαρροές αερίου από τους δακτυλίους, θα οδηγηθούν μέσω οπών στη βαλβίδα έγχυσης και ύστερα ανάμεσα στα διπλά τοιχώματα του σωλήνα. Το αέριο βρίσκεται σε πίεση 250 bar. Οπότε το λάδι στεγανοποίησης πρέπει να βρίσκεται σε 25-50 bar υψηλότερη πίεση. Στο σχήμα φαίνεται η βαλβίδα έγχυσης καυσίμου.

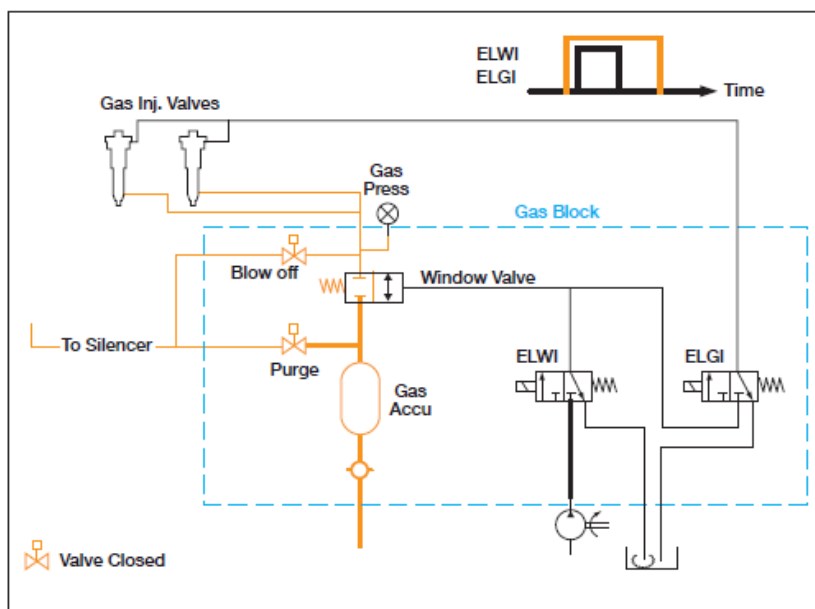


Εικόνα 9 Βαλβίδα έγχυσης καυσίμου (stoichiometric) (5)

Σε λειτουργία μεικτής καύσης γίνεται έγχυση και πιλοτικού καυσίμου, και αερίου καυσίμου χρησιμοποιώντας διαφορετικές βαλβίδες για κάθε καύσιμο. Η βαλβίδα του πιλοτικού καυσίμου είναι ίδια με την κανονική βαλβίδα έγχυσης πετρελαίου, με αλλαγές μόνο στο στόμιο. Η πίεση του καυσίμου ελέγχεται και παρακολουθείται από το σύστημα ασφαλείας ( gas injection) το οποίο εντοπίζει τυχόν δυσλειτουργίες. Σαν πιλοτικό καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί HFO, MGO και



MDO. Το σύστημα έγχυσης καυσίμου αποτελείται από δυο βαλβίδες πετρελαίου, δυο βαλβίδες αερίου καυσίμου, ELGI για να ανοιγοκλείνει τις βαλβίδες αερίου, μια βαλβίδα FIVA ώστε να ελέγχεται το εγχυόμενο υγρό καύσιμο, και μια ELWI βαλβίδα για παραπάνω ασφάλεια ώστε να αποφεύγονται διαρροές αερίου. Επίσης αποτελείται από το συμβατικό fuel oil pressure booster το οποίο προμηθεύει το πιλοτικό καύσιμο σε λειτουργία μεικτής καύσης. Παρακάτω φαίνεται το σχήμα του συστήματος έγχυσης καυσίμου: **(5)**



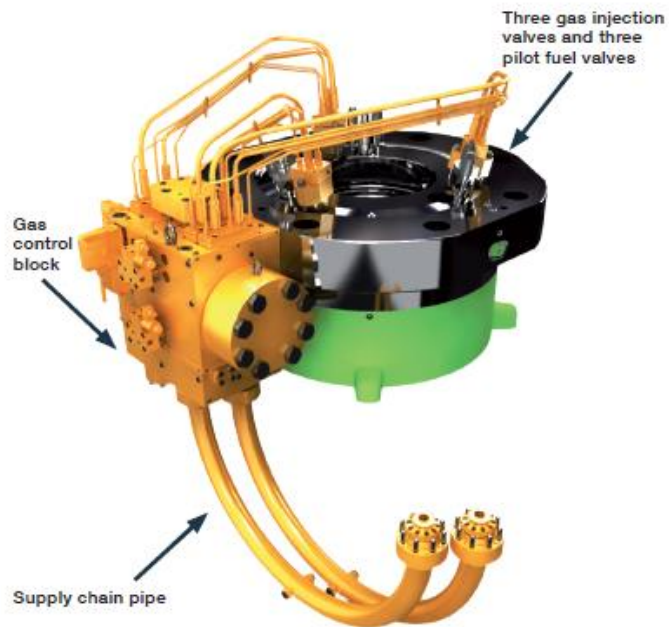
Εικόνα 10 Σύστημα έγχυσης καυσίμου (stoichiometric) (5)

### 2.10.2. Κάλυμμα κυλίνδρου

Το αέριο καύσιμο υψηλής πίεσης, φεύγει από το συμπιεστή, και μεταφέρεται από τον κεντρικό σωλήνα σε στενούς και εύκαμπτους σωλήνες με διακλαδώσεις ώστε να οδηγείται σε κάθε κύλινδρο ξεχωριστά. Αυτοί οι σωλήνες εξυπηρετούν δύο σκοπούς:

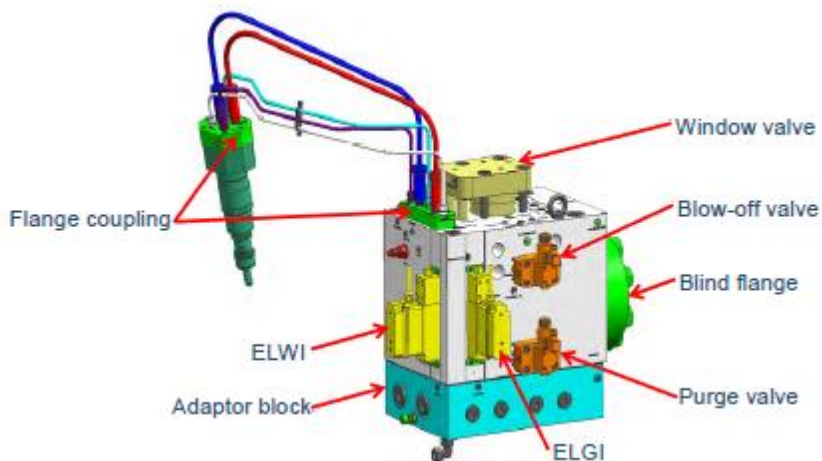
- Διαχωρίζουν κάθε κύλινδρο από τους υπόλοιπους
- Δρουν ως εύκαμπτες συνδέσεις μεταξύ του άκαμπτου κεντρικού σωλήνα, και της μηχανής, εξασφαλίζοντας ασφάλεια εναντίον μεγάλων τάσεων και διαστολών λόγω μεγάλης θερμοκρασίας.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κάλυμμα του κυλίνδρου.



Εικόνα 11 Κάλυμμα κυλίνδρου (stoichiometric)

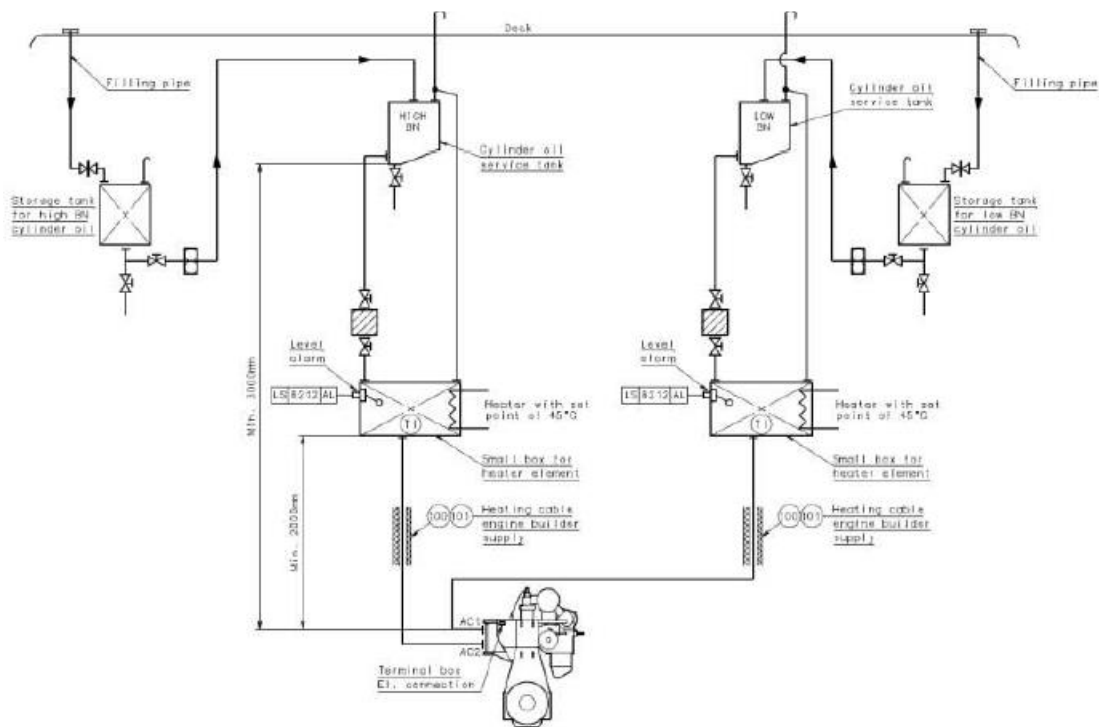
Το αέριο καύσιμο οδηγείται μέσα από τους σωλήνες στο gas control block. Ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα, το κάλυμμα του κυλίνδρου έχει δύο ή τρεις βαλβίδες έγχυσης αερίου, και άλλες τόσες για το πιλοτικό καύσιμο. Εσωτερικές οπές στο κάλυμμα του κυλίνδρου, οδηγούν το αέριο καύσιμο από το gas control block στις βαλβίδες έγχυσης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το gas control block



Εικόνα 12 Gas control block (stoichiometric)

## 2.11. Σύστημα λίπανσης κινητήρα

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σύστημα λίπανσης του κινητήρα υψηλής πίεσης. Στο σχήμα φαίνεται η δεξαμενή αποθήκευσης του λιπαντικού λαδιού. Από εκεί, το λάδι οδηγείται στην κυλινδρική δεξαμενή όπου εξυπηρετεί τον κινητήρα. Από την κυλινδρική δεξαμενή, το λάδι οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας, όπου το θερμαίνει στους 45 βαθμούς κελσίου. Στο δοχείο με τον εναλλάκτη υπάρχει και προειδοποιητικός αισθητήρας της στάθμης του λαδιού. Τέλος το λιπαντικό οδηγείται στον κινητήρα. Αυτή η διάταξη που περιγράφηκε, υπάρχει δύο φορές, μια για low BN και μία για high BN. Η χρήση των low-BN cylinder lube oils, είναι για καύσιμα με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο, ενώ τα high-BN cylinder lube oils, για καύσιμα υψηλής περιεκτικότητας σε θείο. (3)

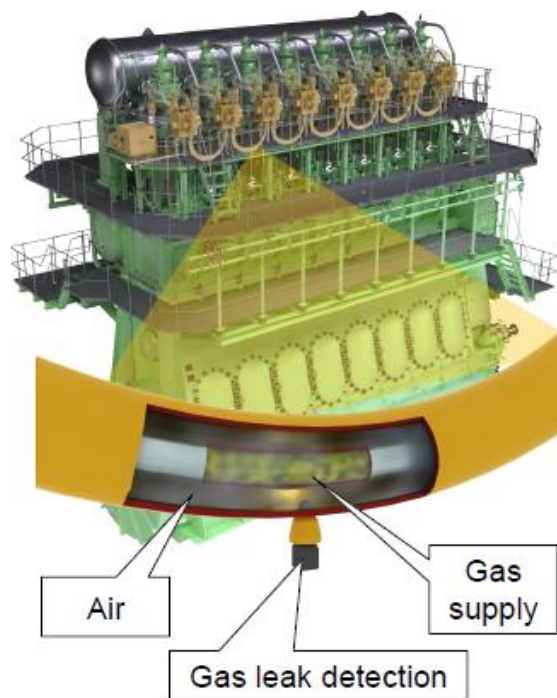


Εικόνα 13 Σύστημα λίπανσης κινητήρα (stoichiometric) (3)

## 2.12. Ασφάλεια-σωλήνες διπλού τοιχώματος

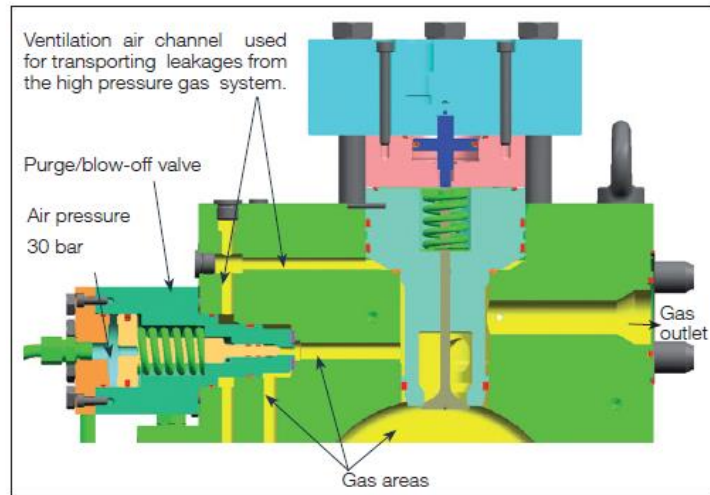
Η κύρια ανησυχία στους κινητήρες με λειτουργία μεικτής καύσης είναι οι διαρροές του αερίου καυσίμου από τα πιστόνια. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί παρακολουθώντας την πίεση του σαρωμένου αέρα, και τις συνθήκες καύσης. Οι σωλήνες μεταφοράς του αερίου καυσίμου έχουν διπλά τοιχώματα, ώστε να εμποδίζεται η εκροή του αερίου στο χώρο του μηχανοστασίου σε περίπτωση ρίξης ή διαρροής. Τα διπλά αυτά τοιχώματα έχουν ανάμεσά τους αερισμό, και χαμηλότερη πίεση από αυτήν του εξωτερικού χώρου. Ο ενδιάμεσος αυτός χώρος, συμπεριλαμβανομένου και του χώρου γύρω από τις βαλβίδες, τις φλάτζες κτλ. έχει

ειδικό αερισμό με 30 αλλαγές αέρα την ώρα. Ο αέρας αυτός που απαιτείται για τον εξαερισμό, λαμβάνεται από ασφαλές μέρος, και αργότερα καίγεται σε ασφαλές μέρος, οπότε οι πιθανές διαρροές δεν φεύγουν στο περιβάλλον αλλά καίγονται. Ό,τι διαρροή υπάρχει εντοπίζεται από ειδικούς σένσορες υδρογονανθράκων ( HC sensors) που υπάρχουν ανάμεσα στα τοιχώματα. Οι σωλήνες αυτοί είναι σχεδιασμένοι για λειτουργία σε 50% παραπάνω πίεση σε σχέση με αυτήν που λειτουργούν, και ειδικά φτιαγμένοι ώστε να μην επηρεάζονται από μηχανικές δονήσεις. Ακόμα είναι θωρακισμένες από δυνατά χτυπήματα, πιθανόν από πτώση μεγάλων αντικειμένων. Επίσης είναι σχεδιασμένοι ώστε να αντέχουν αλλαγές στο μέγεθός τους λόγω αλλαγών θερμοκρασίας, και να αντέχουν σε διακυμάνσεις πίεσης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το εσωτερικό του σωλήνα αυτού, καθώς και ο σένσορας αερίου και το ρεύμα αέρα. (5)

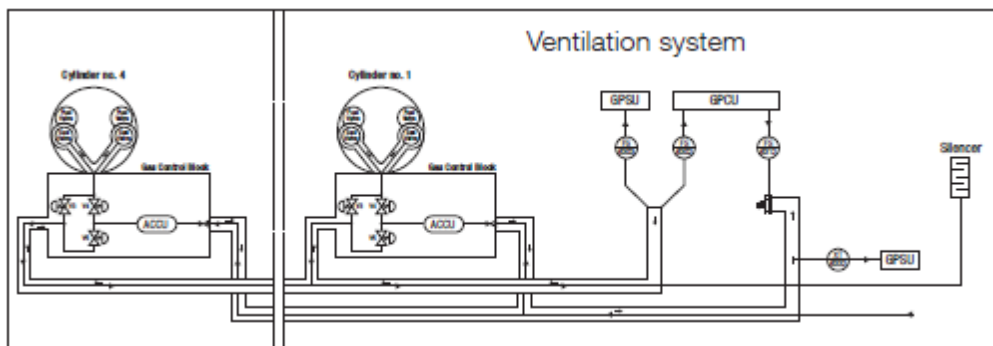


Εικόνα 14 Σωλήνας διπλού τοιχώματος (stoichiometric) (6)

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά το gas valve control block καθώς και το σύστημα σωληνώσεων



Εικόνα 15 Gas control block (stoichiometric) (5)



Εικόνα 16 Σύστημα σωληνώσεων (stoichiometric) (5)

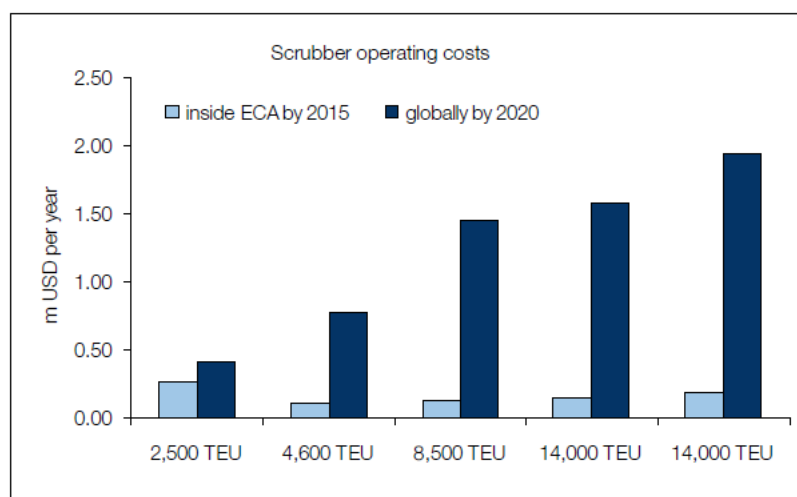
### 2.13 Τεχνολογία καθαρισμού καυσαερίων ( scrubbers)

Η μελέτη αυτή προϋποθέτει τη χρήση υγρών scrubbers για τη μείωση των εκπομπών SOx, καθαρίζοντας τα καυσαέρια του κινητήρα με θαλασσινό νερό. Τα καυσαέρια οδηγούνται από τον υπερσυμπιεστή σε έναν μεγάλο scrubber, ο οποίος είναι τοποθετημένος κατάντη του λέβητα καυσαερίων. Τα καυσαέρια οδηγούνται μέσα από μια παράταξη σταγονιδίων θαλασσινού νερού τα οποία ξεπλένουν το θείο από τα καυσαέρια. Το νερό καθαρισμού πέφτει στο κάτω μέρος του scrubber και εκκενώνεται στη θάλασσα. Η εξάτμιση οδηγείται στην καπνοδόχο περνώντας μέσα από έναν αναθερμαντήρα, ώστε να αποτρέψει τον ατμό να γίνει ορατός στα καυσαέρια. Εάν το πλοίο ταξιδεύει σε περιοχή όπου απαγορεύεται να αδειάσει το νερό καθαρισμού στη θάλασσα, είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσει ένα σύστημα κλειστού βρόχου με φρέσκο νερό. Το σύστημα καθαρισμού περιέχει μια φυγόκεντρο μηχανή για να απομακρύνει τα σωματίδια, και προστίθεται NaOH στο κυκλοφορούν νερό, για εξουδετέρωση του θειικού οξέος, το οποίο θα αναπτυχθεί όταν το θείο πλένεται από τα καυσαέρια με γλυκό νερό. Οι scrubbers χρησιμοποιούνται μόνο όταν είναι αναγκαίοι ώστε να τηρούνται τα απαιτούμενα όρια εκπομπών. Το κόστος λειτουργίας τους εξαρτάται από τις ώρες λειτουργίας και το φορτίο του κινητήρα. Μέσο κόστος για scrubbers ανοιχτού και κλειστού βρόχου είναι 5 USD/MWh.



Εικόνα 17 Scrubber installation on Ficaria Seaways (13)

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα κόστη λειτουργίας του συστήματος Scrubber μέσα στις περιοχές ECA το 2015 (γαλάζιο χρώμα), και παγκοσμίως έως το 2020 ( μπλε χρώμα) (13)



Σχήμα 13 Κόστος λειτουργίας scrubber (13)

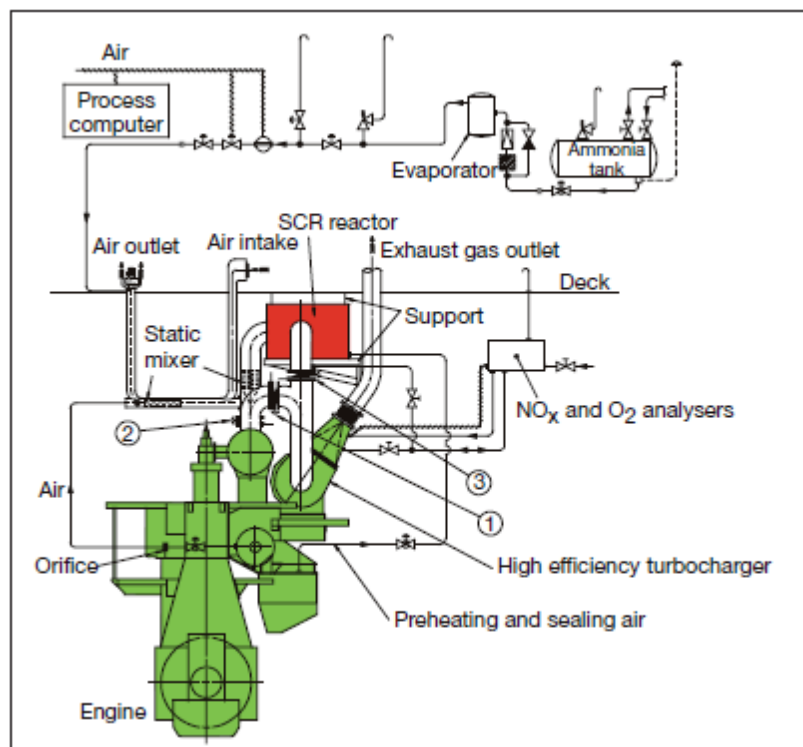
## 2.14 Χρήση καταλύτη SCR

Οι κινητήρες διπλού καυσίμου υψηλής πίεσης χρησιμοποιούν τεχνολογία SCR για τη μείωση των εκπομπών NOx τα τελευταία 20 χρόνια. Η τεχνολογία αυτή ταιριάζει καλύτερα σε σταθερές συνθήκες υψηλού φορτίου και λιγότερο για λειτουργία χαμηλού φορτίου και ελιγμούς σε παράκτιες και λιμενικές περιοχές. Λόγω περιορισμών για διαρροή αμμωνίας, τίθενται περιορισμοί στη λειτουργία του και η μέγιστη μείωση των εκπομπών NOx κυμαίνεται μεταξύ 90-95%. Εάν συγκρίνουμε την εγκατάσταση SCR σε νέα πλοία που μόλις κατασκευάζονται σε σχέση με παλιά πλοία που κάνουν retrofit, συμπεραίνουμε ότι είναι πολύ πιο εύκολο να γίνει η εγκατάσταση σε ένα καινούριο πλοίο. Αρχικά η εύρεση του απαιτούμενου χώρου για τον καταλύτη, τις σωληνώσεις, το βοηθητικό εξοπλισμό και τις συσκευές μέτρησης NOx, O<sub>2</sub> και NH<sub>3</sub>, είναι μια πρόκληση που πιο εύκολα αντιμετωπίζεται σε καινούρια πλοία.

Με την τεχνολογία SCR, τα καυσαέρια αναμειγνύονται με αμμωνία (NH<sub>3</sub>) πριν περάσουν από ένα ειδικό στρώμα καταλύτη με θερμοκρασίες ανάμεσα στους 300-400 °C, όπου το στοιχείο NOx διασπάται σε N<sub>2</sub> και νερό.

Ο καταλύτης SCR πρέπει να τοποθετείται ανάμεσα στην έξοδο των καυσαερίων και τον υπερσυμπιεστή. Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο σχήμα με τη διάταξη του κινητήρα και του καταλύτη





Εικόνα 18 Σύστημα καταλύτη SCR (19)

Η επιλογή χρήσης EGR ή SCR εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Αρχικό κόστος
- Απαιτήσεις χώρου
- Ευελιξία εγκατάστασης
- Κόστος λειτουργίας
- Απλότητα λειτουργίας
- Αξιοπιστία
- Κόστος συντήρησης
- Κόστος αποβλήτων

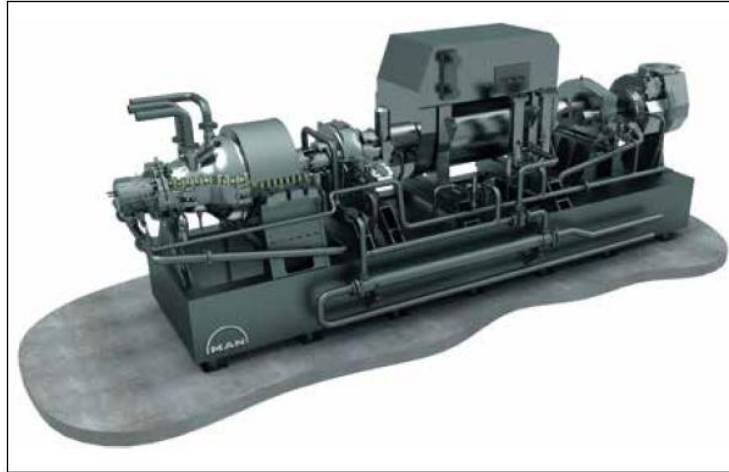
(20)

## 2.15 Τεχνολογία ανάκτησης θερμότητας (WHR)

Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας (WHR) αποτελείται από ένα λέβητα θέρμανσης καυσαερίων, που τροφοδοτεί ατμό σε ατμοστρόβιλο. Για την ενίσχυση της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου, το σύστημα μπορεί να επεκταθεί με αεριοστρόβιλο, χρησιμοποιώντας την ενέργεια των καυσαερίων που δεν χρησιμοποιείται από τον υπερσυμπιεστή. Ωστε να επιτευχθεί η υψηλότερη ηλεκτρική παραγωγή, η βέλτιστη λύση είναι η χρήση ενός διπλού ή ακόμα και τριπλού συστήματος ατμού εάν ο κινητήρας είναι εξοπλισμένος με σύστημα EGR. Τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας έχουν σχεδιαστεί για να μειώσουν την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Η εξοικονόμηση εξαρτάται από το μέγεθος του πλοίου και το φορτίο του κινητήρα.



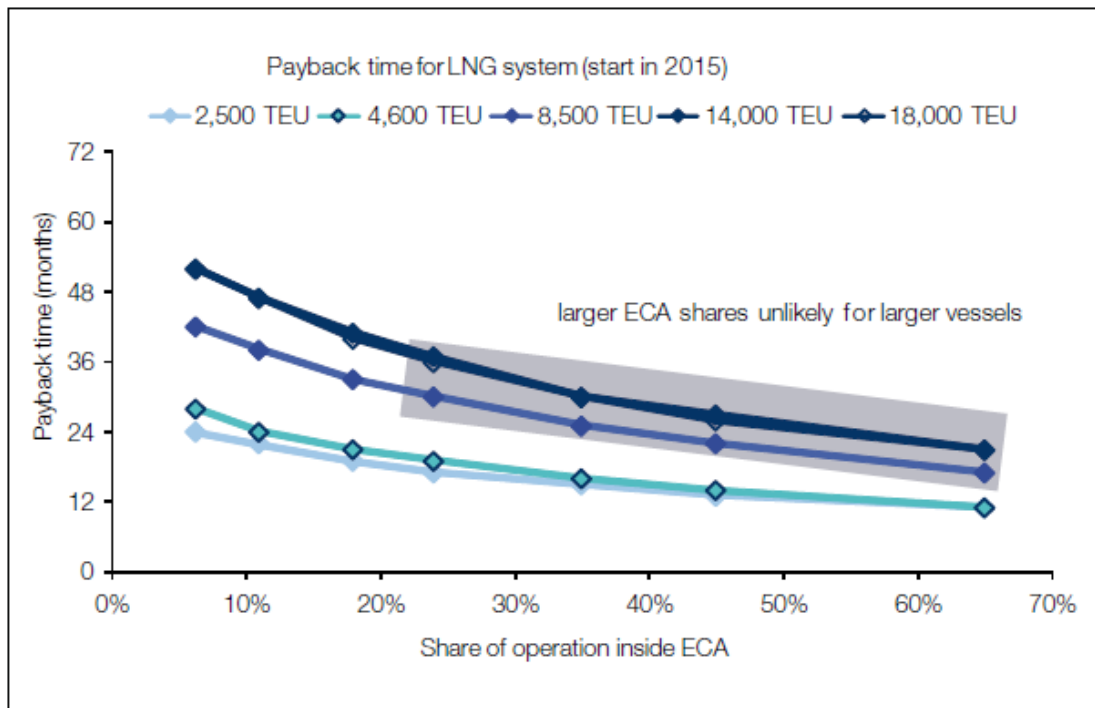
Ένα μέγιστο όφελος περίπου 13% θεωρήθηκε για τα μεγαλύτερα πλοία με 75% MCR. **(13)**



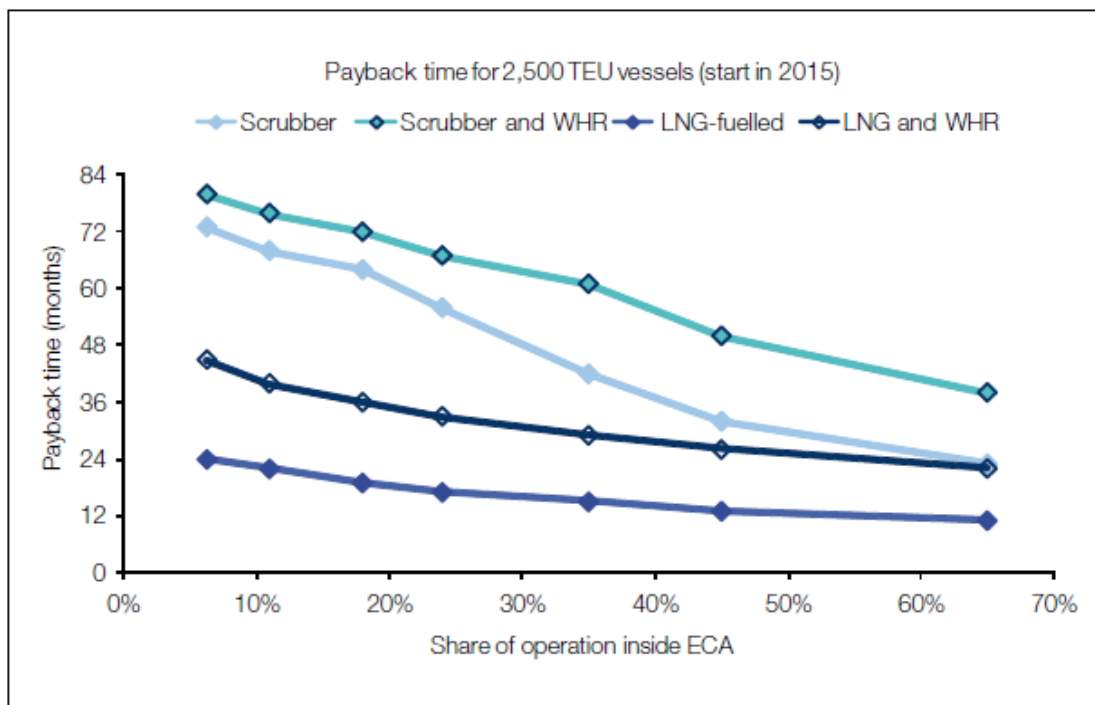
Εικόνα 19 WHR system (13)

## 2.16 Χρόνος αποπληρωμής

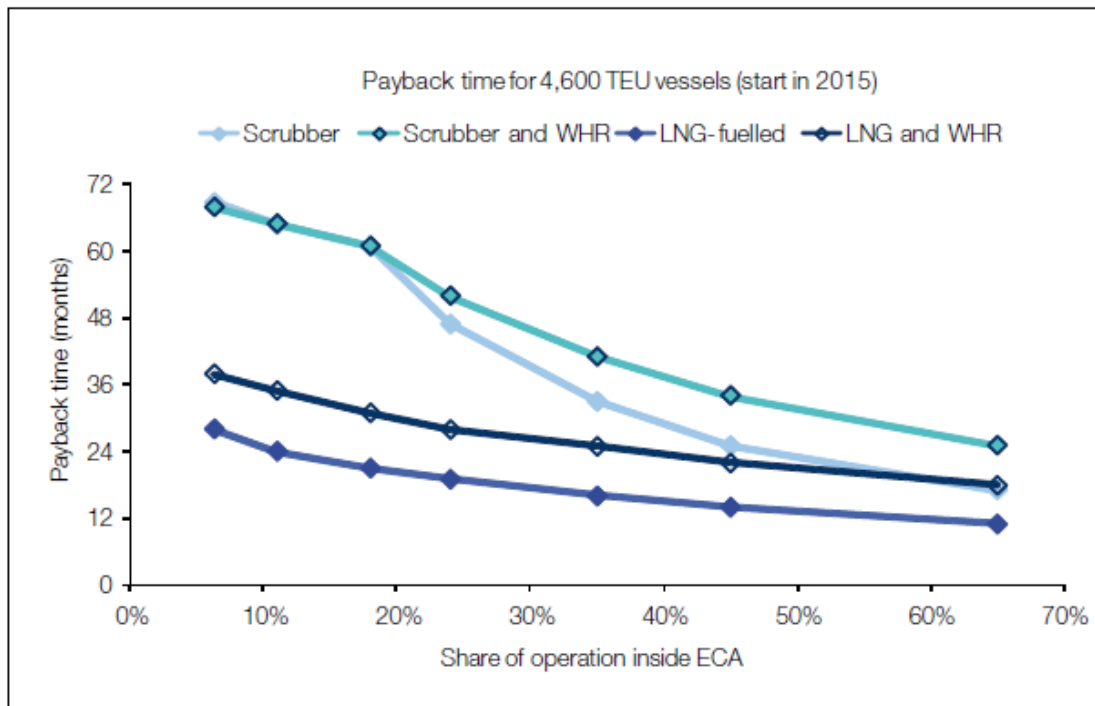
Πλεονεκτήματα για τεχνολογίες όπως LNG ή scrubber, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την χρήση τους. Όσο μεγαλύτερη είναι η έκθεση του πλοίου σε περιοχές ECA, τόσο πιο γρήγορα γίνεται η απόσβεση ( χρόνος αποπληρωμής). Ο χρόνος αποπληρωμής είναι μικρότερος για μικρότερα πλοία μεταφοράς ( container vessels). Αυτό επειδή υπάρχει πολύ μικρότερο κόστος επένδυσης για τα συστήματα LNG σε σχέση με μεγαλύτερα πλοία. Για μικρά πλοία, με 65% έκθεση σε περιοχές ECA, ο χρόνος αποπληρωμής μπορεί να γίνει λιγότερος από 2 χρόνια. Με χρήση WHR ο χρόνος αποπληρωμής μεγαλώνει, λόγω αυξημένου κόστους επένδυσης. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια αντίστοιχα διαγράμματα. Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται συγκριτικά για διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη, ο χρόνος αποπληρωμής συναρτήσει της έκθεσης σε περιοχές ECA. Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η έκθεση στις περιοχές ECA, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος αποπληρωμής. Επίσης όσο μεγαλύτερο είναι το πλοίο, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αυτός, λόγω του αυξημένου κόστους επένδυσης. Στα επόμενα τρία διαγράμματα παρουσιάζονται για συγκεκριμένα μεγέθη ο χρόνος αποπληρωμής σε σχέση με την έκθεση σε περιοχές ECA, για συνδυασμούς με χρήση scrubber και WHR. **(13)**



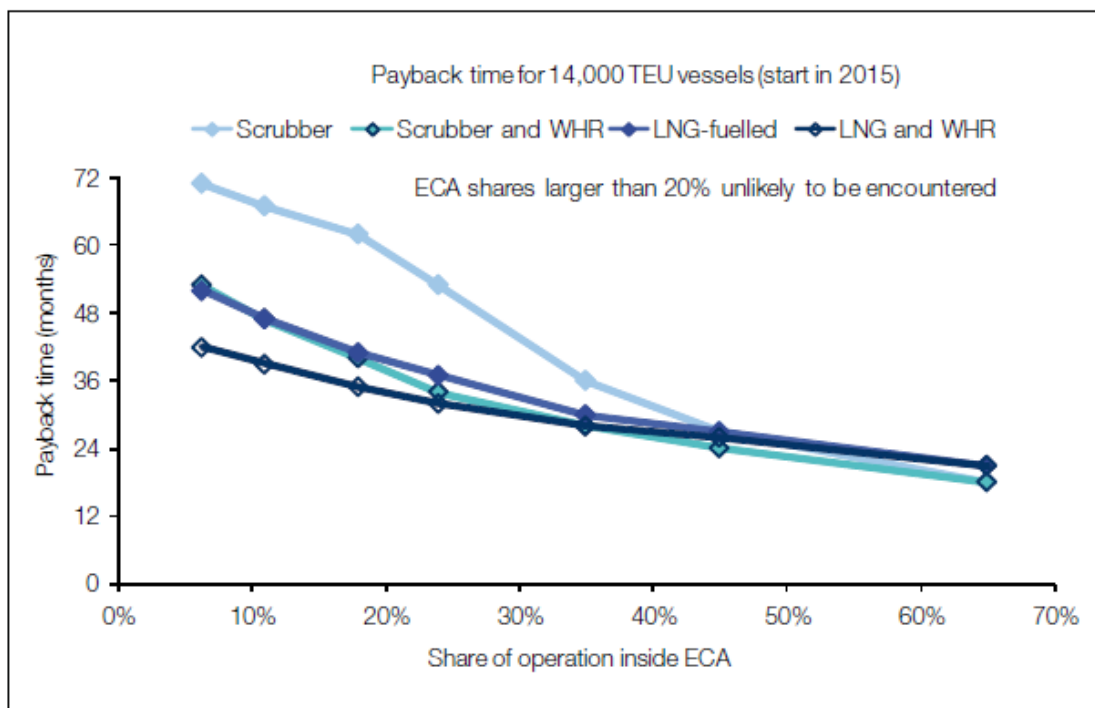
Σχήμα 14 Χρόνος αποπληρωμής για διάφορα πλοία (13)



Σχήμα 15 Χρόνος αποπληρωμής 2500 TEU (13)



Σχήμα 16 Χρόνος αποπληρωμής 4600 TEU (13)

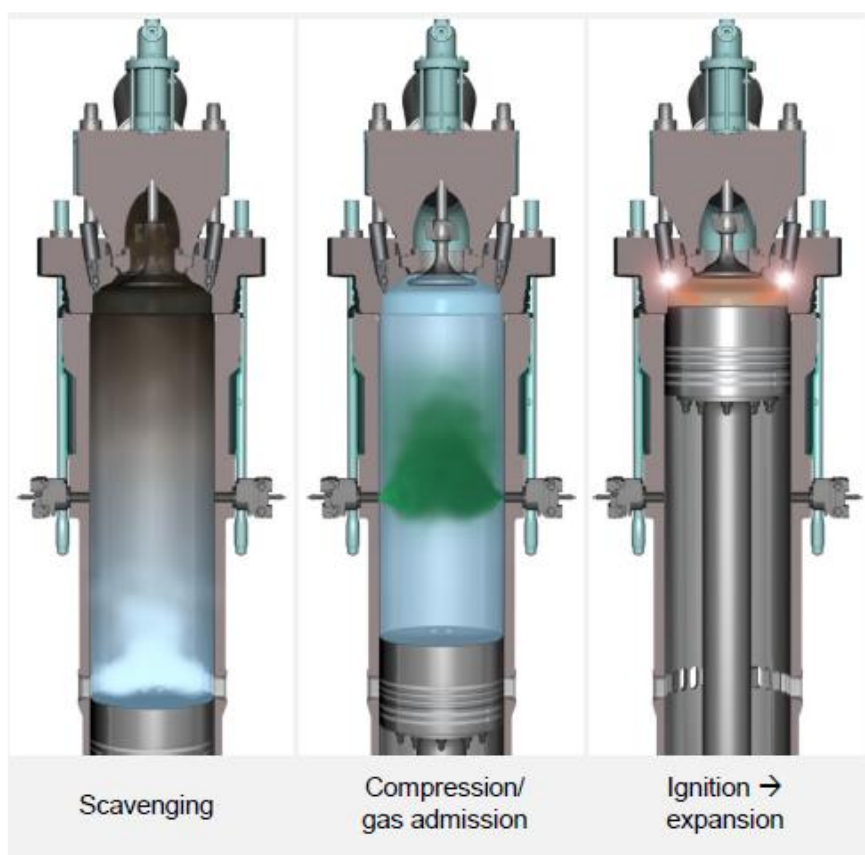


Σχήμα 17 Χρόνος αποπληρωμής 14000 TEU (13)

### 3. Σύστημα χαμηλής πίεσης (lean burn)

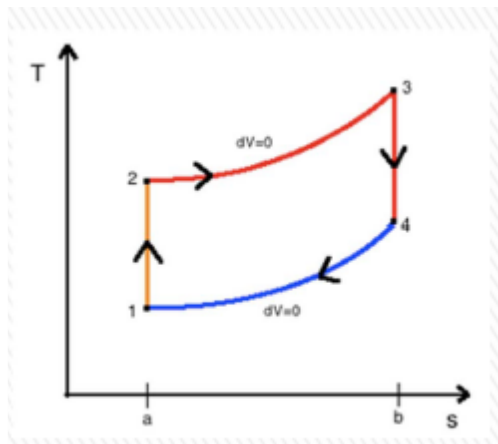
#### 3.1 Κύκλος Otto

Οι δίχρονοι κινητήρες χαμηλής πίεσης (lean burn) λειτουργούν όπως οι κινητήρες Otto. Ο αέρας και το αέριο αναμειγνύονται πριν από την καύση και δημιουργούν το lean mixture. Εκεί περιέχεται περισσότερος αέρας από τον αναγκαίο για στοιχειομετρική καύση.



Εικόνα 20 Κύλινδρος - διαδικασία καύσης (21)

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κύκλος Otto, τον οποίο εφαρμόζουν οι κινητήρες χαμηλής πίεσης. Δίνεται το θερμοδυναμικό διάγραμμα του κύκλου (θερμοκρασίας-εντροπίας):



Σχήμα 18 Κύκλος Otto (21)

Η διεργασία 1-2 είναι ισεντροπική συμπίεση. Η 2-3 είναι θέρμανση υπό σταθερό όγκο. Η 3-4 ισεντροπική εκτόνωση, ενώ η 4-1 ψύξη υπό σταθερό όγκο. **(21)**

### 3.2 Χαρακτηριστικά κινητήρων.

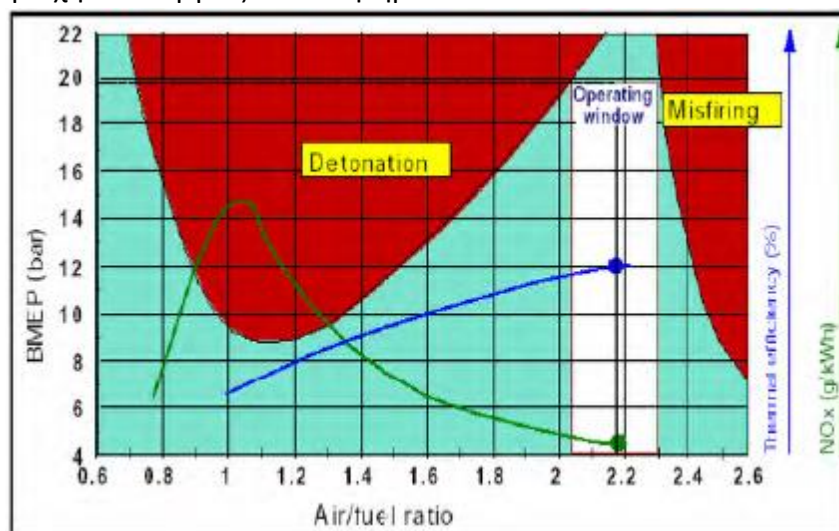
Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των κινητήρων χαμηλής πίεσης:

- Ο κινητήρας λειτουργεί σύμφωνα με τον κύκλο Otto
- Χρησιμοποιεί τεχνολογία pre-mixed 'Lean burn', όπου ο αέρας και το αέριο αναμειγνύονται πριν την καύση. Αυτό συνεπάγεται :
  - Περισσότερο αέρα από ότι χρειάζεται για στοιχειομετρική καύση
  - Χαμηλή θερμοκρασία φλόγας, με αποτέλεσμα χαμηλές εκπομπές NOx και μικρότερες απώλειες από τα τοιχώματα
  - Όχι τοπικά πλούσια καύση με αποτέλεσμα χαμηλές εκπομπές σωματιδίων (PM)
- Έγχυση αερίου χαμηλής πίεσης κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων της συμπίεσης
- Εξωτερική έναυση σε προ-θάλαμο καύσης το οποίο:
  - Παρέχει την απαραίτητη ενέργεια ώστε να γίνει έναυση του αερίου
  - Παρέχει καλή και σταθερή καύση, με μικρή ποσότητα πιλοτικού καυσίμου ( 1% περίπου)
- Έχει μεγάλη επίδραση στην μείωση εκπομπών NOx. Πληροί τις προϋποθέσεις IMO Tier III χωρίς επεξεργασία καυσαερίων
- Σε χαμηλά φορτία, ο κινητήρας μπορεί να αλλάξει τη λειτουργία του σε κατανάωση μόνο πετρελαίου. Οι συνέπειες αυτής της αλλαγής είναι μεγαλύτερες εκπομπές NOx, και άλλων ρύπων όπου παράγονται από την καύση του πετρελαίου.
- Σε χαμηλό φορτίο, το ποσοστό της ενέργειας που παραδίδεται από το υγρό καύσιμο( πετρέλαιο), μεγαλώνει.
- Ο κινητήρας διατηρεί το βασικό του σύστημα έγχυσης πετρελαίου, ίσως με κάποια τροποποίηση στην αντλία έγχυσης και το ακροφύσιο για να βελτιώσει την απόδοσή του σε χαμηλές ταχύτητες τροφοδοσίας

- Ανάλογα με την ποιότητα του χρησιμοποιούμενου αερίου καυσίμου, ο λόγος συμπίεσης μπορεί να μειωθεί για να αποφευχθούν φαινόμενα όπως κρουστική καύση, αλλά είναι ακόμη αρκετά υψηλός ώστε να εξασφαλίζει αξιόπιστη ανάφλεξη του πιλοτικού καυσίμου. Η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι κατά κανόνα περίπου 10% χαμηλότερη από την ισοδύναμη λειτουργία του κινητήρα με πετρέλαιο.
- Ένα ειδικό ηλεκτρονικό σύστημα για τους κινητήρες διπλού καυσίμου, ελεγχει την καύση σε κάθε κύλινδρο και βελτιστοποιεί την απόδοση και τις εκπομπές κάτω από όλες τις συνθήκες, διατηρώντας κάθε κύλινδρο μέσα στο παράθυρο λειτουργίας.
- Η ποσότητα και ο χρόνος έγχυσης του πιλοτικού καυσίμου, ρυθμίζονται μεμονωμένα, μαζί με τον ειδικό για κάθε κύλινδρο λόγο αέρα-καυσίμου, ώστε να διατηρείται ο κάθε κύλινδρος στο σωστό σημείο λειτουργίας, και μέσα στο όρια ( παράθυρο λειτουργίας) ανάμεσα στις καμπύλες knocking και misfiring. Αυτός είναι ο παράγοντας-κλειδί ώστε να εξασφαλίζεται αξιόπιστη λειτουργία με αέριο καύσιμο, ρυθμίζοντας δηλαδή τον κινητήρα σε διάφορες συνθήκες.
- Σε λειτουργία με πετρέλαιο, ο κινητήρας λειτουργεί σύμφωνα με την κλασική αρχή Diesel, χρησιμοποιώντας ένα παραδοσιακό σύστημα αντλίας ψεκασμού καυσίμου. Το καύσιμο εγχέεται με υψηλή πίεση στο θάλαμο καύσης λίγο πριν το άνω νεκρό σημείο.
- Η πίεση του αερίου στον κινητήρα είναι μικρότερη από 4 bar σε πλήρες φορτίο, καθιστώντας τη χρήση σωλήνων μονού τοιχώματος εφικτή, αν το δωμάτιο του κινητήρα έχει κατάλληλο εξαερισμό και ανιχνευτές αερίου. Η βαλβίδα αερίου σε κάθε κεφαλή κυλίνδρου είναι απλή και ανθεκτική, ηλεκτρονικά ελεγχόμενη ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, όπου υπόσχεται αξιοπιστία με μεγάλα διαστήματα συντήρησης.
- Το σύστημα του πιλοτικού καυσίμου, περιέχει μια αντλία υψηλής πίεσης η οποία προμηθεύει το καύσιμο σε κάθε βαλβίδα καυσίμου, σε πίεση 900 bar.
- Λόγω της υψηλής πίεσης χρησιμοποιείται σύστημα διπλού τοιχώματος με ανιχνευτή διαρροής υγρού καυσίμου και αντίστοιχο συναγερμό. Η βαλβίδα έγχυσης είναι διπλής βελόνας, με την βελόνα πιλοτικού καυσίμου να ελέγχεται ηλεκτρονικά από το σύστημα ελέγχου του κινητήρα. Είναι σημαντικό ότι το σύστημα έγχυσης μπορεί να διαχειρίζεται την μικρή ποσότητα του πιλοτικού καυσίμου με ελάχιστες διακυμάνσεις από κύκλο σε κύκλο. Ο κύριος σχεδιασμός της βελόνας είναι ένα συμβατικό σύστημα, όπου μηχανικά ελεγχόμενες αντλίες, ελέγχουν την έγχυση.

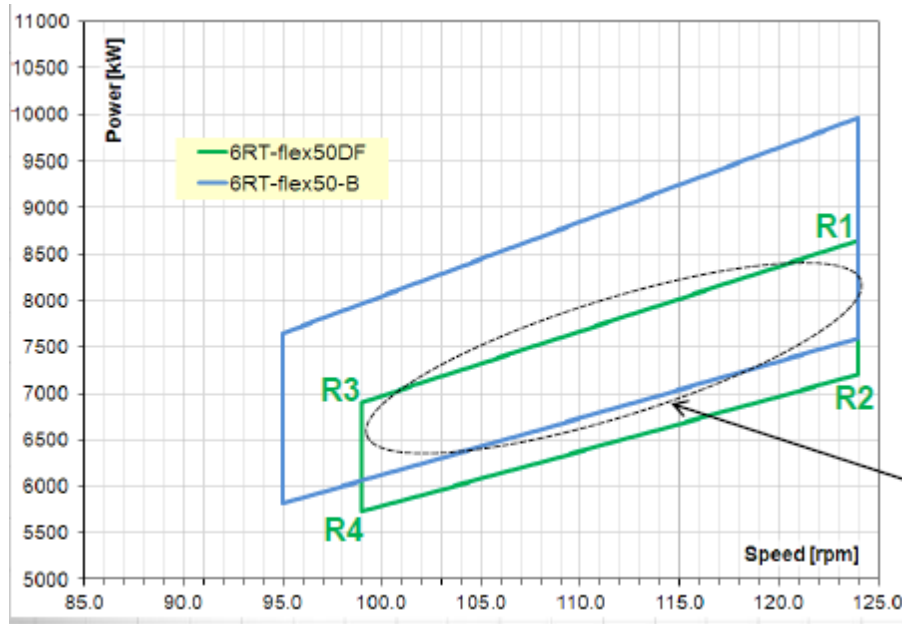
### 3.3 Περιοχή λειτουργίας

Όταν ο κινητήρας διπλού καυσίμου βρίσκεται σε λειτουργία με αέριο, με προανεμειγμένο μίγμα αέρα-καυσίμου, η καύση πρέπει να ελέγχεται για να αποφεύγονται φαινόμενα όπως knocking ή misfiring. Ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό, είναι ο πλήρης ηλεκτρονικός έλεγχος της έγχυσης πιλοτικού καυσίμου, αλλά και της εισαγωγής αερίου σε κάθε κυλινδροκεφαλή. Ο λόγος αέρα-καυσίμου ελέγχεται από μια βαλβίδα εξαγωγής, η οποία επιτρέπει μέρος των καυσαερίων να παρακάμψει τον στρόβιλο. Αυτό εξασφαλίζει ότι ο λόγος αυτός είναι στην κατάλληλη τιμή, ανεξάρτητα από αλλαγές στις συνθήκες περιβάλλοντος όπως η θερμοκρασία. Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα με την επιτρεπτή περιοχή λειτουργίας του κινητήρα.



Σχήμα 19 Περιοχή λειτουργίας (lean burn) (11)

Επειδή υπάρχει πολύ μεγάλος κίνδυνος αυτοκαταστροφής του κινητήρα λόγω φαινομένων knocking, detonation και misfiring, πρέπει να περιοριστεί η ισχύς του κινητήρα οπότε αυτός λειτουργεί σε μια πολύ μικρή περιοχή (operating window). Αυτή η μείωση στην ισχύ εξόδου παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα όπου συγκρίνεται ο ίδιος κινητήρας στην μία περίπτωση καταναλώνοντας πετρέλαιο (6RT-flex50-B) και στην άλλη σε λειτουργία μεικτής καύσης (6RT-flex50DF)



Σχήμα 20 Ισχύς εξόδου (lean burn) (8)

Σε κάποιες εφαρμογές, ίσως είναι αναγκαία η χρήση ενός επιπλέον κυλίνδρου, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ισχύς εξόδου. Οι περισσότεροι κινητήρες σήμερα λειτουργούν στο κυκλωμένο σημείο στο διάγραμμα, δηλαδή εκεί που δείχνει το βέλος ('de-rated' output). **(11), (8)**

### 3.4 Εξάρτηση λειτουργίας με αριθμό μεθανίου

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, η ισχύς εξόδου του κινητήρα διπλού καυσίμου, περιορίζεται από τον αριθμό μεθανίου του αερίου. Τυπικές τιμές αριθμού μεθανίου του φυσικού αερίου είναι 70-90. Σε περίπτωση που ο αριθμός μεθανίου είναι πολύ χαμηλός, το σύστημα ελέγχου του κινητήρα, αυτόματα πραγματοποιεί τις απαραίτητες προσαρμογές και περιορίζει την ισχύ εξόδου σε ασφαλή επίπεδα, ή αλλάζει σε λειτουργία πετρελαίου για 100% φορτίο. **(17)**

### 3.5 Λειτουργία κινητήρα σε μεικτή καύση

Ο κινητήρας χαμηλής πίεσης μπορεί να λειτουργεί με αέριο ή ελαφρύ καύσιμο (marine diesel ή gas oil), αλλά και με heavy fuel oil. Όταν λειτουργεί με αέριο και διακοπεί η παροχή του αερίου, τότε αμέσως αλλάζει σε λειτουργία με πετρέλαιο. Η μετάβαση αυτή δεν διαρκεί παραπάνω από ένα δευτερόλεπτο και δεν έχει καμία επίδραση στην ταχύτητα του κινητήρα και στο φορτίο. Ωστόσο η αλλαγή από λειτουργία με πετρέλαιο σε λειτουργία με αέριο, είναι μια σταδιακή διαδικασία. Η παροχή με πετρέλαιο, αργά μειώνεται ενώ η ποσότητα του εισερχόμενου στον κινητήρα αερίου αυξάνεται. Η επίδραση στις στροφές του κινητήρα και στις διακυμάνσεις φορτίου κατά την αλλαγή σε αέριο είναι ελάχιστες. Η μετάβαση από αέριο σε HFO, απαιτεί κάποιες αλλαγές στον κινητήρα, οι οποίες όμως μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μία μέρα. Η χρήση HFO, απαιτεί επίσης διαφορετικού τύπου



λιπαντικό λάδι ( σε λειτουργία με αέριο ή με ελαφρύ υγρό καύσιμο πετρέλαιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ίδια ποιότητα λιπαντικού λαδιού). Ο κινητήρας ξεκινάει με έγχυση μόνο πιλοτικού καυσίμου μέχρι ταχύτητα κινητήρα 60% επί της ονομαστικής. Όταν ανιχνεύεται ανάφλεξη σε όλους τους κυλίνδρους, η εισαγωγή αερίου ενεργοποιείται και οι στροφές του κινητήρα αυξάνονται στην ονομαστική τιμή. Αυτό το μέτρο ασφαλείας διασφαλίζει ότι δεν υπάρχει υπερβολικό άκαυστο καύσιμο όπου να τροφοδοτείται απευθείας στο σύστημα εξάτμισης.

### 3.6 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα

Παρακάτω πρόκειται να παρουσιαστούν τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των κινητήρων lean burn. Αρχικά παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα:

- Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των κινητήρων χαμηλής πίεσης (και μοναδικό ) είναι ότι έχει ευελιξία στην επιλογή καυσίμου. Μπορεί να λειτουργεί με Φ.Α. , MDO, HFO και βιοκαύσιμα. Έτσι μπορούν οι ιδιοκτήτες του κάθε πλοίου, να επιλέξουν καύσιμο ανάλογα με τους τοπικούς περιορισμούς, την εκάστοτε τιμή του καυσίμου, ή την διαθεσιμότητά του.
- Παρέχεται ασφάλεια αφού σε περίπτωση διακοπής της προμήθειας αερίου, οι κινητήρες dual fuel αλλάζουν τη λειτουργία σε καύση πετρελαίου, χωρίς μείωση της ταχύτητας ή της ισχύος.
- Η θερμοκρασία φλόγας είναι χαμηλή με αποτέλεσμα να υπάρχουν χαμηλές εκπομπές NOx, και χαμηλές θερμικές απώλειες από τα τοιχώματα
- Δεν έχει τοπική πλούσια καύση, με αποτέλεσμα να εκπέμπονται λιγότερα σωματίδια (P.M.)
- Η έναρξη της καύσης γίνεται σε προθάλαμο καύσης (pre-chamber ), με αποτέλεσμα να υπάρχει σταθερότητα καύσης- έναυσης με χαμηλό πιλοτικό καύσιμο, λιγότερο από 1% σε πλήρες φορτίο.
- Οι εκπομπές CO<sub>2</sub>, Sox μειώνονται χάρη στη σύσταση του καυσίμου
- Η τεχνολογία του low pressure gas supply για κινητήρες lean burn χρησιμοποιείται ήδη πολλά χρόνια σε τετράχρονους κινητήρες
- Καθώς το πλοίο κάνει μανούβρες, βρίσκεται στο ρελαντί ή μπαίνει σε κάποιο λιμάνι, μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά και σταθερά στο αέριο και να πληρεί τις προϋποθέσεις για TIER III
- Είναι απλό, αξιόπιστο, πιο ασφαλές και πιο οικονομικό ( λιγότερο CAPEX, λιγότερο κόστος συντήρησης και χαμηλή απαίτηση ενέργειας για low pressure) σύστημα τροφοδοσίας αερίου, με τα λιγότερα δυνατά εξαρτήματα τα οποία καταλαμβάνουν λίγο χώρο.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα σημαντικότερα μειονεκτήματα:

- Χρειάζονται fuel gas supply retrofit, πρόσθετες μετατροπές στη γεωμετρία του κινητήρα, και άλλα εξαρτήματα. Όλη αυτή η μετατροπή κοστίζει 20-25% του κόστους του κινητήρα

- Απαιτείται περισσότερος χρόνος για να αλλάξει από λειτουργία με πετρέλαιο, σε λειτουργία με αέριο
- Το φαινόμενο pre-ignition παρατηρείται σε συγκεκριμένες συνθήκες σε υψηλή μέση πραγματική πίεση. Αυτό οδηγεί σε μέγιστη πίεση κυλίνδρου και εκπομπές NOx χάρη στον ανεξέλεγκτο συγχρονισμό έναυσης
- Η τεχνική μείωσης θερμοκρασίας δεν είναι αρκετή για να αποφευχθεί η προανάφλεξη, επειδή η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του λαδιού λίπανσης είναι παρόμοια με τη θερμοκρασία ανάφλεξης του πιλοτικού καυσίμου
- Ο αριθμός των πυρήνων (σημείων) αυτανάφλεξης μπορεί να μειωθεί με μείωση του λιπαντικού λαδιού στον κύλινδρο, το οποίο είναι ωστόσο πολύ σημαντικό
- Οι πιθανοί χρόνοι εισόδου του αερίου στον κύλινδρο ποικίλλουν ανάλογα με τις διαφορετικές θέσεις εισδοχής, και είναι περιορισμένες είτε λόγω διαρροής αερίου στην εξάτμιση ( φεύγουν τα καυσαέρια και μαζί και αέριο καύσιμο εάν το αέριο εγχύεται πολύ νωρίς, ή κοντά στη βαλβίδα εξαγωγής), είτε από την υπερβολικά υψηλή πίεση αερίου ( αν το αέριο εισέρχεται καθυστερημένα όταν η βαλβίδα εξαγωγής είναι κλειστή).
- Ένα στρώμα αέρα σχηματίζεται εγχύοντας αέριο με μικρή καθυστέρηση, αφού ο scavenged air φτάνει στο gas injection nozzle . Αυτό αποτρέπει την ανάφλεξη από επαφή με καυσαέριο υψηλής θερμοκρασίας.
- Για να μειωθεί η διαρροή αερίου, το αέριο δεν εγχύεται σε πρώιμη χρονική στιγμή της σάρωσης. Ως εκ τούτου, το εγχυόμενο καύσιμο δεν φτάνει στη βαλβίδα εξαγωγής κατά το άνοιγμά της. Η έγχυση στο mid stroke μειώνει τη διαρροή αερίου σε αντίθεση με scavenge injection. Ωστόσο η φτωχή ομοιογένεια μίγματος σε αέρα/αέριο οδηγεί σε προανάφλεξη και απaráδεκτα γρήγορη καύση.
- Η ισχύς εξόδου μπορεί να είναι μειωμένη λόγω Methane number ( ο οποίος για LNG = 70-90 )
- Η περιοχή λειτουργίας είναι  $\leq 85\%$  σε σχέση με λειτουργία με πετρέλαιο, λόγω περιορισμών για knocking, pre ignition
- Μπορεί σε κάποιες εφαρμογές, να χρειάζεται ένας παραπάνω κύλινδρος σε σχέση με λειτουργία diesel, ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ισχύς εξόδου

### 3.7 Εκπομπές

Όταν ένας κινητήρας χαμηλής πίεσης λειτουργεί με κύριο καύσιμο το Φ.Α. τότε:

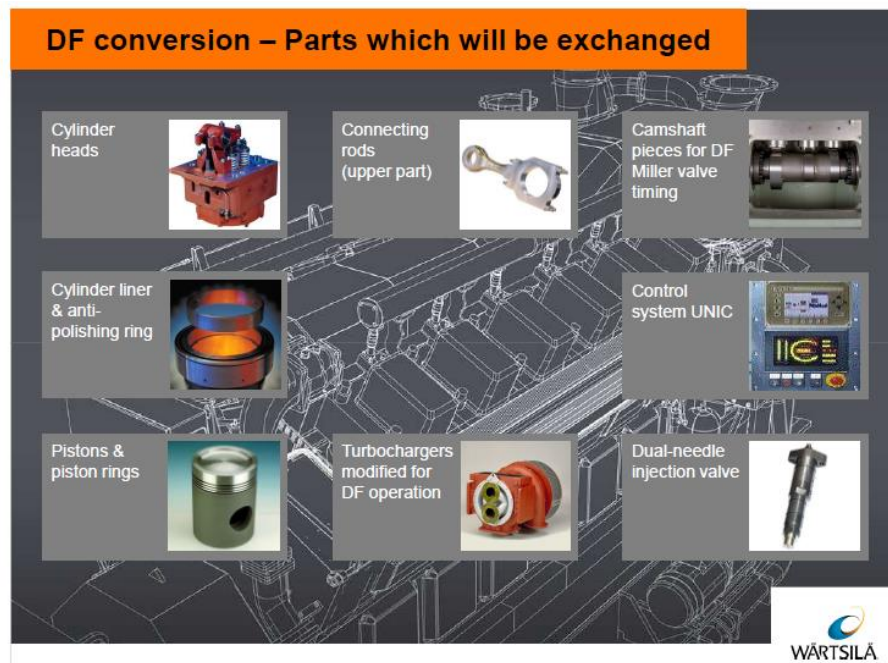
- Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> μειώνονται κατά 25-30% λόγω του ότι περιέχεται λιγότερος άνθρακας στο φυσικό αέριο
- Οι εκπομπές NOx μειώνονται κατά 85% . Αυτό επιτυγχάνεται γιατί περιέχεται περισσότερος αέρας στο μείγμα , και χαμηλότερες θερμοκρασίες. Δηλαδή όσο μεγαλύτερος ο λόγος αέρα-καύσης, τόσο μικρότερες οι θερμοκρασίες καύσης και κατ'επέκταση οι εκπομπές NOx
- Οι εκπομπές SOx σχεδόν εξαλείφονται, αφού το φυσικό αέριο δεν περιέχει θείο

- Δεν εκπέμπονται σωματίδια (PM) αφού το φυσικό αέριο έχει αποδοτικότερη καύση

Σε λειτουργία με αέριο, οι κινητήρες lean burn πληρούν τα κριτήρια IMO TIER III χωρίς επεξεργασία των καυσαερίων ( aftertreatment ). Σε λειτουργία με υγρό καύσιμο μόνο, οι κινητήρες πληρούν τα κριτήρια IMO TIER II. **(21)**

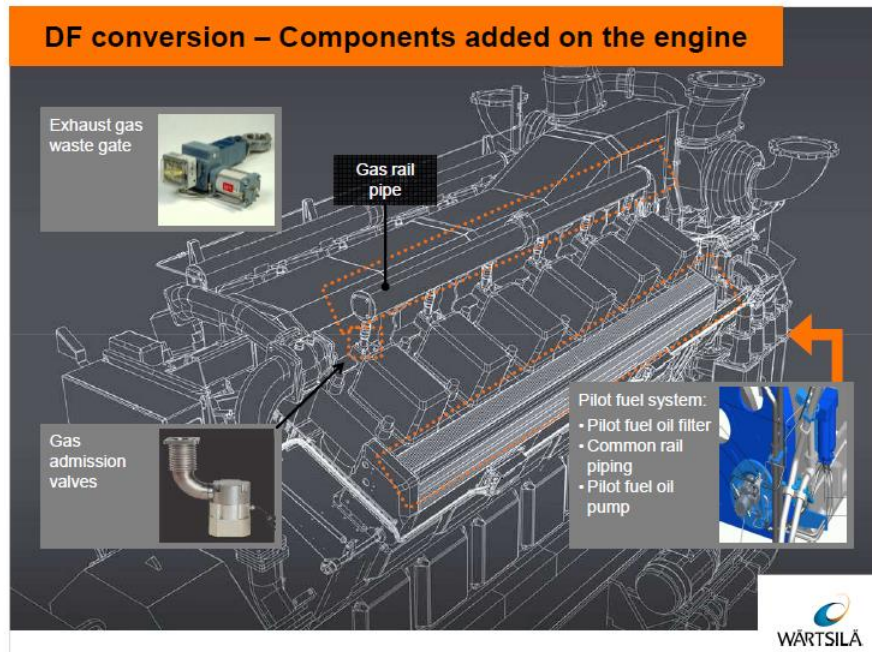
### 3.8 Μετατροπή κινητήρα πετρελαίου σε μεικτής καύσης

Για τη μετατροπή ενός κινητήρα πετρελαίου σε κινητήρα dual fuel, θα πρέπει να αντικατασταθούν κάποια τμήματα του κινητήρα , και να προστεθούν κάποια ακόμα. Τα τμήματα που πρέπει να αντικατασταθούν είναι οι κυλινδροκεφαλές, διωστήρες, κομμάτια camshaft του άξονα για διαφορετικούς χρονισμούς των βαλβίδων dual fuel, σύστημα ελέγχου, σύστημα έγχυσης καυσίμου με διπλή οπή ( και για τα δύο καύσιμα), οι υπερπληρωτές να είναι κατάλληλοι για λειτουργία διπλού καυσίμου και τέλος τα πιστόνια και οι δακτύλιοί τους.



Εικόνα 21 Εξαρτήματα που αλλάζουν (lean burn) (11)

Τα τμήματα τα οποία πρόκειται να προστεθούν στον κινητήρα είναι έξοδος παράκαμψης καυσαερίου (waste gate), βαλβίδες εισαγωγής αερίου, και το σύστημα πιλοτικού καυσίμου. Το τελευταίο αποτελείται από το φίλτρο του πιλοτικού καυσίμου, σωληνώσεις και την αντλία του πιλοτικού καυσίμου. **(11)**



Εικόνα 22 Εξαρτήματα που προστίθενται (lean burn) (11)

### 3.9 Διαρροή μεθανίου

Το φαινόμενο που ονομάζεται methane slip είναι αυτό το οποίο το καύσιμο (LNG), περνά μέσα από τη μηχανή και μετά από την εξάτμιση οδηγείται στο περιβάλλον χωρίς να χρησιμοποιηθεί. Ουσιαστικά απελευθερώνεται στο περιβάλλον τελείως ανεκμετάλλευτο. Αυτό είναι πρόβλημα για τους εξής λόγους:

- Είναι 23 φορές χειρότερο σαν αέριο του θερμοκηπίου σε σχέση με το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>).
- Το φαινόμενο αυτό μπορεί να μεταφραστεί σαν διαρροή αερίου, δηλαδή προσθέτει επιπλέον κατανάλωση καυσίμου η οποία θα πρέπει να συμπεριληφθεί στη συνολική κατανάλωση.
- Παρόλο που υπάρχει φυσικό μεθάνιο στην ατμόσφαιρα η πρόσθετη πηγή μεθανίου μέσω των κινητήρων αυτών διαταράσσει τη φυσική ισορροπία.
- Στους κινητήρες με λειτουργία Otto, το μεθάνιο καίγεται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στο θάλαμο καύσης, μέρος του μεθανίου μετατρέπεται σε φορμαλδεΐδες, σε ποσοστό περίπου 10% επί της ποσότητας που διαφεύγει στο περιβάλλον. Οι φορμαλδεΐδες όμως είναι ένας παράγοντας που προκαλεί καρκίνο σε άτομα που εισπνέουν ποσότητά τους.

Είναι λοιπόν σημαντικό λοιπόν να βρεθεί λύση ώστε αυτό το φαινόμενο να σταματήσει, ώστε να αποφευχθούν οι συνέπειες του σε όλους τους τομείς. Προκειμένου να αντιμετωπισθεί αυτό το φαινόμενο ακολουθούνται οι παρακάτω λύσεις:

- Η απευθείας διαρροή μεθανίου μπορεί να αποφευχθεί, με τον καλό συγχρονισμό των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής

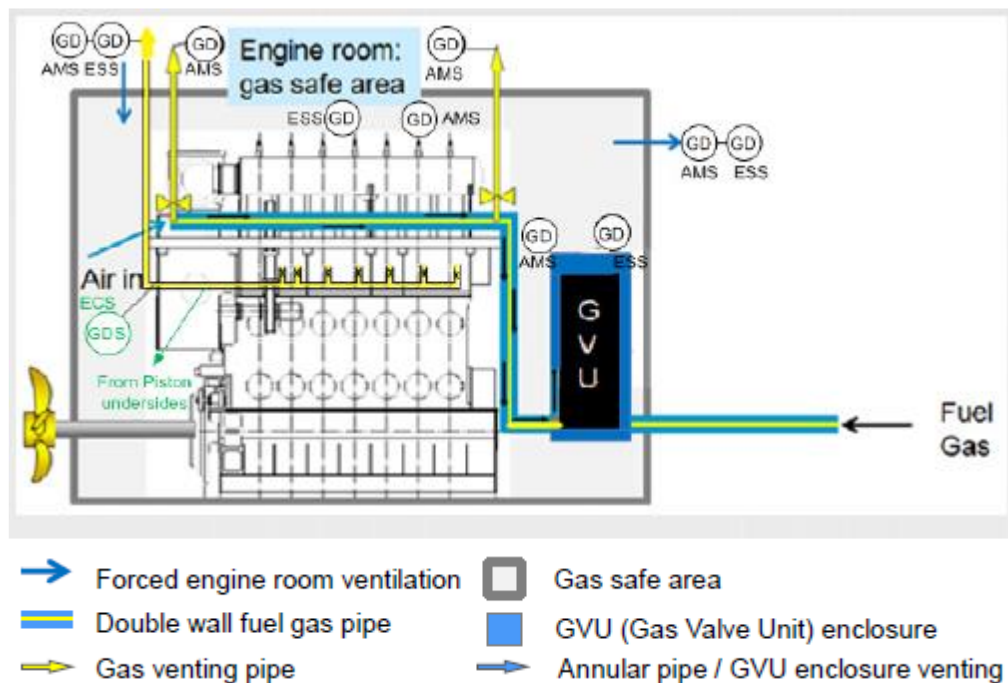
- Με χρήση τεχνολογίας προ-θαλάμου καύσης ώστε να επιτευχθεί πλήρης καύση
- Βελτιστοποιημένος χώρος καύσης, ώστε να αποφεύγονται 'dead volumes' (17)

### 3.10 Ανίχνευση αερίου ( gas detection)

Στο δωμάτιο του κινητήρα υπάρχουν αρκετοί ανιχνευτές αερίου για να εντοπίζουν τυχόν διαρροές. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν στις εξής θέσεις:

- Ένας ανιχνευτής στην έξοδο του εξαερισμού του δωματίου
- Ένας πάνω από τη μηχανή
- Εάν το GVU έχει εγκατασταθεί στο δωμάτιο του κινητήρα, τότε υπάρχει ένας ανιχνευτής πάνω από αυτό.
- Ένας ανιχνευτής από την κάτω πλευρά του εμβόλου συνδέεται απευθείας με το σύστημα ασφάλειας της μηχανής (ESS)
- Προαιρετικά τοποθετούνται ανιχνευτές στον αγωγό εξαερισμού

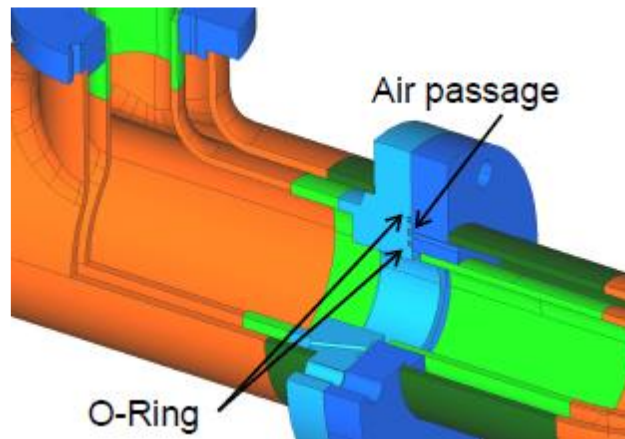
Παρακάτω φαίνεται και το αντίστοιχο σχήμα του μηχανοστασίου που περιέχει τον κινητήρα και την μονάδα GVU.



Εικόνα 23 Μηχανοστάσιο (lean burn) (17)

Επίσης στο σχήμα φαίνονται οι αγωγοί εξαερισμού, οι σωλήνες μεταφοράς αερίου διπλού τοιχώματος, εξαερισμός σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης και το κάλυμμα του συστήματος GVU. Ο χώρος του μηχανοστασίου είναι ασφαλής από διαρροές αερίου σε χώρους έξω από αυτόν. Οι σωλήνες μεταφοράς του αερίου καυσίμου έχουν διπλά τοιχώματα, και ο χώρος ανάμεσά τους αερίζεται πετυχαίνοντας τουλάχιστον 30 αλλαγές το λεπτό. Σε περίπτωση διαρροής, ενεργοποιείται ο

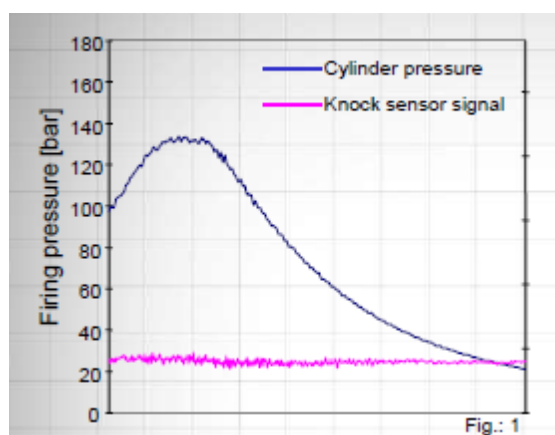
συναγερμός, αλλάζει η λειτουργία σε κατανάλωση μόνο πετρελαίου και οι σωλήνες αερίζονται. Παρακάτω φαίνεται μια τομή των σωλήνων αυτών. (17)



Εικόνα 24 Σωλήνας διπλού τοιχώματος (lean burn) (17)

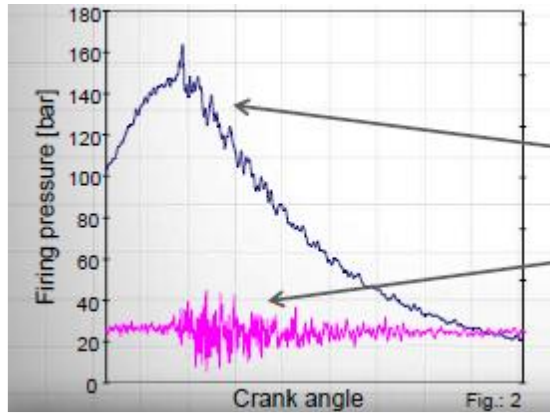
### 3.11 Φαινόμενο Knocking

Όταν το αέριο καύσιμο εισέρχεται στο θάλαμο καύσης, και αναμειγνύεται με τον αέρα καύσης, υπάρχει πιθανότητα για μη φυσιολογική καύση όπως knocking ή pre-ignition. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο, η μέγιστη ισχύς εξόδου του δίχρονου κινητήρα χαμηλής πίεσης διπλού καυσίμου, κρατείται χαμηλότερη σε σχέση με αυτήν του αντίστοιχου κινητήρα diesel. Επίσης η αύξηση του λόγου αέρα-καυσίμου βοηθά στη μείωση του φαινομένου. Παρακάτω φαίνονται δύο διαγράμματα πίεσης-γωνίας κυλίνδρου.



Σχήμα 21 Πίεση κυλίνδρου- κανονική καύση (8)



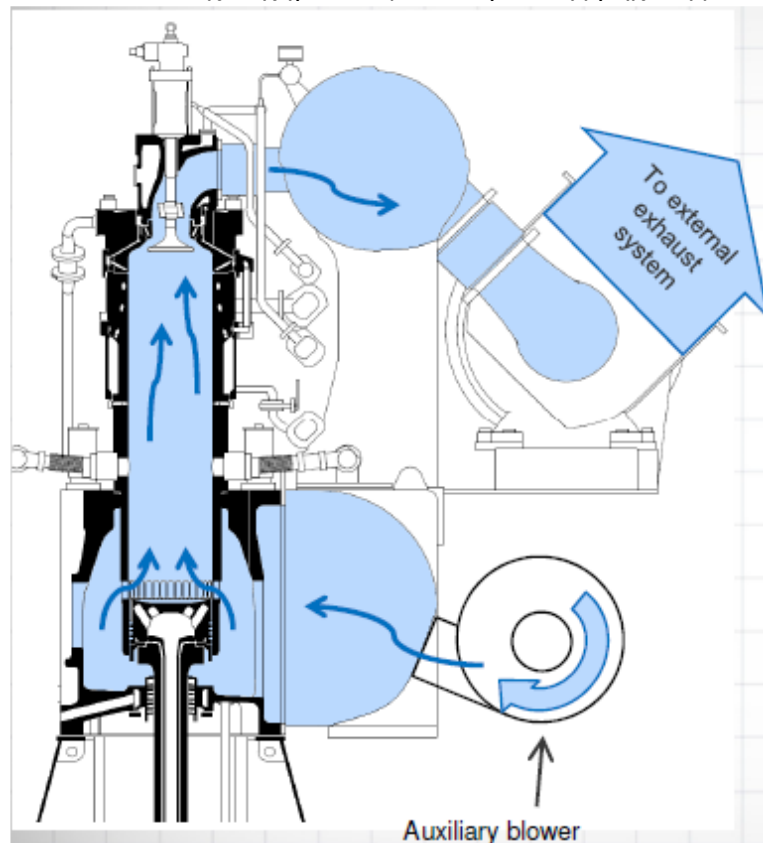


Σχήμα 22 Πίεση κυλίνδρου- knocking (8)

Και στα δύο διαγράμματα εκτός της πίεσης φαίνεται με ροζ χρώμα και το σήμα του σένσορα knocking. Το πρώτο διάγραμμα αναφέρεται σε κανονική καύση, ενώ το δεύτερο σε καύση με το φαινόμενο knocking. Το φαινόμενο εντοπίζεται από έναν σένσορα πίεσης και από έναν σένσορα knocking. Υπάρχει σε κάθε κύλινδρο από ένας. (8)

### 3.12 Βασική δομή του συστήματος εξαερισμού του κυλίνδρου της μηχανής

Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο σχήμα ενός κυλίνδρου της μηχανής.

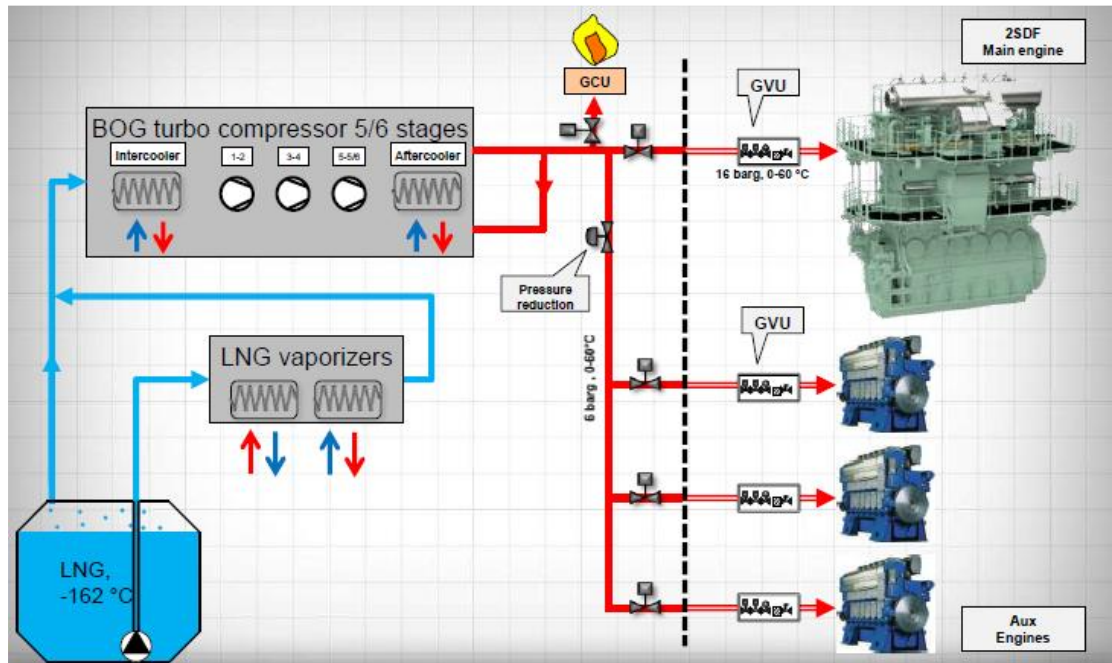


Εικόνα 25 Εξαερισμός κυλίνδρου (17)

Μετά από μια αναγκαστική διακοπή της λειτουργίας με αέριο, γίνεται “κάθαρση” του κυλίνδρου με βοηθητικούς φυσητήρες (blowers), καθώς οι βαλβίδες εξαγωγής ανοίγουν αυτόματα. (17)

### 3.13 Διαδικασία παροχής LNG

Η διαδικασία κατά την οποία το φυσικό αέριο παρέχεται στους κινητήρες περιγράφεται παρακάτω σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 26 Σύστημα παροχής LNG (lean burn)

Το BOG αναρροφάται από το πάνω μέρος της δεξαμενής, συμπιέζεται στους συμπιεστές BOG turbo compressors, και οδηγείται στις μηχανές αφού περάσει από τη μονάδα GVU. Το LNG αντλείται από τον πυθμένα της δεξαμενής, ατμοποιείται στους ατμοποιητές ( vaporizer), και ύστερα ακολουθεί την ίδια διαδρομή με το BOG.



### 3.14 Σύστημα τροφοδοσίας αερίου χαμηλής πίεσης

Το σύστημα αυτό αποτελείται από τα εξής εξαρτήματα, όπως απεικονίζονται και στο παρακάτω σχήμα:

- 1) Αγωγός τροφοδοσίας
- 2) Δεξαμενή αερίου ( σφραγισμένη αεροστεγώς )
- 3) Μονάδα πίεσης
- 4) Ατμοποιητής
- 5) Βαλβίδες ελέγχου
- 6) Θέρμανση
- 7) Σωλήνες διπλού τοιχώματος
- 8) GVU
- 9) Σωλήνες προμήθειας αερίου στον κινητήρα

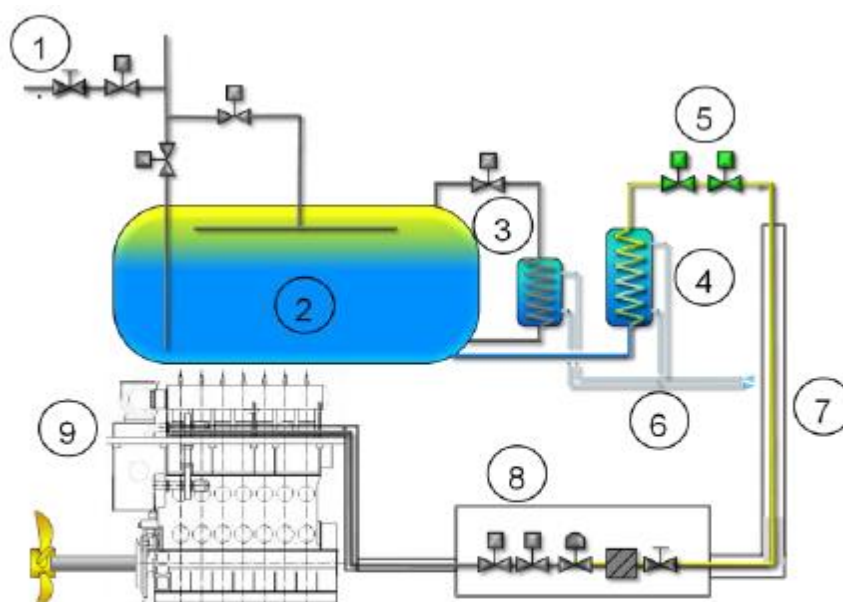


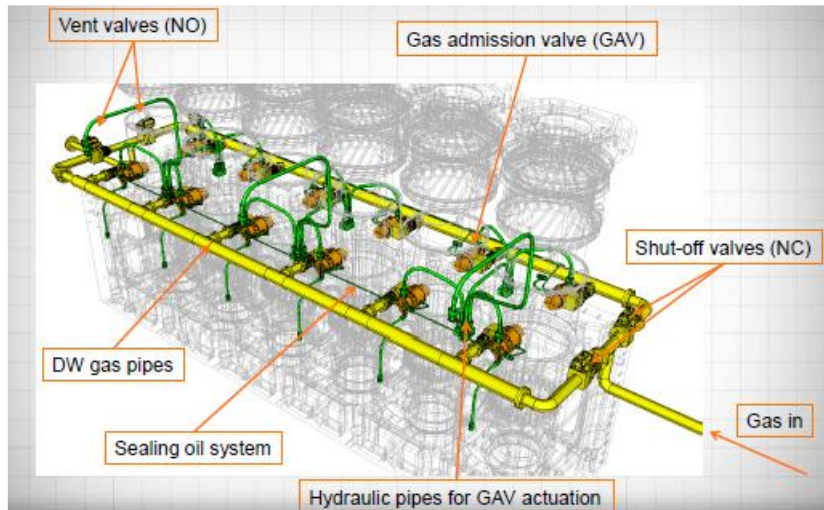
Figure 4: The main elements of the low pressure gas supply system

Εικόνα 27 Σύστημα τροφοδοσίας αερίου (lean burn)

### 3.15 Σύστημα εισαγωγής αερίου στον κύλινδρο

Υπάρχουν δύο βαλβίδες εισαγωγής αερίου σε κάθε κύλινδρο. Η κάθε μία από τις βαλβίδες αυτές ενεργοποιείται υδραυλικά. Το σύστημα έχει υδραυλική παροχή ισχύος από την βαλβίδα εξαγωγής, με σερβομηχανισμό λαδιού. Εξασφαλίζεται ακριβής έλεγχος της εισαγωγής αερίου, από το πλήρες φορτίο έως το ρελαντί. Το σύστημα αυτό είναι ο λόγος για τον οποίο είναι βελτιστοποιημένο το μίγμα

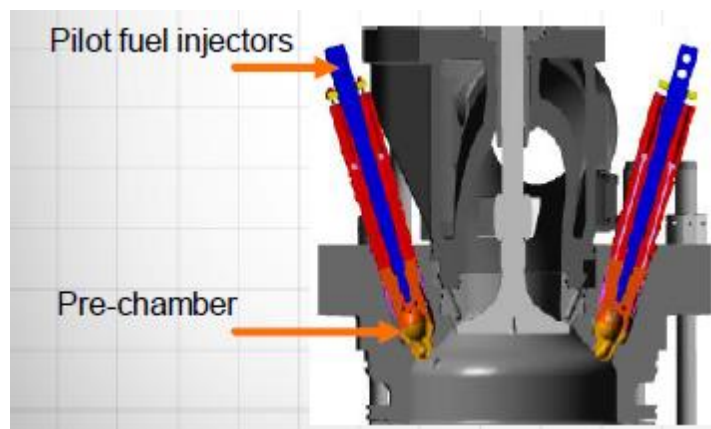
καυσίμου-αέρα, αλλά και η απόδοση του κινητήρα. Επίσης περιέχει σωλήνες διπλού τοιχώματος για ενισχυμένη ασφάλεια.



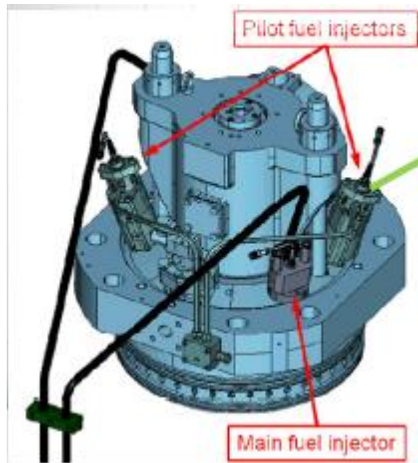
Εικόνα 28 Σύστημα εισαγωγής αερίου στον κύλινδρο (lean burn) (10)

### 3.16 Σύστημα πιλοτικού καυσίμου

Το πιλοτικό καύσιμο χρησιμοποιείται για την έναυση του μίγματος στον κύλινδρο, με ποσότητα μικρότερη του 1% επί του συνολικού καυσίμου. Όπως έχει περιγραφεί και προηγούμενα, χρησιμοποιείται στον κύλινδρο τεχνολογία pre-chamber για καλύτερη έναυση και σταθερή καύση. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ο εγχυτήρας πιλοτικού καυσίμου στην κεφαλή του κυλίνδρου.

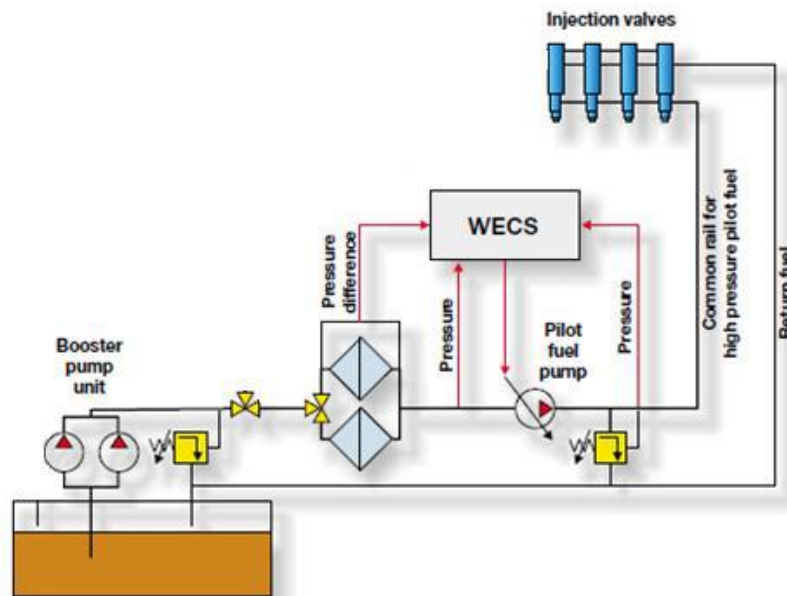


Εικόνα 29 Σύστημα πιλοτικού καυσίμου (lean burn) (8)



Εικόνα 30 Εγχυτήρες καυσίμου (lean burn) (8)

Κάθε κύλινδρο τον εξυπηρετεί μία αντλία καυσίμου. Στο σύστημα της αντλίας καυσίμου χρησιμοποιούνται φίλτρα και ρυθμιστής πίεσης. Η αντλία αυτή μπορεί να λειτουργεί είτε ηλεκτρικά, είτε μηχανικά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σύστημα της αντλίας, από την τροφοδοσία καυσίμου μέχρι την διανομή του στις βαλβίδες έγχυσης. (8)



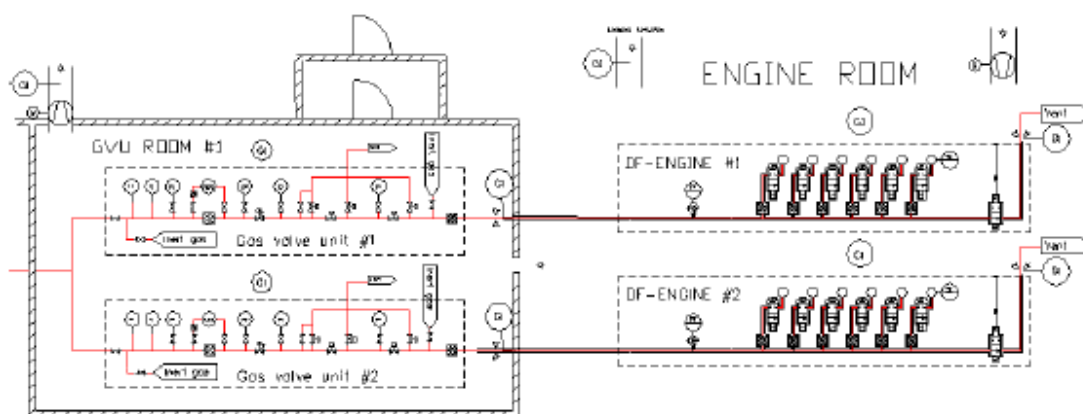
Εικόνα 31 Σύστημα αντλίας καυσίμου (lean burn) (8)

### 3.17 Μονάδα GVU

Ο κάθε κινητήρας χρειάζεται ειδική μονάδα GVU. Η μονάδα αυτή εκτελεί μια διαδικασία δοκιμής διαρροών πριν από την έναρξη λειτουργίας με αέριο. Η βαλβίδα ρύθμισης πίεσης ρυθμίζει την πίεση τροφοδοσίας αερίου στον κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του. Η μονάδα GVU αποτελείται από τα ακόλουθα εξαρτήματα:

- Βαλβίδα χειροκίνητης απενεργοποίησης
- Φίλτρο αερίου
- Αποκλεισμός και εξαέρωση της βαλβίδας
- Βαλβίδα ελέγχου πίεσης
- Βαλβίδες εξαερισμού
- Βαλβίδες αδρανοποίησης με άζωτο

Η μονάδα GVU, εγκαθίσταται πάντα σε ξεχωριστό δωμάτιο από τον κινητήρα, το οποίο προσθέτει κόστος πολυπλοκότητας και εγκατάστασης. Απαιτεί ειδικό χώρο συμπεριλαμβανομένου αγωγού έκρηξης από το δωμάτιο. Απαιτείται σφράγιση μεταξύ του χώρου του GVU και του περιβάλλοντος και μέγιστη απόσταση 10 μέτρων από τον κινητήρα. Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο σχήμα:



Εικόνα 32 Μονάδα GVU στο μηχανοστάσιο (11)

Εάν η μονάδα GVU βρίσκεται σε κάλυμμα, τότε έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Μπορεί να τοποθετηθεί στο ίδιο μηχανοστάσιο, και δεν απαιτείται ειδικός χώρος
- Συμπαγής σχεδιασμός και εύκολη εγκατάσταση
- Ενσωματωμένο σύστημα εξαερισμού όταν συνδυάζεται με LNG rac

- Είναι βέλτιστο για εγκατάσταση retrofit λόγω του συμπαγούς μεγέθους
- Χαμηλότερο συνολικό κόστος επένδυσης σε σύγκριση με το υπάρχον GVU
- Μικρότερος όγκος εξαερισμού άρα και μικρότερο κόστος εξαερισμού

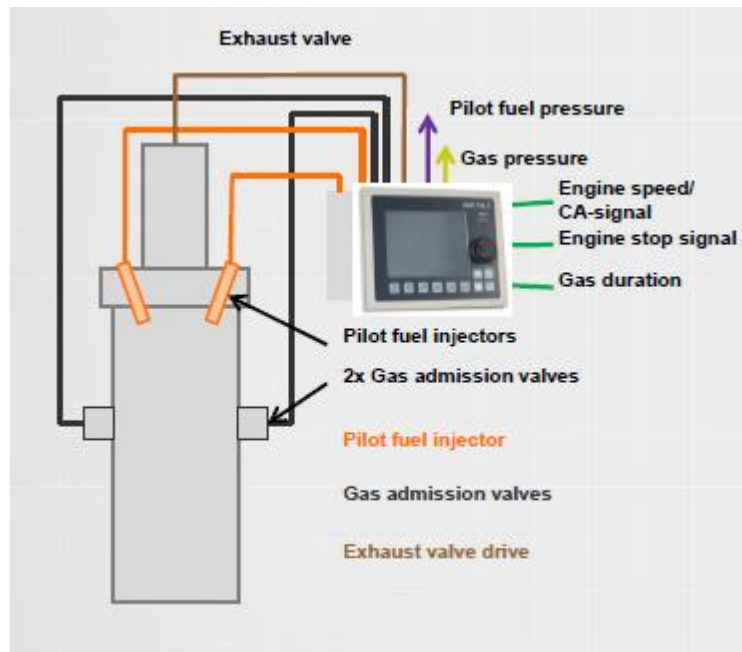
Παρακάτω φαίνεται μια φωτογραφία ενός τέτοιου συστήματος: **(11)**



*Εικόνα 33 Μονάδα GVU με κάλυμμα (11)*

### **3.18 Έλεγχος κινητήρα και σύστημα αυτοματισμού**

Το σύστημα ελέγχου περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία ελέγχου σε ένα σύστημα. Πραγματοποιείται ατομικός έλεγχος των σχετικών παραμέτρων της καύσης, ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του κινητήρα. Υπάρχουν λειτουργίες ασφαλείας σχετικές με το αέριο, συμπεριλαμβανομένης της ανίχνευσης φαινομένων όπως knocking και misfiring. **(9)**



Εικόνα 34 Σύστημα ελέγχου κινητήρα (lean burn) (9)

### 3.19 Σύστημα εξάτμισης (rupture discs)

Το σύστημα εξάτμισης προσαρμόζεται με χρήση rupture discs. Αυτό έχει ως συνέπεια να προστατεύεται το σύστημα εξάτμισης σε περίπτωση έκρηξης αερίων εξάτμισης. Τα rupture discs είναι αντικαταστάσιμα. Η έξοδος εξαερισμού σε περίπτωση έκρηξης, πρέπει να οδηγείται σε ασφαλή περιοχή.

### 3.20 LNG pac

Είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα για αέριο καύσιμο σε LNG πλοία. Περιλαμβάνει το σταθμό ανεφοδιασμού, δεξαμενές LNG και σχετικό εξοπλισμό όπως το σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης. Προσφέρει το LNG fuel system ως προϊόν από μόνο του ή ως ένα ολοκληρωμένο πακέτο συστήματος πρόωσης. Το αναβαθμισμένο LNG pac προσφέρει μια απλή λύση για τη διαχείριση του αερίου καυσίμου τοποθετώντας το airlock και το control cabinet μέσα στο χώρο σύνδεσης της δεξαμενής. Τα λειτουργικά εξαρτήματα του GVU μπορούν επίσης να τοποθετηθούν στον ίδιο χώρο. Επίσης το heating media skid, αντικαθίσταται από ένα άλλο που δεν χρειάζεται αντλίες, και μπορεί να χρησιμοποιεί άμεσα το ψυκτικό νερό του κινητήρα. Έτσι χρειάζεται λιγότερες διασυνδέσεις και λιγότερη δουλειά για την εγκατάστασή του. Το LNG pac μπορεί να εξοπλιστεί είτε με μόνωση με κενό αέρος, είτε με PUR μόνωση για εγκατάσταση είτε πάνω στο κατάστρωμα, είτε από κάτω ανάλογα των απαιτήσεων του fuel gas handling system. Το νέο LNG pac έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

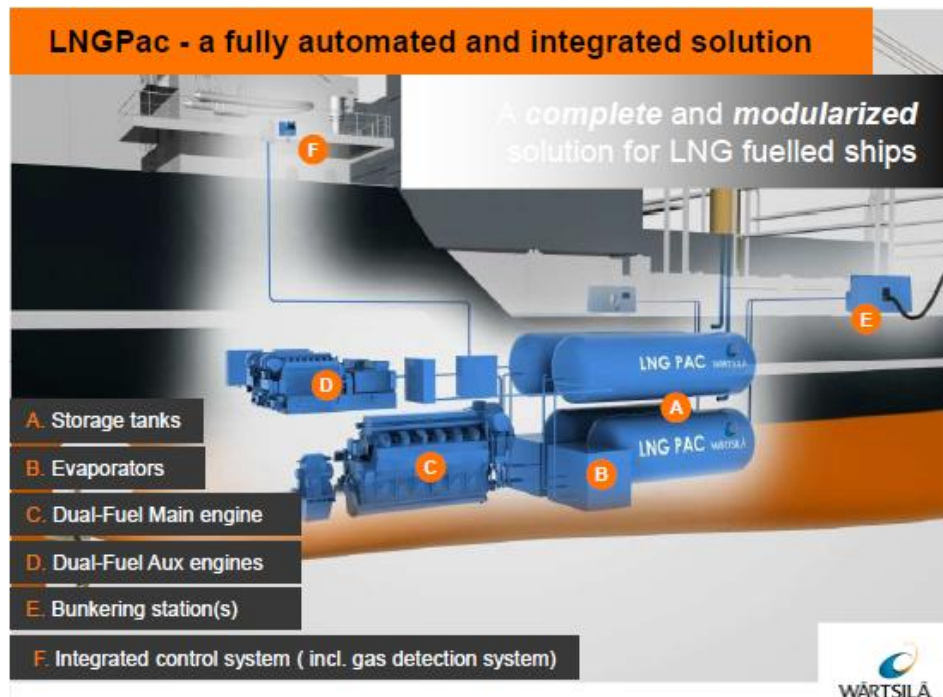
- Αποδοτική αξιοποίηση χώρου
- Λιγότερες διασυνδέσεις
- Μειωμένες κεφαλαιουχικές δαπάνες και κόστη λειτουργίας



- Αυξημένη αξιοπιστία
- Μεγιστοποιημένο όγκο του LNG storage.

Είναι μια λύση η οποία ταιριάζει σε διαφορετικά προφίλ πλοίων ( ως προς την αυτονομία και την κατανάλωση αερίου καυσίμου). Στα LNG pac υπάρχει εύρος ανάμεσα σε:

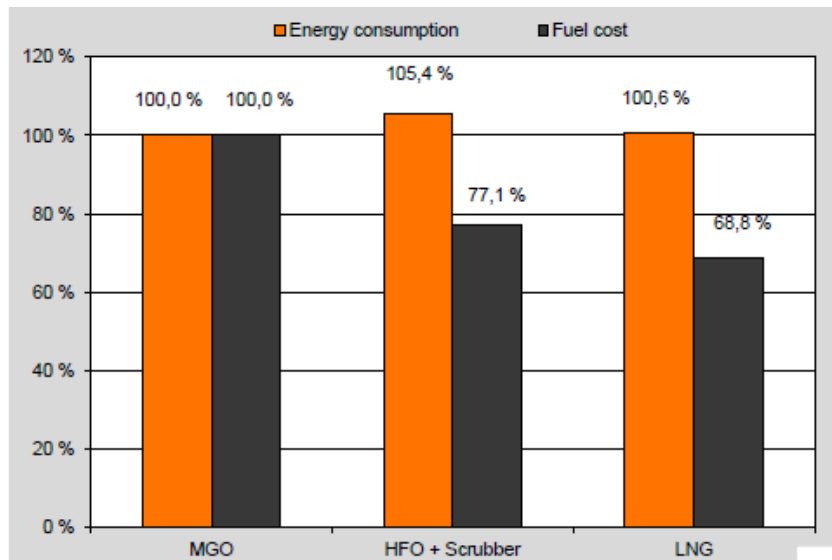
- 13 μεγέθη δεξαμενών, από  $50 m^3$  έως  $530 m^3$ .
- 6 διαφορετικές διαμέτρους δεξαμενών, ώστε να διασφαλίζεται μέγιστη χρήση του χώρου όπου τοποθετούνται
- Θεωρητική μέγιστη αυτονομία σε MWh, υπολογισμένη για όλες τις δεξαμενές, από 240 MWh έως 1160 MWh **(11)**



Εικόνα 35 LNG pac (11)

### 3.21 Οικονομικά στοιχεία

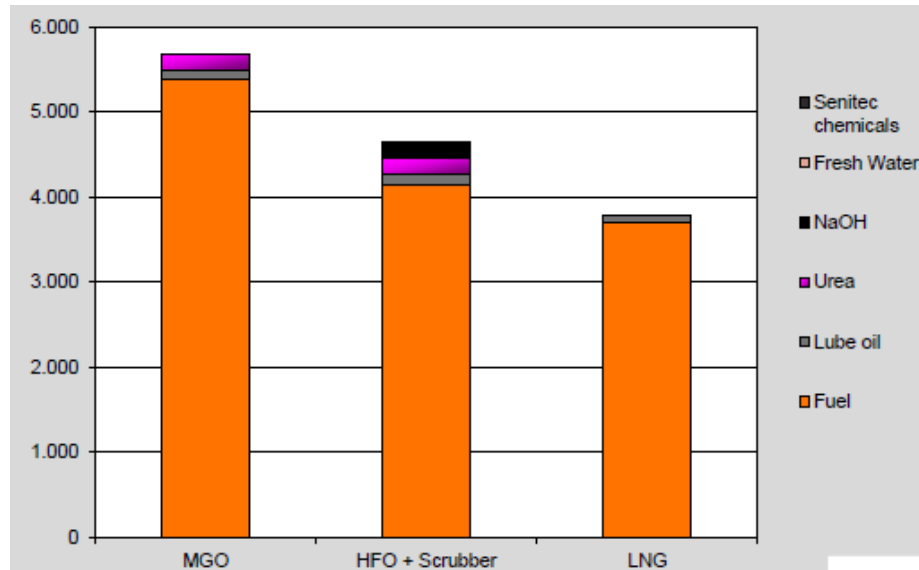
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας και το κόστος του καυσίμου ( επί τοις εκατό) σε σύγκριση με λειτουργία MGO (100%), της χρήσης HFO με scrubber και LNG.



Σχήμα 23 Ετήσια κατανάλωση- κόστος καυσίμου (21)

Όπως παρατηρείται, η χρήση LNG έχει το μικρότερο κόστος καυσίμου καθώς και η ενέργεια που καταναλώνει είναι σχεδόν ίδια με χρήση MGO.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι ετήσιες καταναλώσεις (σε χιλιάδες ευρώ) καυσίμου, λαδιού λίπανσης και άλλων υλικών για τις τρεις διαφορετικές λειτουργίες.

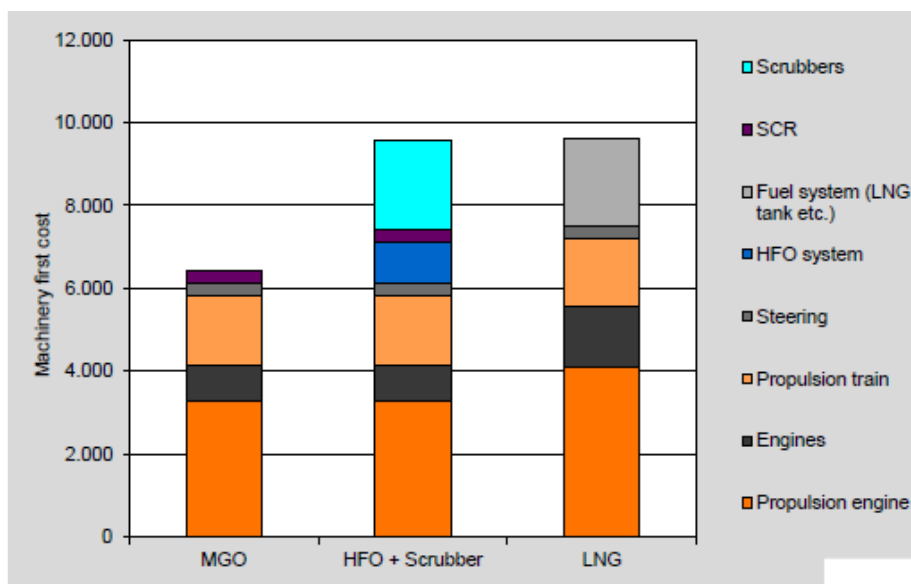


Σχήμα 24 Ετήσιες καταναλώσεις (21)

Παρατηρούμε ότι με χρήση LNG, η ολική κατανάλωση, αλλά και η κατανάλωση μόνο καυσίμου είναι μικρότερη.

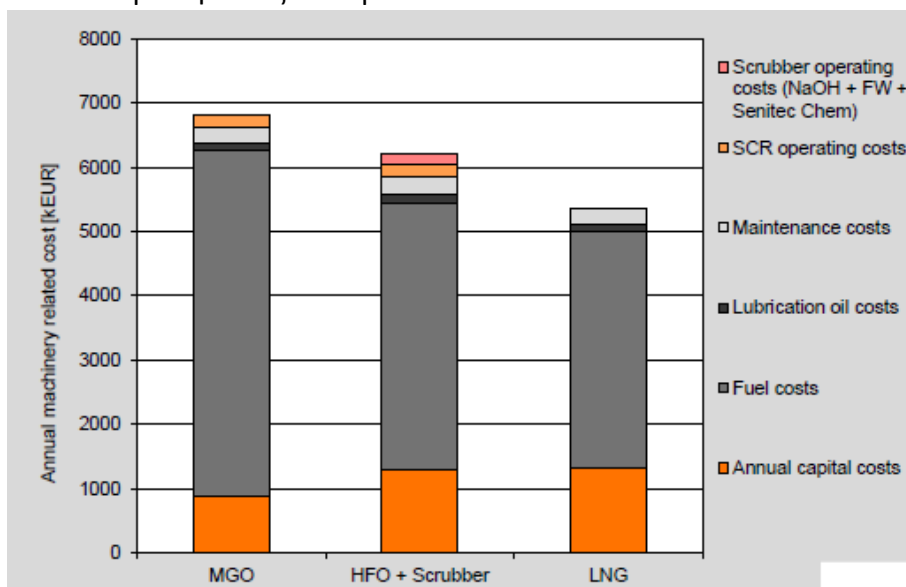
Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται τα κόστη εγκατάστασης της μηχανής και των βοηθητικών εξαρτημάτων που απαιτούνται για κάθε μία τεχνολογία αντίστοιχα.





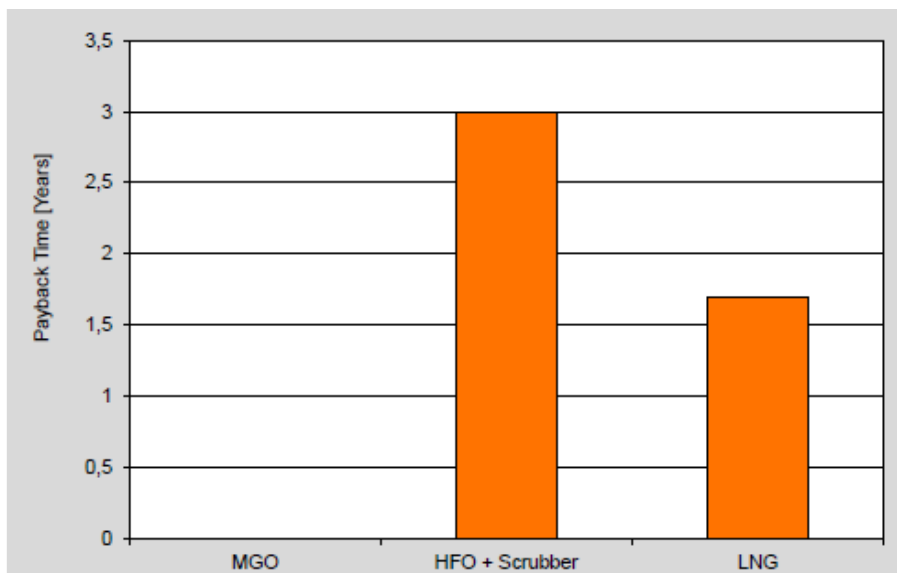
Σχήμα 25 Κόστη εγκατάστασης (21)

Παρατηρούμε ότι το συνολικό κόστος στην λειτουργία LNG είναι υψηλότερο, όμως είναι μια τεχνολογία που σε βάθος χρόνου επιφέρει κέρδος και καλύπτει όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις για τους κανονισμούς που πρέπει να συμμορφωθεί το κάθε πλοίο. Στο επόμενο σχήμα παρατηρούμε τα ετήσια κόστη λειτουργίας της μηχανής και του απαραίτητου εξοπλισμού.



Σχήμα 26 Ετήσια κόστη λειτουργίας (21)

Εδώ παρατηρούμε ότι οικονομικότερη λύση είναι αυτή με το LNG. Τέλος παρουσιάζεται ο χρόνος αποπληρωμής συγκριτικά της χρήσης HFO με scrubber, και της χρήσης LNG.



Σχήμα 27 Χρόνος αποπληρωμής (21)

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση LNG έχει το μισό χρόνο αποπληρωμής έναντι της άλλης λύσης ( λίγο παραπάνω από ενάμιση χρόνο). **(21)**

## 4. Συγκριτική αξιολόγηση των δύο μεθόδων

### 4.1 Σύγκριση low vs high pressure Winterthur gas and diesel (23)

Παρακάτω πρόκειται να παρουσιαστεί μια συγκριτική αξιολόγηση για τις δύο τεχνικές μεικτής καύσης (χαμηλής – υψηλής πίεσης) όπως παρουσιάστηκαν από την εταιρία Winterthur gas and diesel το 2015. Αρχικά θα συγκριθούν οι δύο τεχνικές σε συγκεκριμένους τομείς. Τα αποτελέσματα από την σύγκριση αυτή απαντώνται με το σύμβολο (+) όπου μπορεί να έχουν από ένα έως τρία, και προφανώς όσο περισσότερα, τόσο καλύτερη είναι η λύση αυτή. Οι απαντήσεις είναι υποκειμενικές καθώς δεν υπάρχουν συγκριτικά νούμερα.

#### 4.1.1 Προκλήσεις για ανάπτυξη

##### Low pressure +++

Η ανάπτυξη κινητήρων διπλού καυσίμου χαμηλής πίεσης είναι αρκετά απαιτητική. Ο κινητήρας απαιτεί το κατάλληλο ομογενές μίγμα αέρα- αερίου καυσίμου ( όχι πολύ πλούσιο- όχι πολύ πτωχό ), το οποίο πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο θάλαμο καύσης. Ως εκ τούτου, η σωστή ποσότητα αέρα καύσης και αερίου καυσίμου, πρέπει να αναμειχθεί στο θάλαμο καύσης έτσι ώστε να εξασφαλίζει ένα ομογενές μίγμα. Οι περιοχές που έχουν πιο πλούσιο μείγμα αέρα- καυσίμου, μπορεί να οδηγηθούν σε αυτανάφλεξη, ενώ περιοχές με πιο πτωχό μίγμα μπορεί να μην καούν, με αποτέλεσμα το αέριο καύσιμο να οδηγηθεί στο περιβάλλον μέσω της εξάτμισης.

##### High pressure+

Η πρόκληση για ανάπτυξη για έναν κινητήρα υψηλής πίεσης διπλού καυσίμου, είναι κυρίως ο ασφαλής χειρισμός του αερίου καυσίμου όταν συμπιεστεί στα 300 bar ο οποίος όμως είναι εφικτός.

Εκτός από τον έλεγχο της ποσότητας αέρα καύσης και καυσίμου ώστε να είναι κατάλληλο το μίγμα, πρέπει ο λόγος συμπίεσης να είναι μειωμένος στον κύκλο Otto, ενώ να κρατείται όσο πιο ψηλά γίνεται στον κύκλο Diesel.

#### 4.1.2 Ασφάλεια

Ανεξάρτητα από το ποια τεχνική εφαρμόζεται σε κάθε κινητήρα, η ασφάλεια στο πλοίο πρέπει να είναι στα ίδια επίπεδα με τους συμβατικούς κινητήρες ντίζελ. Επομένως απαιτούνται σωλήνες διπλού τοιχώματος και στις δύο τεχνικές, έτσι ώστε αν υπάρχει τυχόν διαρροή αερίου, να εντοπίζεται αμέσως και να μην μπορεί να μπει στο δωμάτιο του κινητήρα.

##### Low pressure +++

- Μεγαλύτεροι σωλήνες αερίου, αλλά με μικρότερη πίεση/πυκνότητα ( ίδια ποσότητα αερίου στον κινητήρα με αυτήν του κινητήρα υψηλής πίεσης)
- Μικρό ρίσκο για διαρροές

#### **High pressure ++**

- Μικρότεροι σωλήνες αερίου, αλλά με μεγαλύτερη πίεση/πυκνότητα ( ίδια ποσότητα αερίου στον κινητήρα με αυτήν του κινητήρα χαμηλής πίεσης)
- Μεγαλύτερο ρίσκο για διαρροές

#### **4.1.3 Απόδοση κινητήρα (ισχύς εξόδου)**

Ένας κινητήρας διπλού καυσίμου υψηλής πίεσης εφαρμόζει την ίδια διαδικασία καύσης με τον κινητήρα Diesel. Έτσι δεν αναμένονται βασικές διαφορές στην απόδοσή του. Αντίθετα στους κινητήρες χαμηλής πίεσης διπλού καυσίμου αναμένονται διαφορές στην απόδοση λόγω διαφορών στην διαδικασία καύσης.

#### **Low pressure +**

- Μειωμένη ισχύς εξόδου, σε σύγκριση με συμβατικό κινητήρα ντίζελ. Συνήθως, ως συμβατικοί κινητήρες ντίζελ επιλέγονται αυτοί με μειωμένη ισχύ για λόγους εξοικονόμησης καυσίμου. Οι κινητήρες χαμηλής πίεσης διπλού καυσίμου, έχουν πολύ παρόμοια χαρακτηριστικά απόδοσης σε όλο το πεδίο αξιολόγησης, και ελαφρά μεγαλύτερη στη μέγιστη περιοχή.

#### **High pressure +++**

- Ίδια ισχύς εξόδου με αυτή των συμβατικών κινητήρων ντίζελ

#### **4.1.4 Απόδοση κινητήρα ( εξάρτηση από το methane number)**

Καθώς το μίγμα αέρα- αερίου καυσίμου συμπιέζεται στο θάλαμο καύσης, πριν την ελεγχόμενη ανάφλεξη, πρέπει να αποφευχθεί η ανεξέλεγκτη αυτανάφλεξη. Εφόσον το αέριο καύσιμο είναι ένα μίγμα από διάφορα αέρια, η αντίστασή του στην αυτανάφλεξη, όπου εξαρτάται από τον αριθμό μεθανίου ( methane number), μπορεί να ποικίλλει. Για παράδειγμα, για ένα αέριο καύσιμο με χαμηλή αντίσταση στην αυτανάφλεξη, η μέγιστη ισχύς εξόδου του κινητήρα πρέπει να μειωθεί. Αυτό θα μπορούσε να είναι ένα άλλο μειονέκτημα, οπότε απαιτείται περισσότερη διερεύνηση. Για λειτουργία σε ψυχρότερες συνθήκες από αυτές του σχεδιασμού, μεγαλύτερη ισχύς εξόδου μπορεί να επιτευχθεί. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πλειονότητα των διαθέσιμων καυσίμων έχει αριθμό μεθανίου στην περιοχή του 70-90, ένα πλοίο που τροφοδοτείται με LNG, μπορεί πάντα να λειτουργεί στην ταχύτητα λειτουργίας του η οποία είναι τυπικά στο 85-90% της μέγιστης ισχύς εξόδου. Για πλοία που μεταφέρουν LNG, και ταυτόχρονα το χρησιμοποιούν, η κατάσταση είναι κάπως διαφορετική. Σε επίπεδα MN100, το natural boil of gas έχει υψηλό αριθμό μεθανίου, αφού το ελαφρύτερο κλάσμα ( μεθάνιο) εξατμίζεται πρώτο. Στο forced boil of gas, εκτελείται συνήθως ελεγχόμενη εξάτμιση, η οποία επιτρέπει στα βαρύτερα κλάσματα να επιστρέφουν στη δεξαμενή και παραδίδεται το ελαφρύτερο μεθάνιο στον κινητήρα. Έτσι το αέριο καύσιμο που παραδίδεται στον κινητήρα έχει αριθμό μεθανίου περίπου 80, ενώ το LNG που βρίσκεται στη δεξαμενή έχει χαμηλότερο.

#### Low pressure +

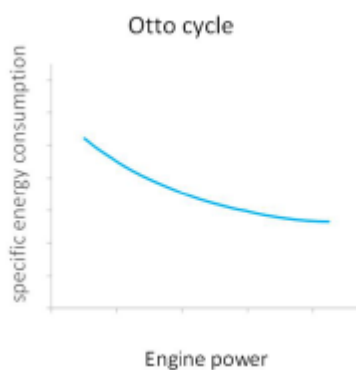
- Εξάρτηση από methane number ( μπορεί να χρησιμοποιήσει MN70-90)

#### High pressure +++

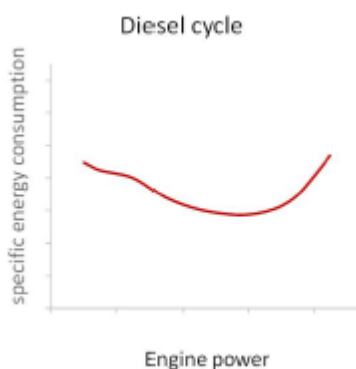
- Δεν υπάρχει εξάρτηση από methane number

#### 4.1.5 Αποδοτικότητα

Είναι μια σχέση ανάμεσα στην ειδική ενέργεια που καταναλώνεται και την ισχύ εξόδου. Παρακάτω φαίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τους δύο τύπους κινητήρων.



Σχήμα 28 Καταναλισκόμενη ενέργεια κύκλου Otto (23)



Σχήμα 29 Καταναλισκόμενη ενέργεια κύκλου Diesel (23)

Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, στα μεγάλα φορτία, ο κύκλος Otto ( χαμηλής πίεσης) , έχει ίδια ή μεγαλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με τον Diesel ( υψηλής πίεσης). Σε μερικά φορτία ο κύκλος Diesel, έχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Ωστόσο οι κινητήρες υψηλής πίεσης απαιτούν παροχή αερίου καυσίμου υψηλής πίεσης το οποίο καταναλώνει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με κινητήρες χαμηλής πίεσης. Επιπλέον, οι κινητήρες υψηλής πίεσης απαιτούν ένα σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων ώστε να λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα εκπομπών NOX. Ανάλογα με το επιλεγμένο σύστημα, καταναλώνονται επιπρόσθετα χημικά, ηλεκτρική ενέργεια και η απόδοση του κινητήρα μειώνεται. Έτσι είναι

φρόνιμο η αποδοτικότητα του κινητήρα να μην εξετάζεται μονομερώς, αλλά να εξετάζεται και η συνολική απόδοση του συστήματος.

#### **4.1.6 Σύστημα διαχείρισης αερίου καυσίμου**

##### **(α) Συμπιεστές**

Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο τύπων κινητήρων διπλού καυσίμου, είναι προφανώς η πίεση του αερίου καυσίμου, δηλαδή ο σχεδιασμός των εξαρτημάτων που ταιριάζουν στην χαμηλή ή υψηλή πίεση αερίου και η ανάγκη να επιτευχθούν αυτά τα επίπεδα πίεσης του αερίου.

##### **Low pressure +++**

Μεγάλο εύρος από συμπιεστές, όπως φυγοκεντρικοί, τύπου κοχλία και πιστονιού είναι διαθέσιμο

##### **High pressure +**

Μόνο συμπιεστές τύπου πιστονιού είναι διαθέσιμοι, και αυτοί από λίγες εταιρίες.

##### **(β) Αντλίες LNG**

##### **Low pressure +++**

Χρησιμοποιεί φυγοκεντρικές αντλίες το οποίο έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Είναι απλοί ρότορες που στρέφονται γύρω από έναν άξονα
- Απαιτεί χαμηλό κόστος συντήρησης

##### **High pressure +**

Χρησιμοποιεί:

- Φυγοκεντρικές αντλίες
- Αντλίες τύπου πιστονιού. Αποτελείται από κινούμενα πιστόνια και βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής. Απαιτείται υψηλό κόστος συντήρησης.

#### **4.2 Μελέτες εταιρίας Winterthur gas and diesel**

Μέχρι στιγμής τα περισσότερα αξιολογημένα θέματα δείχνουν σαφή πλεονεκτήματα, ή έστω παρόμοια αποτελέσματα για τους κινητήρες χαμηλής πίεσης διπλού καυσίμου. Για λεπτομερή διερεύνηση των επιπτώσεων της κάθε τεχνολογίας στα λειτουργικά έξοδα, και στις δαπάνες επενδύσεων, θα παρουσιαστούν παρακάτω δύο μελέτες. Οι ακόλουθες περιπτώσιολογικές μελέτες βασίζονται στα τελευταία διαθέσιμα δεδομένα ( Ιούλιος 2015) για τους κινητήρες X-DF ως αντιπροσωπευτικοί της τεχνολογίας χαμηλής πίεσης, και τους κινητήρες MAN ME-GI ως αντιπροσωπευτικοί της τεχνολογίας υψηλής πίεσης. Οι μελέτες αυτές έγιναν από την εταιρία Winterthur gas and diesel.

#### 4.2.1 Μελέτη για LNG carrier

Επιλέγεται ένα LNG carrier με μέγεθος από 170,000 m<sup>3</sup> έως 180,000 m<sup>3</sup>. Για την μελέτη επιλέχθηκε το παρακάτω «σχήμα» για τους κινητήρες χαμηλής και υψηλής πίεσης:

- LP: 2 x 5X72DF

HP: 2 x 5G70ME-GI

CMCR: 2 x 12,500 kW @ 69.0 rpm

CSR: 90% CMCR

- LP: 2 x 8L34DF + 2x 6L34DF

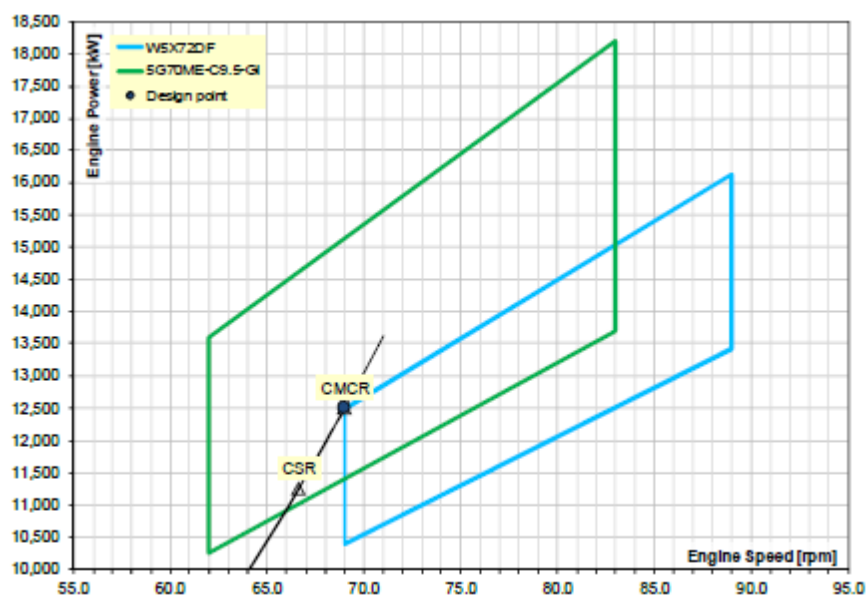
HP: 2 x 9L34DF + 2x 6L34DF

- LP: 2 x Centrifugal compressor

HP: 2 x Piston compressor,

HP: 1 x HP LNG piston pump

Και τα αντίστοιχα διαγράμματα:



Σχήμα 30 Περιοχή λειτουργίας κινητήρων (24)

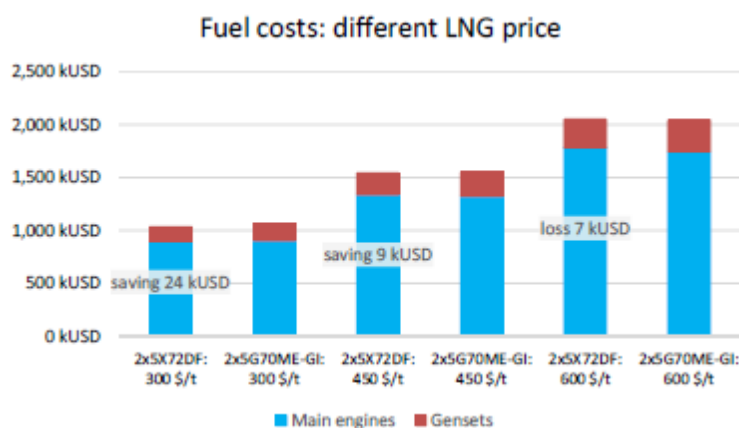
Το LNG φορτώνεται σε ένα λιμάνι στον κόλπο του Μεξικό, και πρέπει να μεταφερθεί στην Ιαπωνία μέσω του καναλιού του Παναμά. Σαν περιοχές ελέγχου των εκπομπών (ECA) λαμβάνονται μόνο τα ύδατα των ΗΠΑ. Εκτός από τη διέλευση μέσα από το κανάλι του Παναμά, όπου η ταχύτητα του πλοίου πρέπει να είναι 10.0 kn χωρίς χρόνους αναμονής, στην υπόλοιπη διαδρομή θεωρείται ταχύτητα 19.5 kn. Η ζήτηση ισχύος για λειτουργία σε μερικό φορτίο, υπολογίζεται από τον μαθηματικό τύπο πρόβλεψης ταχύτητας-ισχύος με τον εκθέτη  $\beta=3.5$ . Η ίδια ζήτηση ισχύος απαιτείται και για γεμάτο και για άδειο πλοίο. Η ισχύς υποτίθεται ότι είναι 2 x 12,500 kW σε ταχύτητα κινητήρα 69 rpm. Όποτε είναι εφικτό, οι μηχανές

λειτουργούν με αέριο καύσιμο. Στις Αμερικάνικες περιοχές ECA, ο κινητήρας 5G70ME-GI πρέπει να λειτουργεί με σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων, όπου επιλέγεται το σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίου ( EGR ) . Εκτός των περιοχών ECA, το HFO είναι το πιλοτικό καύσιμο για τον κινητήρα 5G70ME-GI, ενώ το MDO για τον 5X72DF. Οι τιμές των καυσίμων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα :

Fuel type	Fuel price		LHV kJ/kg	Max sulphur content [%]
	[USD/ton]	[\$/mmBTU]		
LNG	450	9.5	50,000	0.0%
MGO	850	21.0	42,800	0.1%
MDO	650	16.1	42,707	0.5%
HFO	450	11.7	40,500	3.5%

Πίνακας 3 Τιμές καυσίμων (24)

Γενικά οι τιμές μπορεί να αλλάζουν ανάλογα με τους υπολογισμούς των ιδιοκτητών των πλοίων, ανάλογα με τον τύπο του φυσικού αερίου ( natural ή boil of gas), ή διαφορετικές τιμές για ταξίδι με γεμάτες ή άδειες δεξαμενές. Η συγκεκριμένη μελέτη βασίζεται σε μια μέση τιμή φυσικού αερίου που είναι 450 USD/ton η οποία ισοδυναμεί με 9.5 USD/mmBTU. Παρόλα αυτά η επιρροή της τιμής του LNG στο τελικό αποτέλεσμα είναι μικρή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 31 Επίδραση κόστους καυσίμου (24)

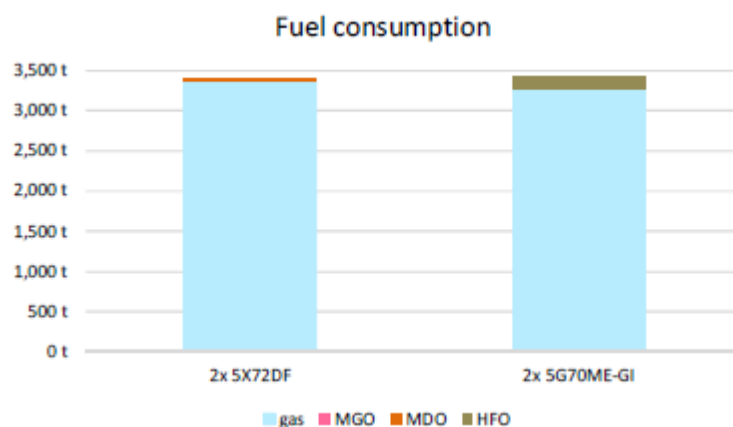
Σε ταξίδια με γεμάτες δεξαμενές, μόνο η κατανάλωση natural boil of gas υποτίθεται, αλλά ανάλογα με την ποιότητα μόνωσης της δεξαμενής, η οποία επηρεάζει το boil-off rate, μπορεί να χρειαστεί μερικό forced boil off gas ώστε να καλυφθούν οι απαραίτητες ανάγκες. Οι κινητήρες 5X72DF τροφοδοτούνται από φυγοκεντρικούς συμπιεστές, η οποία είναι η γενικά αποδεκτή και αποδεδειγμένη λύση, παρόλο που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν πιο αποδοτικοί συμπιεστές όπως τύπου κοχλίας ή πιστονιού. Οι κινητήρες 5G70ME-GI τροφοδοτούνται από συμπιεστές υψηλής πίεσης τύπου πιστονιού . Το LNG για τους κινητήρες 5X72DF τροφοδοτείται από αντλίες στον ατμοποιητή, όπου ατμοποιείται και ύστερα συμπιέζεται από τον



συμπιεστή και οδηγείται στον κινητήρα. Για τους κινητήρες 5G70ME-GI, το αέριο καύσιμο παρέχεται σε δύο παράλληλες ροές. Το natural boil of gas προμηθεύεται από το συμπιεστή τύπου πιστονιού, ενώ το LNG τύπου forced boil of gas συμπιέζεται από αντλία τύπου πιστονιού υψηλής πίεσης, ώσπου το καύσιμο ατμοποιείται σε ατμοποιητή υψηλής πίεσης. Αυτή η διάταξη επιτρέπει την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας αφού η εξοικονόμηση ισχύος του συμπιεστή, είναι πιο σημαντική από την αντίστοιχη κατανάλωση ισχύος της αντλίας υψηλής πίεσης LNG. Η ίδια αρχή θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στον κινητήρα 5X72DF. Ωστόσο, η εξοικονόμηση φορτίου στον φυγοκεντρικό συμπιεστή, είναι περιορισμένη. Συγκεκριμένα, για να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας στον κινητήρα 5X72DF θα πρέπει να εφαρμοστεί η λειτουργία start-stop, ή εναλλακτικά ένας συμπιεστής τύπου μετατόπισης (όπως τύπου κοχλία ή πιστονιού) πρέπει να χρησιμοποιηθεί μαζί με κάποιες δευτερεύουσες προσαρμογές στο σύστημα αερίου. Ως βασικό ηλεκτρικό φορτίο για το πλοίο και τον κινητήρα του, υποτίθεται 2,000 kW. Ανάλογα με την τεχνολογία που έχει επιλεγεί, μπορεί να χρειαστεί επιπρόσθετη ηλεκτρική ισχύς, ώστε να λειτουργήσουν οι συμπιεστές, οι αντλίες καθώς και το σύστημα EGR για τον κινητήρα ME-GI. Η κατανάλωση ισχύος του συστήματος EGR, λαμβάνει υπόψη μόνο στους φυσητήρες και όχι στο σύστημα επεξεργασίας του νερού, αφού το αέριο καύσιμο καίγεται πλήρως. Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού μέσω του Καναλιού του Παναμά, με γεμάτες τις δεξαμενές η ζήτηση ισχύος για τη λειτουργία της μονάδας καύσης του αερίου (GCU), οφείλεται στο δικό του air blower, και στην παροχή συμπιεσμένου αερίου. Το κόστος (σε ισχύ) του αερίου που καίγεται στην GCU δεν λαμβάνεται υπόψη σε αυτή την μελέτη. Ωστόσο το κόστος αυτό είναι χαμηλότερο για τον κινητήρα 5X72DF.

#### Κατανάλωση καυσίμου

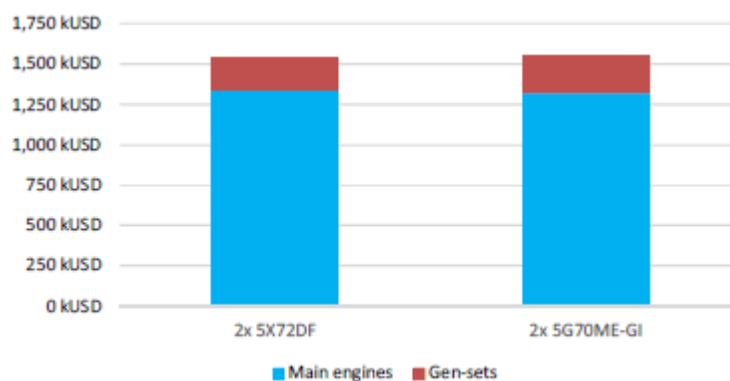
Κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού, ο κινητήρας 5X72DF έχει μεγαλύτερη κατανάλωση αερίου καυσίμου σε σχέση με τον 5G70ME-GI αλλά μικρότερη κατανάλωση πιλοτικού καυσίμου. Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα:



Σχήμα 32 Κατανάλωση καυσίμου (24)

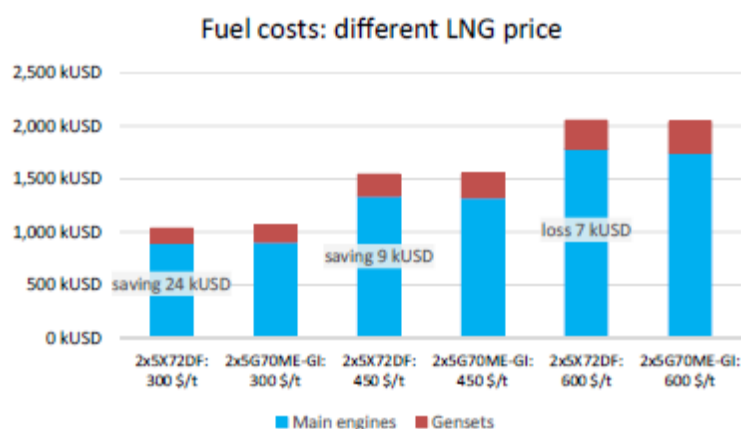
Συγκρίνοντας την κατανομή της κατανάλωσης του καυσίμου στον κινητήρα και στα υπόλοιπα εξαρτήματα (βοηθητικοί κινητήρες), όπως φαίνεται και από το

παρακάτω σχήμα ο κινητήρας 5X72DF έχει μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου στον κινητήρα η οποία όμως αντισταθμίζεται από την χαμηλότερη κατανάλωση στα υπόλοιπα εξαρτήματα.



Σχήμα 33 Ετήσια κατανάλωση καυσίμου (24)

Η επίδραση της υποτιθέμενης τιμής του LNG σε σχέση με σταθερές τιμές υγρών καυσίμων, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 34 Επίδραση κόστους καυσίμου (24)

Όσο η τιμή του LNG ανά μονάδα ενέργειας δεν είναι υψηλότερη αυτής του HFO, ο κινητήρας 5X72DF συμβάλλει στην εξοικονόμηση του κόστους των καυσίμων.

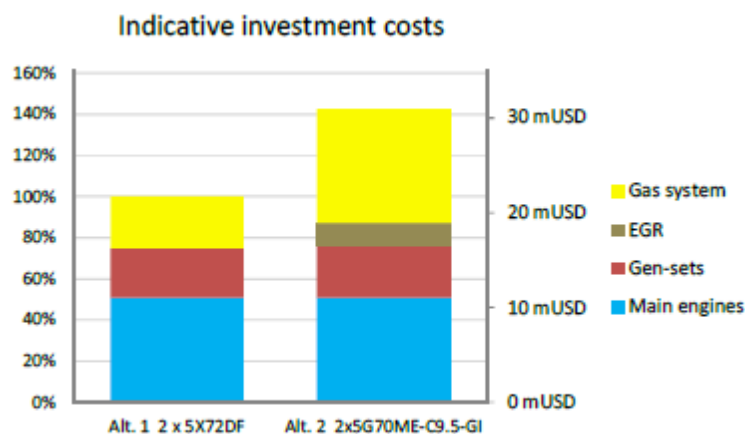
### Κόστη εγκατάστασης

Οι κύριες διαφορές είναι, όπως αναμενόταν, προκληθείσες από τις διαφορές στο σύστημα χειρισμού του αερίου καυσίμου το οποίο πρέπει είτε να σχεδιαστεί για πίεση 16 bar ή για τουλάχιστον 300 bar. Επίσης ένα σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων χρειάζεται για τον κινητήρα 5G70ME-GI ώστε να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις IMO Tier III, σε αντίθεση με τον 5X72DF ο οποίος όσο λειτουργεί με αέριο καύσιμο συμμορφώνεται χωρίς καμία επεξεργασία καυσαερίων.

Οι συγκρίσεις κόστους είναι γενικά πολύ δύσκολες και μπορεί να παρέχουν μια πρώτη εκτίμηση αφού το κόστος εξαρτάται από τις συνθήκες της αγοράς, όπως η προσφορά και η ζήτηση. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, τα ίδια ενδεικτικά κόστη θεωρούνται για τις δύο διαφορετικές τεχνικές των κινητήρων. Όσων αφορά

τα υπόλοιπα εξαρτήματα εκτός των κύριων κινητήρων, για το σύστημα υψηλής πίεσης, το κόστος είναι ακριβότερο γιατί πρέπει να εγκατασταθούν δύο παραπάνω κύλινδροι. Επιπλέον απαιτείται σύστημα επεξεργασίας καυσαερίων, το οποίο ανεβάζει κι άλλο το κόστος. Σήμερα από την εταιρία MAN Diesel & Turbo προωθείται το σύστημα EGR.

Η κύρια διαφορά στο κόστος επένδυσης οφείλεται στο σύστημα αερίου. Χρειάζονται εξαρτήματα όπως εναλλάκτες θερμότητας χαμηλής ή υψηλής πίεσης, σωληνώσεις, και με την μεγαλύτερη επίδραση στο κόστος, συμπιεστές χαμηλής ή υψηλής πίεσης. Στη συγκεκριμένη μελέτη έχουν ληφθεί υπόψη δύο σετ συμπιεστών, το ένα που λειτουργεί και το άλλο σε κατάσταση αναμονής σε περίπτωση βλάβης. Μέσες τιμές που ελήφθησαν από διαφορετικούς κατασκευαστές χρησιμοποιούνται ως ενδεικτικές τιμές. Το επόμενο σχήμα δείχνει ενδεικτικά το μέσο όρο εξοικονόμησης του κόστους επένδυσης για εγκατάσταση του συστήματος χαμηλής πίεσης. **(24)**



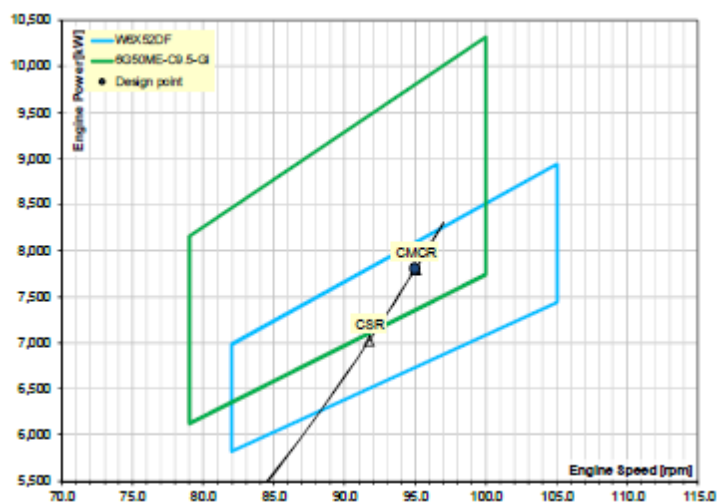
*Σχήμα 35 Κόστος επένδυσης (24)*

#### 4.2.2 Μελέτη για πλοίο που κινείται με LNG

Στη συγκεκριμένη μελέτη υποτίθεται ένα δεξαμενόπλοιο με καύσιμο LNG, περίπου 55,000 dwt. Για κάθε σύστημα ( χαμηλής και υψηλής πίεσης) επιλέγονται τα παρακάτω:

- LP: 1 x 6X52DF
- HP: 1 x 6G50ME-GI
- CMCR: 7,800 kW @ 95.0 rpm
- CSR: 90% CMCR

- LP: 3 x 6L20DF
- HP: 3 x 6L20DF
- LP: 2 x LNG centrifugal pumps
- HP: 2 x LNG centrifugal supply pumps
- And 2 x LNG piston high-pressure pumps
- Both: 2 x 700 m<sup>3</sup> single shell LNG tanks with 10 bar design: pressure και τα αντίστοιχα διαγράμματα:



Σχήμα 36 Περιοχή λειτουργίας κινητήρων (24)

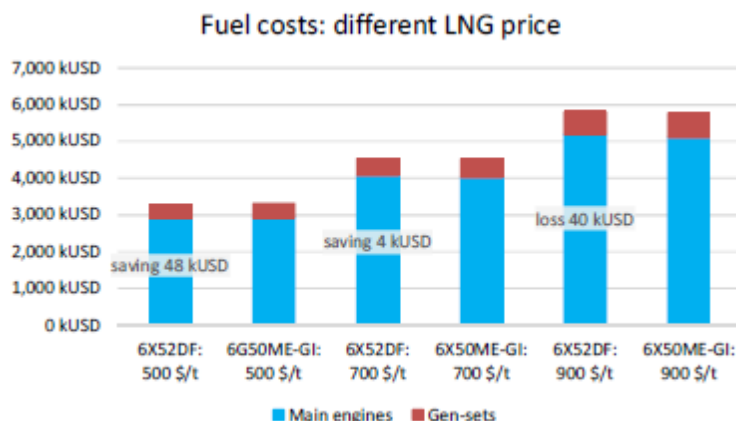
Υποτίθεται ότι όλο το natural boil of gas, μπορεί να απορροφηθεί από τους κινητήρες. Ωστόσο ανάλογα με το προφίλ λειτουργίας, και το μέγεθος της εγκατεστημένης δεξαμενής, όπου μπορεί στην πραγματικότητα να διαφέρει από αυτήν την μελέτη, η κατανάλωση καυσίμου από τα παρελκόμενα μπορεί να μην επαρκεί για να αποφευχθεί η υπερβολική πίεση στη δεξαμενή. Εάν αυτές οι συνθήκες πρέπει να αποφευχθούν, είτε ένα μικρό σύστημα επανυγροποίησης τοποθετείται, είτε ένας συμπιεστής με σχετικά μικρή χωρητικότητα αλλά με πίεση εξόδου που ταιριάζει στον κινητήρα της εκάστοτε περίπτωσης (χαμηλή ή υψηλή πίεση). Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές των καυσίμων.

Fuel type	Fuel price		LHV	Max sulphur content
	[USD/ton]	[\$/mmBTU]	kJ/kg	[%]
LNG	700	14.8	50,000	0.0%
MGO	850	21.0	42,800	0.1%
MDO	650	16.1	42,707	0.5%
HFO	450	11.7	40,500	3.5%

Σχήμα 37 Τιμές καυσίμων (24)

Οι τιμές των υγρών καυσίμων είναι οι ίδιες με τις τιμές της προηγούμενης μελέτης, αλλά η τιμή του LNG είναι αυξημένη αφού το LNG έχει περάσει από διάφορα βήματα τα οποία έχουν προσθέσει κόστος. Επί του παρόντος, οι τιμές του LNG

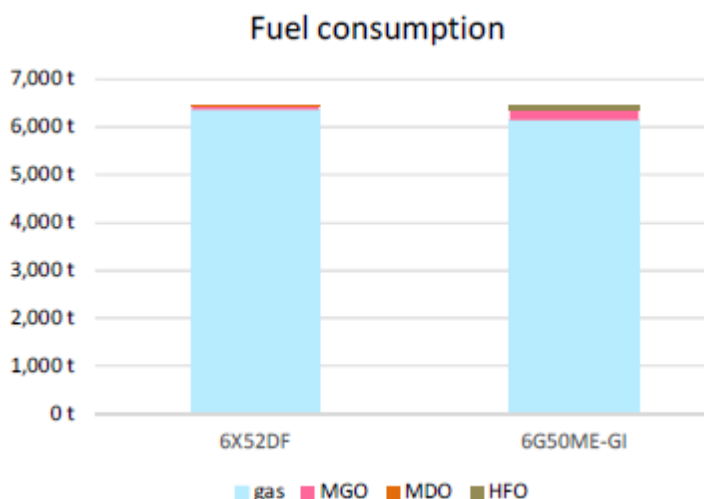
διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους σε διαφορετικά μέρη του κόσμου. Είναι φθηνότερο στις ΗΠΑ, ενδιάμεση τιμή έχει στην Ευρώπη, και ακριβότερο είναι στην Ασία. Εδώ λαμβάνεται υπόψη ένας μέσος όρος επίπεδου τιμών της Ευρώπης. Η επίδραση των διάφορων τιμών του LNG στο συνολικό κόστος καυσίμων παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:



Σχήμα 38 Επίδραση κόστους καυσίμου (24)

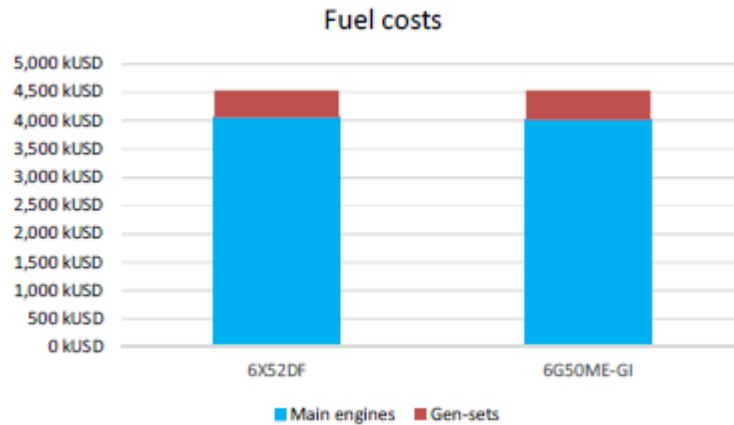
### Κατανάλωση καυσίμου

Παρόμοια με την προηγούμενη μελέτη, η κατανάλωση του αερίου καυσίμου είναι μεγαλύτερη για τον κινητήρα χαμηλής πίεσης, ενώ η κατανάλωση υγρού καυσίμου είναι αισθητά μικρότερη. Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο σχήμα:



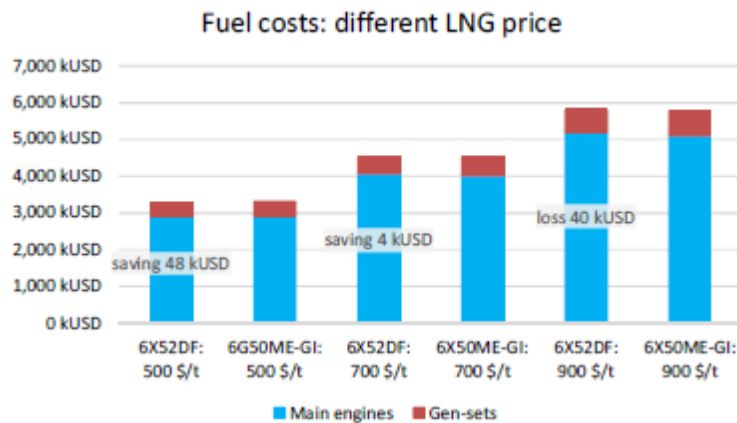
Σχήμα 39 Κατανάλωση καυσίμου (24)

Συγκρίνοντας την κατανομή του κόστους των καυσίμων στον κινητήρα και στα βοηθητικά εξαρτήματα προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 40 Ετήσιο κόστος καυσίμου (24)

Όπως παρατηρείται, για τον κινητήρα 6X52DF υπάρχει μεγαλύτερο κόστος καυσίμου για τον κινητήρα, το οποίο όμως αντισταθμίζεται από το χαμηλότερο κόστος των βοηθητικών κινητήρων. Η επίδραση της υποτιθέμενης τιμής του LNG σε σχέση με σταθερές τιμές υγρών καυσίμων παρατηρείται στο παρακάτω διάγραμμα:

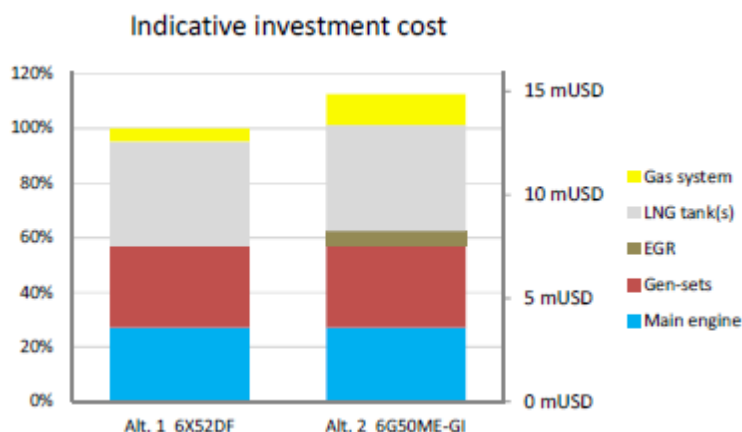


Σχήμα 41 Επίδραση κόστους καυσίμου (24)

### Κόστη εγκατάστασης

Το γενικό πρόβλημα των συγκρίσεων κόστους επένδυσης, όπως εξηγήθηκε και στην προηγούμενη μελέτη, ισχύει και εδώ. Το υψηλότερο κόστος επένδυσης για ένα πλοίο που λειτουργεί με LNG, είναι οι κρυογονικές δεξαμενές LNG. Σε αυτήν την περίπτωση, το 40% του κόστους επένδυσης για το σύστημα χαμηλής πίεσης προκαλείται από αυτές τις δεξαμενές. Ανάλογα με την απαιτούμενη αντοχή της δεξαμενής, το μέγεθός της μπορεί να αλλάζει, με σημαντική επιρροή στις επενδυτικές δαπάνες. Οι επιλεγμένες δεξαμενές που είναι  $2 \times 700 \text{ m}^3$  επιτρέπουν λειτουργία με αέριο για περισσότερο από τρεις εβδομάδες. Εάν υποθέσουμε ότι δεν απαιτείται συμπιεστής αερίου, τουλάχιστον για την παροχή αερίου στον κύριο κινητήρα, οι διαφορές στα κόστη επένδυσης είναι πολύ λιγότερες σε σχέση με την προηγούμενη μελέτη. Ωστόσο η περίπτωση υψηλής πίεσης εξακολουθεί να

χρειάζεται ένα πρόσθετο επενδυτικό κόστος περίπου 15%. Παρακάτω φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα με τα κόστη σε κάθε περίπτωση: **(24)**



Σχήμα 42 Κόστος επένδυσης (24)

#### 4.2.3 Συμπεράσματα μελετών

Η λύση με τον κινητήρα χαμηλής πίεσης είναι η πιο φιλική προς το περιβάλλον λύση, πάντα συμμορφώνεται με τους κανόνες εκπομπών IMO Tier III όταν λειτουργεί με αέριο, ακόμα και εκτός των περιοχών ECA. Οι σχετικές επενδυτικές δαπάνες είναι χαμηλότερες, και ειδικά για πλοία που μεταφέρουν LNG, ακόμα πιο χαμηλές σε σχέση με αυτές των κινητήρων υψηλής πίεσης. Το συνολικό κόστος καυσίμου για τη λειτουργία του πλοίου, είναι παρόμοιο και για τις δύο λύσεις. Χρησιμοποιώντας τις υποτιθέμενες τιμές, και τα προφίλ λειτουργίας, η λύση της χαμηλής πίεσης οδηγεί σε κάποιες εξοικονομήσεις. Τα έξοδα συντήρησης δεν έχουν διερευνηθεί σε αυτήν την μελέτη, αφού ο υπολογισμός τους είναι πολύ περίπλοκος και χρειάζεται ξεχωριστή μελέτη μόνο για αυτά. Ωστόσο, δεδομένου ότι απαιτούνται λιγότερα εξαρτήματα για τη λύση της χαμηλής πίεσης, και χρησιμοποιείται εξοπλισμός για χαμηλότερη πίεση αερίου, αναμένεται σαφής εξοικονόμηση κόστους συντήρησης για τη λύση της χαμηλής πίεσης. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται μια επισκόπηση της κάθε τεχνολογίας ( χαμηλής και υψηλής πίεσης). Οι συμβολισμοί μέσα στον πίνακα σημαίνουν:

++μεγάλο πλεονέκτημα, + πλεονέκτημα, (τικ) πληροί τις απαιτήσεις,

- μειονέκτημα, -- μεγάλο μειονέκτημα . **(24)**

		Low-pressure technology	High-pressure technology
Environment	GHG	+	++
	SO <sub>x</sub>	++	+ (++) <sup>2</sup>
	NO <sub>x</sub>	++	✓ (+) <sup>3</sup>
	PM	++	+
Technical aspects	Power output	✓	++
	MN dependency	✓	++
	FGHS selection	++	✓
Financial	OPEX	+++ <sup>4</sup>	+
	CAPEX	++	-- (-) <sup>5</sup>
Summary	Conclusion	++	✓ (+) <sup>5</sup>

Πίνακας 4 Σύγκριση τεχνολογιών (24)

(2 εξαρτάται από την ποσότητα θείου που περιέχεται στο πιλοτικό καύσιμο)

(3 εάν το σύστημα επεξεργασίας NO<sub>x</sub> ( EGR ή SCR) είναι σε λειτουργία)

(4 Εάν συμπεριληφθούν:

- Εξοικονομήσεις για τη λειτουργία του συστήματος επεξεργασίας ΗFO
- Πιθανές βελτιώσεις στην απόδοση του συστήματος αερίου
- Το αέριο καίγεται από το GCU
- Λιγότερα κόστη συντήρησης)

(5 Λιγότερο σημαντικό μειονέκτημα CAPEX για πλοία που τροφοδοτούνται με LNG)

Στον πίνακα παρατηρείται η στάθμιση των διαφόρων θεμάτων σε πέντε επίπεδα, από μεγάλο πλεονέκτημα, σε μεγάλο μειονέκτημα. Είναι κάτι τελείως υποκειμενικό, και κάποιιοι άνθρωποι μπορεί να έρθουν σε διαφορετικά συμπεράσματα. Όμως δείχνει μια γενική εικόνα της κατάστασης. Τέλος μπορούμε να συμπεράνουμε ότι είναι σωστή απόφαση να επιλέξουμε την εταιρία χαμηλής πίεσης.



### 4.3 Συγκριτικοί πίνακες του συστήματος έγχυσης καυσίμου για τις δύο τεχνικές

Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις συγκριτικοί πίνακες όπου συγκρίνουν χαρακτηριστικά στοιχεία της διαδικασίας καύσης των δύο τεχνικών υψηλής-χαμηλής πίεσης. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάστηκαν από την εταιρία MAN το 2013. (6)

Engine type	Diesel cycle	Otto cycle	
	Gas Injection (ME-GI)	Spark Ignition	Dual Fuel
Combustion processes	Turbulent non-premixed	Premixed	Premixed
Pilot fuel oil	3-5%*	-	Approx. 1%
Combustion pressure variations	Unchanged	Increased	Increased
Knocking during load change	None	Possible	Possible
Misfiring	None	Possible	Possible
High ambient temperature	Insensitive	Sensitive	Sensitive
Scavenge air receiver explosion risk	No	Yes	Yes
Crankcase explosion risk	No	Yes	Yes
Exhaust receiver explosion risk	No	Yes	Yes

Πίνακας 5 Συγκριτικός πίνακας (6)

Engine type	Diesel cycle	Otto cycle	
	Gas Injection (ME-GI)	Spark Ignition	Dual Fuel
Dual fuel capability	Yes	No	Yes
Power density	Unchanged	Reduced	Reduced
HFO as pilot fuel	Yes	No	No
Gas mode efficiency	Increased	Unchanged	Unchanged
Diesel mode efficiency	Unchanged	Not available	Reduced
Load response	Unchanged	Load ramp required	Load ramp required
Port-to-port gas operation	Yes	Yes	No/Yes
Transient response	Unchanged	Limited	Limited

Πίνακας 6 Συγκριτικός πίνακας (6)

	Diesel cycle	Otto cycle	
Engine type	Gas Injection (ME-GI)	Spark Ignition	Dual Fuel
Gas running load range	0 to 100% load	0 to < 100% load	0 to < 100% load
Gas injection pressure	300bar	5-7bar	5-7bar
Gas quality/requirements (LCV)	Insensitive	Sensitive	Sensitive
Methane number dependant	No	Yes	Yes
NO <sub>x</sub>	Below Tier II/III*	Below Tier III	Below Tier III
NO <sub>x</sub> reduction according to Tier III	All fuels	Only gas	Only gas
Methane slip	0.1% of SFOC	2-4% of SFOC	2-4% of SFOC
GWP	Reduced by 20%	Increased	Increased

Πίνακας 7 Συγκριτικός πίνακας (6)

## 5. Συμπεράσματα

Παρακάτω πρόκειται να παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν τη διπλωματική εργασία. Τα συμπεράσματα αυτά είναι ποιοτικά και όχι ποσοτικά εφόσον δεν έγινε κάποιο πείραμα, και ουσιαστικά γίνεται γενική σύγκριση των δύο συστημάτων. Δεν μπορούμε να καταλήξουμε με βεβαιότητα για το ποιο σύστημα είναι καλύτερο. Και οι δύο τύποι κινητήρα είναι αξιόπιστοι και έχουν μεγάλο αγοραστικό ενδιαφέρον, και αυτό φαίνεται από τους πολλούς κινητήρες κάθε τύπου που υπάρχουν διαθέσιμοι στην αγορά. Μπορούμε να πούμε με σιγουριά κάποια σημεία που πλεονεκτεί ο κάθε τύπος κινητήρα.

Ο κινητήρας υψηλής πίεσης πλεονεκτεί:

- Στην απόδοση, αφού ο χαμηλής πίεσης έχει εξάρτηση από MN
- Στην ισχύ εξόδου, αφού ο χαμηλής πίεσης έχει μειωμένη ισχύ λόγω της διαδικασίας καύσης που ακολουθεί

Ο κινητήρας χαμηλής πίεσης πλεονεκτεί:

- Δεν χρειάζεται επεξεργασία καυσαερίων, και συμμορφώνεται με τα όρια IMO Tier III όταν λειτουργεί με αέριο, ακόμα και εκτός περιοχών ECA.
- Μεγαλύτερη ασφάλεια, αφού ο κύκλος λειτουργίας είναι σε χαμηλή πίεση
- Μικρότερα επενδυτικά κόσθη, λόγω απλούστερης εγκατάστασης.

Για πιο ολοκληρωμένη εικόνα, θα πρέπει να γίνει οικονομική ανάλυση των δύο συστημάτων, ώστε να είναι γνωστά μεγέθη όπως κόσθη εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, ώστε να μπορεί να γίνει η επιλογή του συστήματος, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε αγοραστή.

## Συντομογραφίες

- DI – direct injection
- BSFC – brake specific fuel consumption
- SOOT – αιθάλη
- SI – spark ignition
- DF – dual fuel
- NO<sub>x</sub> – οξείδια του αζώτου
- CO – μονοξείδιο του άνθρακα
- LGI – liquid gas injection
- GI – gas injection
- EGR – exhaust gas recirculation
- SFOC – specific fuel oil consumption
- SCR- selective catalytic reduction
- LNG – liquefied natural gas
- SO<sub>x</sub> – οξείδια του θείου
- HFO – heavy fuel oil
- CAPEX – capital expenditure
- FIVA – fuel injection valve actuator
- PM – particulate matter
- MDO – marine diesel oil
- MGO – marine gas oil
- CNG – compressed natural gas
- TEU – twenty foot equivalent unit
- WHR- waste heat recovery
- MN – methane number

## Βιβλιογραφία

- 1) Winterthur Gas and Diesel
- 2) Ioannis Bakas, September 2015 " Principles of Marine Main Engines running on LNG" , Environmental Protection Engineering S.A. (EPE)
3. Niels Kjemtrup, Copenhagen 2015 'Gas 2-stroke marine engine Design and Operation' (MAN)
4. René SejrLaursen, January 2011 'LNG som brændstof' (MAN)
5. "A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas" (MAN)
6. " ME-GI – Dual Fuel Done Right." SNAME NY, Dec 2013 (MAN)
7. Andrea Zotti, mars 2015 Oslo "Present and future of the LNG fueled vessels " (Wartsila)
8. Marcel Ott, January 2015 Low pressure gas engines "The industry standard" (Wartsila)
9. Rudolf Wettstein, SEPT. 18, 2013 " The Wärtsilä low-speed low-pressure dual-fuel engine development" (Wartsila)
10. Marcel Ott, October 2014 "Wartsila 2-stroke dual fuel, technology responding to chaging market needs" ( Wartsila)
11. LENNART HARALDSON, Copenhagen 11-12May 2011 " LNG as a fuel for environmentally friendly shipping" (Wartsila)
12. Application of gas engines in the marine industry, 2013 ( CIMAC)
13. Dr. Pierre C. Sames (GL) ,Mr. Niels B. Clausen (MDT) and Mr. Mads Lyder Andersen (MDT)., Aug. 2012 , " Costs and Benefits of LNG as Ship Fuel for Container Vessels" (MAN)
14. Andrzej Krupa, 2011 " ME-GI Engine Fuelled by LNG" (MAN)
15. " ME-GI Gas-ready Ship" (MAN) Aug 2015
16. " A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas" (MAN)
17. Marcel Ott, Jan 2014 " WÄRTSILÄ 2-STROKE DUAL FUEL TECHNOLOGY"
18. Océane Balland, May2014 " LNG – A COST-EFFICIENT FUEL OPTION?" (DNV GL-Der Norske Veritas – Germanischer Lloyd)

- 19." Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow Application on MAN B&W Two-stroke Marine Diesel Engines" MAN
20. Kjeld Aabo, feb 2015 " Two stroke engines for different fuels and reduction of exhaust gas emission" MAN
21. Oskar Levander, sept 2011 " DUAL FUEL ENGINES LATEST DEVELOPMENTS" Wartsila
22. Ingemar Nylund, " Low pressure at low speed" Wartsila
23. Daniel Strödecke, 2015 " Low- and high-pressure dual-fuel technology comparison" Winterthur gas and diesel
24. Daniel Strödecke, 2015 " Low- and high-pressure dual-fuel Technology Evaluation Process; Case Studies for LNG Carriers and Merchant Vessel" Winterthur gas and diesel
25. Prof. Dimitrios T. Hountalas, November 2015 " Gas 2-stroke marine engines Technology Comparison"
26. Δρ. Δημήτριος Θ. Χουντάλας, Δρ. Ρούσσοις Γ. Παπαγιαννάκης " Μεικτή Καύση Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου σε Κινητήρες Ντήζελ, Δυνατότητες Χρήσης Φυσικού Αερίου σε Υπάρχοντες Κινητήρες Ντήζελ" Αθήνα, Φεβρουάριος 2012
27. R.G. Papagiannakis, D.T. Hountalas " Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot Diesel fuel and natural gas" 28 February 2004
28. International Maritime Organization (IMO)