



---

## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

---

### **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

«Διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης φυσικού αερίου ως καυσίμου σε ναυτικούς κινητήρες diesel και κινητήρες diesel οχημάτων βαρέως τύπου»

### **Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή**

Βέρμπη Σπύρου

### **Επιβλέπων**

Χουντάλας Δημήτριος, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Μηχανολόγων  
Μηχανικών  
Ρούσσος Παπαγιαννάκης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα  
Αεροπορικών Επιστημών

---

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017

## *Ευχαριστίες*

*Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χουντάλα Δημήτριο για την ανάθεση του θέματος και την σημαντική βοήθεια του καθώς και τον κ. Παπαγιαννάκη Ρούσο για την καθοριστική βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε.*

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΣΥΝΟΨΗ .....	1
ABSTRACT .....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	2
SUMMARY .....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ.....	6
1.1 Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά στοιχεία ενός κινητήρα Diesel .....	6
1.1.1 Εισαγωγή.....	6
1.1.2 Διαχωρισμός κινητήρων Μ.Ε.Κ. σε κατηγορίες.....	8
1.1.3 Μικρή ιστορική αναδρομή κινητήρων Diesel .....	10
1.2 Σύντομη περιγραφή του θεωρητικού και πραγματικού κύκλου λειτουργίας 4-X και 2-X κινητήρα Diesel .....	10
1.2.1 Θεωρητικός Κύκλος Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα Diesel.....	10
1.2.2 Πραγματικός Κύκλος Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα Diesel .....	12
1.2.3 Θεωρητικός Κύκλος Λειτουργίας Τετράχρονου Κινητήρα Diesel.....	13
1.2.4 Πραγματικός Κύκλος Λειτουργίας Τετράχρονου Κινητήρα Diesel.....	14
1.2.5 Διαφορές ανάμεσα στον θεωρητικό κύκλο Diesel και τον πραγματικό κύκλο λειτουργίας .....	15
1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κινητήρων Diesel.....	16
1.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης κινητήρων Diesel.....	16
1.3.2 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα μεταξύ δίχρονων και τετράχρονων κινητήρων Diesel...	17
1.4 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα κινητήρων Diesel .....	18
1.4.1 Εκπεμπόμενη ρύποι από μηχανές εσωτερικής καύσης.....	18
1.4.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου (NO <sub>x</sub> ) .....	20
1.4.3 Σχηματισμός των άκαυστων υδρογονανθράκων HC.....	22
1.4.4 Εκπεμπόμενα σωματίδια-αιθάλη .....	23
1.5 Σύντομη παράθεση τεχνολογιών βελτίωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και της απόδοσης υφιστάμενων κινητήρων Diesel.....	25
1.5.1 Πρωτογενείς μέθοδοι μείωσης των βλαβερών αερίων στους κινητήρες Diesel.....	25
1.5.2 Δευτερογενείς μέθοδοι μείωσης των βλαβερών αερίων στους κινητήρες Diesel .....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> : ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ & ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ .....	35
2.1 Εισαγωγή στα αέρια καύσιμα.....	35

2.2 Κατηγοριοποίηση αερίων καυσίμων .....	35
2.3 Βασικά στοιχεία του φυσικού αερίου.....	39
2.3.1 Φυσικές ιδιότητες του φυσικού αερίου.....	43
2.3.2. Χημικές ιδιότητες του φυσικού αερίου.....	47
2.4 Περιοχές εφαρμογής του φυσικού αερίου .....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΙΚΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ .....</b>	<b>50</b>
3.1 Η μεικτή καύση φυσικού αερίου και πετρελαίου σε κινητήρα Diesel.....	50
3.2 Υφιστάμενες τεχνολογίες μεικτής καύσης σε κινητήρες αυτανάφλεξης και τεχνολογίες βελτίωσης του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος.....	53
3.3 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της λειτουργίας κινητήρα Diesel υπό συνθήκες μεικτής καύσης σε σχέση με την κλασσική λειτουργία κινητήρα Diesel. ....	58
3.4 Εφαρμογές της Μεικτής Καύσης στην αυτοκίνηση και στην ναυτιλία. ....	62
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ.....</b>	<b>66</b>
4.1 Κανονισμοί και νομοθεσία (Ευρωπαϊκή και Ελληνική) που ελέγχουν τα επίπεδα εκπομπής ρύπων από κινητήρες Diesel στην αυτοκίνηση.....	66
4.1.1 Εισαγωγή.....	66
4.1.2 Προδιαγραφές εκπομπής ρύπων σε επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα.....	69
4.1.3 Ελληνική Νομοθεσία κυκλοφορίας οχημάτων βάση εκπομπής ρύπων.....	74
4.1.4 Τροποποιημένοι κανονισμοί ελέγχου εκπομπών στο άμεσο μέλλον.....	75
4.1.5 Προδιαγραφές εκπομπής ρύπων για οχήματα βαρέως τύπου .....	76
4.2 Διεθνείς κανονισμοί και νομοθεσία ελέγχου των επιπέδων εκπομπής ρύπων από κινητήρες Diesel τόσο στην εμπορική όσο και στην επιβατική ναυτιλία. ....	80
4.2.1 Εισαγωγή.....	80
4.2.2 Κανονισμοί για τον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων στην ναυτιλία.....	83
4.2.3 Ρυθμιστικό πλαίσιο Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	86
4.2.4 Μέτρα περιορισμού εκπομπών στο άμεσο μέλλον .....	88
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ LNG ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ, ΟΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΙΚΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΚΑΙ ΤΑ ΟΦΕΛΟΙ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΥΤΩΝ .....</b>	<b>90</b>
5.1 Η επίδραση της αυξανόμενης χρήσης φυσικού αερίου στις μεταφορές και ειδικότερα στην ναυτιλία.....	90
5.1.1 Δεξαμενές αποθήκευσης LNG σε πλοία με κινητήρες μεικτής καύσης.....	91
5.1.2 Ανεφοδιασμός LNG σε πλοία με κινητήρα μεικτής καύσης.....	93

5.1.3 Θέματα ασφαλείας σχετικά με την χρήση του LNG ως καύσιμο.....	95
5.2 Τεχνολογίες ναυτικών κινητήρων μεικτής καύσης .....	96
5.2.1 Τετράχρονοι κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης.....	97
5.2.2 Δίχρονοι κινητήρες μεικτής καύσης υψηλής πίεσης .....	102
5.2.3 Δίχρονοι κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης.....	109
5.3 Σύγκριση των τεχνολογιών μεικτής καύσης.....	115
5.3.1 Σύγκριση δίχρονων κινητήρων μεικτής καύσης υψηλής πίεσης με τους χαμηλής πίεσης .....	116
5.3.2 Σύγκριση δίχρονου κινητήρα υψηλής πίεσης σε λειτουργία διπλού και μονού καυσίμου .....	119
5.4 Κόστος εγκατάστασης, κόστος χρήσης και χρόνος απόσβεσης κινητήρων μεικτής καύσης.	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	128
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	130

# ΣΥΝΟΨΗ

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης παίζουν καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή κινητικής ή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εξέλιξη τους τον τελευταίο αιώνα είναι ραγδαία και θα συνεχίσει να είναι μέχρι την ολοκληρωτική επικράτηση του ηλεκτρισμού και των ηλεκτρικών κινητήρων. Μέχρι να συμβεί αυτό όμως οι μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν να προσφέρουν πολλά. Μία από τις κατευθύνσεις που ακολουθεί τελευταία η τεχνολογία των μηχανών εσωτερικής καύσης είναι αυτή της μεικτής καύσης. Περιβαλλοντολογικοί και οικονομικοί παράγοντες έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών μεικτής καύσης ή κινητήρων διπλού καυσίμου, dual-fuel engines όπως αναφέρονται διεθνώς. Στον τομέα της αυτοκίνησης οι μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν λίγες ακόμα δεκαετίες μπροστά τους για να εξελιχθούν καθώς ήδη έχουν κατασκευαστεί τα πρώτα ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Στον τομέα όμως της ναυτιλίας, οι μηχανές εσωτερικής καύσης θα κυριαρχούν για πολλές ακόμα δεκαετίες καθώς πρόκειται για εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ. Οι απαιτήσεις αυτές καλύπτονται από δίχρονους κινητήρες αυτανάφλεξης οι οποίοι είναι οι κινητήρες με τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης. Ταυτόχρονα, οι μεγάλες απαιτήσεις φυσικού αερίου σε όλο τον κόσμο καθιστά αναγκαία την μεταφορά του σε όλα τα σημεία της γης. Το φυσικό αέριο είναι ένα ορυκτό καύσιμο το οποίο έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από το πετρέλαιο και τα στερεά καύσιμα και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του είναι ότι με την καύση του εκπέμπονται αρκετά λιγότεροι ρύποι σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο καύσιμο. Αυτοί οι δυο παράγοντες οδήγησαν στην ανάπτυξη τεχνολογιών μεικτής καύσης πετρελαίου – φυσικού αερίου επιτυγχάνοντας καθαρότερη καύση. Στην παρούσα εργασία θα αναφερθούν οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί που ισχύουν στις οδικές και θαλάσσιες μεταφορές καθώς και οι τεχνολογίες μεικτής καύσης με τις οποίες επιτυγχάνεται η εναρμόνιση των κινητήρων με αυτούς τους περιορισμούς.

## ABSTRACT

Internal combustion engines play a key role in the production of kinetic or electrical energy. Their evolution in the last century is rapid and will continue to be until the full prevalence of electricity and electric motors. Until this happens, internal combustion engines have much to offer. One of the latest approaches to internal combustion engine technology is that of mixed combustion. Environmental and economic factors have led to the development of dual fuel combustion technologies or dual-fuel engines as reported internationally. In the automotive sector, internal combustion engines have a few decades ahead in order to evolve as the first electric vehicles have already been built. In the field of shipping, however, internal combustion engines will dominate for many more decades as they are applications with high requirements in force. These requirements are covered by two-stroke self-ignition engines which are the engines with the highest efficiency. At the same time, large gas requirements around the world make it necessary to transport it all over the world. Natural gas is a fossil fuel that has a longer service life than oil and solid fuels, and its biggest advantage is that much less pollutants are emitted than any other fuel. These two factors have led to the development of mixed oil-gas combustion technologies achieving cleaner combustion. This work will mention the environmental constraints on road and sea transport as well as mixed combustion technologies which achieve the compliance of engines with these constraints.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της αυτοκίνησης και της ναυσιπλοΐας. Είναι η κινητήριος δύναμη των δύο αυτών τομέων. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης που έχουν επικρατήσει είναι οι κινητήρες σπινθηρισμού που ακολουθούν τον κύκλο του Otto και οι κινητήρες αυτανάφλεξης που ακολουθούν τον κύκλο του Diesel. Οι κινητήρες σπινθηρισμού είναι καταλληλότεροι για εφαρμογές πολύ μικρών έως μεσαίων ισχύων (μέχρι μερικά MW). Από την άλλη οι κινητήρες αυτανάφλεξης είναι κατάλληλοι για εφαρμογές από μερικές δεκάδες kW μέχρι δεκάδες MW. Στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσουν οι κινητήρες αυτανάφλεξης λόγω της επικράτησής τους σε πλήθος εφαρμογών καθώς και λόγω του υψηλότερου συντελεστή απόδοσης. Ακόμα, θα αναφερθούν οι εκπεμπόμενοι ρύποι, τα μέσα περιστολής τους καθώς και οι κανονισμοί οι οποίοι εφαρμόζονται με σκοπό τον έλεγχο και περιορισμό αυτών των ρύπων στην αυτοκίνηση και την ναυτιλία. Επιπλέον, θα γίνει αναφορά στο φυσικό αέριο και στις δυνατότητες που προσφέρει στην οικονομία και την τεχνολογία. Τέλος, ο κύριος άξονας γύρω από τον οποίο αναπτύσσεται αυτή η εργασία είναι η τεχνολογία της μεικτής καύσης. Γίνεται αναφορά στις αρχές λειτουργίας στις οποίες βασίζεται η μεικτή καύση καθώς και τα περιβαλλοντολογικά και οικονομικά οφέλη που προσφέρει.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας γίνεται μια συνοπτική αναφορά στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης ή αλλιώς κινητήρες διαχωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με κάποια χαρακτηριστικά τους. Πρώτο και κυριότερο χαρακτηριστικό με βάση το οποίο διαχωρίζονται οι κινητήρες μεταξύ τους είναι ο τρόπος έναυσης του καύσιμου μίγματος. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό μπορούμε να αναφερόμαστε σε κινητήρες σπινθηρισμού και σε κινητήρες αυτανάφλεξης. Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων αυτανάφλεξης, με τους οποίους και θα ασχοληθούμε, βασίζεται στον κύκλο λειτουργίας του Diesel. Σε αυτούς τους κινητήρες το καύσιμο μίγματα αυτανάφλεγεται λόγω κατάλληλων συνθηκών που επικρατούν στον θάλαμο καύσης (υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες). Ένας ακόμη διαχωρισμός που γίνεται στους κινητήρες είναι με βάση τους χρόνους λειτουργίας τους (πλήθος διαδρομών εμβόλου για ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας). Έτσι προκύπτουν οι επονομαζόμενοι δίχρονοι και τετράχρονοι κινητήρες. Στους τετράχρονους έχουμε συνδυασμό αυτών των διεργασιών. Ο καθένας από αυτούς έχει τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάνοντάς τους κατάλληλους για διαφορετικού είδους εφαρμογές. Ακόμα, οι κινητήρες διαχωρίζονται με βάση την διάταξη των κυλίνδρων τους και την ταχύτητα περιστροφής. Όλοι οι κινητήρες κατά την λειτουργία τους εκπέμπουν καυσαέρια και ρύπους στην ατμόσφαιρα. Τέτοιου είδους ρύποι είναι το μονοξειδίο του άνθρακα CO, τα οξειδία του θείου SO<sub>x</sub>, τα οξειδία του αζώτου NO<sub>x</sub>, οι άκαυστους υδρογονάνθρακες HC και τα σωματίδια PM (αιθάλη). Ανάλογα με το είδος τους κινητήρα το ποσοστό εκπομπής κάθε ρύπου είναι διαφορετικό. Στους κινητήρες αυτανάφλεξης κυριαρχούν τα οξειδία του αζώτου και τα σωματίδια. Για αυτόν τον λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι αντιρύπανσης που μπορεί να είναι είτε πρωτογενείς είτε δευτερογενείς. Πρωτογενείς είναι οι μέθοδοι οι οποίες εφαρμόζονται για περιορισμό των ρύπων πριν την δημιουργία τους, δηλαδή ρύθμιση παραμέτρων καύσης για να επιτευχθεί μείωση των ρύπων. Δευτερογενείς είναι οι μέθοδοι οι οποίες θα εφαρμόζονται με σκοπό την περιστολή των ρύπων αφού έχουν ήδη δημιουργηθεί. Δευτερογενή μέθοδοι είναι οι επιλεκτικοί καταλύτες αναγωγής, η ανακυκλοφορία των καυσαερίων και οι παγίδες αιθάλης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα αέρια καύσιμα. Αέρια καύσιμα είναι το φυσικό αέριο, τα υγραέρια, τα βιοαέρια, τα συνθετικά αέρια και το υδρογόνο. Το αέριο καύσιμο όμως που παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι το φυσικό αέριο. Το βρίσκουμε είτε μόνο του σε κοιτάσματα φυσικού αερίου του είτε συνυπάρχει σε κοιτάσματα πετρελαίου. Το φυσικό αέριο είναι άχρωμο και άοσμο και ελαφρύτερο από τον ατμοσφαιρικό αέρα και για αυτό σε περίπτωση διαφυγής τους δεν συγκεντρώνεται στο έδαφος. Σε συνθήκες περιβάλλοντος βρίσκεται, όπως είναι φυσικό, σε αέρια μορφή αλλά αν ψυχθεί, υπό ατμοσφαιρική πίεση, σε θερμοκρασίες κάτω από -162°C υγροποιείται. Υγροποιημένο το φυσικό αέριο καταλαμβάνει 600 φορές μικρότερο όγκο από ότι σε αέρια μορφή. Για αυτόν τον λόγο η μεταφορά του είναι προτιμότερο να γίνεται σε υγροποιημένη μορφή. Μεταφορά του μπορεί να γίνει και με χρήση πιεστικών δοχείων στα οποία αποθηκεύεται υπό πίεση 200 bar. Η τρίτη και αρκετά διαδεδομένη μέθοδος είναι με την χρήση αγωγών μεταφοράς του φυσικού αερίου από την πηγή απευθείας στην κατανάλωση. Το φυσικό αέριο αν και ορυκτό καύσιμο προσφέρει πολύ καθαρότερη καύση με αποτέλεσμα να αναζητούνται συνεχώς νέες μέθοδοι εκμετάλλευσής του και αντικατάστασης παλιών ρυπογόνων συστημάτων. Ακόμα, τα αποθέματα του φυσικού αερίου είναι μεγαλύτερα από αυτά του πετρελαίου και των στερεών καυσίμων και προβλέπεται ότι όλο και θα αυξάνονται με την ανακάλυψη νέων κοιτασμάτων. Αυτό το καθιστά πιο οικονομικό στην χρήση από ότι το πετρέλαιο μιας και είναι σε μεγαλύτερη αφθονία και δεν απαιτούνται κοστοβόρες διεργασίες για την εκμετάλλευσή του. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών. Από τον οικιακό μέχρι και τον βιομηχανικό τομέα γίνεται χρήση φυσικού αερίου. Ακόμα, το φυσικό αέριο τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται και στον τομέα των μεταφορών. Από μικρά επιβατικά οχήματα μέχρι μεγάλα οχήματα βαρέως τύπου κάνουν χρήση φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας σε κινητήρες σπινθηρισμού και να αντικαταστήσει την βενζίνη είτε συνδυαστικά με την

καύση πετρελαίου όπου και πραγματοποιείται μεικτή καύση. Στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσει η μεικτή καύση του πετρελαίου με το φυσικό αέριο.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη αναφορά στην τεχνολογία της μεικτής καύσης. Η ανάπτυξη που παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία της μεικτής καύσης οφείλεται σε περιβαλλοντολογικούς αλλά και οικονομικούς παράγοντες. Αρχικά, η ιδέα της μεικτής καύσης δεν είναι κάτι νέο. Από την εποχή του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου τα οχήματα έκαναν χρήση συνθετικού αερίου καθώς τα υγρά καύσιμα ήταν υπό έλλειψη. Η βασική αρχή λειτουργίας της μεικτής καύσης πετρελαίου – φυσικού αερίου βασίζεται στην λογική της αρχικής έγχυσης μιας ποσότητας φυσικού αερίου, είτε έμμεσα είτε άμεσα, μέσα στο θάλαμο καύσης και στην συνέχεια της έγχυσης μιας μικρής ποσότητας πετρελαίου. Το πετρέλαιο βρισκόμενο σε συνθήκες αυτανάφλεξης αυταναφλέγεται εκλύοντας την απαιτούμενη ενέργεια για την ανάφλεξη και της ποσότητας φυσικού αερίου που υπάρχει στον κύλινδρο. Το πετρέλαιο ουσιαστικά γίνεται η πηγή έναυσης του φυσικού αερίου με αποτέλεσμα και τα δύο μαζί να προσφέρουν την απαιτούμενη ενέργεια στον κινητήρα. Εφαρμογές μεικτής καύσης έχουμε στην αυτοκίνηση και ιδιαίτερα στα οχήματα βαρέως του. Βέβαια, η μεικτή καύση παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον στους ναυτικούς κινητήρες όπου και τα οφέλη καύσης φυσικού αερίου είναι πολλαπλά.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται συνοπτική αναφορά και περιγραφή στους κανονισμούς οι οποίοι ισχύουν στην αυτοκίνηση και στην ναυτιλία σχετικά με τις επιτρεπόμενες εκπομπές ρύπων. Όσον αφορά την αυτοκίνηση, οδηγίες σχετικά με τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια εκπομπής ρύπων είχαν αρχίσει να εφαρμόζονται από την δεκαετία του '70. Από την δεκαετία όμως του '90 άρχισαν να γίνονται πιο συντονισμένες προσπάθειες όσον αφορά τα όρια εκπομπής ρύπων. Τα πρότυπα Euro, τόσο για τα επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα όσο και για τα οχήματα βαρέως τύπου, με το πέρασμα των χρόνων γίνονται όλο και αυστηρότερα. Την τελευταία δεκαετία τα πρότυπα αυτά είναι αρκετά αυστηρά έτσι ώστε η επίδραση των εκπεμπόμενων ρύπων να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ακόμα περιορισμοί υπάρχουν και για το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Το CO<sub>2</sub> δεν είναι ρύπος αλλά η αύξηση του στην ατμόσφαιρα οδηγεί στην επιδείνωση του θερμοκηπίου. Όσον αφορά την ναυτιλία, οι περιορισμοί στις εκπομπές ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου δεν είναι τόσο αυστηρές όσο στην αυτοκίνηση. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιορισμοί ως προς τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) και οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και σε ορισμένες ελεγχόμενες περιοχές τα όρια αυτά γίνονται ακόμα πιο αυστηρά.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιδιαιτερότητες της χρήσης LNG ως καύσιμο στην ναυτιλία καθώς και οι τεχνολογίες μεικτής καύσης που έχουν αναπτυχθεί από μεγάλες εταιρίες κατασκευής ναυτικών κινητήρων. Το LNG και η ναυτιλία συνυπάρχουν εδώ και τουλάχιστον 50 χρόνια από όταν άρχισαν να γίνονται οι πρώτες μεταφορές LNG. Σαν καύσιμο βέβαια άρχισε να χρησιμοποιείται το 2001 και μόνο σε πλοία τα οποία μετέφεραν το LNG σαν εμπόρευμα. Όταν το LNG χρησιμοποιούταν ως καύσιμο αυτό γινόταν σε κινητήρες μεικτής καύσης ή διπλού καυσίμου όπως αναφέρονται συνήθως. Στην συνέχεια βέβαια, παρατηρώντας τα σημαντικά οφέλη που έχει η μεικτή καύση αναπτύχθηκαν τεχνολογίες για εγκατάσταση τέτοιων κινητήρων και σε άλλου είδους πλοία. Πλέον, οι εταιρίες κατασκευής ναυτικών κινητήρων προσφέρουν μεγάλη γκάμα κινητήρων μεικτής καύσης για κάλυψη μεγάλου εύρους αναγκών. Όσον αφορά την χρήση του LNG ως καύσιμο υπάρχουν κάποιες ιδιαιτερότητες που με την εξέλιξη της τεχνολογίας ξεπερνιούνται. Αρχικά, ο ανεφοδιασμός με LNG δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε όλα τα λιμάνια κάτι το οποίο είναι σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας. Ακόμη, ο ανεφοδιασμός του πλοίου με LNG απαιτεί συγκεκριμένα πρωτόκολλα προστασίας. Οι δεξαμενές οι οποίες αποθηκεύουν το LNG για χρήση ως καύσιμο θα πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Εκτός αυτού, οι δεξαμενές του LNG καταλαμβάνουν περισσότερο όγκο από τις δεξαμενές πετρελαίου δημιουργώντας έτσι χωροταξικά προβλήματα. Όσον αφορά τους ναυτικούς κινητήρες μεικτής καύσης αυτοί ακολουθούν ουσιαστικά δύο αρχές λειτουργίας. Η μία αρχή λειτουργίας βασίζεται στον κύκλο του Otto και γενικά αναφέρονται ως κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης καθώς η έγχυση του φυσικού αερίου γίνεται έμμεσα στην εισαγωγή του κινητήρα υπό χαμηλή πίεση (12 bar). Η δεύτερη αρχή λειτουργίας βασίζεται στον κύκλο του Diesel. Αυτοί οι κινητήρες μεικτής καύσης αναφέρονται ως κινητήρες μεικτής καύσης υψηλής πίεσης καθώς η έγχυση του φυσικού αερίου γίνεται άμεσα στον κύλινδρο σε υψηλή πίεση (300 bar). Οι κινητήρες μεικτής καύσης που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο είναι τετράχρονοι και δίχρονοι ενώ οι κινητήρες μεικτής καύσης υψηλής πίεσης είναι δίχρονοι. Σε όλες τις περιπτώσεις πάντως τα οφέλη στον περιβαλλοντολογικό και οικονομικό τομέα είναι σημαντικά και παρουσιάζονται αναλυτικά στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.



# SUMMARY

Internal combustion engines are an integral part of automotive and navigation. It is the driving force of these two areas. The prevailing internal combustion engines are spark-ignition motors following the Otto cycle and self-ignition engines following the Diesel cycle. Spark-ignition motors are more suitable for applications of very small to medium power (up to a few MW). On the other hand, self-ignition engines are suitable for applications ranging from several tens of kW to tens of MW. In the present work we will deal with self-ignition engines due to their prevalence in a number of applications as well as due to the higher efficiency coefficient. In addition, it will be mentioned the pollutants that are emitted, the means of their containment and the regulations applied to control and limit these pollutants in automotive and shipping. In addition, reference will be made to natural gas and its potential in the economy and technology. Finally, the main axis around which this work is developed is mixed combustion technology. Reference is made to the principles of operation on which mixed combustion is based, as well as the environmental and economic benefits it offers.

In the first chapter of this paper a brief reference to internal combustion engines is made. Internal combustion engines or motors are divided into different categories according to some of their characteristics. The first and most important feature on the basis of which the engines are separated from each other is how to ignite the combustible mixture. Based on this feature we can refer to spark-ignition engines and self-ignition engines. The principle of operation of the self-ignition engines is based on the Diesel cycle. In these engines the combustible mixtures self-ignite due to the appropriate conditions prevailing in the combustion chamber (high pressures and temperatures). Another splitting of the motors is based on their operating times (plunger stroke plots for a full cycle). This results in the so-called two-stroke and four-stroke engines. In four-stroke engines, each process is completely distinct (input, combustion, expansion, output), whereas in two-stroke we have a combination of these processes. Each of them has their own advantages and disadvantages, making them suitable for different applications. Still, the motors are separated by their roller arrangement and the speed of rotation. All engines in operation emit exhaust fumes and pollutants into the atmosphere. Such pollutants are carbon monoxide  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$  sulfur oxides,  $\text{NO}_x$  nitrogen oxides, unburnt HC hydrocarbons and PM particles. Depending on the type of engine, the emission rate for each pollutant is different. In self-ignition engines dominate nitrogen oxides and particulates. For this reason, various methods of anti-pollution have been developed, which may be either primary or secondary. Primary are the methods that are used to limit pollutants before they are created and this limitation is achieved by the regulation of combustion parameters. Secondary are the methods that will be applied to reduce the pollutants since they have already been created. Secondary methods are selective catalytic reduction, exhaust gas recirculation and smoke traps.

In the second chapter, reference is made to gaseous fuels. Gaseous fuels are natural gas, liquefied petroleum gas, biogas, synthetic gases and hydrogen. However, gas fuel that is of greater interest is natural gas. We find it either alone in its natural gas fields or coexisting in oil fields. Natural gas is colourless and odourless and lighter than atmospheric air and therefore in case of escape it is not concentrated on the ground. In ambient conditions it is, naturally, in gaseous form but if it is cooled under atmospheric pressure at temperatures below  $-162^\circ\text{C}$  it liquefies. Liquefied natural gas occupies 600 times smaller volume than in gaseous form. For this reason it is preferable to carry it in a liquefied form. It can also be transported using pressure vessels stored at a pressure of 200 bar. The third and fairly widespread method is to use natural gas pipelines from the source directly to consumption. Natural gas, although fossil fuel, offers much cleaner combustion, resulting in constantly seeking new methods of exploiting and replacing old polluting systems. Still, natural gas reserves are larger than those of oil and solid fuels and it is predicted that they will increase with the discovery of new deposits. This makes it more economical to use than oil as it is more abundant and no process cost is required to exploit it. Natural gas is used in a variety of applications. From the domestic to the industrial sector, natural gas is widely used. Still, natural gas has also been used in the transport sector in recent years. From small passenger cars to large heavy-duty vehicles, they use natural gas. Natural gas can be used either directly in spark-ignition engines and replace gasoline or combined with combustion of oil where mixed combustion occurs. In the present work we will be concerned with the mixed combustion of oil with natural gas.

In the third chapter there will be a brief reference to combustion technology. The development of mixed combustion technology in recent years is due to both environmental and economic factors. Initially, the idea of mixed combustion is not new. Since the Second World War vehicles have been using synthetic gas, as liquid fuels have been in short supply. The basic principle of the operation of mixed oil-gas combustion is based on the logic of the initial injection of a quantity of natural gas, either indirectly or directly, into the combustion chamber and then the injection of a small quantity of oil. The oil in self-ignition conditions self-ignites so as to release the required energy for the ignition of the quantity of natural gas that presents in the cylinder. Oil is basically the source of gas ignition, and both together provide the required energy for the engine. Dual fuel engines we have in automotive and especially the heavy vehicles. Of course, mixed combustion is more interesting in naval engines where the benefits of combustion of gas are multiple.,

In the fourth chapter there is a brief reference and description of the regulations that apply to automotive and shipping related to permitted pollutant emissions. In automotive sector guidelines on maximum allowable emission limits have been in place since the 1970s. Since the 1990s, more concerted efforts have been made in terms of emission limits. Euro standards, both for passenger and light commercial vehicles and for heavy-duty vehicles, have become increasingly strict over the years. Over the last decade, these standards are stringent so that the impact of pollutants emitted is as low as possible for the environment and human health. Also there are restrictions on carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). CO<sub>2</sub> is not dirt but its increase in the atmosphere leads to the deterioration of the greenhouse gases. In the shipping sector the limitations on emissions of greenhouse gases and pollutants are not as strict as in automotive. However, there are limitations on emissions of sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and in some controlled areas these limits are even more stringent.

The fifth and final chapter presents the particularities of LNG use as a fuel in shipping as well as mixed combustion technologies developed by large marine engine manufacturing companies. LNG and shipping have coexisted for at least 50 years since the first LNG transport began. As a fuel, of course, it started to be used in 2001 and only on ships that transported the LNG as a commodity. When the LNG was used as a fuel, this was done in mixed combustion or dual fuel engines as commonly reported. Afterwards, observing the significant benefits of mixed combustion, technologies for installing such engines and other ships were also developed. Marine engineers now offer a wide range of combustion engines to meet a wide range of needs. Regarding the use of LNG as a fuel there are some peculiarities but with the evolution of technologies it will be overcome. Initially, LNG refuelling cannot take place in all ports, which is an important inhibitor. Also, supplying the ship with LNG requires specific protection protocols. Tanks that store LNG for use as fuel should meet specific specifications. In addition, LNG tanks occupy more volume than oil tanks, creating spatial problems. For marine combustion engines these essentially follow two principles of operation. One operating principle is based on the Otto cycle and is generally referred to as low-pressure mixed-combustion engines as gas injection is indirectly applied to the low-pressure (12 bar) intake of the engine. The second operating principle is based on the Diesel cycle. These mixed combustion engines are referred to as high-pressure mixed-combustion engines as natural gas is injected directly into the cylinder at high pressure (300 bar). Combustion engines that are commercially available are four-stroke and two-stroke while high-pressure combustion engines are two-stroke. In all cases, environmental and economic benefits are significant and are presented in detail in this chapter.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

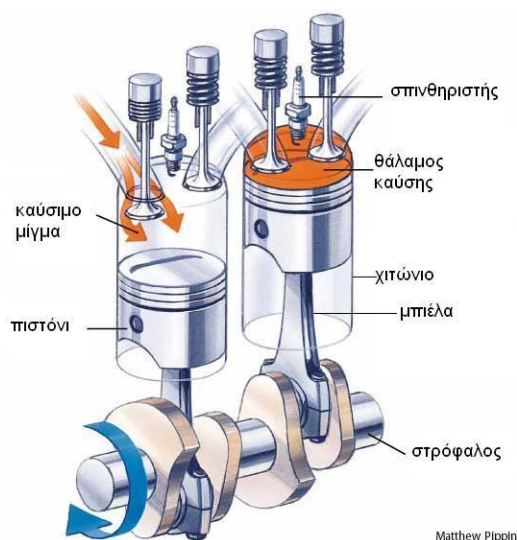
### 1.1 Αρχή λειτουργίας και χαρακτηριστικά στοιχεία ενός κινητήρα Diesel

#### 1.1.1 Εισαγωγή

Οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.) ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των θερμικών μηχανών. Περίπου το 85% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών καλύπτεται με την χρήση θερμικών μηχανών όπου, μέσω της καύσης, η χημική ενέργεια του καυσίμου (είτε στερεό είτε υγρό είτε αέριο) μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ που είναι διαθέσιμη σε μια περιστρεφόμενη άτρακτο με σκοπό την παραγωγή μηχανικής ενέργειας (πχ. κίνηση ενός μεταφορικού μέσου) ή ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση γεννήτριας. Οι θερμικές μηχανές έχουν όμως και ένα μεγάλο μειονέκτημα καθώς συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό στην εκπομπή βλαβερών ρύπων και διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο επιδεινώνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα στις Μ.Ε.Κ. το καυσαέριο που προκύπτει από την καύση του καυσίμου στο εσωτερικό ενός κυλίνδρου (για αυτό και χρησιμοποιείται ο όρος μηχανές εσωτερικής καύσης) παράγει την μηχανική ισχύ που αποδίδεται στην περιστρεφόμενη άτρακτο.

Βασικό χαρακτηριστικό κάθε Μ.Ε.Κ. είναι ο θάλαμος καύσης (κύλινδρος), ο χώρος δηλαδή όπου πραγματοποιούνται οι διάφορες διεργασίες. Τυπική μορφή κυλίνδρου Μ.Ε.Κ. δίνεται στην εικόνα 1.1 μαζί με τα βασικά του υποσυστήματα. Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στον κύλινδρο είναι:

- i. Εισαγωγή της νέας γόμωσης (αέρας ή αέριο μίγμα) διαμέσου της πολλαπλής εισαγωγής και των βαλβίδων ή θυρίδων εισαγωγής,
- ii. Συμπύεση της εγκλωβισμένης γόμωσης με την ανοδική κίνηση του εμβόλου, αφού προηγουμένως έχουν κλείσει οι βαλβίδες/θυρίδες εισαγωγής, και φτάνοντας το έμβολο στο άνω νεκρό σημείο και ουσιαστικά στο τέλος της συμπίεσης ξεκινάει η καύση,
- iii. Αποτόνωση των καυσαερίων η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας των όπου και έχουμε την παραγωγή της ωφέλιμης ισχύος του κινητήρα, μέρος της οποίας βέβαια προσδίδεται για την πραγματοποίηση του επόμενου κύκλου συμπίεσης,
- iv. Εξαγωγή του καυσαερίου διαμέσου των βαλβίδων/θυρίδων εξαγωγής και του συστήματος εξαγωγής (πολλαπλή εξαγωγής-εξάτμιση) προς το περιβάλλον.



Εικόνα 1.1: Τυπική αναπαράσταση του εσωτερικού ενός κινητήρα σπινθηρισμού.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σε μια Μ.Ε.Κ. πραγματοποιούνται όλες οι διεργασίες στον ίδιο χώρο. Ουσιαστικά για να γίνει αυτό εφικτό θα πρέπει σε μια Μ.Ε.Κ. να επιτύχουμε την εναλλαγή της νέας γόμωσης και των καυσαερίων, μέσα στον θάλαμο καύσης (κύλινδρο), σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αυτή η εναλλαγή γίνεται εφικτή μέσω της παλινδρομικής κίνησης του εμβόλου (πιστόνι) μέσα στον κύλινδρο και με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιούνται οι τέσσερις διεργασίες που αναφέραμε παραπάνω. Αυτή η παλινδρομική κίνηση του εμβόλου (πιστόνι) μετατρέπεται μέσω του διωστήρα (μπιέλα) σε περιστροφική κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα όπου και έχουμε την παραγωγή της ωφέλιμης ισχύος, είτε μηχανική (σύνδεση στροφαλοφόρου με άξονα μετάδοσης κίνησης) είτε ηλεκτρική (σύνδεση στροφαλοφόρου άξονα με τον άξονα γεννήτριας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος).

Οι εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ. έχουν ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών το οποίο περιλαμβάνει από την κίνηση των μοτοσυκλετών έως ακόμα και των μεγάλων εμπορικών πλοίων και των ελικοφόρων αεροπλάνων. Ακόμα, εφαρμογή βρίσκουν σε μικρές βιομηχανίες, αντλίες κ.τ.λ. έως και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον μια πολύ σημαντική δυνατότητα που δίνουν οι Μ.Ε.Κ. είναι η κάλυψη μεγάλου εύρους ισχύων που σημαίνει ότι μπορούμε να κατασκευάσουμε Μ.Ε.Κ. που καλύπτουν απαιτήσεις ελάχιστων kW έως και πάνω από 80 MW για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή πρόωση μεγάλων εμπορικών πλοίων.

### **1.1.2 Διαχωρισμός κινητήρων Μ.Ε.Κ. σε κατηγορίες**

Οι διάφορες κατηγορίες Μ.Ε.Κ. διαχωρίζονται με βάση:

#### ***Τον τρόπο έναυσης του καυσίμου***

- Έχουμε τους κινητήρες σπινθηρισμού ή κινητήρες Otto (spark ignition-SI) στους οποίους η έναυση του καυσίμου μίγματος επιτυγχάνεται με την χρήση σπινθηριστή.
- Έχουμε τους κινητήρες αυτανάφλεξης ή κινητήρες Diesel (compression ignition-CI) στους οποίους η έναυση του καυσίμου μίγματος πραγματοποιείται λόγω αυτανάφλεξης του καυσίμου μίγματος. Η αυτανάφλεξη επιτυγχάνεται λόγω της υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατεί στον θάλαμο καύσης.

Στους κινητήρες σπινθηρισμού η έναρξη της καύσης πραγματοποιείται με τη χρήση σπινθηριστή, ο οποίος τροφοδοτείται τη κατάλληλη στιγμή με ηλεκτρική τάση, μέσω του ηλεκτρικού συστήματος ανάφλεξης του κινητήρα. Η ηλεκτρική τάση τροφοδοτείται στον σπινθηριστή κοντά στο τέλος της συμπίεσης του εμβόλου όπου και στην συνέχεια ξεκινάει η καύση. Ο κάθε κύλινδρο διαθέτει τουλάχιστον έναν σπινθηριστή, ο οποίος είναι τοποθετημένος στην κυλινδροκεφαλή. Στους κινητήρες σπινθηρισμού η ρύθμιση των στροφών λειτουργίας τους είναι ποσοτική και πραγματοποιείται με τη πεταλούδα ρύθμισης του αέρα εισαγωγής, έτσι ελέγχεται η ποσότητα του καυσίμου μίγματος που θα εισέλθει στον κύλινδρο.

Οι κινητήρες αυτανάφλεξης συμπιέζουν μόνο αέρα και η έναρξη της καύσης πραγματοποιείται κατά την έγχυση του καυσίμου απευθείας μέσα στον κύλινδρο στο τέλος της συμπίεσης. Η αυτανάφλεξη του καυσίμου πραγματοποιείται λόγω επίτευξης κατάλληλων συνθηκών (υψηλή θερμοκρασία και πίεση) μέσα στον θάλαμο καύσης. Για την επίτευξη αυτών των συνθηκών χωρίς την χρήση σπινθηριστή απαιτείται ο κινητήρας να έχει μεγάλο λόγο συμπίεσης. Λόγο συμπίεσης αποκαλούμε τον συνολικός όγκος του κυλίνδρου (μαζί με τον όγκο του θαλάμου καύσης), προς τον όγκο του θαλάμου καύσης μόνο. Στους κινητήρες αυτανάφλεξης ο λόγος συμπίεσης, κυμαίνεται συνήθως από 17:1 έως 25:1, ενώ στους κινητήρες σπινθηρισμού από 7:1 έως 12:1.

#### ***Τους χρόνους λειτουργίας***

Η διαδρομή που κάνει το έμβολο για να μετακινηθεί μεταξύ του Άνω Νεκρού Σημείου (ΑΝΣ) και του Κάτω Νεκρού Σημείου (ΚΝΣ) χαρακτηρίζεται ως χρόνος (stroke). Ως Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) χαρακτηρίζουμε το ανώτατο σημείο που μπορεί να φτάσει το έμβολο, ενώ αντίστοιχα ως Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ) χαρακτηρίζουμε το κατώτατο σημείο που μπορεί να φτάσει το έμβολο.

Έχουμε δύο τύπους εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ., τους τετράχρονους (4χ) και τους δίχρονους (2χ) όπου ο αριθμός 4 ή 2 υποδηλώνει τον αριθμό των διαδρομών του εμβόλου που απαιτούνται για την πραγματοποίηση δύο διαδοχικών καύσεων.

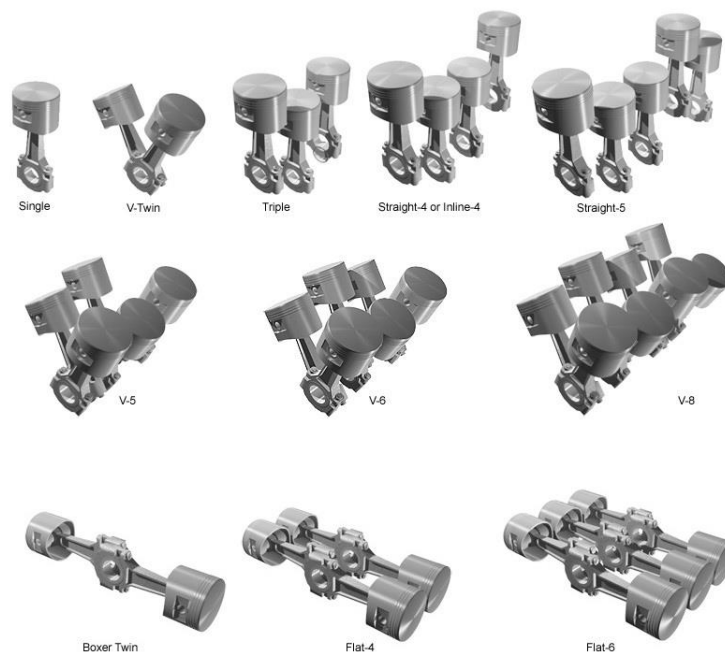
### *Τις στροφές λειτουργίας*

Ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους οι κινητήρες διακρίνονται σε βραδύστροφους, μεσόστροφους και ταχύστροφους.

- Βραδύστροφοι κινητήρες, ονομάζονται εκείνοι οι οποίοι λειτουργούν έως 300 στροφές ανά λεπτό.
- Μεσόστροφοι κινητήρες ονομάζονται οι κινητήρες που λειτουργούν από 300 έως 1200 στροφές ανά λεπτό.
- Ταχύστροφοι κινητήρες ονομάζονται οι κινητήρες που λειτουργούν από 1200 στροφές ανά λεπτό και πάνω.

### *Την διάταξη των κυλίνδρων*

- Σε σειρά: Μέχρι 12 κατακόρυφους κυλίνδρους σε μια γραμμή.
- Τύπου V: Οι κύλινδροι βρίσκονται συνήθως υπό γωνία  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $60^\circ$  ή  $90^\circ$ .
- Επίπεδοι κινητήρες: Έχουν τους κυλίνδρους τους στη μία πλευρά ή σε γωνία  $180^\circ$  και βρίσκουν εφαρμογή σε φορτηγά, λεωφορεία και μηχανές τρένων λόγω μικρού ύψους
- Αστεροειδούς τύπου: Έχουν τους κυλίνδρους στις ακτίνες ενός κύκλου, στο κέντρο του οποίου βρίσκεται ο στροφαλοφόρος άξονας.



*Εικόνα 1.2: Συνήθεις διατάξεις κινητήρων εσωτερικής καύσης*

Έχοντας αναφέρει με συνοπτικό τρόπο τις διάφορες κατηγορίες εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης θα προχωρήσουμε σε μια πιο αναλυτική παρουσίαση των κινητήρων αυτανάφλεξης ή όπως συνήθως αποκαλούνται κινητήρων Diesel. Ο λόγος που οι κινητήρες Diesel παρουσιάζουν τόσο μεγάλο ενδιαφέρον είναι η ικανότητα τους να πετυχαίνουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης σε σχέση με τις υπόλοιπες μηχανές εσωτερικής καύσης. Ενδεικτικά ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης σε Μ.Ε.Κ. έχει επιτευχθεί από δίχρονους ναυτικούς κινητήρες οι οποίοι έχουν φτάσει μέχρι και το 54%.

### **1.1.3 Μικρή ιστορική αναδρομή κινητήρων Diesel**

Ο κινητήρας Diesel κατοχυρώθηκε ως ευρεσιτεχνία από τον Γερμανό Rudolf Diesel το 1892. Το 1897 έγινε η πρώτη παρουσίαση του εμβολοφόρου κινητήρα Diesel. Το 1923, Έπειτα από προσπάθειες που έγιναν για βελτίωση του, κατασκευάστηκε από την MAN ο πρώτος ολοκληρωμένος κινητήρας Diesel που βρήκε εφαρμογή σε φορτηγά οχήματα. Το 1936 ο πρώτος κινητήρας Diesel που τοποθετήθηκε σε επιβατικό όχημα ήταν της Mercedes - Benz. Η εξέλιξη των κινητήρων Diesel είναι ραγδαία και συνεχόμενη με αποτέλεσμα την χρησιμοποίησή τους σε ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών.

Μεγάλη εξέλιξη στους κινητήρες Diesel επήλθε με την υπερτροφοδότηση-υπερπλήρωση τους. Από την δεκαετία του '50 υπερτροφοδοτούμενοι κινητήρες Diesel χρησιμοποιήθηκαν από την Mercedes-Benz και τη Volvo σε μικρά φορτηγά. Σε επιβατικά οχήματα όμως, οι υπερπληρούμενοι κινητήρες, εφαρμόστηκαν από τη δεκαετία του '80 και έπειτα. Στο τέλος της δεκαετίας του '80 είχαμε μια ακόμα σημαντική εξέλιξη των κινητήρων Diesel όπου επετεύχθη ο μερικός ηλεκτρονικός έλεγχος (EDC) των μέχρι τότε συστημάτων έγχυσης καυσίμου. Η συνεχής βελτίωση των ηλεκτρονικών συστημάτων, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός νέου πλήρως ηλεκτρονικά ελεγχόμενου συστήματος έγχυσης καυσίμου (Common rail), το οποίο τροποποίησε πλήρως τη λειτουργία των κινητήρων Diesel. Το σύστημα Common rail, χρησιμοποιείται από το 1995 έως και σήμερα, αφού αποτελεί το πλέον αποδοτικότερο σύστημα προσαγωγής καυσίμου.

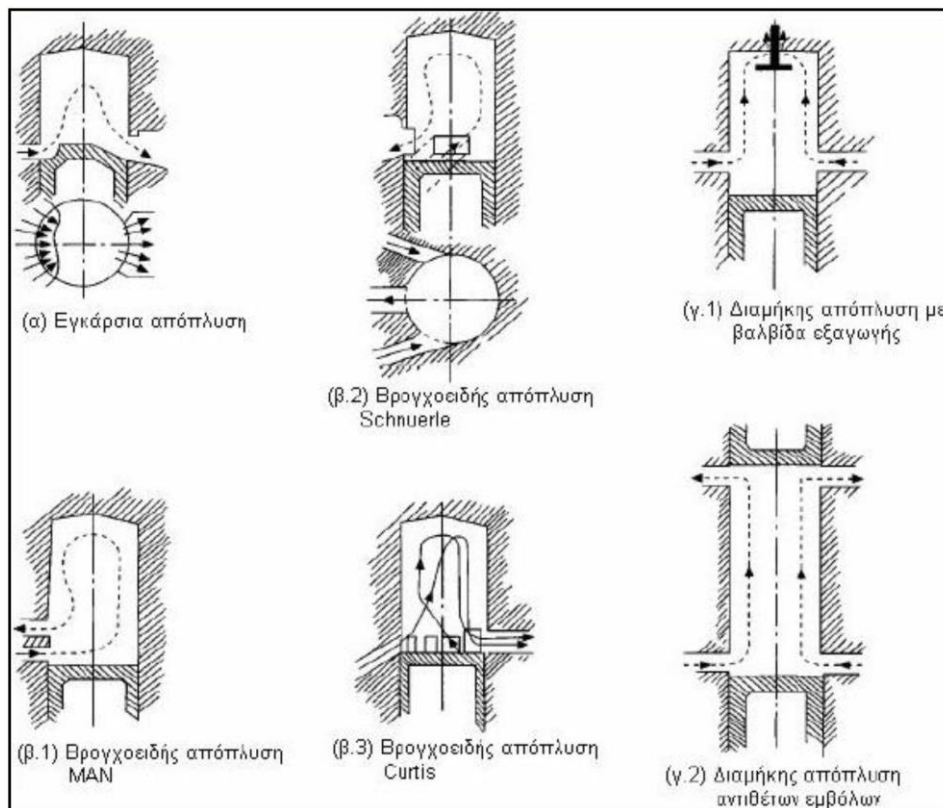
## **1.2 Σύντομη περιγραφή του θεωρητικού και πραγματικού κύκλου λειτουργίας 4-X και 2-X κινητήρα Diesel**

### **1.2.1 Θεωρητικός Κύκλος Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα Diesel**

Οι δίχρονοι κινητήρες Diesel πραγματοποιούν δύο παλινδρομικές κινήσεις του εμβόλου σε ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας και κατά συνέπεια μία πλήρη περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα. Στην πρώτη παλινδρομική κίνηση του εμβόλου (1<sup>ος</sup> χρόνος), πραγματοποιείται η φάση της καύσης και εκτόνωσης, ενώ παράλληλα αρχίζει η εξαγωγή και η εισαγωγή. Στην δεύτερη παλινδρομική

κίνηση του εμβόλου ( $2^{05}$  χρόνος), πραγματοποιείται η ολοκλήρωση της φάσης εισαγωγής και εξαγωγής ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιείται η φάση της συμπίεσης.

Στους δίχρονους παλινδρομικούς κινητήρες για την εισαγωγή του αέρα χρησιμοποιούνται θυρίδες ενώ για την έξοδο των καυσαερίων γίνεται χρήση είτε θυρίδων είτε βαλβίδων εξαγωγής. Αυτοί οι δύο τρόποι εξαγωγής των καυσαερίων οδηγούν σε δύο διαφορετικές μεθόδους απόπλυσης ή σάρωσης. Απόπλυση ή σάρωση είναι η διαδικασία κατά την οποία με την εισαγωγή του αέρα από την θυρίδα εισαγωγής έχουμε την υποβοηθούμενη εξαγωγή των καυσαερίων και κατά συνέπεια την απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια. Όταν έχουμε θυρίδες εξαγωγής πραγματοποιείται μία βρογχοειδής απόπλυση, ενώ στη περίπτωση που χρησιμοποιούνται βαλβίδες εξαγωγής, πραγματοποιείται διαμήκη απόπλυση. Για να επιτευχθεί και κατά κύριο λόγο να επιταχυνθεί η διαδικασία της απόπλυσης στους δίχρονους κινητήρες Diesel γίνεται χρήση υπερπληρωτή.



Εικόνα1.3: Διάφορα είδη απόπλυσης.

- $1^{05}$  Χρόνος Λειτουργίας (καύση – εκτόνωση – έναρξη εξαγωγής και εισαγωγής)

Το έμβολο κινούμενο προς τα πάνω φτάνει στο ΑΝΣ. Μέσα στον κύλινδρο υπάρχει συμπιεσμένος αέρας που είχε εισέλθει από την προηγούμενη φάση. Οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν μέσα στον θάλαμο καύσης είναι οι κατάλληλες για να επιτύχουμε την αυτανάφλεξη του



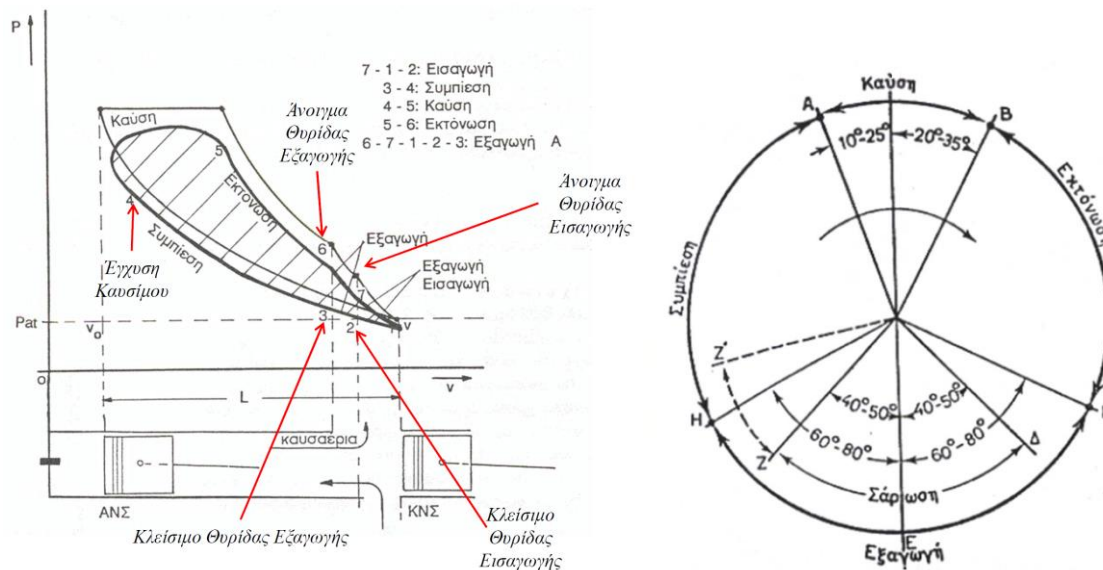
πετρελαίου που εγχέεται στον κύλινδρο. Με τον ψεκασμό του πετρελαίου μέσα στον θάλαμο καύσης έχουμε και την διάσπαση του σε πολύ μικρά σταγονίδια τα οποία έρχονται σε επαφή με τον συμπιεσμένο και θερμό αέρα έχοντας σαν αποτέλεσμα την αυτανάφλεξή τους. Με την καύση του μίγματος αέρα –πετρελαίου έχουμε την απελευθέρωση μεγάλου ποσού θερμότητας, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία και τη πίεση μέσα στο κύλινδρο. Λόγω αυτής της αύξησης της θερμοκρασίας και της πίεσης τα παραγόμενα καυσαέρια εκτονώνονται και ωθούν το έμβολο στο ΚΝΣ. Καθώς το έμβολο κινείται προς τα κάτω, πριν φτάσει στο ΚΝΣ, αποκαλύπτει τις θυρίδες/βαλβίδες εξόδου από όπου εξέρχονται τα καυσαέρια προς την ατμόσφαιρα. Συνεχίζοντας το έμβολο την καθοδική του πορεία αποκαλύπτει στην συνέχεια και τις θυρίδες εισαγωγής/σάρωσης οι οποίες τροφοδοτούν με αέρα τον κύλινδρο, τον γεμίζει και βοηθάει και στην απόπλυση του από τα εναπομείναντα καυσαέρια. Ουσιαστικά η φάση της εκτόνωσης είναι και η ενεργή φάση του κύκλου, κατά την οποία πραγματοποιείται η παραγωγή έργου της μηχανής.

- 2<sup>ος</sup> Χρόνος Λειτουργίας (ολοκλήρωση εισαγωγής και εξαγωγής – συμπίεση)

Ο 2<sup>ος</sup> χρόνος λειτουργίας ξεκινάει με το έμβολο να βρίσκεται στο ΚΝΣ και κατά συνέπεια τις θυρίδες εισαγωγής/σάρωσης και θυρίδες/βαλβίδες εξαγωγής ανοικτές. Με την χρήση του υπερπληρωτή στην εισαγωγή έχουμε την τροφοδότηση πεπιεσμένου αέρα από τις θυρίδες εισαγωγής και εν συνεχεία την απόπλυση του κυλίνδρου από τα καυσαέρια καθώς ο πεπιεσμένος αέρας ωθεί τα καυσαέρια στην έξοδο από τον κύλινδρο μέσω των θυρίδων/βαλβίδων εξαγωγής. Κάποιες μοίρες μετά το ΚΝΣ, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, το έμβολο κλείνει τις θυρίδες εισαγωγής και εν συνεχεία κλείνει και τις θυρίδες/βαλβίδες εξαγωγής, προκειμένου να αρχίσει η συμπίεση του αέρα. Ανεβαίνοντας το έμβολο, πλησιάζει πάλι λίγο πριν το ΑΝΣ, με αποτέλεσμα να ξαναδημιουργούνται οι κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας έτσι ώστε να έχουμε την επανάληψη του πρώτου χρόνου λειτουργίας.

## 1.2.2 Πραγματικός Κύκλος Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα Diesel

Σύμφωνα με το σχήμα της εικόνα 1.4 έχουμε στο σημείο Α, 10° ως 25° πριν από το ΑΝΣ, την αρχή της εγχύσεως αλλά και της καύσεως. Η καύση τελειώνει στο σημείο Β, 20° ως 35° μετά το ΑΝΣ, ενώ η εκτόνωση τελειώνει στο σημείο Γ, 60° ως 80° πριν από το ΚΝΣ, και ακολουθεί η εξαγωγή μέχρι το σημείο Η 60° ως 80° μετά το ΚΝΣ. Μετά ακολουθεί η συμπίεση από το σημείο Η μέχρι το σημείο Α γιατί στους δίχρονους κινητήρες πραγματοποιείται ταυτόχρονα η εξαγωγή και η εισαγωγή με σκοπό την απόπλυση του κυλίνδρου. Συγκεκριμένα ,ταυτόχρονα με την εξαγωγή έχουμε από το σημείο Δ, 40° ως 50° πριν από το ΚΝΣ την εισαγωγή νέου μίγματος και την απόπλυση/σάρωση του χώρου μέχρι το σημείο Ζ, 40° ως 50° μετά το ΚΝΣ.



Εικόνα 1.4: Πραγματικός κύκλος λειτουργίας δίχρονου κινητήρα Diesel

### 1.2.3 Θεωρητικός Κύκλος Λειτουργίας Τετράχρονου Κινητήρα Diesel

Οι τετράχρονοι κινητήρες Diesel πραγματοποιούν τέσσερις παλινδρομικές κινήσεις του εμβόλου για έναν πλήρη κύκλο λειτουργίας του κινητήρα και κατά συνέπεια δύο πλήρη περιστροφές του στροφαλοφόρου άξονα. Μία διαφορά με τους δίχρονους κινητήρες Diesel είναι ότι οι τετράχρονοι χρησιμοποιούν πάντα βαλβίδες και όχι θυρίδες για την εισαγωγή του αέρα. Οι τέσσερις χρόνοι λειτουργίας ενός κινητήρα Diesel είναι οι ακόλουθοι:

- 1<sup>ος</sup> Χρόνος λειτουργίας: Εισαγωγή Αέρα

Το έμβολο από το Α.Ν.Σ. κατέρχεται στο Κ.Ν.Σ. με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται αναρρόφηση αέρα με την βαλβίδα εισαγωγής ανοιχτή και την βαλβίδα εξαγωγής κλειστή. Αφού το έμβολο φτάσει στο Κ.Ν.Σ. η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει.

- 2<sup>ος</sup> Χρόνος λειτουργίας: Συμπίεση Αέρα

Το έμβολο από το Κ.Ν.Σ. ανέρχεται στο Α.Ν.Σ. με τις δύο βαλβίδες κλειστές με αποτέλεσμα την συμπίεση του αέρα έτσι ώστε να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες για αυτανάφλεξη. Λίγες μόλις πριν φτάσει το έμβολο στο Α.Ν.Σ. και τελειώσει η συμπίεση του αέρα αρχίζει η έγχυση του καυσίμου.

- 3<sup>ος</sup> Χρόνος λειτουργίας: Καύση Εκτόνωση

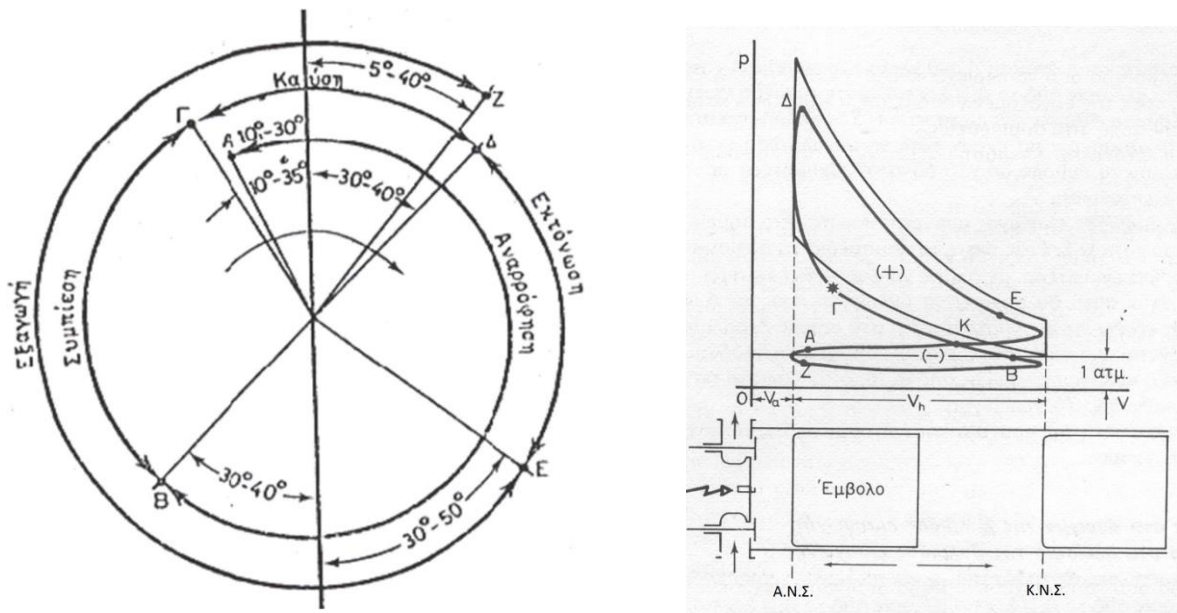
Το έμβολο κινείται από το Α.Ν.Σ. στο Κ.Ν.Σ. λόγω της εκτόνωσης των καυσαερίων που προέκυψαν από την αυτανάφλεξη του καυσίμου. Οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής παραμένουν κλειστές μέχρις ότου το έμβολο φτάσει στο Κ.Ν.Σ.

- 4<sup>ος</sup> Χρόνος λειτουργίας: Εξαγωγή

Το έμβολο από το Κ.Ν.Σ. ανέρχεται στο Α.Ν.Σ. Όταν το έμβολο βρίσκεται στο Κ.Ν.Σ. και αρχίζει να ανέρχεται οι βαλβίδες εξαγωγής ανοίγουν και με την ανοδική κίνηση του εμβόλου έχουμε την εξαγωγή των καυσαερίων από τον κύλινδρο. Όταν το έμβολο φτάσει πλέον στο ΑΝΣ, κλείνει η βαλβίδα εξαγωγής, ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής και έχουμε την επανάληψη από την αρχή των χρόνων λειτουργίας του κινητήρα.

#### 1.2.4 Πραγματικός Κύκλος Λειτουργίας Τετράχρονου Κινητήρα Diesel

Στην πραγματικότητα οι χρόνοι δεν αρχίζουν και δε τελειώνουν στο Άνω και Κάτω νεκρό σημείο, αλλά λίγο πριν ή λίγο μετά από αυτό. Συγκεκριμένα έχουν τόσες μοίρες διαφορά όσες ορίζει ο κατασκευαστής του κινητήρα.



Εικόνα 1.5: Πραγματικός κύκλος λειτουργίας τετράχρονου κινητήρα Diesel

- 1<sup>ος</sup> Χρόνος λειτουργίας: Εισαγωγή Αέρα

Στο πρώτο χρόνο λειτουργίας η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει 10° ως 30° πριν το ΑΝΣ (σημείο Α). Με το να ανοίγει πιο νωρίς η βαλβίδα εισαγωγής υποβοηθάτε η εισαγωγή του αέρα στον κύλινδρο.

- 2<sup>ος</sup> Χρόνος λειτουργίας: Συμπίεση Αέρα

Στο δεύτερο χρόνο λειτουργίας το έμβολο κινείται από το ΚΝΣ προς το ΑΝΣ. Η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει 30° ως 40° μετά το ΚΝΣ (σημείο Β) και ο παγιδευμένος στο κύλινδρο αέρας συμπιέζεται.

- 3<sup>ος</sup> Χρόνος λειτουργίας: Καύση Εκτόνωση

Ο τρίτος χρόνος λειτουργίας ξεκινά με το έμβολο να βρίσκεται στο ΑΝΣ και κατά την διάρκεια του τρίτου χρόνου πραγματοποιείται η καύση του καυσίμου μίγματος και η παραγωγή έργου. Στο χρόνο αυτό γίνεται ο ψεκασμός του καυσίμου όπου πραγματοποιείται η καύση του καυσίμου και η ενεργητική μετακίνηση του εμβόλου προς τα κάτω από την εκτόνωση των καυσαερίων. Η καύση του πετρελαίου στον κύλινδρο δεν είναι στιγμιαία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στον θεωρητικό κύκλο λειτουργίας αλλά προοδευτική. Πραγματοποιείται σε τρία χαρακτηριστικά στάδια Καταρχήν η καύση αρχίζει όταν το έμβολο βρίσκεται 10° ως 30° πριν το Α.Ν.Σ. (σημείο Γ) και την ολοκλήρωση της συμπίεσης. Τότε ψεκάζεται το πετρέλαιο στο χώρο καύσης με μορφή σταγονιδίων τα οποία αφού έρθουν σε επαφή με το οξυγόνο και λόγω των συνθηκών που επικρατούν στον κύλινδρο αναφλέγονται χωρίς τη παραγωγή θερμότητας. Αυτό το πρώτο στάδιο καύσης ονομάζεται στάδιο καθυστέρησης της ανάφλεξης. Το δεύτερο στάδιο ανάφλεξης του πετρελαίου ονομάζεται στάδιο ανεξέλεγκτης καύσης και συμβαίνει στην περιφέρεια της αρχικής καύσης και καταναλώνει το μεγαλύτερο μέρος της έως τότε εγχυθείσας ποσότητας καυσίμου. Η ολοκλήρωση της καύσης γίνεται με το τρίτο στάδιο που είναι αυτό της ελεγχόμενης καύσης και το εγχεόμενο καύσιμο καίγεται σταθερά και με ελάχιστη καθυστέρηση. Ο ψεκασμός του καυσίμου τελειώνει 30° ως 40° μετά το Α.Ν.Σ. (σημείο Δ). Με την ολοκλήρωση της καύσης τα καυσαέρια εκτονώνονται ωθώντας τον έμβολο προς το Κ.Ν.Σ. και αυτή η εκτόνωση διαρκεί μέχρι να ανοίξουν οι βαλβίδες εξαγωγής, οι οποίες ανοίγουν 30° ως 50° πριν το Κ.Ν.Σ. (σημείο Ε).

- 4<sup>ος</sup> Χρόνος λειτουργίας: Εξαγωγή

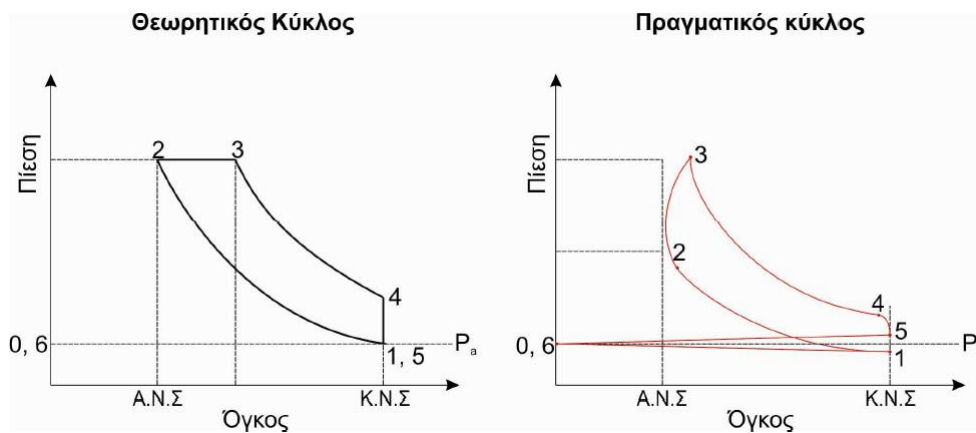
Ο τέταρτος χρόνος λειτουργίας ξεκινάει με το έμβολο να βρίσκεται στο Κ.Ν.Σ.. Η εξαγωγή των καυσαερίων όπως είπαμε ξεκινάει 30° ως 50° πριν το Κ.Ν.Σ. (σημείο Ε) καθώς τότε ανοίγουν οι βαλβίδες εξαγωγής. Οι βαλβίδες εξαγωγής παραμένουν ανοιχτές μέχρι και 5° ως 40° μετά το Α.Ν.Σ. (σημείο Ζ) καταφέροντας την αποτελεσματική εξαγωγή των καυσαερίων.

### 1.2.5 Διαφορές ανάμεσα στον θεωρητικό κύκλο Diesel και τον πραγματικό κύκλο λειτουργίας

Όπως είναι φανερό και από τα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 1.6, ο θεωρητικός με τον πραγματικό κύκλο εμφανίζουν διαφορές. Οι διεργασίες ενός πραγματικού κύκλου Diesel δεν είναι αδιαβατικές, ισοβαρής ή ισόχωρες όπως παρουσιάζονται στον θεωρητικό κύκλο. Πιο αναλυτικά:

- Στον θεωρητικό κύκλο η εισαγωγή του καυσίμου είναι ισοβαρής διαδικασία (μια διεργασία που γίνεται κάτω από σταθερή πίεση), ενώ στην πραγματική λειτουργία κατά την εισαγωγή του καυσίμου αναπτύσσεται πίεση μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση. Η πίεση είναι μικρότερη της ατμοσφαιρικής εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα στην πολλαπλής εισαγωγής και λόγω των απωλειών στραγγαλισμού στην εισαγωγή. Έτσι στην πραγματική λειτουργία την εισαγωγή του καυσίμου την παριστάνουμε με καμπύλη και όχι ευθεία γραμμή.

- Στον θεωρητικό κύκλο η συμπίεση είναι αδιαβατική μεταβολή ενώ στην πραγματική λειτουργία είναι πολυτροπική.
- Στον θεωρητικό κύκλο η αυτανάφλεξη του καύσιμου μίγματος είναι ισοβαρής διαδικασία (σταθερή πίεση) ενώ στην πραγματική λειτουργία η διαδικασία της καύσης δεν είναι ισοβαρής μεταβολή.
- Στον θεωρητικό κύκλο η κίνηση του εμβόλου προς τα κάτω λόγω της εκτόνωσης των καυσαερίων αναπαριστάτε με μια αδιαβατική μεταβολή ενώ στην πραγματική λειτουργία αυτή η μεταβολή είναι πολυτροπική.
- Στον θεωρητικό κύκλο η εξαγωγή των καυσαερίων και η εξισορρόπηση της πίεσής τους με την ατμοσφαιρική είναι ισόχωρη διαδικασία ενώ στην πραγματική λειτουργία δεν είναι.



Εικόνα 1.6: Θεωρητικό και πραγματικό διάγραμμα τετράχρονου πετρελαιοκινητήρα

## 1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κινητήρων Diesel

### 1.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χρήσης κινητήρων Diesel

Οι κινητήρες Diesel έχουν τεράστια αποδοχή και μεγάλο εύρος εφαρμογών που τους κατατάσσουν στο ίδιο επίπεδο, αν όχι και παραπάνω, σε σχέση με τους κινητήρες Otto. Όπως είναι λογικό, η κάθε μία από τις δύο τεχνολογίες έχει τα προτερήματα και τα μειονεκτήματά της. Σε ότι αφορά τους κινητήρες Diesel θα μπορούσαμε να πούμε τα εξής:

Έχουν μικρότερη κατανάλωση καυσίμου από τους αντίστοιχους Otto καθώς επιτυγχάνουν μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης. Η ισχύς όμως που μπορούν να παράξουν είναι μικρότερη σε

σύγκριση με αντίστοιχου μεγέθους κινητήρες Otto. Για το λόγο αυτό σε εφαρμογές που απαιτείται μικρό μέγεθος κινητήρα και υψηλότερη απόδοση έχουμε την χρήση κινητήρων Otto.

Ακόμη, οι κινητήρες Diesel έχουν περισσότερο βάρος και όπως είπαμε είναι και πιο ογκώδης, γιατί η πίεση λειτουργίας τους είναι μεγαλύτερη από ενός κινητήρα Otto αλλά και για αυτό το λόγο παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και κατά συνέπεια μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και λιγότερες απαιτήσεις για συντήρηση. Για αυτό το λόγο η χρήση τους σε επαγγελματικά οχήματα, φορτηγά και στην ναυσιπλοΐα είναι σχεδόν μονόδρομος.

Τέλος, σαν καύσιμο το πετρέλαιο είναι ασφαλέστερο από την βενζίνη καθώς δεν είναι εύφλεκτο και δεν έχει αναθυμιάσεις. Το μεγάλο όμως μειονέκτημα των κινητήρων Diesel είναι η μεγάλη ποσότητα εκπεμπόμενων ρύπων και μικροσωματιδίων τα οποία είναι επικίνδυνα για την υγεία του ανθρώπου.

### **1.3.2 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα μεταξύ δίχρονων και τετράχρονων κινητήρων Diesel**

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του τετράχρονου κινητήρα έναντι του δίχρονου εντοπίζεται στη διαδικασία απομάκρυνσης των καυσαερίων από τον κύλινδρο. Σε έναν τετράχρονο κινητήρα ο καθαρισμός του κυλίνδρου από τα καυσαέρια επιτυγχάνεται μετά από μια πλήρη διαδρομή του εμβόλου σε αντίθεση με τον καθαρισμό του κυλίνδρου ενός δίχρονου κινητήρα ο οποίος επιτυγχάνεται μόνο κατά την διάρκεια της απόπλυση/σάρωσης (όπου η θυρίδα εισαγωγής και θυρίδα/βαλβίδα εξαγωγής παραμένουν συγχρόνως ανοιχτές). Κατά συνέπεια, η απομάκρυνση των καυσαερίων σε έναν τετράχρονο κινητήρα είναι πολύ πιο αποτελεσματική από ότι σε έναν δίχρονο κινητήρα. Αποτελεσματική απόπλυση σε έναν δίχρονο κινητήρα diesel επιτυγχάνουμε μόνο όταν ο ρυθμός περιστροφής είναι πολύ μικρός, δηλαδή στους βραδύστροφους ναυτικούς κινητήρες.

Βέβαια το αποδιδόμενο ωφέλιμο έργο στους τετράχρονους κινητήρες είναι μικρότερο από αυτό των δίχρονων. Θεωρητικά μάλιστα, είναι το μισό από το αντίστοιχο ωφέλιμο έργο που αποδίδει ένας δίχρονος κινητήρας αντίστοιχων διαστάσεων. Αυτό οφείλεται στο ότι ο κάθε κύλινδρος μιας τετράχρονης μηχανής παράγει ωφέλιμο έργο κάθε τέσσερις διαδρομές του εμβόλου ενώ ο αντίστοιχος κύλινδρος μιας δίχρονης παράγει ωφέλιμο έργο κάθε δύο διαδρομές του εμβόλου. Οι δίχρονοι κινητήρες καταναλώνουν μικρότερο μέρος του έργου τους, για την κίνηση βαλβίδων αφού έχουν μόνο βαλβίδες εξαγωγής είτε δεν έχουν καθόλου. Στην πράξη βέβαια το έργο στους δίχρονους κινητήρες είναι αυξημένο κατά 20-30% σε σχέση με τους αντίστοιχους τετράχρονους και αυτό οφείλεται στην απώλεια της συμπίεσης κατά την απόπλυση του κυλίνδρου, στην παραμένουσα ποσότητα των καυσαερίων μέσα στον θάλαμο καύσης και στην απορροφούμενη ισχύ της διάταξης υπερπλήρωσης, που είναι απαραίτητη στους κινητήρες αυτούς.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα των τετράχρονων κινητήρων είναι οι μικρότερες καταπονήσεις που δέχονται τα εξαρτήματα τους σε σχέση με τα εξαρτήματα των δίχρονων κινητήρων. Ειδικά, στους

δύχρονους κινητήρες παρατηρούνται περισσότερες φθορές στα τμήματα του συστήματος παραγωγής της κίνησης, όπως είναι ο κύλινδρος, τα έμβολα και τα ελατήρια. Αυτό συμβαίνει γιατί στους τετράχρονους κινητήρες έχουμε μικρότερη θερμική καταπόνηση σε σχέση με τους δίχρονους κινητήρες, λόγω της πραγματοποίησης καύσης σε κάθε τέσσερις διαδρομές του εμβόλου. Κατά συνέπεια οι τετράχρονες μηχανές θεωρούνται περισσότερο αξιόπιστες και μεγαλύτερης αντοχής σε σχέση με τις δίχρονες, ιδιαίτερα όταν λειτουργούν σε υψηλό αριθμό στροφών.

Η ύπαρξη όμως περισσότερων εξαρτημάτων στους τετράχρονους κινητήρες είναι και μειονέκτημα καθώς τους καθιστά πιο πολύπλοκους σε σχέση με τους αντίστοιχους δίχρονους κινητήρες. Η πολυπλοκότητα αυτή οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αναγκαία ύπαρξη του μηχανισμού των βαλβίδων εισαγωγής και εξαγωγής. Αντίθετα, την πολυπλοκότητα αυτή δεν την συναντάμε στις δίχρονες μηχανές, αφού σ' αυτές ο αριθμός των βαλβίδων μπορεί να είναι μικρότερος ή ακόμα και να μην υπάρχουν καθόλου, κάνοντας χρήση θυρίδων εισαγωγής και εξαγωγής. Γενικά, οι δίχρονες μηχανές diesel έχουν λιγότερα εξαρτήματα, είναι ελαφρύτερες και έχουν μικρό κόστος κατασκευής.

Κατά συνέπεια, όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, έχουν οδηγήσει τους κατασκευαστές στο να προτιμούν τους μεν δίχρονους κινητήρες για αργόστροφες μηχανές μεγάλης ισχύος, τους δε τετράχρονους κινητήρες για ταχύστροφες και μικρότερης γενικά ισχύος μηχανές. Με βάση τα παραπάνω, οι δίχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως ως κινητήρες πλοίων ή στην ηλεκτροπαραγωγή. Οι τετράχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως ως κινητήρες οχημάτων, σε μηχανήματα έργων και γενικά είναι πιο διαδεδομένοι καθώς έχουν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών.

## 1.4 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα κινητήρων Diesel

### 1.4.1 Εκπεμπόμενα ρύποι από μηχανές εσωτερικής καύσης

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης παράγουν ρυπογόνες ουσίες οι οποίες σχηματίζονται λόγω της χημικής διάσπασης των προϊόντων της καύσης. Οι κυριότερες ρυπογόνες ουσίες που παράγονται κατά την καύση και οι οποίες ελέγχονται και από την νομοθεσία είναι:

- **Οξειδία του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ):** δημιουργούνται από την οξείδωση του αζώτου ( $\text{N}_2$ ) (ο αέρας που χρησιμοποιείται για την καύση περιέχει άζωτο) λόγω του ότι στο θάλαμο καύσης επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας και πλεόνασμα οξυγόνου. Μερικά οξειδία του αζώτου είναι επιβλαβή για την υγεία, αφού μπορούν να προκαλέσουν αναπνευστικές και καρδιακές παθήσεις. Επίσης, πρόκειται για έναν από τους βασικούς συντελεστές δημιουργίας του φωτοχημικού νέφους.

- **Μονοξειδίο του άνθρακα (CO):** δημιουργείται από την έλλειψη οξυγόνου και κατά συνέπεια την ατελή καύση των καυσίμων που περιέχουν άνθρακα. Προέρχεται κυρίως από τους βενζινοκινητήρες καθώς στους πετρελαιοκινητήρες έχουμε πλεόνασμα αέρα σε όλες τις φάσεις λειτουργίας. Είναι ένα άχρωμο, άγευστο, άοσμο και εκρηκτικό αέριο και όταν η συγκέντρωσή του στον αέρα ξεπεράσει κάποια επίπεδα προκαλεί πονοκεφάλους και προβλήματα στο κυκλοφορικό σύστημα. Σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να αποβεί θανατηφόρο. Είναι ασταθής ένωση και μόλις βρεθεί στον ελεύθερο αέρα μετατρέπεται αρκετά γρήγορα σε αβλαβές διοξείδιο του άνθρακα και για αυτό έχει μόνο τοπική επίδραση.
- **Άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC):** υδρογονάνθρακες χαρακτηρίζονται οι ενώσεις της μορφής  $C_xH_y$  που εμφανίζονται μετά από ατελή καύση. Η δημιουργία τους οφείλεται κατά κύριο λόγο στον εγκλωβισμό καυσίμου και λιπαντικού στα διάκενα μεταξύ του εμβόλου και των τοιχωμάτων του κυλίνδρου με συνέπεια την μη σωστή ανάμιξή τους με τον αέρα ώστε να πραγματοποιηθεί η πλήρης καύση τους. Στους πετρελαιοκινητήρες εμφανίζεται μικρότερη ποσότητα HC από ότι στους βενζινοκινητήρες λόγω της τελειότερης καύσης τους. Στον ανθρώπινο οργανισμό επιδρούν με διαφορετικό τρόπο καθώς μερικοί υδρογονάνθρακες ερεθίζουν τα μάτια, ενώ άλλοι (αρωματικοί υδρογονάνθρακες, όπως το βενζόλιο) είναι καρκινογόνοι. Επίσης είναι υπεύθυνοι και για τη φωτοχημική αιθαλομίχλη.
- **Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>):** το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) δημιουργείται από την καύση καυσίμου που περιέχει θείο. Είναι ένα άχρωμο αέριο με έντονη οσμή. Το ποσοστό θείου στα καύσιμα παρουσιάζει ρυθμούς μείωσης αφού τα διυλιστήρια φροντίζουν να τα αποθειώνουν.
- **Σωματίδια Αιθάλης:** εκτός από τους παραπάνω αέριους ρύπους, οι πετρελαιοκινητήρες εκπέμπουν ταυτόχρονα και στερεά σωματίδια σε μορφή σκόνης, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ο γνωστός μαύρος καπνός στα καυσαέρια. Τα σωματίδια αυτά είναι σωματίδια αιθάλης τα οποία είναι μόρια άκαυστου άνθρακα και είναι επικίνδυνα για το περιβάλλον, αλλά και για την υγεία του ανθρώπου αφού μπορούν να διεισδύσουν από τις αναπνευστικές οδούς στους πνεύμονες και να προκαλέσουν καρκινογένεση. Η δημιουργία τους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τη παροχή αέρα, τον ψεκάσμο του καυσίμου και την εξάπλωση της φλόγας. Σε μερικές περιοχές του θαλάμου καύσης το μείγμα μπορεί να είναι πλούσιο επειδή δεν υπάρχει επάρκεια οξυγόνου με συνέπεια η καύση να είναι ατελής και να δημιουργούνται σωματίδια αιθάλης.

Γενικά, όλοι οι παραπάνω ρύποι δεν έχουν την ίδια επικινδυνότητα ούτε παράγονται σε ίδιες ποσότητες για όλους τους τύπους των Μ.Ε.Κ. Πιο συγκεκριμένα:

- Και οι τρεις αέριοι ρύποι CO, HC, NO<sub>x</sub> παρουσιάζουν μεγάλη συγκέντρωση σε εμβολοφόρους κινητήρες Otto.



- ii. Σε κινητήρες Diesel αυτοκινήτων και φορτηγών κυριαρχούν τα  $\text{NO}_x$  και η αιθάλη (CO και HC εκπέμπονται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις)..
- iii. Σε κινητήρες Diesel βιομηχανικών εφαρμογών και ναυτικούς κυριαρχούν οι εκπομπές  $\text{NO}_x$  και αυτός είναι και ο μοναδικός ρύπος, μαζί με τα οξείδια του θείου, για τον οποίο υπάρχουν θεσμοθετημένα όρια στη συγκεκριμένη κατηγορία. Λόγω του πολύ μικρού ρυθμού των μεταβατικών λειτουργιών, οι εκπομπές της αιθάλης είναι σχετικά περιορισμένες.

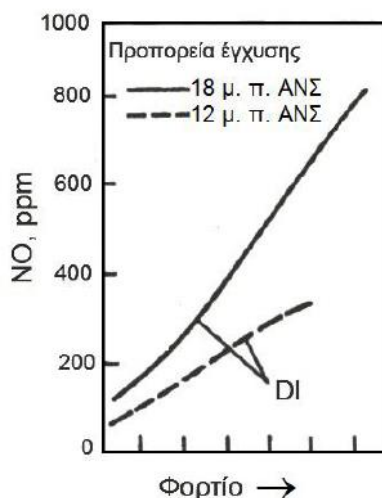
#### 1.4.2 Σχηματισμός των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ )

Με τον όρο οξείδια του αζώτου  $\text{NO}_x$  αναφερόμαστε στο μονοξείδιο του αζώτου NO, στο διοξείδιο του αζώτου  $\text{NO}_2$  αλλά ενδεχομένως και ίχνη άλλων οξειδίων του αζώτου (όπως τριοξείδιο  $\text{N}_2\text{O}_3$  και πεντοξείδιο  $\text{N}_2\text{O}_5$ ). Το  $\text{NO}_2$  εκπέμπεται σε αρκετά μικρότερο ποσοστό από ότι το NO. Η αιτία δημιουργίας των  $\text{NO}_x$  βασίζεται στην ύπαρξη υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων εντός του θαλάμου καύσης, καθώς και στην ύπαρξη της απαραίτητης ποσότητας οξυγόνου. Το  $\text{NO}_2$  είναι δηλητηριώδες για το αναπνευστικό σύστημα, και προκαλεί μολύνσεις στους πνεύμονες καθώς επίσης και αλλεργίες του αναπνευστικού. Ακόμη, τα  $\text{NO}_x$  αντιδρούν με αμμωνία, υγρασία και άλλα συστατικά σχηματίζοντας νιτρικό οξύ και ανάλογα σωματίδια, τα οποία επίσης επιβαρύνουν το αναπνευστικό σύστημα και καταστρέφουν τους πνεύμονες. Η συνεχής εκπομπή  $\text{NO}_x$  συμβάλλει επίσης στην όξυνση των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο περιβάλλον.

Στις Μ.Ε.Κ. κατά τη φάση της αποτόνωσης, αν υπήρχε διαθέσιμος χρόνος για την επίτευξη χημικής ισορροπίας, η μεγαλύτερη ποσότητα του NO θα αποσυντίθετο σε άζωτο και οξυγόνο. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι εφικτό να συμβεί καθώς έχουμε απότομη πτώση της θερμοκρασίας κατά την αποτόνωση, η οποία οδηγεί τις αντιδράσεις που συμμετέχουν στο σχηματισμό των  $\text{NO}_x$  να «παγώσουν», με αποτέλεσμα το καυσαέριο της εξαγωγής να περιέχει συγκεντρώσεις οξειδίων αζώτου αρκετά μεγαλύτερες από ότι θα περιείχε σε περίπτωση χημικής ισορροπίας.

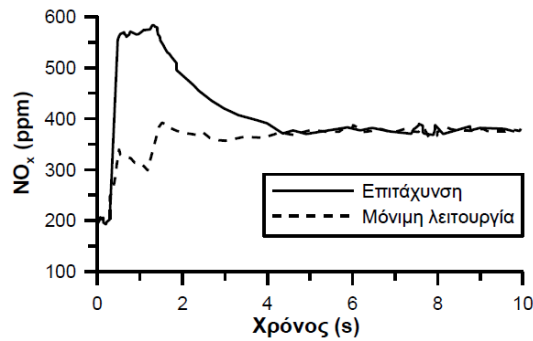
Η παραγωγή οξειδίων του αζώτου εξαρτάται εκθετικά από τη θερμοκρασία της φλόγας και γραμμικά από τη διάρκεια καύσης. Για τους παραπάνω λόγους καταλήγουμε στο ότι θα έχουμε αυξημένες συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου:

- με την αύξηση του φορτίου λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας στην ζώνη αντίδρασης και λόγω της ύπαρξης αρκετών περιοχών με συγκέντρωση αέρα-καυσίμου κοντά στην στοιχειομετρική τιμή
- με αύξηση της προπορείας έγχυσης, που σημαίνει ότι η καύση ξεκινάει νωρίτερα, και ένα κομμάτι της εξελίσσεται σε μειούμενο όγκο καθώς προσεγγίζεται το ANΣ, άρα αυξάνονται αναλογικά οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις στον θάλαμο καύσης, κάτι που οδηγεί στην αύξηση της δημιουργίας  $\text{NO}_x$



Εικόνα 1.7: Επίδραση προπορείας έγχυσης και φορτίου στην παραγωγή NO σε κινητήρα Diesel άμεσης έγχυσης (DI)

- όταν η διάρκεια της καύσης είναι μεγάλη, όπως στους 2-X ναυτικούς κινητήρες, και γενικά όσο χαμηλότερες είναι οι στροφές λειτουργίας του κινητήρα τόσο μεγαλύτερες οι συγκεντρώσεις των NO<sub>x</sub>
- όταν υπάρχει τοπική συγκέντρωση σε οξυγόνο. Ειδικά στους κινητήρες Diesel, λόγω του ότι το καύσιμο εγχέεται στο θάλαμο καύσης σε υγρή μορφή και στη συνέχεια αναμιγνύεται με τον αέρα, υπάρχει μεγάλη στρωμάτωση στην κατανομή της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του καυσίμου μίγματος με αποτέλεσμα να σχηματίζονται NO<sub>x</sub> σε ορισμένες μόνον περιοχές, εκεί όπου το επιτρέπουν οι συνθήκες. Το μεγαλύτερο ποσοστό των NO<sub>x</sub> σχηματίζεται κυρίως κατά το δεύτερο στάδιο της καύσης (ανεξέλεγκτη καύση) του οποίου οι τιμές του λόγου ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου είναι κοντά στη μονάδα και θερμοκρασία, λόγω της προ-αναμεμιγμένης καύσης, ιδιαίτερα υψηλή
- με την μείωση του ποσοστού του παραμένου καυσαερίου έχοντας ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση των εκπομπών NO<sub>x</sub>. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι επειδή μειώνεται η ειδική θερμοχωρητικότητα του καυσίμου μίγματος με συνέπεια την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας
- κατά τη φάση της επιτάχυνσης, κυρίως στους στροβιλο-υπερπληρωμένους Diesel



Εικόνα 1.8: Αύξηση εκπομπών οξειδίου του αζώτου κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης στροβιλο-υπερπληρωμένου κινητήρα Diesel από την άφορτη λειτουργία.

### 1.4.3 Σχηματισμός των άκαυστων υδρογονανθράκων HC

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες HC που εμφανίζονται στην εξαγωγή των κινητήρων Diesel και Otto προέρχονται από την ατελή καύση του καυσίμου. Τα διάφορα είδη HC που παρατηρούνται είναι οι ολεφίνες, οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες και τα ακετυλένια και μαζί με τα οξειδία του αζώτου συμβάλλουν στη δημιουργία του φωτοχημικού νέφους.

Ο υδρογονάνθρακες αυτοί προέρχονται είτε απευθείας από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, είτε είναι προϊόντα πολυμερισμού ή πυρόλυσης του καυσίμου, κυρίως κατά τις φάσεις της καύσης και αποτόνωσης. Οι κυριότερες αιτίες που προκαλούν το σχηματισμό και την εκπομπή HC από την εξαγωγή των κινητήρων είναι η σβέση της φλόγας της καύσης κατά την πρόσπτωσή της κοντά στα ψυχρά τοιχώματα, με συνέπεια το αντίστοιχο ποσό μείγματος να μένει άκαυστο, καθώς και η αδυναμία της φλόγας να διεισδύσει σε περιοχές οι οποίες είναι ιδιαίτερα στενές, όπως τα διάκενα των ελατηρίων και ο χώρος που παραμένει μεταξύ των βαλβίδων και των εδρών τους.

Οι υδρογονάνθρακες που ανιχνεύονται στην εξαγωγή ενός κινητήρα Diesel προέρχονται είτε από καύσιμο το οποίο διέφυγε κατά την κανονική διαδικασία της καύσης είτε διότι το μείγμα καυσίμου – αέρα ήταν πολύ πτωχό για να αυταναφλεγεί ή να συντηρήσει την καύση είτε διότι ήταν πολύ πλούσιο (πολύ καύσιμο). Η κύρια αιτία που οδηγεί στο σχηματισμό υδρογονανθράκων είναι το πολύ πτωχό μείγμα, το οποίο δεν αυταναφλέγεται ή είναι ανίκανο να συντηρήσει την καύση. Οι συνθήκες λειτουργίας των κινητήρων Diesel επηρεάζουν σημαντικά τις εκπομπές των HC. Στο κενό φορτίο ή στα πολύ χαμηλά φορτία (μεγάλο  $\lambda_a$ ) οι εκπομπές είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι στο πλήρες φορτίο. Στην περίπτωση που ο κινητήρας υπερφορτωθεί (υπερβολική παροχή καυσίμου), οι εκπομπές HC αυξάνονται ραγδαία. Οι μηχανισμοί που οδηγούν στον σχηματισμό HC στους κινητήρες Diesel είναι οι ακόλουθοι:

- i. Υπερ-αναμιξιμότητα με αέρα (πτωχό μίγμα): σχηματισμός HC υπό κενό ή χαμηλό φορτίο. Το ποσοστό των ακαύστων HC που προέρχεται από τις περιοχές με πτωχό καύσιμο εξαρτάται από την ποσότητα του καυσίμου που εγχέεται στην διάρκεια της καθυστέρησης

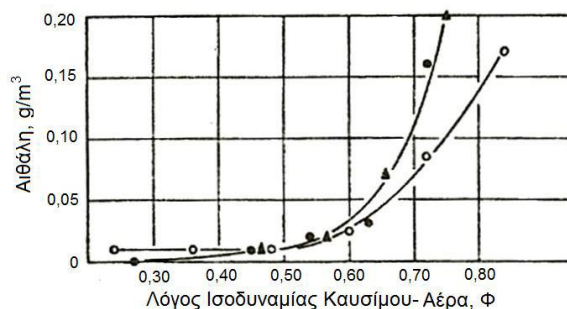
καύσης, από το ρυθμό ανάμιξης με τον αέρα κατά το στάδιο αυτό και από το κατά πόσον οι συνθήκες εντός του κυλίνδρου μπορούν να οδηγήσουν σε αυτανάφλεξη.

- ii. Υπο-αναμιξιμότητα με αέρα (πλούσιο μίγμα): σχηματισμός HC στα υπερβολικά υψηλά φορτία λόγω ατελούς καύσης του καυσίμου. Η πολύ χαμηλή ταχύτητα με την οποία εγχέεται το καύσιμο στο τέλος της φάσης της καύσης και το επιπλέον καύσιμο που εισέρχεται στον κύλινδρο κάτω από συνθήκες υπερφόρτισης του κινητήρα (μικρές τιμές του  $\lambda_a$ ) συντελούν στη χαμηλή ανάμιξη του καυσίμου με τον αέρα και συνεπώς στο σχηματισμό HC.
- iii. Στην περίπτωση που ο κινητήρας Diesel υπερφορτωθεί, π.χ. κατά την απότομη επιτάχυνση ή επιβολή φορτίου (μεγάλη παροχή καυσίμου), οι εκπομπές HC αυξάνονται σημαντικά.
- iv. Επίσης, κατά την ψυχρή εκκίνηση κινητήρων Diesel, όπου ανάλογα και με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να έχουμε μέχρι και αστοχία έναυσης (misfire). Και γενικά σε κάθε περίπτωση ασταθούς καύσης στους πρώτους κύκλους λειτουργίας (combustion instability) έχουμε σημαντική αύξηση των εκπομπών HC.

#### 1.4.4 Εκπεμπόμενα σωματίδια-αιθάλη

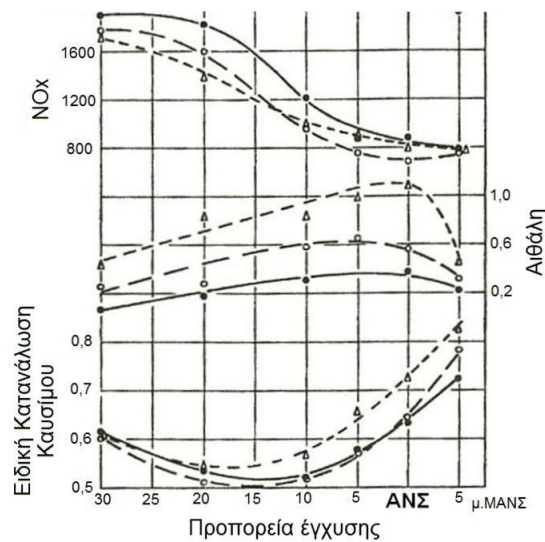
Τα σωματίδια (particulate matter, PM) αποτελούνται κυρίως από ανθρακούχο υλικό (αιθάλη) παραγόμενο από την καύση, στο οποίο έχουν προσροφηθεί οργανικά συστατικά (προερχόμενα κυρίως από άκαυστο πετρέλαιο και λιπαντικό λάδι σε εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ.). Τα σωματίδια κατανέμονται σε ένα πλατύ εύρος μεγεθών από 20 nm έως 10  $\mu\text{m}$ , χαρακτηριστικό που τα καθιστά αναπνεύσιμα. Χωρίζονται συχνά σε ένα διαλυτό οργανικό μέρος (SOF) και σε ένα μη διαλυτό, το οποίο χρησιμοποιείται συχνά ως μία εκτίμηση της αιθάλης (soot).

Το ποσοστό της αιθάλης στα σωματίδια που εκπέμπει ένας κινητήρας Diesel ποικίλει, αλλά είναι συνήθως κοντά στο 40-50%. Άλλες ουσίες που περιέχονται στα σωματίδια είναι: άκαυστο ή μερικώς μόνον καμένο καύσιμο ή λιπαντικό λάδι κινητήρα, τρίμματα μετάλλων από φθορά και διάφορα άλατα προερχόμενα από τα καύσιμα. Η αιθάλη δημιουργείται από άκαυστο καύσιμο, το οποίο σχηματίζει σωματίδια από την αέρια φάση στη στερεή και σε περιοχές πλούσιες σε καύσιμο (απουσία οξυγόνου) και με υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 1.9: Επίδραση φορτίου ( $\Phi$ ) στις εκπομπές αιθάλης

Η βασική παράμετρος, στους κινητήρες Diesel, που επηρεάζει την παραγωγή αιθάλης-σωματιδίων είναι η αναλογία καυσίμου-αέρα, δηλαδή το φορτίο του κινητήρα (ποιοτική ρύθμιση ισχύος). Αύξηση της αναλογίας αυτής οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης αιθάλης. Η μέγιστη αύξηση της αναλογίας αυτής και κατά συνέπεια αύξηση των παραγόμενων σωματιδίων συμβαίνει κατά την μεταβατική λειτουργία των στρόβιλο-υπερπληρωμένων κινητήρων Diesel. Με τον όρο μεταβατική λειτουργία εννοούμε την εξαναγκασμένη και συνήθως απότομη μεταβολή είτε στην παροχή του εγχέομένου καυσίμου στον κύλινδρο (μεταβολή στροφών) είτε στο φορτίο με το οποίο είναι συνδεδεμένος ο κινητήρας, π.χ. ηλεκτρική γεννήτρια. Το βασικό μειονέκτημα της στρόβιλο-υπερπλήρωσης κατά τη μεταβατική λειτουργία εντοπίζεται στην υστέρηση του ζεύγους υπερπλήρωσης να τροφοδοτήσει άμεσα τον κινητήρα με αυξημένη παροχή αέρα. Ενώ την ίδια ώρα το σύστημα έγχυσης καυσίμου ανταποκρίνεται άμεσα στην εντολή για αύξηση της ισχύος εγχέοντας περισσότερο καύσιμο. Έτσι, έχουμε σαν αποτέλεσμα στους πρώτους κύκλους λειτουργίας μετά από απότομη αύξηση στροφών ή φορτίου να παρατηρείται ανακολουθία ανάμεσα στην (αυξημένη) παροχή καυσίμου και στην χαμηλή ποσότητα του παρεχόμενου αέρα με αποτέλεσμα (σε κινητήρες Diesel) ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου  $\lambda_a$  να πέφτει σε πολύ χαμηλές τιμές (ακόμα και κάτω από τη μονάδα) οδηγώντας σε αυξημένες εκπομπές καπνού, οι οποίες είναι ορατές. Μετά την πάροδο μερικών δευτερολέπτων, οπότε και έχει επιταχυνθεί το ζεύγος υπερπλήρωσης, καταφέρνει ο συμπιεστής να δώσει την επιπλέον ποσότητα αέρα στους κυλίνδρους, οπότε και ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα.



Εικόνα 1.10: Αιθάλη, οξείδια του αζώτου και κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της προπορείας έγχυσης κινητήρα Diesel.

Ένα ιδιαίτερα αρνητικό γεγονός είναι ότι τα αίτια παραγωγής της αιθάλης βρίσκονται σε ανακολουθία με τα αίτια που οδηγούν στην δημιουργία των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ). Αυτό συμβαίνει γιατί, ενώ η αυξημένη θερμοκρασία εντός του θαλάμου καύσης μπορεί να μειώσει την αιθάλη (λόγο προαγωγής αντιδράσεων οξειδωσης), από την άλλη πλευρά, αυξάνει την παραγωγή

οξειδίων του αζώτου. Η αντίθετη αυτή πορεία των δύο ρύπων μπορεί να επεκταθεί και όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου καθιστώντας ιδιαίτερα δύσκολη την εύρεση ιδανικής λύσης.

Η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων (particle size distribution) είναι ιδιαίτερα καθοριστική όσον αφορά την ποιότητα της ατμόσφαιρας, επειδή θεωρείται ότι η τοξικότητα αυξάνεται όσο το μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται.

Το μέγεθος των σωματιδίων καθορίζει το μέγεθος της επίδρασης τους στο περιβάλλον ως εξής: επηρεάζει το χρόνο παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, τις οπτικές ιδιότητες των σωματιδίων, την επιφάνεια των σωματιδίων και τις επιπτώσεις στην υγεία. Για παράδειγμα, τα σωματίδια αιθάλης της τάξεως των 100 nm δημιουργούν κίνδυνο στην υγεία του ανθρώπου έχοντας διαστάσεις αρκετά μικρές για να απορροφηθούν από την μύτη και αρκετά μεγάλες για να επικαθήσουν στους πνεύμονες. Ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα είναι μεγαλύτερος για τα σωματίδια με διάμετρο 0.1-10 μm και είναι περίπου μία εβδομάδα. Ένας χαρακτηριστικός χρόνος παραμονής για τα σωματίδια με διάμετρο 10 nm είναι μόνο 15 λεπτά περίπου.

Μεταξύ των σημαντικότερων παραγόντων που έχουν βρεθεί ότι επηρεάζουν τη συγκέντρωση του αριθμού των σωματιδίων και την κατανομή μεγέθους είναι ο τύπος του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Για το λόγο αυτό προτιμούνται τα καύσιμα με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο γιατί επιτυγχάνουν μειωμένες γενικά εκπομπές σωματιδίων, αν και έχει παρατηρηθεί μια αύξηση στη συγκέντρωση των νανοσωματιδίων. Μικρότερες εκπομπές σωματιδίων παρατηρούνται και όταν το καύσιμο εγχέεται σε υψηλότερες πιέσεις ή όταν τα ποσοστά ανακυκλοφορίας καυσαερίου (EGR) είναι χαμηλότερα.

## **1.5 Σύντομη παράθεση τεχνολογιών βελτίωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και της απόδοσης υφιστάμενων κινητήρων Diesel**

Η μείωση των βλαβερών αερίων στους πετρελαιοκινητήρες, μπορεί να πραγματοποιηθεί με δυο τρόπους, είτε με την μείωση του σχηματισμού των ρύπων μέσα στο θάλαμο καύσης, πρωτογενείς μέθοδοι, είτε χρησιμοποιώντας συστήματα ώστε να περιορίζουν τους εκπεμπόμενους ρύπους στην εξαγωγή του κινητήρα, δευτερογενείς μέθοδοι.

### **1.5.1 Πρωτογενείς μέθοδοι μείωσης των βλαβερών αερίων στους κινητήρες Diesel**

Οι πρωτογενείς μέθοδοι, είναι μέθοδοι πρόληψης που σκοπό έχουν τον περιορισμό του σχηματισμού των ρύπων παρεμβαίνοντας στα χαρακτηριστικά της καύσης. Τέτοιες παρεμβάσεις μπορούν να γίνουν :

1. Στην έγχυση του καυσίμου μέσα στο θάλαμο καύσης
2. Στη κίνηση του προσαγόμενου αέρα καθώς και στην ποσότητα του μέσα στο θάλαμο καύσης
3. Στη αναλογία του μίγματος (πετρέλαιο - αέρα)
4. Στην δημιουργία τεχνητής έγχυσης νερού στο θάλαμο καύσης

### ***1. Έγχυση καυσίμου***

- Προπορεία εγχύσεως

Η χρονική στιγμή που θα εγχυθεί το καύσιμο μέσα στο θάλαμο καύσης, εκτός των άλλων, παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή μονοξειδίων του αζώτου (NO). Όταν το καύσιμο ψεκάζεται νωρίτερα στο θάλαμο καύσης, τότε αναμιγνύεται καλύτερα με τον ατμοσφαιρικό αέρα που βρίσκεται μέσα, με αποτέλεσμα ο κινητήρας να αποδίδει μεγαλύτερη ισχύ. Λόγω όμως της μεγάλης πίεσης και θερμοκρασίας που δημιουργείται μέσα στο θάλαμο καύσης, αυξάνεται και η παραγωγή των μονοξειδίων του αζώτου (NO), το οποίο δεν είναι επιθυμητό. Προτιμάται όμως η αυξημένη προπορεία καθώς εκτός της αυξημένης ισχύος έχουμε και μείωση των παραγόμενων σωματιδίων λόγω της πιο τέλει καύσης. Τα μονοξείδια του αζώτου μπορούν να μειωθούν με κάποιους μηχανισμούς περιστολής.

- Πίεση έγχυσης καυσίμου.

Με την αύξηση της πίεσης εγχύσεως, διασκορπίζεται καλύτερα το καύσιμο μέσα στο θάλαμο καύσης και μειώνεται ο χρόνος ψεκασμού, με αποτέλεσμα να μειώνεται το μέγεθος των σταγονιδίων του καυσίμου, να εξατμίζονται ευκολότερα και να έχουμε πιο τέλεια καύση. Έτσι επιτυγχάνεται η μείωση της αιθάλης και της ειδική κατανάλωσης του καυσίμου. Λόγω όμως της αύξησης της πίεσης και της πιο γρήγορης καύσης, που οδηγεί σε αυξημένες θερμοκρασίες, έχουμε και την αύξηση των NO<sub>x</sub>.

### ***2. Κίνηση και ποσότητα προσαγόμενου αέρα***

Η αύξηση της συστροφής καθώς και της ποσότητας του αέρα που βρίσκεται μέσα το θάλαμο καύσης, αυξάνουν τις εκπομπές μονοξειδίων του αζώτου (NO). Μειώνουν όμως τις εκπομπές των σωματιδίων αιθάλης, αφού με τη συστροφή αναμιγνύεται καλύτερα το καύσιμο με τον αέρα και έχουμε πιο τέλεια καύσης. Από την άλλη με τη αύξηση και της ποσότητας του αέρα δημιουργείται περίσσια οξυγόνου (O<sub>2</sub>) κάτι το οποίο αυξάνει και την δημιουργία των μονοξειδίων του αζώτου.

### ***3. Αναλογία καυσίμου-αέρα***

Οι αναλογία του καυσίμου με τον αέρα παίζει σημαντικό ρόλο στις εκπομπές των ρύπων, αφού ως γνωστόν ο αέρας περιέχει οξυγόνο, πράγμα που σημαίνει ότι όσο πιο μεγάλη ποσότητα οξυγόνου υπάρχει στο μίγμα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η παραγωγή των οξειδίων του αζώτου.

#### 4. Έγχυση νερού ή γαλακτώματος νερού-καυσίμου.

Η έγχυση νερού στο θάλαμο καύσης προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα όπως θα αναφέρουμε και παρακάτω. Από μελέτες που έχουν γίνει προκύπτει ότι η εισαγωγή του νερού μέσα στο θάλαμο καύσης μπορεί να επιφέρει μείωση της θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης, μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων ( $\text{NO}_x$ , CO και των σωματιδίων αιθάλης), μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου καθώς και καλύτερη ατμοποίηση του και αύξηση της παραγόμενης ισχύς του κινητήρα. Οι σύγχρονες μέθοδοι προσαγωγής του νερού στο θάλαμο καύσης είναι :

- Δημιουργία γαλακτώματος καυσίμου-νερού

Με την τεχνική αυτή το καύσιμο, πριν την έγχυση του, αναμιγνύεται με ένα επιθυμητό ποσοστό νερού και ψεκάζεται μέσα στο θάλαμο καύσης από τους εγχυτήρες του καυσίμου. Η τεχνική αυτή θεωρείται η πιο αποδοτική μέθοδος εγχύσεως του νερού και θεωρείται κατάλληλη για χρήση σε ναυτικούς και μη κινητήρες diesel. Παράλληλα η ευκολία της εφαρμογής της ακόμα και σε κινητήρες παλαιού τύπου είναι πολύ σημαντική. Επίσης, τα επίπεδα μείωσης των οξειδίων του αζώτου, μπορούν να συγκριθούν εύκολα με τα επίπεδα μείωσης των οξειδίων του αζώτου που προσφέρει η μέθοδος της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων EGR που θα αναλύσουμε και παρακάτω.

Η χρήση γαλακτώματος καυσίμου-νερού μέσα στο θάλαμο καύσης, επιφέρει μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ), μείωση των σωματιδίων αιθάλης, καθώς και μειωμένη ή σταθερή κατανάλωση καυσίμου, χωρίς μάλιστα να μειωθεί η αποδιδόμενη ισχύς του κινητήρα. Καμία άλλη μέθοδος δεν τα επιτυγχάνει όλα αυτά μαζί καθώς συνήθως η μείωση των  $\text{NO}_x$  οδηγεί σε αύξηση των σωματιδίων και μείωση της ισχύος. Με την έγχυση γαλακτώματος καυσίμου-νερού πετυχαίνουμε σημαντική μείωση των  $\text{NO}_x$  λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας καύσης. Ακόμα, το νερό που περιέχεται στο γαλάκτωμα ατμοποιείται και συμπαρασύρει μαζί του τα σταγονίδια του καυσίμου συντελώντας στην καλύτερη ανάμιξη του καυσίμου με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Έτσι μειώνονται οι περιοχές όπου υπάρχει πλούσιο μίγμα και οι οποίες είναι υπεύθυνες για την δημιουργία των σωματιδίων αιθάλης.

Βασικό μειονέκτημα της δημιουργίας γαλακτώματος, είναι ότι δεν μπορεί να ρυθμιστεί η ποσότητα του νερού που ψεκάζετε ανάλογα με τις ανάγκες του κινητήρα σε ισχύ. Ακόμα, η προετοιμασία του γαλακτώματος απαιτεί την ύπαρξη συγκεκριμένης διάταξης, στην οποία γίνεται η γαλακτοποίηση, αλλά και κάποιο χρονικό διάστημα για την προετοιμασία του. Ένα τελευταίο μειονέκτημα της έγχυσης γαλακτώματος είναι ότι αυξάνεται ο χρόνος έγχυσης, καθώς αυξάνεται η ποσότητα του εγχεόμενου μέσου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε πλήρες φορτίο, την θερμική καταπόνηση των βαλβίδων αφού κατά την φάση της εκτόνωσης πραγματοποιείται ακόμα η καύση.



- Εισαγωγή του νερού μαζί με τον ατμοσφαιρικό αέρα

Με τη τεχνική αυτή αναμιγνύεται το νερό με τον ατμοσφαιρικό αέρα, με σκοπό να δημιουργηθεί ένα ομοιογενές μίγμα νερού-αέρα το οποίο θα εισαχθεί μέσα στον θάλαμο καύσης. Με την συγκεκριμένη μέθοδο επιτυγχάνεται επίσης η μείωση των NO<sub>x</sub> καθώς έχουμε μείωση της θερμοκρασίας καύσης. Η εισαγωγή του νερού μέσα στο θάλαμο καύσης, μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα, μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους :

- i. Με ψεκασμό του νερού στο ρεύμα εισαγωγής του αέρα, για κάθε κύλινδρο ξεχωριστά, ακριβώς πριν τις βαλβίδες εισαγωγής.
- ii. Με προσαγωγή του νερού από ένα κεντρικό εγχυτήρα πριν τον υπερπληρωτή.
- iii. Με προσαγωγή του νερού από ένα κεντρικό εγχυτήρα μετά τον υπερπληρωτή και πριν την πολλαπλή εισαγωγή.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι αυτή η μέθοδος δίνει την δυνατότητα ηλεκτρονικής ρύθμισης της ποσότητας του νερού που θα αναμειχθεί με τον αέρα το οποίο θα εισαχθεί στην συνέχεια στον θάλαμο καύσης. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι ακόμα πιο εύκολη στους παλαιούς κινητήρες diesel καθώς απαιτείται μόνο η εγκατάσταση του εγχυτήρα νερού μαζί με την διάταξη που τον υποστηρίζει.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η αυξημένη δημιουργία σωματιδίων αιθάλης καθώς το νερό το οποίο είναι αναμεμιγμένο με τον αέρα εμποδίζει το καύσιμο να αναμειχθεί με την σειρά του με τον αέρα και εν τέλει έχουμε την δημιουργία περισσότερων περιοχών με μεγάλη συγκέντρωση καυσίμου οι οποίες ευθύνονται για την παραγωγή της αιθάλης. Ακόμα, για την επίτευξη παρόμοιας μείωσης εκπομπών NO<sub>x</sub> με αυτή της τεχνικής δημιουργίας γαλακτώματος, θα πρέπει να εισαχθεί νερό διπλάσιας ποσότητας. Τέλος, ενώ όλες οι τεχνικές δημιουργούν προβλήματα οξείδωσης στα εξαρτήματα λόγω του νερού, η συγκεκριμένη μέθοδος δημιουργεί τα περισσότερα καθώς έρχεται σε επαφή με περισσότερα εξαρτήματα.

- Εισαγωγή νερού απ' ευθείας μέσα στο θάλαμο καύσης

Στην συγκεκριμένη μέθοδο το νερό ψεκάζεται από ξεχωριστούς εγχυτήρες σε κάθε κύλινδρο και όχι από τους εγχυτήρες που ψεκάζεται το καύσιμο. Οι εγχυτήρες αυτοί, ενεργοποιούνται ηλεκτρομαγνητικά όπως γίνεται και στο σύστημα ψεκασμού καυσίμου (Common rail) αλλά λειτουργούν με ξεχωριστή μονάδα ελέγχου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι έχουμε ακριβή έλεγχο της ποσότητας του εγχυόμενου νερού ανάλογα και με το φορτίο. Και στην συγκεκριμένη όμως μέθοδο απαιτείται περισσότερο νερό για την ίδια μείωση των οξειδίων του αζώτου συγκρινόμενη με την πρώτη μέθοδο. Ακόμα, όταν γίνεται η έγχυση του νερού μέσα στο θάλαμο καύσης, θα πρέπει να επικρατούν συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας και πίεσης, έτσι ώστε να γίνεται αμέσως η ατμοποίηση του για να μην έρθει το νερό σε επαφή με το λιπαντικό του κινητήρα και καταστραφούν οι ιδιότητες του λιπαντικού.

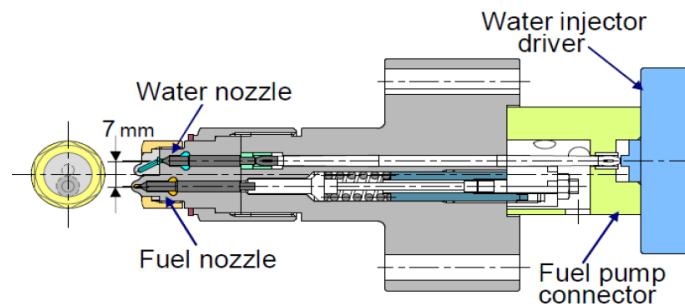
Η τεχνική δημιουργίας γαλακτώματος καυσίμου-νερού καθώς και η τεχνική του ψεκασμού νερού μέσα στο θάλαμο καύσης, είναι οι πιο αποτελεσματικοί μέθοδοι προσαγωγής νερού μέσα στο θάλαμο καύσης. Τα πλεονεκτήματα της μιας όμως είναι μειονεκτήματα της άλλης και για αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν και άλλες τεχνικές, οι οποίες βασίζονται σε αυτές τις δυο. Τέτοιες είναι η στρωματοποιημένη έγχυση καυσίμου-νερού και η ταυτόχρονη έγχυση νερού-καυσίμου με την ακαριαία ανάμιξή τους.

### 1. *Στρωματοποιημένη έγχυση καυσίμου – νερού.*

Στη συγκεκριμένη τεχνική το νερό και το καύσιμο εγχέονται από τον ίδιο εγχυτήρα. Πιο συγκεκριμένα, εισάγεται στην αρχή μια μικρή ποσότητα καυσίμου, στη συνέχεια εισάγεται η ποσότητα νερού και τέλος ακολουθεί η έγχυση της κύριας ποσότητας του καυσίμου. Λόγω της στρωματοποιημένης έγχυσης του καυσίμου και του νερού επιτυγχάνεται πολύ καλή αναμειξιμότητα αλλά και πολύ καλός έλεγχος της ποσότητας του νερού που εγχέεται στον θάλαμο καύσης. Ακόμα, με τη τεχνική αυτή παρατηρήθηκε μείωση στις εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων και μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Ένα σοβαρό μειονέκτημα που παρουσιάζει η τεχνική αυτή είναι ότι με την στρωματοποιημένη έγχυση του μίγματος, αυξάνεται η χρονική διάρκεια εγχύσεως με αποτέλεσμα την καθυστέρηση έναυσης και καθυστέρηση πέρατος και εν τέλει την μεγάλη θερμική καταπόνηση των εξαρτημάτων του κινητήρα.

### 2. *Ταυτόχρονη έγχυση νερού - καυσίμου και ακαριαία ανάμιξή τους*

Στη τεχνική αυτή, η έγχυση του νερού – καυσίμου γίνεται μέσα στο θάλαμο καύσης τη ίδια χρονική στιγμή και στο ίδιο σημείο χρησιμοποιώντας τον ίδιο εγχυτήρα, αλλά με διαφορετικά όμως ακροφύσια. Αυτή η τεχνική εμφανίζει όλα τα πλεονεκτήματα της προηγούμενης και εξαλείφει και το μεγάλο της μειονέκτημα καθώς δεν απαιτείται επιπλέον χρόνος για την έγχυση του νερού.



Εικόνα 1.11: Εγχυτήρας με ξεχωριστό ακροφύσιο για το νερό και ξεχωριστό για το πετρέλαιο.

Η τεχνική αυτή θεωρείται η πιο αποτελεσματική από όλες τις τεχνικές που αναφέρθηκαν πιο πάνω για τη μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου. Το μεγάλο της μειονέκτημα όμως είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κινητήρες οι οποίοι είναι ήδη σε λειτουργία λόγω της περίπλοκης διάταξης. Τέλος, η ποσότητα νερού που απαιτείται για αντίστοιχη μείωση των NO<sub>x</sub> σε σχέση με την μέθοδο του γαλακτώματος είναι περισσότερη.

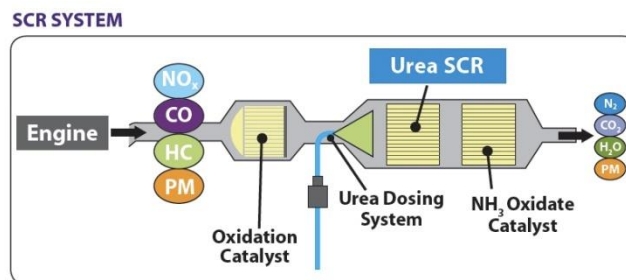
## 1.5.2 Δευτερογενείς μέθοδοι μείωσης των βλαβερών αερίων στους κινητήρες Diesel

Οι δευτερογενείς μέθοδοι αποσκοπούν στην παγίδευση ή στην μετατροπή των βλαβερών ουσιών των καυσαερίων σε ουσίες φιλικότερες προς το περιβάλλον. Το κόστος καθώς και ο όγκος αυτών των εφαρμογών είναι μεγάλο και για αυτό τον λόγο προτιμούνται οι πρωτογενείς μέθοδοι αλλά σε περιπτώσεις που δεν επαρκούν για τον περιορισμό των ρύπων έχουμε την εφαρμογή και των ακόλουθων δευτερογενών μεθόδων:

### 1. Σύστημα εκλεκτικής καταλυτικής αναγωγής SCR

Μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους περιστολής των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) είναι η μέθοδος της Εκλεκτικής Καταλυτικής Αναγωγής-SCR καθώς είναι οικονομική και αποτελεσματική (περισσότερο από 80% περιστολή των  $\text{NO}_x$ ) και λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες (180–450 °C). Η αναγωγή των  $\text{NO}_x$  πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο με αμμωνία καθώς είναι εκλεκτικό αναγωγικό μέσο, σε αντίθεση με το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το υδρογόνο ( $\text{H}_2$ ), το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και τους υδρογονάνθρακες (HC) που δεν είναι και αντιδρούν με το οξυγόνο που είναι παρόν στα καυσαέρια. Τα συστήματα SCR, τα οποία κάνουν χρήση ειδικού καταλυτικού μετατροπέα, έχουν στόχο να μειώσουν τα  $\text{NO}_x$  που έχουν παραχθεί και όχι να περιορίσουν τον σχηματισμό τους όπως γίνεται με το σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων-EGR που στόχο έχει την ελάττωση του σχηματισμού των  $\text{NO}_x$  εντός του κυλίνδρου. Στην εκλεκτική καταλυτική αναγωγή, πριν την είσοδο των καυσαερίων του πετρελαιοκινητήρα στον καταλύτη SCR, εγχύεται ουρία με αποτέλεσμα να αντιδρά με το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου ( $\text{NO}$  και  $\text{NO}_2$ ) οπότε και παράγεται αβλαβές άζωτο ( $\text{N}_2$ ) και υδρατμός ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

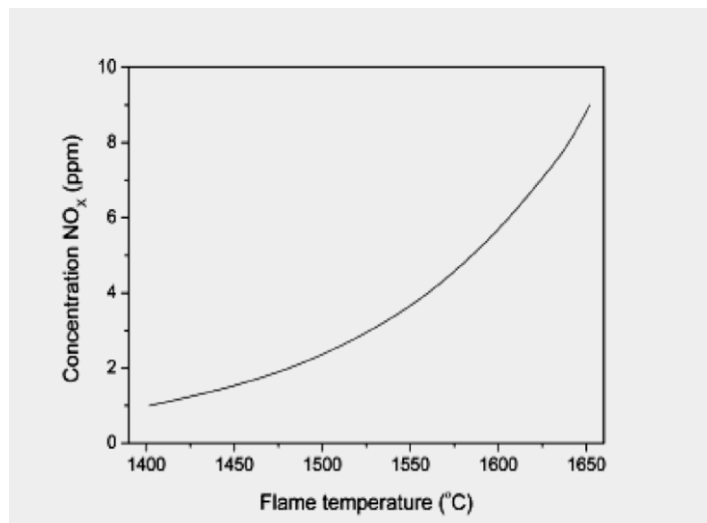
Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι, το μεγάλο ποσοστό αποτελεσματικότητας, η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου και σε καυσαέρια που περιέχουν σωματίδια, το ότι οι συνήθεις χρησιμοποιούμενοι καταλύτες, τύπου βαναδίου/τιτανίου, δεν απενεργοποιούνται από το  $\text{SO}_2$  και  $\text{H}_2\text{O}$  (που συνήθως περιέχονται στο καύσιμο) καθώς και η ευκολία συντήρησης του συστήματος. Επίσης, μπορεί να επιτευχθεί μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου μέχρι και 5%. Ωστόσο, μεγάλα μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης, το υψηλό κόστος της αμμωνίας και των καταλυτών, καθώς και η τοξικότητα της αμμωνίας που διαφεύγει στο περιβάλλον. Τελευταία έχει αναπτυχθεί το διάλυμα ουρίας-νερού, γνωστό ως AdBlue, το οποίο δεν είναι τοξικό όπως η αμμωνία.



Εικόνα 1.12: Επιλεκτικός καταλυτικός μετατροπέας με χρήση ουρίας

## 2. Ανακυκλοφορία των καυσαερίων (*Exhaust gas recirculation, EGR*)

Η ανακυκλοφορία των καυσαερίων πραγματοποιείται με σκοπό τη μείωση των οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) στα καυσαέρια τα οποία δημιουργούνται λόγω των υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών που επικρατούν μέσα στο θάλαμο καύσης. Με την παρακράτηση μιας μικρής ποσότητας καυσαερίων μέσα στο θάλαμο καύσης (εσωτερική μέθοδος EGR) ή με την ανακυκλοφορία μιας μικρής ποσότητας καυσαερίων από την πολλαπλή εξαγωγής του κινητήρα, στην πολλαπλή εισαγωγής του (εξωτερική μέθοδος EGR) επιτυγχάνουμε μείωση της θερμοκρασίας. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε και την αντίστοιχη μείωση των  $\text{NO}_x$  καθώς το μίγμα μας πλέον έχει μικρότερη θερμοκρασία και μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα.



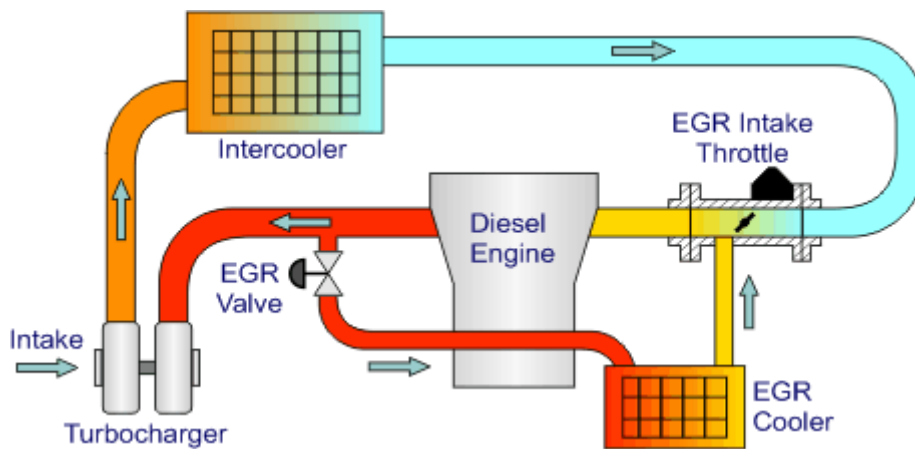
Εικόνα 1.13: Εξάρτηση Εκπεμπόμενων  $\text{NO}_x$  με την θερμοκρασία καύσης

Με την εσωτερική μέθοδο EGR δεν πραγματοποιείται ουσιαστικά ανακυκλοφορία των καυσαερίων αλλά παρακράτηση μιας ποσότητας αυτών μέσα στο θάλαμο καύσης. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται μεταβλητός χρονισμός βαλβίδων, ο οποίος βοηθάει στην ανάμιξη φρέσκου αέρα με τα καυσαέρια. Με αυτή την μέθοδο όμως δεν επιτυγχάνεται η ψύξη των καυσαερίων, όπως επιτυγχάνεται στην εξωτερική μέθοδο EGR, οδηγώντας έτσι σε αύξηση θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιείται η καύση.

Με την εξωτερική μέθοδο EGR επιτυγχάνουμε ανακυκλοφορία των καυσαερίων, η οποία μπορεί να πραγματοποιείται είτε σε υψηλή είτε σε χαμηλή πίεση. Όταν ο σωλήνας που ανακυκλοφορεί τα καυσαέρια συνδέεται μετά την πολλαπλή εξαγωγής του κινητήρα πριν από τον στρόβιλο και καταλήγει στην εισαγωγή μετά τον συμπιεστή πραγματοποιείται ανακυκλοφορία των καυσαερίων σε υψηλή πίεση. Στο σύστημα χαμηλής πίεσης, τα καυσαέρια συλλέγονται μετά το στρόβιλο και καταλήγουν στην εισαγωγή του αέρα πριν το συμπιεστή. Και στις δύο περιπτώσεις, για να μειωθεί περισσότερο η θερμοκρασία μέσα στο θάλαμο καύσης, πριν τα καυσαέρια εισχωρήσουν στη πολλαπλή εισαγωγής περνάνε από έναν εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος ψύχει τα

καυσαέρια. Έτσι εκτός από τη μείωση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται και εισαγωγή μεγαλύτερης ποσότητας καυσαερίου.

Η ποσότητα των καυσαερίων η οποία θα εισαχθεί στην πολλαπλή εισαγωγής από την πολλαπλή εξαγωγής του κινητήρα, ελέγχεται από την βαλβίδα ανακυκλοφορίας καυσαερίων (βαλβίδα EGR), η οποία είναι τοποθετημένη στο σωλήνα που συνδέει την πολλαπλή εξαγωγής με την πολλαπλή εισαγωγής. Βέβαια, η ποσότητα αυτή των αδρανών καυσαερίων αντικαθιστά στους κινητήρες Diesel μέρος του αναρροφώμενου αέρα με αποτέλεσμα το μείγμα να καθίσταται πιο πλούσιο και να οδηγούμαστε σε αύξηση της παραγωγής αιθάλης. Το αδρανές αυτό καυσαέριο όμως απορροφά μέρος της θερμότητας της καύσης και αυξάνει την θερμοχωρητικότητα όλου του μείγματος. Με συνέπεια την μείωση της θερμοκρασίας στον θάλαμο καύσης και εν τέλει την μείωση των παραγόμενων οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ).



Εικόνα 1.14: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας συστήματος EGR

Με την ανακυκλοφορία των καυσαερίων, εκτός από την αύξηση της αιθάλης στα καυσαέρια, μειώνεται και η συγκέντρωση ισχύος του κινητήρα. Για αυτόν τον λόγο η λειτουργία του συστήματος διακόπτεται ή περιορίζεται από την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου του κινητήρα στις παρακάτω καταστάσεις λειτουργίας:

- Στο πλήρες φορτίο ή την απότομη επιτάχυνση
- Στην λειτουργία ψυχρής εκκίνησης
- Σε λειτουργία του κινητήρα σε μεγάλο υψόμετρο, όπου υπάρχει έλλειψη οξυγόνου
- Σε πολύ υψηλή θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής για αποφυγή υπερθέρμανσης των ακροφυσίων
- Στο ρελαντί (προκαλεί ασταθές ρελαντί)

Τέλος, στα σύγχρονα συστήματα η εφαρμογή της ανακυκλοφορίας καυσαερίων παρουσιάζει και τα εξής προτερήματα:

- Μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά τη λειτουργία του κινητήρα σε μεσαία και χαμηλά φορτία.
- Αύξηση της γωνίας της προπορείας έναυσης, όσο διαρκεί η λειτουργία του EGR. Το μείγμα είναι λιγότερο ευαίσθητο σε κρουστική καύση, άρα μπορεί να αυξηθεί η προπορεία έναυσης για καλύτερη απόδοση του κινητήρα.

### 3. Παγίδες Αιθάλης

Τα φίλτρα σωματιδίων πετρελαίου (Diesel Particulate Filters, DPF) ή παγίδες αιθάλης (soot traps) τοποθετούνται στη σωλήνωση εξαγωγής των καυσαερίων και συγκρατούν τα σωματίδια της αιθάλης και στη συνέχεια τα οξειδώνουν.



*Εικόνα 1.15: Παγίδα αιθάλης*

Οι παγίδες αιθάλης είναι συσκευές που συλλέγουν τα σωματίδια των καυσαερίων με φυσικό τρόπο, εμποδίζοντας την απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα. Τα σύγχρονα φίλτρα έχουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης (πάνω από 90%) και καλή μηχανική και θερμική αντοχή. Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το μέγεθος των όδων του φίλτρου, το βάθος διήθησης, την ταχύτητα καυσαερίου και τη διάμετρο των σωματιδίων.

Κατά την σταδιακή συσσώρευση της αιθάλης στο φίλτρο καταλήγουμε στην δημιουργία σωματιδιακής στρώσης η οποία αποτελεί μια επιπλέον αντίσταση στην ροή των καυσαερίων. Αυτή η αντίσταση οδηγεί σε πτώση πίεσης στην εξαγωγή και επηρεάζει αρνητικά τη λειτουργία του κινητήρα και λόγω των μεγαλύτερων απωλειών αυξάνεται η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές ρύπων.

Η αυξημένη συγκέντρωση των σωματιδίων αιθάλης μέσα στα φίλτρα αντιμετωπίζεται με την οξείδωση των σωματιδίων (αναγέννηση) που στόχο έχει την κατάκαυση των παγιδευμένων σωματιδίων που βρίσκονται μέσα στα φίλτρα. Για την καύση όμως αυτών το σωματιδίων απαιτείται θερμοκρασία της τάξης 500-600°C, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από την θερμοκρασία των εξερχόμενων καυσαερίων. Άρα, για την επίτευξη αυτής της θερμοκρασίας πραγματοποιείται είτε

εξωτερική θέρμανση καυσαερίων (θετική αναγέννηση), είτε ανάφλεξη σε αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας κατάλληλο καταλυτικό υλικό (καταλυτική αναγέννηση).

Στην θετική αναγέννηση ψεκάζεται καύσιμο στα εξερχόμενα από το κινητήρα καυσαέρια, ώστε να τους αυξήσει τη θερμοκρασία τους και να καούν τα σωματίδια αιθάλης που είναι παγιδευμένα στο φίλτρο αιθάλης. Στη καταλυτική αναγέννηση, το καταλυτικό υλικό που χρησιμοποιείται, μπορεί είτε να εμποτιστεί πάνω στην κεραμική επιφάνεια του φίλτρου της αιθάλης, είτε να προστεθεί μέσα στο δοχείο καυσίμου, προκαλώντας μείωση της θερμοκρασίας που θα καούν τα σωματίδια της αιθάλης από 500°C στους 300°C.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ & ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

#### 2.1 Εισαγωγή στα αέρια καύσιμα

Τα αέρια καύσιμα, τα οποία πρώτη φορά άρχισαν να χρησιμοποιούνται στην αρχαία Κίνα, είναι μια πολύ σημαντική πηγή ενέργειας την παρούσα περίοδο. Παρόλο που η πράσινη ανάπτυξη και η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει εξελιχθεί πάρα πολύ και εμφανίζει τεράστιους ρυθμούς ανάπτυξης, τα αέρια καύσιμα και ειδικά τα φυσικό αέριο έχουν πολλά να προσφέρουν στην παραγωγή ενέργειας, είτε ηλεκτρική, είτε θερμική είτε μηχανική. Ο λόγος της σημαντικότητας των αερίων καυσίμων είναι το ότι αποτελούν ένα καθαρότερο καύσιμο σε σχέση με τα υγρά και στερεά ορυκτά καύσιμα που έχουν επικρατήσει εδώ και δεκαετίες. Ακόμη, το ότι αποτελούν οικονομικότερη λύση σε σχέση με τα υγρά καύσιμα καθώς και δυνατότητα χρήσης τους σε μεγάλο εύρος εφαρμογών είναι καθοριστικοί παράγοντες για την επικράτησή τους.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, η εκμετάλλευση των αερίων καυσίμων γίνεται όλο και αποτελεσματικότερη. Τα αέρια καύσιμα μπορούν να εξυπηρετήσουν από οικιακές μέχρι και βαριά βιομηχανικές ανάγκες. Ξεκίνησαν σαν αέρια καύσιμα για την παραγωγή φωτός, έτσι προκύπτει και ο όρος φωταέριο και έχουν εξελιχθεί σήμερα σε καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε οικιακές εφαρμογές, στην αυτοκίνηση, την ναυτιλία αλλά και μέχρι τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 2.2 Κατηγοριοποίηση αερίων καυσίμων

Τα αέρια καύσιμα είναι μείγματα στοιχειωδών αερίων καυσίμων όπως το υδρογόνο, κορεσμένοι υδρογονάνθρακες (μεθάνιο, προπάνιο βουτάνιο κ.α.) ακόρεστοι υδρογονάνθρακες (αιθυλένιο, προπυλένιο κ.α.) και μικροποσότητες αδρανών αερίων όπως το άζωτο, το διοξείδιο του άνθρακα κ.α. Οι κυριότερες κατηγορίες αερίων καυσίμων που απαντώνται στην πράξη είναι:

- **Φυσικό Αέριο:** Το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα αερίων υδρογονανθράκων, με το μεθάνιο να καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό και με κυμαινόμενες ποσότητες άλλων αερίων τα οποία συνήθως είναι οι ακαθαρσίες του. Βρίσκεται συνήθως συνδυασμένο με υγρούς υδρογονάνθρακες, ουσιαστικά κοντά στα κοιτάσματα αργού πετρελαίου. Είναι ένα άχρωμο, άγευστο και άοσμο αέριο το οποίο εισπνεόμενο προκαλεί βλάβες στην υγεία του ανθρώπου. Σε θερμοκρασία πάνω από  $-161,5^{\circ}\text{C}$  βρίσκεται σε αέρια κατάσταση και μπορεί να αναφλεγεί



στον ατμοσφαιρικό αέρα. Τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του φυσικού αερίου θα παρουσιαστούν πιο αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

- **Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο:** Πρόκειται ουσιαστικά για το φυσικό αέριο το οποίο βρίσκεται στην υγρή φάση. Διεθνώς γνωστό ως L.N.G. (Liquefied Natural Gas) δεν υπάρχει πουθενά ως κοιτάσμα αλλά παράγεται σε ειδικές κρυογονικές εγκαταστάσεις, στις οποίες το φυσικό αέριο μετά από συμπίεση σε πιέσεις μεγαλύτερες από 46,2 bar και ψύξη σε θερμοκρασίες μικρότερες από  $-82,5^{\circ}\text{C}$  μετατρέπεται σε υγρό. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο διευκολύνει την μεταφορά μεγάλης ποσότητας φυσικού αερίου σε μεγάλες αποστάσεις, καθώς 1 κυβικό μέτρο υγροποιημένου φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε 600 κυβικά μέτρα φυσικού αερίου.
- **Συμπιεσμένο Φυσικό Αέριο:** Το συμπιεσμένο φυσικό αέριο προκύπτει κατόπιν συμπίεσης του σε πιέσεις μεγαλύτερες από 200bar και η αποθήκευση του γίνεται σε φιάλες ή δεξαμενές ικανές να αντέξουν τις τόσο μεγάλες πιέσεις. Το συμπιεσμένο φυσικό αέριο βρίσκει εφαρμογή στις χερσαίες μετακινήσεις και τα τελευταία χρόνια εξετάζεται και η εφαρμογή σε ναυτικούς κινητήρες, κάτι το οποίο θα εξετάσουμε στην συνέχεια της παρούσας εργασίας.
- **Υγραέρια:** Γενικά με τον όρο υγραέρια χαρακτηρίζουμε το υγροποιημένο προπάνιο ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) καθώς και το εμπορικό μείγμα υγροποιημένου προπανίου και βουτανίου ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). Διεθνώς τα υγραέρια είναι γνωστά ως L.P.G.(Liquid Petroleum Gas) για τον λόγο ότι παράγονται σε ορισμένες φάσεις της δύλισης του αργού πετρελαίου κατά την διεργασία της πυρόλυσης για την παραγωγή της βενζίνης. Σε αέρια κατάσταση είναι άχρωμα και άγευστα αλλά εύφλεκτα. Υγροποιημένα διατηρούνται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα σε φιάλες ή σε δοχεία υπό πίεση. Τα υγραέρια έχουν υψηλότερη θερμογόνο δύναμη αλλά είναι λιγότερο ασφαλή από το φυσικό αέριο καθώς είναι βαρύτερα από τον αέρα και σε περίπτωση διαρροής τους καταλήγουν στο έδαφος με υψηλό κίνδυνο εγκλωβισμού τους σε υπόγειους χώρους
- **Βιομηχανικά Αέρια:** Τα βιομηχανικά αέρια όπως αναφέρουν και το όνομα τους πρωτοεμφανίστηκαν κατά την βιομηχανική περίοδο και ουσιαστικά ήταν το παραγόμενο αέριο προϊόν της ξηράς απόσταξης του λιθάνθρακα. Είναι αρκετά τοξικά λόγω κυρίως του μονοξειδίου του άνθρακα που περιέχουν. Στην γενική τους μορφή περιέχουν μεθάνιο, υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και άλλους υδρογονάνθρακες. Πλέον τα βιομηχανικά αέρια χρησιμοποιούνται όλο και πιο σπάνια.
- **Βιοαέρια:** Είναι εύφλεκτα αέρια τα οποία παράγονται ως παραπροϊόν αποσύνθεσης σε εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού, σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και γενικά όπου λαμβάνουν χώρα διεργασίες φυτικών ουσιών και οργανικών προϊόντων. Αναφέρονται συχνά και ως αέρια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς προκύπτουν από

ζυμώσεις φυτικών και οργανικών ουσιών. Η ποιότητα τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εκάστοτε επεξεργαζόμενο προϊόν και από αυτό εξαρτάται και η περιεκτικότητα του σε υδρατμούς, υδρόθειο ( $H_2S$ ) και άλλες μικρές ποσότητες επιβλαβών αερίων. Το βιοαέριο παράγεται λόγω της ζύμωσης της βιομάζας με αναερόβιες διεργασίες όπου βασικό ρόλο έχουν τα βακτήρια τα οποία μετατρέπουν τις πρωτεΐνες, τα λίπη και τους πολυσακχαρίτες σε υδρατμούς, διοξείδιο του άνθρακα και κατά τα δύο τρίτα του αερίου μείγματος σε μεθάνιο. Ουσιαστικά το μεθάνιο είναι το κύριο συστατικό του βιοαερίου και ανάλογα με την περιεκτικότητα του σε αυτό εξαρτάται και η δυνατότητα ανάμειξης του με το φυσικό αέριο.

- Υδρογόνο: Το υδρογόνο αν και είναι γνωστό καύσιμο από την εποχή του βιομηχανικού αερίου μέχρι και την περίοδο που διανύουμε δεν έχει αναπτυχθεί σαν κύριο καύσιμο σε κάποιον τομέα. Τα τελευταία χρόνια όμως γίνονται αρκετές προσπάθειες ειδικά από τον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας έτσι ώστε το υδρογόνο να λάβει μερίδιο σαν πηγή ενέργειας στις οδικές μετακινήσεις. Βέβαια, θεωρείται από την τεχνολογική και επιστημονική κοινότητα ως το καύσιμου του 21<sup>ου</sup> αιώνα, αλλά μάλλον αυτό θα συμβεί μόνο όταν προκύψει ζήτημα αντικατάστασης του φυσικού αερίου. Το υδρογόνο  $H_2$  προσφέρει σχεδόν μηδενική παραγωγή ρύπων και έχει σχεδόν τετραπλάσια θερμογόνο δύναμη σε σχέση με το φυσικό αέριο. Από την αλλαγή το υδρογόνο είναι πολύ εύφλεκτο αυξάνοντας έτσι τις πιθανότητες κάποιου ατυχήματος και είναι και πολύ ελαφρύ (οκτώ φορές ελαφρύτερο από το φυσικό αέριο) καθιστώντας το δύσκολο στην αποθήκευση και στην διακίνηση του.

Ένας ακόμα τρόπος κατηγοριοποίησης ή μάλλον ομαδοποίησης θα λέγαμε των αερίων καυσίμων είναι σύμφωνα με τον δείκτη Wobbe

Καταρχήν, τα αέρια καύσιμα είναι κατά κανόνα αέρια μίγματα υδρογονανθράκων και διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την σύνθεση τους. Επειδή όμως η σύνθεση του κάθε αερίου διαφέρει, ακόμα και τα φυσικά αέρια έχουν διαφορετική σύνθεση ανάλογα με την προέλευση τους, είναι δύσκολη η τυποποιημένη ταξινόμηση τους. Οπότε μέσω του δείκτη Wobbe επιτυγχάνουμε την ομαδοποίηση τους με διάφορα όρια τιμών για τον δείκτη αυτόν.

Ο δείκτης Wobbe υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση και έχει ιδιαίτερη σημασία για την εναλλαξιμότητα των διαφόρων τύπων αερίων στις συσκευές καύσης και ειδικά στους καυστήρες και είναι ένα μέτρο της ροής ενέργειας που εκρέει από το ακροφύσιο του καυστήρα.

$$W = \frac{H}{\sqrt{d}} \left( J/m^3 \right) \text{ όπου } H: \text{θερμογόνος δύναμη του αερίου και } d: \text{σχετική πυκνότητα του αερίου}$$

Η θερμογόνος δύναμη χαρακτηρίζει τη χημικά περιεχόμενη ενέργεια στο καύσιμο. Διακρίνεται σε ανώτερη και κατώτερη θερμογόνο δύναμη, ΑΘΔ και ΚΘΔ. Σύμφωνα με αυτό τον διαχωρισμό προκύπτει και ο ανώτερος δείκτης Wobbe και ο κατώτερος δείκτης Wobbe.

Η ΑΘΔ είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας καυσίμου που απελευθερώνεται κατά την πλήρη καύση του, όταν η θερμοκρασία των καυσαερίων που παράγονται φθάνει στους 25°C και οι παραγόμενοι υδρατμοί υγροποιηθούν, απελευθερώνοντας έτσι την ενέργεια συμπύκνωσης τους. Αντίστοιχα, η ΚΘΔ είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν τα καυσαέρια φθάνουν στους 25°C όμως οι υδρατμοί δεν υγροποιούνται και κατά συνέπεια η ενέργεια συμπύκνωσης παραμένει δεσμευμένοι στους υδρατμούς. Συνήθως ισχύει ότι  $KΘΔ \approx 0,9ΑΘΔ$ .

Από το 2008 συμφωνήθηκε να γίνει η ομαδοποίηση των αερίων καυσίμων και ο διαχωρισμός τους σε τρεις ομάδες οι οποίες είναι η ακόλουθες:

- Πρώτη οικογένεια αερίων: Συνθετικά και παραγόμενα αέρια καύσιμα

Σε αυτή την ομάδα ανήκει ουσιαστικά το αέριο πόλης που παράγεται τεχνητά από νάφθα άνθρακα και παρόμοια προϊόντα και έχει τιμές δείκτη Wobbe 23-33 MJ/m<sup>3</sup>

- Δεύτερη οικογένεια αερίων: Φυσικά αέρια

Σε αυτήν υπάγονται όλα τα φυσικά αέρια. Λόγω της εξάρτησης του φυσικού αερίου από το προερχόμενο κοιτάσμα έχουμε την υποδιαίρεση του στις ομάδες L και H. Στην ομάδα L ανήκουν τα φυσικά αέρια που προέρχονται από κοιτάσματα πετρελαίου και αντλείται σαν μείγμα με το πετρέλαιο και είναι φτωχότερο σε θερμογόνο δύναμη. Πλουσιότερα σε θερμογόνο δύναμη είναι τα φυσικά αέρια της ομάδας H καθώς προέρχονται από κλειστά κοιτάσματα αερίου. Οι τιμές του δείκτη Wobbe κυμαίνονται από 37,8 έως 46,8 MJ/m<sup>3</sup> για την ομάδα L και από 46,1 έως 56,5 MJ/m<sup>3</sup> για την ομάδα H.

Μεγέθη		Ομάδα L	Ομάδα H
Δείκτης Wobbe	$W_0, \text{ MJ/Nm}^3$	37,8 – 46,8	46,1 – 56,5
Ανώτερη Θερμογόνο Δύναμη	$H_0, \text{ MJ/Nm}^3$	30,2 – 47,2	
Επιτρεπόμενη Τοπική Απόκλιση $W_0$	$\text{MJ/Nm}^3$	+0,6 / -1,2	+0,7 / -1,4
Σχετική Πυκνότητα	d	0,55 – 0,70	
Πίεση Σύνδεσης	P, mbar	18 -24 , ονομαστική 20	

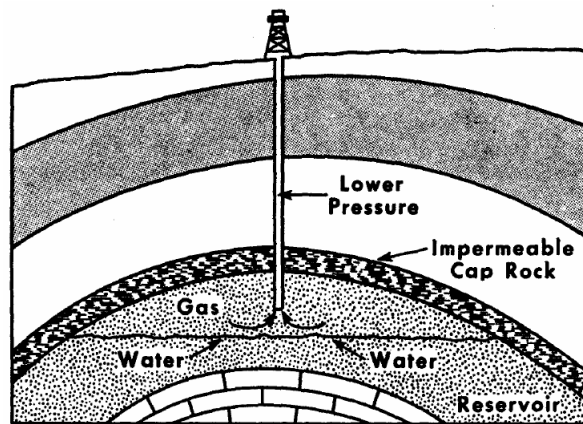
Πίνακας 2.1: Θερμοδυναμικές ιδιότητες της δεύτερης οικογένειας αερίων

- Τρίτη οικογένεια αερίων: Υγραέρια

Ο δείκτης Wobbe για την τρίτη οικογένεια κυμαίνεται από 72,9 έως 87,3 MJ/m<sup>3</sup>. Σε αυτήν ανήκουν όλα τα υγραέρια, υγροποιημένο προπάνιο, υγροποιημένο βουτάνιο είτε καθαρά είτε σε μίγματα.

## 2.3 Βασικά στοιχεία του φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο δημιουργήθηκε από τεράστιες ποσότητες οργανικής ύλης που εγκλωβίστηκαν μέσα στην γη, συμβάλλοντας στον σχηματισμό πετρωμάτων. Με το πέρασμα των χρόνων, οι υψηλές θερμοκρασίες και οι πιέσεις που αναπτύχθηκαν από τις καθιζήσεις μαζών γης, πυροδότησαν μια σειρά χημικών διεργασιών που είχαν ως αποτέλεσμα τη μετατροπή της οργανικής ύλης σε υδρογονάνθρακες, οι οποίοι, αναρροφούμενοι από πορώδη πετρώματα, δημιούργησαν τα κοιτάσματα. Με μια διαδικασία που διήρκεσε εκατομμύρια έτη, το αέριο τμήμα αυτών των υδρογονανθράκων, διαχωριζόμενο από το βαρύτερο υγρό τμήμα (αργό πετρέλαιο), ανερχόταν προς την επιφάνεια της γης. Κατά την ανοδική του πορεία, το αέριο αυτό τμήμα παγιδεύτηκε μέσα σε ειδικές δομές του υπεδάφους, σχηματίζοντας έτσι τις κοιλότητες φυσικού αερίου.



Εικόνα 2.1: Φυσικό Αέριο εγκλωβισμένο κάτω από μη διαπερατό ιζηματογενές πέτρωμα

Το φυσικό αέριο παίζει καθοριστικό ρόλο στην παγκόσμια προσφορά ενέργειας. Είναι μια από τις πιο καθαρές, ασφαλείς και χρήσιμες ενεργειακές πηγές. Σε αντίθεση με άλλα ορυκτά καύσιμα το φυσικό αέριο καίγεται καθαρά παράγοντας κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς και μικρά ποσά οξειδίων του αζώτου.

Ξεκινώντας όμως με μια μικρή ιστορική αναδρομή, πριν κατανοηθεί τι ακριβώς ήταν το φυσικό αέριο, το κάλυπτε ένα μυστήριο. Κάποιες φορές, αστραπές και κεραυνοί μπορούσαν να αναφλέξουν το φυσικό αέριο που διέφευγε κάτω από τον εξωτερικό φλοιό της γης με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια φωτιά που ανάβλυζε από την γη, καίγοντας το φυσικό αέριο που έβγαινε από το υπέδαφος. Οι αρχαίοι Έλληνες πίστευαν ότι επρόκειτο για θεϊκή παρέμβαση. Το 500 π.Χ. όμως οι Κινέζοι ανακάλυψαν την δυνατότητα εκμετάλλευσης των φλογών αυτών. Αφού έβρισκαν σημεία στο έδαφος όπου διέφευγε αέριο, κατασκεύαζαν πρόχειρους αγωγούς με καλάμια μπαμπού για να μεταφέρουν το αέριο, όπου το χρησιμοποιούσαν για το βρασμό και την αφάλατωση του θαλασσινού νερού και την μετατροπή του σε πόσιμο.

Η σύγχρονη ιστορία των αερίων καυσίμων αρχίζει με την παραγωγή καύσιμου αερίου με ξηρή απόσταξη από στερεά καύσιμα, που χρησίμευσε για τον φωτισμό με αποτέλεσμα να ονομαστεί "φωταέριο". Η Βρετανία ήταν η πρώτη χώρα που εμπορευματοποίησε την χρήση του φωταερίου.

Μεγάλη συμβολή στην ανάπτυξη του φωταερίου είχε ο Samuel Clegg που εφηύρε όλα τα βοηθητικά μηχανήματα για τον καθαρισμό, την συλλογή, την αποθήκευση, την ρύθμιση της παραγωγής, την μέτρηση του φωταερίου και τέλος έδωσε ώθηση στην εξέλιξη των μηχανημάτων παραγωγής του. Τα μηχανήματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του φωταερίου, με το οποίο φωτίστηκαν για πρώτη φορά στην ιστορία τους, το 1813, οι δρόμοι του Λονδίνου. Βέβαια, πολύ σύντομα το φωταέριο χρησιμοποιήθηκε για θερμαντικούς σκοπούς, είτε στον οικιακό είτε στον εμπορικό τομέα, για μαγείρεμα, για θέρμανση νερού, για θέρμανση χώρων ή και για ειδικές ακόμη κατεργασίες.



*Εικόνα 2.2: Φωτισμός δρόμου με φυσικό αέριο.*

Από τα διάφορα στερεά καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή του φωταερίου γρήγορα επικράτησαν οι λιθάνθρακες και ιδιαίτερα οι λιθάνθρακες φωταερίου, που έδιναν συγχρόνως κατάλληλης ποιότητας κοκ για πολλές χρήσεις. Ενδιαφέρουσα είναι και η ανάπτυξη των κλιβάνων παραγωγής φωταερίου. Η επιτυχία από την εφαρμογή και χρήση του φωταερίου στους διάφορους τομείς οδήγησε στην αξιοποίηση κάθε αερίου, που παράγονταν ή θα μπορούσε να παραχθεί κατά κάποιον τρόπο. Έτσι εισερχόμαστε σε μια νέα εποχή, αυτή των βιομηχανικών αερίων και ως πρώτο βιομηχανικό αέριο μπορούμε να θεωρήσουμε το αέριο των υψικαμίνων, που κατ' αρχήν καιγόταν μη αξιοποιούμενο, αλλά στην συνέχεια με την ανάπτυξη της τεχνολογίας επετεύχθη η αξιοποίησή του.

Όσον αφορά στο πετρέλαιο, κατά την κλασματική απόσταξή του, παράγονται διάφορα αέρια από τα οποία το προπάνιο και το βουτάνιο έχουν την ιδιότητα υπό μικρή πίεση να υγροποιούνται σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο τα λεγόμενα "υγραερία".

Φτάνοντας στο φυσικό αέριο οι πρώτες αναφορές αξιοποίησης του γίνονται το 1626, στην Αμερική, όταν Γάλλοι εξερευνητές συνάντησαν ιθαγενείς να αναφλέγουν αέρια που ανάβλυζαν μέσα και γύρω από την λίμνη Erie. Η Αμερικάνικη βιομηχανία φυσικού αερίου ξεκίνησε από αυτή την περιοχή. Το 1821, η πρώτη πηγή ειδικά για την εξόρυξη φυσικού αερίου ανοίχθηκε στην Fredonia, New York, από τον William Hart. Ο Hart, ο οποίος θεωρείται από πολλούς ο «πατέρας» του φυσικού αερίου στην Αμερική, αφού παρατήρησε φυσαλίδες αερίου να ανέρχονται στην επιφάνεια σε ένα ρυάκι, έσκαψε μια πηγή 8.2m βάρους ώστε να μπορέσει να αντλήσει περισσότερη ποσότητα αερίου. Κατά την διάρκεια του 19<sup>ου</sup> αιώνα το φυσικό αέριο χρησιμοποιούνταν σχεδόν αποκλειστικά για φωτισμό. Χωρίς την υποδομή αγωγών, ήταν δύσκολο να μεταφερθεί το αέριο σε μακρινές αποστάσεις ή σε σπίτια για χρήση σε θέρμανση ή μαγείρεμα. Το περισσότερο από το φυσικό αέριο που παράγονταν αυτή την εποχή προέρχονταν από το κάρβουνο αντί να μεταφέρονταν από πηγή.

Κοντά στο τέλος του 19<sup>ου</sup> αιώνα, με την άνοδο του ηλεκτρισμού, ο φωτισμός με φυσικό αέριο αντικαταστάθηκε με ηλεκτρικό φωτισμό. Αυτό οδήγησε τους παραγωγούς φυσικού αερίου να αναζητήσουν νέες χρήσεις του προϊόντος τους. Έτσι, το 1885, ο Robert Bunsen εφηύρε αυτό που σήμερα είναι γνωστό ως καυστήρας Bunsen και ουσιαστικά πρόκειται για μια συσκευή που αναμίγνυε φυσικό αέριο με αέρα σε σωστές αναλογίες, δημιουργώντας μια φλόγα που μπορούσε με ασφάλεια να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση και μαγείρεμα. Η εφεύρεση αυτή με το πέρασμα των χρόνων οδήγησε στην χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου σε μεγάλος εύρος εφαρμογών.

Μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο και αφού η ασφαλής και αξιόπιστη μεταφορά του φυσικού αερίου ήταν πλέον δυνατή, ανακαλύφθηκαν νέες χρήσεις του. Βρήκε εφαρμογή στην θέρμανση οικιών και στη λειτουργία συσκευών όπως θερμοσιφώνων και φούρνων. Και στον βιομηχανικό τομέα το φυσικό αέριο άρχισε να χρησιμοποιείται σε εργοστάσια κατασκευών και διεργασιών. Επίσης, το φυσικό αέριο χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση νερού με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η υποδομή των αγωγών είχε πλέον κάνει το φυσικό αέριο εύκολο στην απόκτησή του και εξελίχθηκε σε μια δημοφιλή μορφή ενέργειας.



*Εικόνα 2.3: Ένας τυπικός καυστήρας-λύχνος Bunsen.*

Γίνεται πλέον πλήρως κατανοείτο πως το φυσικό αέριο είναι το αέριο καύσιμο με την μεγαλύτερη χρησιμότητα και την ευκολότερη εκμετάλλευση μιας και απαντάται σε κοιτάσματα τεραστίων αποθεμάτων και η μόνη δυσκολία που παρουσιάζεται είναι στην μεταφορά του. Το φυσικό αέριο όπως προείπαμε αποτελείται από τους ακόλουθες υδρογονάνθρακες, το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), το αιθάνιο ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), το προπάνιο ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), το βουτάνιο ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) και το πεντάνιο ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), καθώς και άλλους βαρύτερους υδρογονάνθρακες αλλά σε πολύ μικρές ποσότητες. Ακόμα, σε μικρή ποσότητα υπάρχουν και άλλα αδρανή στοιχεία που χαρακτηρίζονται σαν ακαθαρσίες. Αυτά τα αδρανή στοιχεία είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το άζωτο ( $\text{N}_2$ ), οι υδρατμοί ( $\text{H}_2\text{O}$ ) κ.α.. επειδή όμως είναι στην πλειοψηφία τους ανεπιθύμητα, απομακρύνονται πριν το φυσικό αέριο οδηγηθεί στην κατανάλωση. Σαν ακαθαρσία θεωρείται και το υδρόθειο το οποίο κάνει το φυσικό αέριο όξινο και κατά την καύση του εκπέμπετε διοξείδιο του θείου. Στο εμπορεύσιμο αέριο η περιεκτικότητα σε υδρόθειο πρέπει να είναι κάτω από 3ppm. Ακόμη, το φυσικό αέριο μπορεί να περιέχει βαρύτερους υδρογονάνθρακες σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα από ότι στον παρακάτω πίνακα καθώς και να είναι κορεσμένο σε υδρατμούς. Αυτά τα συστατικά μπορούν να συμπυκνωθούν σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πίεσης κάτι το οποίο δυσχεραίνει την μεταφορά του σε αγωγούς καθώς μπορεί να σχηματιστούν παγόμορφα στερεά που ονομάζονται υδρίτες. Για αυτό το λόγο πρέπει επίσης η περιεκτικότητα του φυσικού αερίου σε βαρύτερους υδρογονάνθρακες και ατμούς νερού να είναι κάτω από συγκεκριμένο όριο πριν μεταφερθεί σε αγωγούς. Κύριο χαρακτηριστικό όλων των φυσικών αερίων είναι η μεγάλη περιεκτικότητα σε μεθάνιο, τουλάχιστον 75% της σύστασης του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ). Μετά την αφαίρεση των ακαθαρσιών του φυσικού αερίου, η καύση του και τα προϊόντα της καύσης του είναι πολύ πιο φιλικά στο περιβάλλον από ότι του πετρελαίου και γενικά των υγρών καυσίμων. Δεν έχουμε παραγωγή μικροσωματιδίων και λόγω της πιο τέλει καύσης οι ρύποι είναι ελάχιστοι. Εξαιρώντας της ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το φυσικό αέριο είναι το πιο πράσινο καύσιμο για παραγωγή ενέργειας.

Συστατικό	Μοριακό Κλάσμα
Υδρογονάνθρακες	
Μεθάνιο	0.75 – 0.99
Αιθάνιο	0.01 – 0.15
Προπάνιο	0.01 – 0.10
κ-Βουτάνιο	0.00 – 0.02
Ισοβουτάνιο	0.00 – 0.01
κ-Πεντάνιο	0.00 – 0.01
Ισοπεντάνιο	0.00 – 0.01
Εξάνιο	0.00 – 0.01
Επτάνιο και βαρύτεροι υδρογονάνθρακες	0.00 – 0.001
Μη Υδρογονάνθρακες	
Άζωτο	0.00 – 0.15
Διοξείδιο του Άνθρακα	0.00 – 0.30
Υδρόθειο	0.00 – 0.30
Ήλιο	0.00 – 0.05

Πίνακας 2.2: Τυπικά όρια περιεκτικότητας συστατικών φυσικού αερίου

### 2.3.1 Φυσικές ιδιότητες του φυσικού αερίου

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω τα φυσικό αέριο μπορεί να διατεθεί σε τρεις μορφές, φυσικό αέριο, συμπιεσμένο φυσικό αέριο και υγροποιημένο φυσικό αέριο. Η μεταφορά του φυσικού αερίου με δίκτυο αγωγών γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε πιέσεις μέχρι 60-70 bar στους κεντρικούς αγωγούς και μικρότερες πιέσεις στην μετέπειτα μεταφορά του στους υπόλοιπους αγωγούς. Το συμπιεσμένο φυσικό αέριο βρίσκεται σε θερμοκρασίας περιβάλλοντος αλλά υπό πίεση 200 bar και σε αυτές τις συνθήκες μπορεί να γίνει η μεταφορά του σε δεξαμενές υπερπιέσεων αποφεύγοντας την αναγκαιότητα των αγωγών. Η αποθήκευση του φυσικού αερίου σε τέτοιες δεξαμενές εξυπηρετεί και την χρήση του ως καύσιμο στις χερσαίες και θαλασσιές μεταφορές. Τέλος, για την υγροποίηση του φυσικού αερίου απαιτείται πίεση 46,2 bar και θερμοκρασίες μικρότερες από  $-82,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Λόγω της δυσκολίας που υφίσταται για ταυτόχρονη επίτευξη χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλών πιέσεων για την υγροποίηση του φυσικού αερίου σε πίεση περιβάλλοντος πρέπει να επιτευχθεί θερμοκρασία μικρότερη από  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Αν και η επίτευξη τόσο χαμηλών θερμοκρασιών απαιτεί σημαντικά ποσά ενέργειας, είναι εν τέλει συμφέρουσα καθώς 1 κυβικό μέτρο υγροποιημένου φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε 600 κυβικά μέτρα φυσικού αερίου. Η μεταφορά και η αποθήκευση υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι επιτακτική σε περιοχές όπου δεν έχει αναπτυχθεί δίκτυο αγωγών ή για αποθήκευση αποθεμάτων φυσικού αερίου σε περίπτωση που υπάρξει διακοπή στην τροφοδοσία του φυσικού αερίου μέσω του δικτύου των αγωγών.

Επίσης έχουμε αναφέρει ότι η σύσταση του φυσικού αερίου δεν είναι σταθερή και για αυτό τα χαρακτηριστικά του μεγέθη εξαρτώνται από την σύσταση του. Αν και το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο, τα υπόλοιπα συστατικά του παίζουν και αυτά σημαντικό ρόλο και επηρεάζουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Μοριακό Βάρος και Όγκος
- Πυκνότητα  $\rho$ , Σχετική Πυκνότητα  $d$  και Δυναμικό Ιξώδες  $\mu$
- Ειδική Θερμοχωρητικότητα  $C_p$
- Θερμική Αγωγιμότητα  $k$
- Ειδική Ενθαλπία  $h$
- Θερμογόνο Δύναμη



Συστατικό	Μοριακό Βάρος $M$	Μοριακός Όγκος $V$	Πυκνότητα $\rho$	Σχετική Πυκνότητα $d$
	kg/kmol	m <sup>3</sup> /kmol	kg/m <sup>3</sup>	(Αέρας = 1)
Μεθάνιο	16.043	22.360	0.7175	0.5549
Αιθάνιο	30.069	22.191	1.355	1.048
Προπάνιο	44.096	21.928	2.011	1.555
κ-Βουτάνιο	58.123	21.461	2.708	2.094
Ισοβουτάνιο	58.123	21.550	2.697	2.086
κ-Πεντάνιο	72.150 *	20.90 *	3.452 *	2.670 *
Ισοπεντάνιο	72.150 *	21.06 *	3.426 *	2.650 *
κ-Εξάνιο	86.177 *	20.10 *	4.29 *	3.315 *
κ-Επτάνιο	100.203 *	18.3 *	5.48 *	4.235 *
Άζωτο	28.0134	22.403	1.2504	0.9671
Διοξείδιο του Άνθρακα	44.0098	22.261	1.9770	1.5290
Υδρόθειο	34.076	22.192	1.5355	1.1875
Ήλιο	4.0026	22.426	0.17848	0.1380

\* Υγρά σε κανονικές συνθήκες.

Πίνακας 2.3: Φυσικές Ιδιότητες Συστατικών Φυσικού Αερίου

Το φυσικό αέριο είναι ουσιαστικά μίγμα ιδανικών αερίων, σε διάφορες αναλογίες  $\tau_i$ , και οι φυσικές του ιδιότητες ακολουθούν τους κανόνες μίξης των ιδανικών αερίων. Έτσι, για κάθε συστατικό  $i$  ορίζεται το γραμμομοριακό κλάσμα  $x_i$ , το κλάσμα μάζας  $w_i$  και η σχετική μοριακή μάζα  $M_i$ .

$$x_i = \frac{c_i}{c} \quad \text{και} \quad w_i = \frac{\rho_i}{\rho} \quad \text{και} \quad M_i = \frac{\rho_i}{c}$$

- Μοριακό Βάρος και Όγκος

Το μοριακό βάρος ενός μίγματος φυσικού αερίου είναι ίσο με το άθροισμα των μοριακών κλασμάτων  $x_i$  επί το μοριακό βάρος  $M_i$  του κάθε συστατικού του μίγματος.

$$M = \sum y_i \cdot M_i$$

Ο υπολογισμός του μοριακού όγκου ενός μίγματος αερίων μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας το μέσο μοριακό του βάρος για τον υπολογισμό του αριθμού των kmol. Για ένα ιδανικό αέριο ο όγκος που καταλαμβάνει δεν εξαρτάται από το είδος των μορίων αλλά από την θερμοκρασία, την πίεση και τον αριθμό των μορίων που βρίσκονται στον χώρο. Ο όγκος 1 kmol ενός ιδανικού αερίου σε κανονικές συνθήκες (273,15 K, 101325 Pa) υπολογίζεται πως είναι ίσος με 22,414 m<sup>3</sup>.

- Πυκνότητα  $\rho$ , Σχετική Πυκνότητα  $d$  και Δυναμικό Ιξώδες  $\mu$

Η πυκνότητα  $\rho$  ενός μίγματος φυσικού αερίου είναι το άθροισμα των γινομένων της αναλογίας  $r_i$  του κάθε συστατικού επί την πυκνότητα του  $\rho_i$ , υπό την ίδια πίεση και θερμοκρασία με αυτή του μίγματος. Κατά συνέπεια η πυκνότητα του μίγματος του φυσικού αερίου δίνεται από τον τύπο:

$$\rho = \sum r_i \cdot \rho_i \quad \text{σε } kg/m^3$$

Η σχετική πυκνότητα  $d$  αποτελεί τον αδιάστατο λόγο της πυκνότητας του μίγματος φυσικού αερίου προς την πυκνότητα του αέρα στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Κατά συνέπεια η σχετική πυκνότητα δίνεται από τον τύπο:

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\alpha\epsilon\rho\alpha}} = \sum r_i \cdot d_i$$

Το δυναμικό ιξώδες  $\mu$  του μίγματος φυσικού αερίου υπολογίζεται, με βάση την ημιεμπειρική σχέση του Wilke (Θεωρία Μιγμάτων), από το ιξώδες των συστατικών του μίγματος:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{\sum_{j=1}^n x_j \cdot \Phi_{ij}} \quad \text{σε } kg/msec$$

όπου η συνάρτηση  $\Phi_{ij}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left[ 1 + \frac{M_i}{M_j} \right]^{-0.5} \left[ 1 + \left( \frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0.5} \left( \frac{M_i}{M_j} \right)^{0.25} \right]^2$$

το  $\Phi_{ij}$  είναι αδιάστατο μέγεθος και ισχύει ότι για  $i=j$  είναι  $\Phi_{ij}=1$

- Ειδική Θερμοχωρητικότητα  $C_p$

Η ειδική ισοβαρής θερμοχωρητικότητα  $C_p$  του μίγματος φυσικού αερίου δίνεται από την σχέση:

$$C_p(T) = \sum w_i C_{pi}(T) \quad \text{σε } kJ/m^3K$$

Βέβαια για τεχνικές εφαρμογές τα συστατικά του φυσικού αερίου θεωρούνται ιδανικά αέρια και για αυτό η ειδική ισοβαρής θερμοχωρητικότητα υπολογίζεται από πολυωνυμικές ή εκθετικές εξισώσεις.

- Θερμική Αγωγιμότητα k

Η θερμική αγωγιμότητα k του μίγματος φυσικού αερίου δίνεται από την σχέση:

$$k = \frac{\sum x_i k_i \sqrt[3]{M_i}}{\sum x_i \sqrt[3]{M_i}} \quad \text{σε } J/msec$$

- Ειδική Ενθαλπία h

Η ειδική ενθαλπία h του μίγματος φυσικού αερίου δίνεται από την σχέση:

$$h = \sum w_i h_i = \sum w_i c_{pi} T_i \quad \text{σε } J/kg$$

- Θερμογόνος Δύναμη

Η θερμογόνος δύναμη ενός μίγματος φυσικού αερίου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$A\theta\Delta = \sum x_i A\theta\Delta_i \quad \text{σε } MJ/m^3$$

Όπου  $x_i$  είναι το μοριακό κλάσμα του συστατικού  $i$  και  $A\theta\Delta_i$  είναι η ανώτερη θερμογόνος δύναμη του συστατικού  $i$ . Στο παρακάτω πίνακα δίνονται οι ανώτερες θερμογόνοι δυνάμεις των συστατικών του φυσικού αερίου.

Συστατικό	Ανώτερη Θερμογόνος Δύναμη (MJ/m <sup>3</sup> )
Μεθάνιο	39.819
Αιθάνιο	70.293
Προπάνιο	101.242
κ-Βουτάνιο	134.061
Ισοβουτάνιο	133.119
κ-Πεντάνιο	169.19 *
Ισοπεντάνιο	167.53 *
κ-Εξάνιο	208.70 *
κ-Επτάνιο	265.22 *
Υδροθείο	25.336

\* Υγρό σε κανονικές συνθήκες.

Πίνακας 2.4: Ανώτερη θερμογόνος δύναμη για κάθε ένα από τα συστατικά του φυσικού αερίου σε κανονικές συνθήκες

### 2.3.2. Χημικές ιδιότητες του φυσικού αερίου

Οι χημικές ιδιότητες του φυσικού αερίου προσδιορίζονται με την μέθοδο της χρωματογραφικής ανάλυσης η οποία χρησιμοποιείται για την ποσοτική και ποιοτική ανάλυση των συστατικών του και πιο συγκεκριμένα των υδρογονανθράκων, του υδρογόνου, των ευγενών αερίων, του οξυγόνου, του διοξειδίου του άνθρακα και του αζώτου. Η μέθοδος αυτή απαιτεί δύο χρωματογραφικές στήλες όπου στην μία διαχωρίζεται το ήλιο, το υδρογόνο και το οξυγόνο τα οποία ανιχνεύονται από έναν ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας και στην άλλη στήλη ανιχνεύονται το άζωτο, το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρογονάνθρακες. Οι δύο αναλύσεις πραγματοποιούνται ανεξάρτητα και στο τέλος τα αποτελέσματα τους συνδυάζονται. Τέλος το δείγμα του προς ανάλυση αερίου δεν πρέπει να περιέχει συμπυκνώματα υδρογονανθράκων ή νερού και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά της ανάλυσης ενός πρότυπου μίγματος αερίου το οποίο είναι 99,9% καθαρό.

Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω το φυσικό αέριο αποτελείται από μίγμα παραφινών (κορεσμένων αλειφατικών υδρογονανθράκων). Κορεσμένοι χαρακτηρίζονται οι υδρογονάνθρακες εκείνοι όπου το κάθε άτομο άνθρακα συνδέεται με άλλα τέσσερα άτομα, είναι δεσμευμένοι δηλαδή όλοι οι δεσμοί του. Για τις παραφίνες ισχύει ο τύπος  $C_nH_{2n+2}$  και το πρώτο μέλος της σειρά των παραφινών είναι το μεθάνιο ( $CH_4$ ). Στο φυσικό αέριο συναντάμε με την σειρά το αιθάνιο ( $C_2H_6$ ), προπάνιο ( $C_3H_8$ ), το βουτάνιο ( $C_4H_{10}$ ), το πεντάνιο ( $C_5H_{12}$ ) κτλ. Για του κορεσμένους όμως υδρογονάνθρακες με αριθμό ατόμων άνθρακα μεγαλύτερο από ή ίσο με 4 έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου της ισομερείας, δηλαδή ενώσεις με τον ίδιο μοριακό τύπο αλλά διαφορετική δομή. Έτσι για παράδειγμα έχουμε το κανονικό βουτάνιο όπου τα 4 άτομα άνθρακα σχηματίζουν μια ευθεία αλυσίδα και το ισοβουτάνιο όπου η μία ομάδα  $CH_3$  συνδέεται πλάγια με τα κεντρικό άτομο άνθρακα. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των ατόμων άνθρακα, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των ισομερών.

Δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά του φυσικού αερίου είναι ο υψηλός αριθμός οκτανίων του και κατά συνέπεια και η υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης του. Αυτές οι ιδιότητες του φυσικού αερίου είναι που το καθιστούν σημαντικό υποκατάστατο καύσιμο σε κινητήρες diesel. Ο αριθμός των οκτανίων του φυσικού αερίου ανέρχεται σε 130 RON την στιγμή που ο αριθμός οκτανίων της βενζίνης είναι περίπου 95 RON. Αυτός ο υψηλός αριθμός οκτανίων δίνει την δυνατότητα στο φυσικό αέριο να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες με υψηλό λόγο συμπίεσης με μειωμένο κίνδυνο κρουστικής καύσης. Τέτοιοι κινητήρες είναι οι κινητήρες diesel. Το άλλο βασικό χαρακτηριστικό του φυσικού αερίου είναι η θερμοκρασία αυτανάφλεξης του, η οποία φτάνει μέχρι και τους  $1000^{\circ}C$ .

## 2.4 Περιοχές εφαρμογής του φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται είτε ως πρωτογενές καύσιμο είτε ως δευτερογενές. Με τον όρο πρωτογενές καύσιμο αναφερόμαστε στην χρήση του φυσικού αερίου για παραγωγή θερμότητας ή έργου σε εφαρμογές που υποκαθιστούν τον ηλεκτρισμό (π.χ. κουζίνα μαγειρέματος φυσικού αερίου). Σαν δευτερογενές καύσιμο το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου).

Η χρήση του φυσικού αερίου σαν πρωτογενές καύσιμο είναι πιο συμφέρουμε όπως είναι και λογικό άλλωστε. Παρόλη την υψηλή απόδοση που εμφανίζουν οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φυσικού αερίου (έως και 60%) σε καμία περίπτωση δεν φτάνουν τις υψηλές αποδόσεις των συσκευών και μηχανών που χρησιμοποιούν το φυσικό αέριο σαν πρωτογενές καύσιμο. Ακόμα και αν δεν λάβουμε υπόψη μας την διαφορά σε απόδοση μεταξύ δευτερογενούς και πρωτογενούς χρήσης του φυσικού αερίου, οι απώλειες για την μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από την μονάδα παραγωγής μέχρι την κατανάλωση είναι σημαντικές και καθιστούν σαφές πως είναι προτιμότερη η χρήση του φυσικού αερίου ως πρωτογενές καύσιμο.

Ξεκινώντας από την χρήση του φυσικού αερίου ως δευτερογενές καύσιμο θα μπορούσαμε να αναφέρουμε την καύση του σε μονάδες παραγωγής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου ή σε μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας. Στην πρώτη περίπτωση το φυσικό αέριο καίγεται σε μονάδα αεροστροβίλου και στην συνέχεια τα καυσαέρια του εισέρχονται σε έναν λέβητα ανάκτησης θερμότητας και με την καύση πάλι φυσικού αερίου επιτυγχάνεται η παραγωγή ατμού ο οποίος κινεί με την σειρά του τα πτερύγια του στροβίλου της ηλεκτρογεννήτριας. Στην δεύτερη περίπτωση όπου έχουμε συμπαραγωγή ηλεκτρισμού θερμότητας το φυσικό αέριο καίγεται συνήθως σε μηχανή εσωτερικής καύσης της οποίας ο άξονας περιστρέφει τον αντίστοιχο άξονα της ηλεκτρογεννήτριας. Παράλληλα έχουμε την εκμετάλλευση της θερμότητας του ψυκτικού μέσου του κινητήρα, του λιπαντικού του κινητήρα και των καυσαερίων του και χρήση αυτής της θερμότητας σε διάφορες εφαρμογές.

Οι περιοχές εφαρμογής του φυσικού αερίου ως πρωτογενές καύσιμο είναι πολύ περισσότερες. Χρήση φυσικού αερίου έχουμε στον βιομηχανικό τομέα, στον εμπορικό, στον οικιακό και στον τομέα των μεταφορών. Στις βιομηχανίες συνήθως γίνεται χρήση καυστήρων φυσικού αερίου για παραγωγή θερμότητας και την εξυπηρέτηση των απαιτούμενων διεργασιών που απαιτούν μεγάλα ποσά θερμότητας, όπως για παράδειγμα η ξήρανση. Στον εμπορικό τομέα, όπως καταστήματα, εστιατόρια, ξενοδοχεία, το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται για την ψύξη και την θέρμανση των χώρων καθώς και στις κουζίνες των εστιατορίων. Στο οικιακό τομέα το φυσικό αέριο βρίσκει εφαρμογή σε κουζίνες μαγειρέματος και σε λέβητες θέρμανσης φυσικού αερίου για την θέρμανση των σπιτιών και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης. Τέλος, σημαντική χρήση του φυσικού αερίου γίνεται και στον τομέα των μεταφορών. Ήδη πολλά συμβατικά οχήματα κυκλοφορούν από το εργοστάσιο με τροποποιημένους κινητήρες και δεξαμενές με δυνατότητα

καύσης φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενές υπερυψηλής πίεσης (πάνω από 200bar) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε κινητήρες Otto (με εναλλαγή μεταξύ βενζίνης και φυσικού αερίου) είτε σε κινητήρες Diesel (με συνδυασμένη καύση πετρελαίου και φυσικού αερίου). Το φυσικό αέριο όμως δεν χρησιμοποιείται σαν καύσιμο μόνο σε συμβατικά οχήματα αλλά και σε οχήματα βαρέως τύπου και λεωφορεία με αντίστοιχο τρόπο λειτουργίας. Τα τελευταία χρόνια όμως σημαντικές εξελίξεις συμβαίνουν και στην ναυτιλία όπου ναυτικοί κινητήρες δοκιμάζονται για χρήση φυσικού αερίου με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα, η χρήση φυσικού αερίου σε κινητήρες Diesel θα βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό την εναρμόνιση τους με τους όλο και πιο αυστηρούς κανονισμούς εκπομπής ρύπων. Ακόμη θα οδηγήσει σε σημαντικά οικονομικά οφέλη καθώς το φυσικό αέριο εκτός από καθαρότερο είναι και φθηνότερο καύσιμο από το πετρέλαιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΜΕΙΚΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

#### 3.1 Η μεικτή καύση φυσικού αερίου και πετρελαίου σε κινητήρα Diesel

Η μεικτή καύση δεν αποτελεί τεχνολογία του σήμερα καθώς από την εποχή του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου είχαμε εφαρμογή της σε οχήματα. Παρόλα αυτά, τα τελευταία μόνο χρόνια είναι που παρουσιάζει τεράστια ανάπτυξη. Οι λόγοι είναι κυρίως περιβαλλοντικοί αλλά και οικονομικοί και αυτά είναι τα κύρια πλεονεκτήματα της μεικτής καύσης τα οποία θα αναλύσουμε και στην συνέχεια.

Μεικτή καύση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης αλλά και εξωτερικής. Βέβαια η μεικτή καύση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η βασική αρχή λειτουργίας των κινητήρων μεικτής καύσης ή διπλού καυσίμου (Dual-Fuel engines) είναι η ταυτόχρονη καύση υγρού και αερίου καυσίμου μέσα στον θάλαμο καύσης υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Μέσα στον κύλινδρο εισάγεται κατάλληλη ποσότητα υγρού ή (στην περίπτωση μας) αερίου καυσίμου είτε μέσω της εισαγωγής του κινητήρα είτε με απευθείας έγχυση του καυσίμου στον κύλινδρο. Στην συνέχεια εισάγεται και το κλασικό καύσιμο, βενζίνη ή πετρέλαιο, και γίνεται η ανάφλεξη ή αυτανάφλεξη του μίγματος, αντίστοιχα. Αυτή είναι η βασική αρχή γύρω από την οποία κινούνται όλοι οι κατασκευαστές και αναπτύσσουν τα δικά τους συστήματα μεικτής καύσης.

Η μεικτή καύση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε κινητήρες σπινθηρισμού είτε σε κινητήρες αυτανάφλεξης. Στην περίπτωση των κινητήρων σπινθηρισμού εκτός από την ταυτόχρονη καύση βενζίνης και κάποιου αερίου, υγραερίου ή φυσικού αερίου, υπάρχει η δυνατότητα και αποκλειστικής λειτουργίας του κινητήρα με καύση μόνο αέριων καυσίμων. Αυτή η δυνατότητα δίνεται λόγω της ύπαρξης του σπινθηριστή ο οποίος καταφέρνει να αναφλέξει το αέριο καύσιμο χωρίς την απαραίτητη παρουσία της βενζίνης. Στην περίπτωσή μας, στους κινητήρες αυτανάφλεξης, η καύση πραγματοποιείται με την απαιτούμενη παρουσία του πετρελαίου και έχει σκοπό να αναφλέξει το φυσικό αέριο που βρίσκεται μέσα στον κύλινδρο. Το πετρέλαιο αναλαμβάνει τον ρόλο του σπινθηριστή, γίνεται ουσιαστικά η πηγή έναυσης και καταφέρνει με αυτόν τον τρόπο να αναφλέξει και το υπόλοιπο μίγμα φυσικού αερίου - ατμοσφαιρικού αέρα. Το πετρέλαιο έχει αρκετά μικρότερη θερμοκρασία αυτανάφλεξης σε σχέση με αυτήν του φυσικού αερίου, για τις ίδιες πάντα συνθήκες περιβάλλοντος χώρου. Για τον λόγο αυτό με την εισαγωγή του πετρελαίου στον κύλινδρο έχουμε την αυτανάφλεξη του και την παραγωγή της απαιτούμενης θερμότητας για την ανάφλεξη

και του φυσικού αερίου. Αυτή η τεχνική ουσιαστικά είναι η πιο διαδεδομένη αλλά στην συνέχεια θα αναφερθούμε και σε άλλες.

Εφαρμογές μεικτής καύσης έχουμε, όπως προαναφέραμε, από την εποχή του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου όπου χρησιμοποιήθηκε βιοαέριο ή συνθετικό αέριο ως συμπληρωματικό καύσιμο στους εμβολοφόρους κινητήρες των οχημάτων, γνωστά και ως γκαζοζέν. Με τον τρόπο αυτόν, παρά την έλλειψη των υγρών καυσίμων, λόγω πολέμου, ήταν εφικτή η κίνηση των οχημάτων. Λόγω της επιτυχημένης καύσης εναλλακτικών καυσίμων στους εμβολοφόρους κινητήρες κατά την διάρκεια του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου, άρχισε στη συνέχεια η μελέτη για δυνατότητα καύσης αιθανόλης σε κινητήρες αυτανάφλεξης με σκοπό την μείωση της παραγόμενης αιθάλης.



*Εικόνα 3.1: Λιμουζίνα της Peugeot (μοντέλο 402) προσαρμοσμένη ώστε να λειτουργεί με αέριο που παράγεται από την καύση του άνθρακα (κοκ). Παράχθηκαν 2500 μονάδες μεταξύ 1940 και 1945.*

Στις αρχές της δεκαετίας του '60 πραγματοποιείται ανάπτυξη και αύξηση των διυλιστηρίων με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής υγραερίου (LPG). Ταυτόχρονα παρατηρείται και ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα για διερεύνηση της δυνατότητας καύσης υγραερίου σε εμβολοφόρους κινητήρες είτε ως συμπληρωματικό καύσιμο είτε και ως κύριο καύσιμο. Με την συνεχόμενη επιδείνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στα τέλη της δεκαετίας του 60, η ιδέα χρήσης του υγραερίου γίνεται όλο και περισσότερο ενδιαφέρουσα. Οι μελέτες αποδείκνυαν ότι με την καύση υγραερίου (LPG) επιτυγχάνεται μείωση στις εκπομπές αέριων ρύπων και η παραγόμενη αιθάλη είναι πολύ λιγότερη. Παρά το ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την χρήση του υγραερίου ως συμπληρωματικό ή ακόμα και ως κύριο καύσιμο, υπήρχαν διάφοροι ενδοιασμοί. Φόβοι ως προς την επικινδυνότητα χρήσης του, καθώς σε περίπτωση διαρροής συγκεντρώνεται στο έδαφος όντας πιο βαρύ από τον ατμοσφαιρικό αέρα, ενδοιασμοί ως προς την δυνατότητα αποθήκευσής του καθώς επίσης και το γεγονός ότι το υγραέριο αποτελεί παράγωγο του πετρελαιο



και κατά συνέπεια περαιτέρω εξάρτηση από το πετρέλαιο. Η συγκεκριμένη άποψη ενισχύθηκε από το γεγονός που συγκλόνισε την παγκόσμια οικονομία στις αρχές της δεκαετίας του '70, την πετρελαϊκή κρίση.

Έτσι, από της αρχές της δεκαετίας του '70, και έχοντας εισέρθει στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά, το φυσικό αέριο μπαίνει στο μικροσκόπιο των επιστημόνων οι οποίοι εξετάζουν τις δυνατότητες χρήσης του ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Πέρα από την πετρελαϊκή κρίση που οδήγησε τους επιστήμονες στο φυσικό αέριο υπήρχαν δύο βασικοί παράγοντες που ενίσχυαν ακόμα περισσότερο την όδευση τους σε αυτό. Πρώτον, το φυσικό αέριο είναι ανεξάρτητο από τα κοιτάσματα πετρελαίου καθιστώντας το μια αξιόπιστη εναλλακτική πηγή ενέργειας. Δεύτερον, το φυσικό αέριο είναι πιο ακίνδυνο από το υγραέριο καθώς σε περίπτωση διαρροής του διασκορπίζεται στην ατμόσφαιρα, όντας ελαφρύτερο.

Ακολούθησαν πολλές μελέτες και έρευνες από την πλευρά των επιστημόνων για να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι το φυσικό αέριο αν και ορυκτό καύσιμο θα μπορέσει να αποτελέσει το πρώτο «πράσινο» καύσιμο, συγκρινόμενο πάντα με τα υπόλοιπα παράγωγα του πετρελαίου. Κατά την μεικτή καύση του φυσικού αερίου σε κινητήρες αυτανάφλεξης διαπιστώθηκαν πολύ μειωμένα επίπεδα εκπομπών ρύπων καθώς και μεγάλη μείωση στην εκπνεύσιμη αιθάλη. Επιπλέον, η καύση φυσικού αερίου μείωνε κατά πολύ την ανάγκη καύσης πετρελαίου με συνέπεια την εξοικονόμηση του.

Παρόλα αυτά, από την δεκαετία του '80 και μετά αναπτύχθηκαν πολλά δευτερογενή συστήματα αντιρρύπανσης αφήνοντας έτσι στο περιθώριο την χρήση του πρωτογενούς καθαρότερου καυσίμου, του φυσικού αερίου. Κάνοντας χρήση κατάλληλων διατάξεων στις εξατμίσεις των οχημάτων, όπως καταλυτών και παγίδων αιθάλης, εξουδετερώθηκε ως ένα βαθμό το πλεονέκτημα του φυσικού αερίου ως καθαρότερο καύσιμο. Ακόμα ένας παράγοντας που καθυστέρησε την χρήση του φυσικού αερίου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ήταν η έλλειψη ικανοποιητικού δικτύου ανεφοδιασμού των οχημάτων.

Με την πάροδο των χρόνων και με την εξέλιξη της τεχνολογίας το φυσικό αέριο ήρθε πάλι στο προσκήνιο. Εκτός από την εξέλιξη της τεχνολογίας και την αποδοτικότερη καύση του, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας ήταν και οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για περιορισμό των ρύπων από τα οχήματα και γενικά από τα μέσα μεταφορά. Τα συστήματα αντιρρύπανσης επίσης παρουσίασαν μεγάλη τεχνολογική εξέλιξη αλλά το κόστος ανάπτυξης και κατασκευής τους, οδήγησε πολλούς κατασκευαστές στο να εξετάσουν εκ νέου την δυνατότητα χρήσης του φυσικού αερίου ως εναλλακτικό καύσιμο, είτε ως συμπληρωματικό είτε και ως κύριο καύσιμο. Το δίκτυο ανεφοδιασμών αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό, μην αποτελώντας πλέον ανασταλτικό παράγοντα. Ακόμη, οι εκπνεύσιμη ρύποι, τα μικροσωματίδια και η αιθάλη από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης που κάνει χρήση φυσικού αερίου είναι πολύ λιγότεροι συγκρινόμενοι ακόμα και με τα τελευταία τεχνολογία αντιρρυπαντικά συστήματα. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας εξάπλωσης

πλέον του φυσικού αερίου σαν συμπληρωματικό ή κύριο καύσιμο είναι και η οικονομία που προσφέρει. Η τιμή του φυσικού αερίου τις τελευταίες δεκαετίες είναι αρκετά χαμηλότερη από την τιμή του πετρελαίου, συγκρινόμενες πάντα με βάση το ενεργειακό περιεχόμενο του κάθε καυσίμου, και θα συνεχίσει να είναι φθηνότερο μιας και τα αποθέματα φυσικού αερίου είναι μεγαλύτερα από τα αποθέματα πετρελαίου.

Για τους παραπάνω λόγους, η μεικτή καύση φυσικού αερίου πετρελαίου σε κινητήρες αυτανάφλεξης έχει προσελκύσει εκ νέου το ενδιαφέρον των κατασκευαστών. Εφαρμογές μεικτής καύσης έχουμε από την αυτοκινητοβιομηχανία, τα οχήματα βαρέως τύπου μέχρι και τους μεγάλους ναυτικούς κινητήρες Diesel όπου τα οφέλη είναι πολλαπλάσια. Οι εφαρμογές αυτές ξεκίνησαν κάνοντας χρήση συμπιεσμένου φυσικού αερίου (CNG), χαρακτηριστικό παράδειγμα τα αστικά λεωφορεία της Αθήνας που για πάνω από μια δεκαετία κάνουν χρήση συμπιεσμένου φυσικού αερίου (CNG). Στην υπόλοιπη Ευρώπη, αλλά και γενικά στον υπόλοιπο κόσμο, οι χρήσεις του συμπιεσμένου φυσικού αερίου (CNG) είναι ακόμα περισσότερο διαδεδομένη όπου βρίσκει εφαρμογή σε στόλους οχημάτων βαρέως τύπου ή ακόμα και σε επιβατικά ή ελαφρά επαγγελματικά οχήματα. Τα τελευταία χρόνια βέβαια, μεγάλη ανάπτυξη παρατηρείται και στην χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG), τόσο σε οχήματα βαρέως τύπου αλλά και πολύ περισσότερο στην ναυτιλία. Η εισαγωγή του καυσίμου στον κύλινδρο γίνεται πάντα σε αέρια μορφή, αλλάζοντας απλώς ο τρόπος ανεφοδιασμού και αποθήκευσης του φυσικού αερίου, είτε δηλαδή σε συμπιεσμένη (CNG) μορφή είτε σε υγροποιημένη (LNG).

### **3.2 Υφιστάμενες τεχνολογίες μεικτής καύσης σε κινητήρες αυτανάφλεξης και τεχνολογίες βελτίωσης του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος**

Η αρχή λειτουργία των κινητήρων αυτανάφλεξης, όπως έχουμε αναφέρει και στο πρώτο κεφάλαιο, βασίζεται στην δημιουργία κατάλληλων συνθηκών στο εσωτερικό του κυλίνδρου του κινητήρα με σκοπό την αυτανάφλεξη του καυσίμου μίγματος. Το καύσιμο των κινητήρων αυτανάφλεξης απαιτείται να έχει υψηλό αριθμό κετανίου έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αυτανάφλεξη του. Τέτοιο καύσιμο είναι το πετρέλαιο. Στην μεικτή καύση, όπως έχουμε αναφέρει, κάνουμε χρήση δύο καυσίμων, είτε υγρών είτε αέριων, όπου το κυρίως καύσιμο αναμειγνύεται με το συμπληρωματικό. Στην περίπτωση μας ως κύριο καύσιμο είναι το πετρέλαιο και συμπληρωματικό το φυσικό αέριο. Με τον όρο όμως συμπληρωματικό δεν εννοούμε απαραίτητα ότι η ποσότητα του συγκεκριμένου καυσίμου είναι και μικρότερη από του κυρίως. Οι τεχνικές οι οποίες εφαρμόζονται για την πραγματοποίηση της μεικτής καύσης είναι ουσιαστικά τρεις.

Από τις πρώτες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν για την επίτευξη της μεικτής καύσης ήταν αυτή της καύσης πετρελαίου με συμπληρωματική καύση φυσικού αερίου. Όπως αναφέρει και το όνομα της, κύριο ρόλο στην καύση είχε το πετρέλαιο το οποίο ήταν και το μεγαλύτερο στην ποσότητα και συμπληρωματικά εγγεόταν κάποια ποσότητα φυσικού αερίου στον κύλινδρο. Η

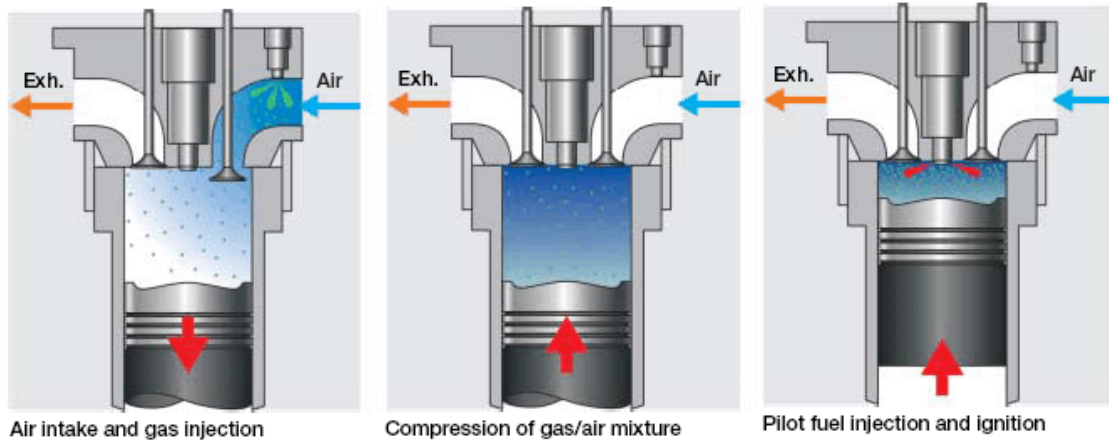
έγχυση του αερίου πραγματοποιούταν αφού πρώτα ο κινητήρας είχε ισορροπήσει σε μια κατάσταση λειτουργίας καίγοντας μέχρι τότε μόνο πετρέλαιο. Στην συνέχεια, με την προσθήκη φυσικού αερίου και διατηρώντας τις στροφές του κινητήρα σταθερές γινόταν προσπάθεια να αυξηθεί το φορτίο. Η συγκεκριμένη τεχνολογία ήταν από τις πρώτες που εφαρμόστηκαν, πλέον όμως κύρια εφαρμογή έχουν δύο άλλες τεχνολογίες οι οποίες βέβαια βασίζονται σε μια κοινή αρχή λειτουργίας.

Η αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζονται και οι δύο αυτές τεχνολογίες είναι η πιλοτική έγχυση πετρελαίου στον θάλαμο καύσης μέσα στον οποίο έχει εισαχθεί η απαιτούμενη ποσότητα μίγματος αέρα - φυσικού αερίου. Υπενθυμίζοντας, στους κινητήρες αυτανάφλεξης πολύ σημαντικό ρόλο κατά την διαδικασία της καύσης έχει η καθυστέρηση καύσης. Επειδή όμως η καύση πραγματοποιείται με αυτανάφλεξη του καυσίμου ο χρόνος της καθυστέρησης καύσης πρέπει να είναι μικρός και για αυτό είναι σημαντικό το καύσιμο μας να έχει υψηλό αριθμό κετανίου, ο οποίος χαρακτηρίζει την δυνατότητα αυτανάφλεξης του καυσίμου. Το φυσικό αέριο όμως λόγω του υψηλού αριθμού οκτανίων παρουσιάζει υψηλές αντικρουστικές ιδιότητες, πολύ μεγαλύτερες από όσο απαιτείται για να αυταναφλεγεί σε κινητήρα αυτανάφλεξης. Ενδεικτικά, οι συνθήκες που επικρατούν κατά μέσο όρο στον θάλαμο καύσης ενός κινητήρα αυτανάφλεξης για να αυταναφλεγεί το πετρέλαιο είναι θερμοκρασία της τάξης των 600°C με λόγο συμπίεσης 17:1. Αντίστοιχα, για την αυτανάφλεξη του φυσικού αερίου απαιτούνται θερμοκρασίες της τάξης των 1000°C συνεπάγοντας έτσι έναν λόγο συμπίεσης περίπου 46:1. Γίνεται αμέσως κατανοείτο ότι ένας τόσο υψηλός λόγος συμπίεσης δεν είναι εφικτός και ειδικά σε υπάρχοντες κινητήρες αυτανάφλεξης. Το συγκεκριμένο πρόβλημα, της υψηλής θερμοκρασίας αυτανάφλεξης του φυσικού αερίου, λύνεται με την πιλοτική έγχυση πετρελαίου στον θάλαμο καύσης.

Σε έναν κινητήρα μεικτής καύσης, πραγματοποιείται προανάμειξη του φυσικού αερίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα δημιουργώντας ένα μίγμα αέρα - φυσικού αερίου και το οποίο εισέρχεται στον θάλαμο καύσης. Για την ανάφλεξη και καύση του μίγματος, λίγες μοίρες πριν το Άνω Νεκρό Σημείο πραγματοποιείται έγχυση μικρής ποσότητας πετρελαίου. Αυτή η ποσότητα αυταναφλέγεται και είναι ουσιαστικά η πηγή έναυσης και για το υπόλοιπο καύσιμο μίγμα αέρα – φυσικού αερίου. Ο τρόπος που εγχέετε το φυσικό αέριο καθορίζει και την τεχνολογία που εφαρμόζεται. Κατά συνέπεια έχουμε την έμμεση έγχυση του φυσικού αερίου στην εισαγωγή του κινητήρα ακολουθούμενη από την πιλοτική έγχυση πετρελαίου και την άμεση έγχυση του φυσικού αερίου απευθείας στον κύλινδρο ακολουθούμενη από την πιλοτική έγχυση του πετρελαίου. Ουσιαστικά κάνουμε λόγω για συστήματα πιλοτικής έγχυσης πετρελαίου με έγχυση φυσικού αερίου σε χαμηλή ή υψηλή πίεση.

Η αρχή λειτουργίας για τα συστήματα χαμηλής πίεσης είναι η εξής: Μέσω ενός σωλήνα ο οποίος είναι τοποθετημένος στην εισαγωγή ή πολλαπλή εισαγωγής του κινητήρα εισάγεται η κατάλληλη ποσότητα φυσικού αερίου ανάλογα και με τις απαιτήσεις σε ισχύ. Στην συνέχεια το μίγμα που έχει δημιουργηθεί εισέρχεται μέσω των βαλβίδων εισαγωγής στους κυλίνδρους του κινητήρα. Κατά τη φάση της συμπίεσης του μίγματος, λίγες μοίρες πριν το Άνω Νεκρό Σημείο, εισάγεται μέσω των εγχυτήρων υψηλής πίεση μικρή ποσότητα πετρελαίου (ανάλογα με τις

απαιτήσεις κυμαίνετε από 10 μέχρι 30%) η οποία αυταναφλέγεται, καθώς οι συνθήκες που επικρατούν στους κυλίνδρους είναι κατάλληλες για αυτανάφλεξη πετρελαίου. Η θερμότητα που εκλύεται από την αυτανάφλεξη του πετρελαίου είναι αρκετή για να οδηγήσει και στην ανάφλεξη του φυσικού αερίου.



*Εικόνα 3.2: Ξεκινώντας από αριστερά έχουμε την ανάμειξη του φυσικού αερίου με τον ατμοσφαιρικό αέρα στην εισαγωγή του κυλίνδρου, στην συνέχεια έχουμε την συμπίεση του μίγματος αέρα-φυσικού αερίου και τέλος την πιλοτική έγχυση και αυτανάφλεξη του πετρελαίου.*

Κατά την πρώτη ανάφλεξη του πετρελαίου, παρατηρείται η γνωστή καθυστέρηση καύσης η οποία είναι ελάχιστα μεγαλύτερη σε σύγκριση με την συμβατική καύση (μόνο πετρέλαιο) και οφείλεται στην λίγο μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα του μίγματος αέρα – φυσικού αερίου. Κατά την δεύτερη όμως ανάφλεξη παρατηρείται επίσης μια καθυστέρηση καύσης. Σε συνολική διάρκεια βέβαια η καύση σε έναν κινητήρα μεικτής καύσης πραγματοποιείται πιο γρήγορα και ειδικά σε υψηλές στροφές κινητήρα. Παρόλο που η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας του φυσικού αέριο είναι γενικά μικρότερη, επειδή όμως το φυσικό αέριο εισέρχεται στον θάλαμο καύση προ-αναμεμιγμένο με ατμοσφαιρικό αέρα η ανάφλεξη του πραγματοποιείται γρηγορότερα. Σε αυτό βοηθάνε και τα πολλά μέτωπα διάδοσης φλόγας που δημιουργούνται στους κινητήρες αυτανάφλεξης. Με την έγχυση της πιλοτικής ποσότητας πετρελαίου, τα σταγονίδια του πετρελαίου αυταναφλέγοντε, όταν οι συνθήκες είναι κατάλληλες, και δημιουργούν πολλά μέτωπα διάδοσης φλόγας οδηγώντας σε γρηγορότερη καύση του φυσικού αερίου ακόμα και σε σχέση με κινητήρες σπινθηρισμού, όπου η διάδοση της φλόγας γίνεται μόνο από ένα σημείο, κοντά στον σπινθηριστή. Λόγω της γρηγορότερης καύσης, παρατηρούνται πιο έντονα κρουστικά φαινόμενα, ειδικά όταν ο κινητήρας λειτουργεί σε υψηλές στροφές. Βέβαια η κρουστική καύση δεν συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις καθώς εξαρτάται και από την περιεκτικότητα του φυσικού αερίου σε μεθάνιο και τα υπόλοιπα συστατικά του.

Η ύπαρξη του σωλήνα εισαγωγής φυσικού αερίου μέσα στον σχετό εισαγωγής του κινητήρα οδηγεί σε ελάχιστη μείωση της ογκομετρικής απόδοσης του κινητήρα (1% - 4%). Επίσης, ενώ στα

υψηλά φορτία η απόδοση του κινητήρα με μεικτή καύση είναι παραπλήσια με την συμβατική καύση μόνο πετρελαίου, στα χαμηλά και μεσαία φορτία δεν συμβαίνει αυτό. Αυτή η μειωμένη απόδοση οφείλεται στην αποτυχία του πιλοτικού καυσίμου να αναφλέξει πλήρως την συνολική ποσότητα του μίγματος αέρα – φυσικού αερίου οδηγώντας τελικά σε αύξηση των εκπεμπόμενων μονοξειδίων του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων. Η χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία σε συνθήκες χαμηλού φορτίου είναι που οδηγούν σε αυτή την αποτυχία. Για την βελτίωση της συγκεκριμένης κατάστασης γίνεται χρήση συστήματος ανακυκλοφορίας καυσαερίων (EGR) όπου με ανακυκλοφορία περίπου 5% ζεστών καυσαερίων επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση στην απόδοση του κινητήρα παρά την περεταίρω μείωση της ογκομετρικής απόδοσης που υφίσταται ο κινητήρας λόγω EGR. Η αύξηση στην απόδοση πραγματοποιείται λόγω της υψηλότερης πίεσης και θερμοκρασίας που δημιουργείται στον θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη καύση του συνόλου του μίγματος αέρα – φυσικού αερίου. Επίσης, στα υψηλά φορτία, το σύστημα EGR μειώνει την κρουστική καύση καθώς μειώνει την συγκέντρωση οξυγόνου στο καύσιμο μίγμα και καθυστερεί την καύση. Και στις δύο περιπτώσεις το σύστημα EGR βελτιώνει τις συνθήκες μεικτής καύσης καθώς αυξάνει την θερμοκρασία του μίγματος (όφελος στις χαμηλές στροφές) αλλά μειώνει και την περιεκτικότητα του μίγματος σε οξυγόνο (όφελος στις υψηλές στροφές).

Όσον αφορά τους εκπεμπόμενους ρύπους, οι κινητήρες αυτανάφλεξης διπλού καυσίμου πετυχαίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων είναι ένας από τους βασικότερους λόγους που αναπτύχθηκαν οι τεχνολογίες μεικτής καύσης. Σε εφαρμογές όπου γίνεται χρήση της τεχνολογίας που αναφέρουμε, επιτυγχάνονται μειώσεις οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) μέχρι και 50% σε χαμηλά φορτία και σχεδόν εξάλειψη της κάπνας και των μικροσωματιδίων. Πιο αναλυτικά, η μείωση των  $\text{NO}_x$  που επιτυγχάνεται στα χαμηλά φορτία είναι σημαντική και οφείλεται ουσιαστικά στις χαμηλές θερμοκρασίες καύσης που επικρατούν. Ακόμα, η ποσότητα των εκπεμπόμενων  $\text{NO}_x$  εξαρτάται και από την ποσότητα πιλοτικού καυσίμου που εγχέεται καθώς κατά την πρώτη καύση του πιλοτικού καυσίμου είναι που αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες ενώ στην συνέχεια η καύση του φυσικού αερίου γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Η κάπνα και τα εκπεμπόμενα σωματίδια εξαρτώνται επίσης κατά κύριο λόγο από το πιλοτικό καύσιμο καθώς το πετρέλαιο είναι αυτό που δημιουργεί αυτούς τους ρύπους. Από την άλλη, το φυσικό αέριο μειώνει ακόμα περισσότερο αυτούς τους ρύπους όχι μόνο επειδή δεν τους παράγει αλλά επειδή με την καύση του, η οποία ακολουθεί αυτή του πιλοτικού καυσίμου, καεί αυτούς τους ρύπους και τους μειώνει ακόμα περισσότερο.

Σε συνθήκες όμως μερικού φορτίου, όπως αναφέραμε και παραπάνω, το φυσικό αέριο δεν καταφέρνει να καεί πλήρως παράγοντας έτσι αρκετά μεγαλύτερη ποσότητα άκαυστων υδρογονανθράκων καθώς και μονοξειδίου του άνθρακα σε σύγκριση με την καύση μόνο πετρελαίου. Το πρόβλημα αυτό επίσης διορθώνεται με την χρήση συστημάτων EGR καταφέροντας να μειώσει αρκετά τις συγκεκριμένες εκπομπές φτάνοντας σε επίπεδα συμβατικού κινητήρα αυτανάφλεξης.

Μια τεχνική η οποία εξετάζεται ως προς τις δυνατότητες βελτίωσης της μεικτής καύσης είναι αυτή της χρησιμοποίησης εναλλακτικών καυσίμων για την πιλοτική έναυση του φυσικού αερίου. Τέτοιου είδους καύσιμα εννοείται πως πρέπει να έχουν αντίστοιχα υψηλό αριθμό κετανίου με το πετρέλαιο αλλά να είναι και βιώσιμα καύσιμα σε αντίθεση με το πετρέλαιο. Γενικά, η χρήση biodiesel ως πιλοτικό καύσιμο επιτυγχάνει σε αρκετά μεγάλο ποσοστό τα ίδια αποτελέσματα με το πετρέλαιο με το πλεονέκτημα όμως ότι το biodiesel χαρακτηρίζεται ως ανανεώσιμο καύσιμο. Ανάλογα με την προέλευση του biodiesel παρατηρούνται μικρές διαφορές. Σε γενικές όμως γραμμές, λόγω της ύπαρξης ποσότητας οξυγόνου στα βιοκαύσιμα, στην μεικτή καύση παρατηρείται μικρή αύξηση των οξειδίων του αζώτου αλλά παράλληλα μείωση των άκαυστων υδρογονανθράκων. Ένας επιπλέον τρόπος βελτίωσης της καύσης και μείωσης των εκπομπών ρύπων είναι η χρήση νερού στο πιλοτικό καύσιμο. Αναμειγνύοντας ένα πολύ μικρό ποσοστό νερού (περίπου 5%) στο πιλοτικό καύσιμο επιτυγχάνεται περεταίρω μείωση των ρύπων.

Η άλλη τεχνολογία που αναπτύσσεται τελευταία είναι αυτή της πιλοτικής έγχυσης πετρελαίου και έγχυσης φυσικού αερίου σε υψηλή πίεση. Ουσιαστικά η έγχυση του φυσικού αερίου γίνεται απευθείας μέσα στον κύλινδρο έχοντας ευεργετικά αποτελέσματα για την μεικτή καύση πετρελαίου – φυσικού αερίου. Το όφελος από την έγχυση του καυσίμου σε υψηλή πίεση γίνεται αντιληπτό ακόμα και σε έναν συμβατικό κινητήρα όπου σε περίπτωση έγχυσης πετρελαίου σε υψηλότερη πίεση επιτυγχάνεται καλύτερος διασκορπισμός του καυσίμου και κατά συνέπεια πιο ολοκληρωμένη καύση.

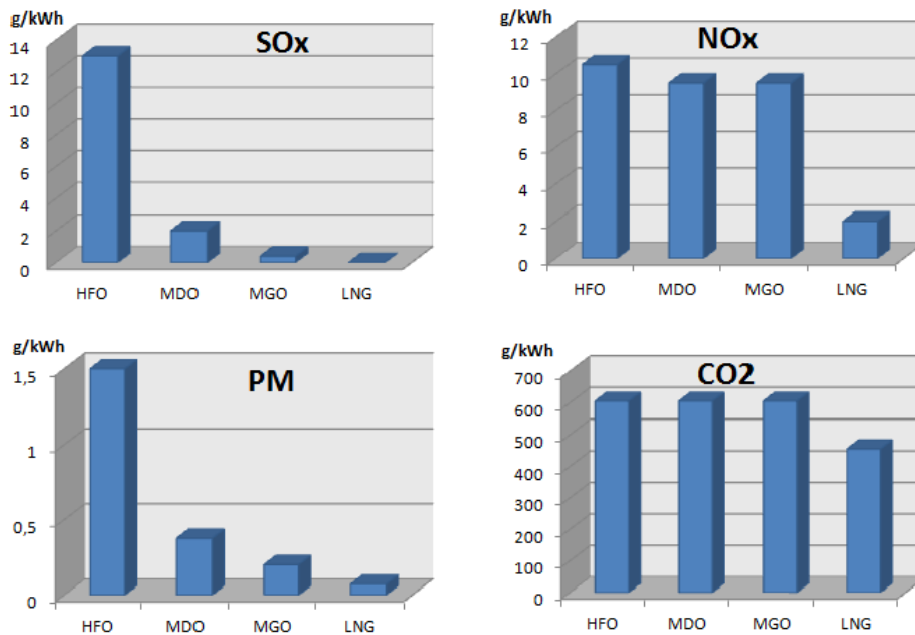
Αντίστοιχα αυξάνοντας την πίεσης έγχυσης και στο πιλοτικό καύσιμο και στο φυσικό αέριο επιτυγχάνεται καλύτερος διασκορπισμός του καυσίμου οδηγώντας σε μείωση του χρόνου καθυστέρησης καύσης και γενικά σε μειωμένο χρόνο καύσης. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου παρουσιάζουν μια μικρή σχετικά αύξηση σε σχέση με την προηγούμενη τεχνολογία που αναφέραμε, αλλά οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες και μονοξείδια του άνθρακα παρουσιάζουν σχετική μείωση όπως το ίδιο συμβαίνει και με τα μικροσωματίδια. Ο σχηματισμός αυτών των ρύπων οφείλεται στην ύπαρξη περιοχών πολύ πλούσιου ή πολύ φτωχού μείγματος που οδηγούν σε ατελή καύση, κάτι το οποίο όμως δεν συμβαίνει σε τόσο μεγάλο βαθμό όταν πραγματοποιείται έγχυση του διπλού καυσίμου σε πολύ υψηλές πιέσεις. Ακόμη, ο θερμικός βαθμός απόδοσης δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την μεταβολή της πίεσης έγχυσης. Στις χαμηλές ταχύτητες περιστροφής, η υψηλή πίεση έγχυσης του καυσίμου, έχει ευεργετικότερα αποτελέσματα από ότι στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Αυτό συμβαίνει γιατί με την αυξημένη πίεση έγχυσης αυξάνονται και οι αναταράξεις του μίγματος μέσα στον κύλινδρο και επιτυγχάνεται ο καλύτερος διασκορπισμός του καυσίμου μίγματος. Αν και στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής αυτές οι αναταράξεις είναι εγγενώς αυξημένες λόγω της κίνησης του εμβόλου, η αυξημένη πίεση έγχυσης έχει επίσης θετικά αποτελέσματα.

### **3.3 Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της λειτουργίας κινητήρα Diesel υπό συνθήκες μεικτής καύσης σε σχέση με την κλασσική λειτουργία κινητήρα Diesel.**

Η μεγάλη ανάπτυξη των τεχνολογιών μεικτής καύσης παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αυτά εξαρτώνται και σε μεγάλο βαθμό από το είδος της εφαρμογής, τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς και τα οικονομικά κριτήρια της κάθε εφαρμογής. Το γενικό συμπέρασμα, μετά από πλήθος ερευνών και υπολογισμών, είναι ότι η μεικτή καύση πετρελαίου φυσικού αερίου είναι το μέλλον στις μηχανές εσωτερικής καύσης μέχρι να επιτευχθεί η ολοκληρωτική επικράτηση του ηλεκτρισμού για όλες τις εφαρμογές.

Ένα από τα δύο πιο σημαντικά πλεονεκτήματα χρήσης κινητήρων διπλού καυσίμου πετρελαίου-φυσικού αερίου έναντι ενός συμβατικού κινητήρα πετρελαίου είναι τα περιβαλλοντικά οφέλη. Οι εκπομπές ρύπων και διοξειδίου του άνθρακα είναι σε ορισμένες περιπτώσεις αρκετά λιγότερες όταν πραγματοποιείται μεικτή καύση πετρελαίου - φυσικού αερίου. Πιο συγκεκριμένα, το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να μειωθεί μέχρι και 30 % ενώ τα οξείδια του αζώτου παρουσιάζουν μεγαλύτερη μείωση την στιγμή που τα οξείδια του θείου και τα μικροσωματίδια σχεδόν εξαλείφονται. Αυτές οι σημαντικές μειώσεις ρύπων παίζουν καθοριστικό ρόλο στην βελτίωση του ατμοσφαιρικού αέρα και ακόμα περισσότερο στην προστασία της υγείας του ανθρώπου.

Στον τομέα της ναυτιλίας, οι μειωμένες εκπομπές ρύπων που προσφέρει η μεικτή καύση παίζουν ακόμα πιο καθοριστικό ρόλο. Με την μεικτή καύση πετρελαίου – φυσικού αερίου επιτυγχάνεται η εναρμόνιση με τα μελλοντικά πρότυπα ρύπων καθώς ακόμα και με αυτά που είναι υπό συζήτηση. Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε την χαρακτηριστική μείωση εκπομπών που επιτυγχάνεται με την καύση υγροποιημένου φυσικού αερίου σε ναυτικούς κινητήρες. Τις μεγαλύτερες εκπομπές SO<sub>x</sub> και PM τις παρατηρούμε με καύσης βαριού πετρελαίου (HFO-Heavy Fuel Oil). Η συγκεκριμένες εκπομπές παρουσιάζουν μεγάλη μείωση με χρήση ναυτικού πετρελαίου (MDO-Marine Diesel Oil) και ναυτικού πετρελαίου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (MGO-Marine Gas Oil). Με το LNG όμως παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη μείωση στους συγκεκριμένους ρύπους καθώς επίσης και στα εκπεμπόμενα NO<sub>x</sub> και CO<sub>2</sub>.

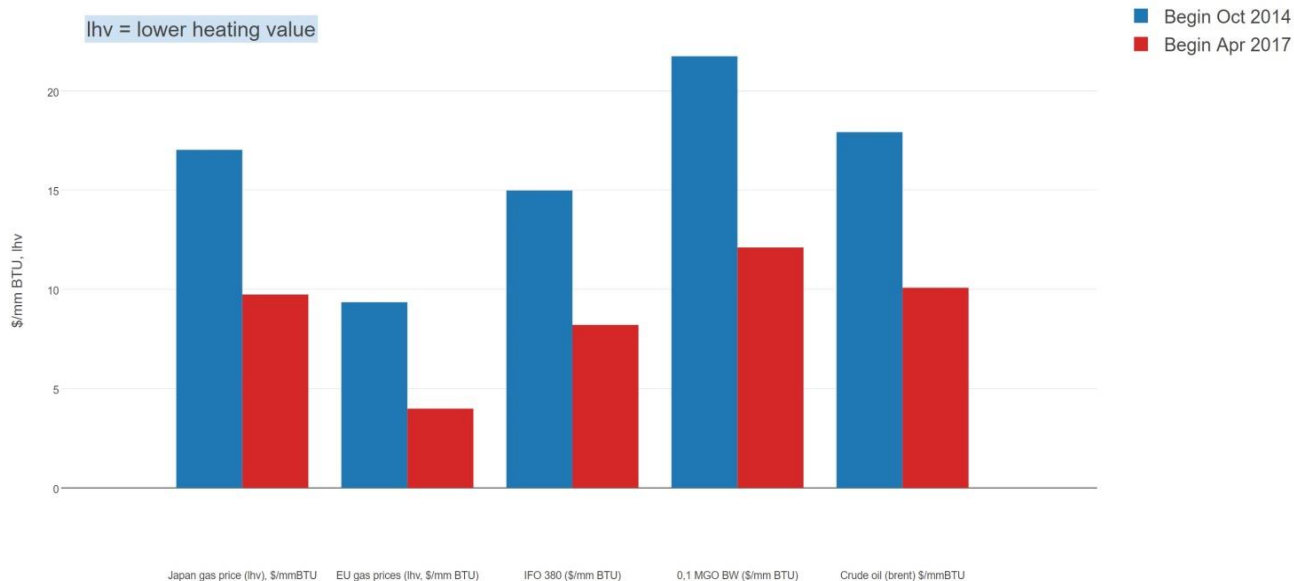


*Εικόνα 3.3: Σύγκριση εκπομπών ρύπων για διάφορους τύπους καυσίμου*

Το δεύτερο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης φυσικού αερίου σαν καύσιμο σε κινητήρες αυτανάφλεξης είναι το μειωμένο κόστος του σε σχέση με το πετρέλαιο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο αλλά ακόμα και με το βαρύ υπολειμματικό πετρέλαιο. Η σύγκριση αυτή βέβαια γίνεται πάντα με βάση το ενεργειακό περιεχόμενο του κάθε καυσίμου και όχι με την μάζα του καυσίμου. Στην βόρειο Αμερική παρατηρούνται οι χαμηλότερες τιμές υγροποιημένου φυσικού αερίου το οποίο παράγεται από σχιστόλιθους. Κάποια σίγουρη μελλοντική πρόβλεψη για τις τιμές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου δεν μπορεί να γίνει αλλά λόγω του ότι τα αποθέματα φυσικού αερίου είναι μεγαλύτερα από τα αποθέματα πετρελαίου η διαφοροποίηση στις τιμές δεν μπορεί να είναι σημαντική αλλά ακόμα και αν είναι, το φυσικό αέριο κατά πάσα πιθανότητα θα συνεχίσει να είναι φθηνότερο από το πετρέλαιο.



Gas and Oil prices begin of Oct 2014 and beginning of April 2017 (Gas: no liquefaction and distribution included)



Εικόνα 3.4: Σύγκριση τιμών φυσικού αερίου με πετρέλαιο διαφορετικών περιεκτικότητων σε θείο.

Παραμένοντας στον οικονομικό τομέα, η συντήρηση ενός κινητήρα μεικτής καύσης που καίει επί το πλείστον φυσικό αέριο είναι οικονομικότερη από το να έκαιγε μόνο πετρέλαιο. Ο λόγος είναι ότι τα κινούμενα μέρη και γενικά ο κινητήρας, καίγοντας φυσικό αέριο, δεν υποφέρει από καρβουνοποίηση και δεν χρειάζεται τόσο συχνό καθαρισμό και συντήρηση. Ακόμα, σε περίπτωση που οι πηγές φυσικού αερίου είναι κοντά σε λιμάνια διευκολύνεται ο ανεφοδιασμός τους κάνοντας το φυσικό αέριο ακόμα πιο οικονομικό καύσιμο σε σχέση με τα κόστη μεταφοράς του πετρελαίου.

Ακόμη, η μεικτή καύση φυσικού αερίου και πετρελαίου δεν επιδρά αρνητικά στην απόδοση του κινητήρα και επιπλέον δεν γίνεται αισθητή η μετάβαση από το ένα καύσιμο στο άλλο. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί ένας κινητήρας να καίει επί το πλείστον φυσικό αέριο αλλά σε περίπτωση που το φυσικό αέριο τελειώσει ο κινητήρας συνεχίζει να δουλεύει καίγοντας πετρέλαιο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεγαλύτερη αυτονομία και άρα δίνεται η δυνατότητα για λιγότερους ανεφοδιασμούς επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση χρόνου.

Από την άλλη μεριά υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που δεν επιτρέπουν ακόμα την καθολική εφαρμογή της μεικτής καύσης φυσικού αερίου σε κινητήρες αυτανάφλεξης. Ο πρώτος και πιο σημαντικός παράγοντας είναι το κόστος κατασκευής ενός τέτοιου κινητήρα ή το κόστος μετατροπής υπάρχοντος κινητήρα μονού καυσίμου σε κινητήρα διπλού καυσίμου. Υπολογίζεται ότι το κόστος κατασκευής ενός κινητήρα μεικτής καύσης είναι έως και 25% μεγαλύτερο συγκριτικά με έναν συμβατικό κινητήρα. Στην περίπτωση τροποποίησης το κόστος ανεβαίνει ακόμα περισσότερο καθιστώντας ίσως πιο συμφέρουσα την αγορά νέου κινητήρα. Παρόλα αυτά, το κόστος κατασκευής

κινητήρα μεικτής καύσης ή τροποποίησης του, με το πέρασμα τον χρόνων και την πρόοδο της τεχνολογίας, θα μειωθεί αρκετά και δεν θα είναι πλέον ανασταλτικός παράγοντας.

Άλλος ένας ανασταλτικός παράγοντας όσον αφορά την καθολική εφαρμογή της μεικτής καύσης είναι η απαίτηση περισσότερου χώρου για τις δεξαμενές υγροποιημένου φυσικού αερίου και ακόμα περισσότερου χώρου για δεξαμενές συμπιεσμένου φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο σε υγροποιημένη μορφή καταλαμβάνει τον λιγότερο δυνατό όγκο. Παρόλα αυτά, το πετρέλαιο έχει κατά 60% καλύτερη ενεργειακή πυκνότητα. Για το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο, το υγροποιημένο φυσικό αέριο απαιτείται 1,6 φορές μεγαλύτερη δεξαμενή. Σε συνδυασμό όμως και με τα παρελκόμενα που απαιτούνται για την καύση υγροποιημένου φυσικού αερίου ο όγκος που καταλαμβάνει μια εγκατάσταση μεικτής καύσης είναι κατά 2,5 με 4 φορές μεγαλύτερος

**ENERGY DENSITY RATIO FOR MGO AND LNG**

Fuel	Lower Heating Value MJ/kg	Density kg/m <sup>3</sup>	Energy Density MJ/m <sup>3</sup>
MGO	42,6	836	35.614
LNG	48,6	440	21.384
- LNG/MGO energy density ratio for given volume = 1,6			

*Πίνακας 3.1: Σύγκριση ενεργειακής πυκνότητας καυσίμων*

Το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου, όπως γνωρίζουμε, είναι το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>). Το μεθάνιο είναι και αυτό αέριο του θερμοκηπίου και μάλιστα πολύ πιο δραστικό από το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Πιο συγκεκριμένα, ένα κιλό μεθανίου αντιστοιχεί σε 25 περίπου κιλά διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό σημαίνει πως μια ενδεχόμενη διαρροή φυσικού αερίου και κατά συνέπεια μεθανίου θα έχει καταστροφικές συνέπειες με επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Αυτός είναι άλλος ένας παράγοντας για τον οποίο η εφαρμογή μεικτής καύσης πετρελαίου - φυσικού αερίου αντιμετωπίζεται με σκεπτικισμό.

Η διαρροή μεθανίου μπορεί να συμβεί είτε κατά την διάρκεια της καύσης είτε και κατά την διάρκεια εξόρυξης του φυσικού αερίου ή και κατά την μεταφορά του και τον ανεφοδιασμό του. Τα μέτρα ασφαλείας είναι υψηλά έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες ατυχήματος και κατά συνέπεια διαρροής του φυσικού αερίου. Παρόλα αυτά, κατά την εξόρυξη, μεταφορά, ανεφοδιασμό και καύση του φυσικού αερίου είναι αδύνατο να μην υπάρχει διαρροή μεθανίου και αυτό οφείλεται και στο φαινόμενο της εξάτμισης του υγροποιημένου φυσικού αερίου. Σύμφωνα με έρευνες όμως, οι ποσότητες μεθανίου που διαρρέουν δεν υπερνικούν το κέρδος σε διοξείδιο του άνθρακα που πραγματοποιείται κατά την μεικτή καύση πετρελαίου – φυσικού αερίου. Αν σε αυτό προσθέσουμε και το γεγονός ότι για την παραγωγή πετρελαίου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο απαιτούνται επιπλέον ενεργοβόρες διεργασίες στα διυλιστήρια οι οποίες απελευθερώνουν 1 - 2% παραπάνω διοξείδιο του άνθρακα τότε τα οφέλη από την χρήση φυσικού αερίου είναι ακόμα μεγαλύτερα. Με

την εξέλιξη της τεχνολογίας η επεξεργασία, η μεταφορά, ο ανεφοδιασμός και η καύση του φυσικού αερίου θα απελευθερώνουν ακόμα λιγότερες ποσότητες μεθανίου.

Τέλος, ένας παράγοντας ο οποίος δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως μειονέκτημα της μεικτής καύσης αλλά σαν πρόκληση για βελτίωση, είναι αυτός των λιπαντικών των κινητήρων. Η καύση δύο διαφορετικών καυσίμων στον ίδιο θάλαμο καύσης δημιουργεί δυσκολία στην επιλογή του καταλληλότερου λιπαντικού. Αυτό γιατί το κάθε καύσιμο έχει διαφορετικές λιπαντικές ιδιότητες και το κάθε λιπαντικό απάγει διαφορετικά την θερμότητα από τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Έτσι, όταν ένα λιπαντικό είναι κατάλληλο για το πετρέλαιο δεν είναι αντίστοιχα κατάλληλο για το φυσικό αέριο καθώς δεν θα μπορεί να απάγει όσο χρειάζεται την αυξημένη θερμοκρασία οδηγώντας σε ακόμα υψηλότερες θερμοκρασίες και κρουστική καύση. Ενώ ένα λιπαντικό κατάλληλο για φυσικό αέριο δεν θα μπορεί να βρεθεί σε θερμοκρασία λειτουργίας με αποτέλεσμα την μην αποτελεσματική λίπανση του κινητήρα. Ακόμη, προσοχή πρέπει να δοθεί και στις προδιαγραφές των καυσίμων και ειδικά του φυσικού αερίου καθώς οι περιεκτικότητες του έχουν μεγάλες διακυμάνσεις από περιοχή με περιοχή και αυτό μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στον ίδιο τον κινητήρα.

### **3.4 Εφαρμογές της Μεικτής Καύσης στην αυτοκίνηση και στην ναυτιλία.**

Η μεικτή καύση είναι αντικείμενο μελέτης και εξέλιξης μεγάλων κατασκευαστών κινητήρων σε όλο τον κόσμο. Ενδεικτικά μερικές από τις μεγαλύτερες κατασκευάστριες εταιρίες κινητήρων μεικτής καύσης είναι οι Caterpillar, Cummins, Iveco, Hyundai, Kubota, Man Turbo & Diesel, Yanmar και φυσικά η Φιλανδική Wärtsilä που είναι πρωτοπόρος στον τομέα της μεικτής καύσης ναυτικών κινητήρων diesel. Πολλές εταιρίες, ακόμα και αν δεν κατασκευάζουν κινητήρες μεικτής καύσης, αναπτύσσουν τεχνολογίες και εξαρτήματα τα οποία αφού τοποθετηθούν σε ένα συμβατικό κινητήρα diesel τον μετατρέπουν σε κινητήρα μεικτής καύσης.

Ξεκινώντας από τον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας, οι εφαρμογές είναι σχετικά περιορισμένες. Στην κατηγορία των επιβατικών και ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων, μεικτή καύση εφαρμόζεται κυρίως σε κινητήρες σπινθηρισμού. Πιο συγκεκριμένα, οι μεγάλοι κατασκευαστές αυτοκινήτων προσφέρουν περιορισμένες επιλογές σε κινητήρες διπλού καυσίμου οι οποίοι βασίζονται στον κύκλο του Otto. Η αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων κινητήρων είναι ίδια με αυτή της καύσης βενζίνης μόνο που η βενζίνη χρησιμοποιείται μόνο κατά την εκκίνηση του κινητήρα ή όταν τελειώσει το φυσικό αέριο. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις διακόπτεται η παροχή βενζίνης και εγχέετε μόνο φυσικό αέριο, κάτι το οποίο ουσιαστικά δεν χαρακτηρίζεται ως μεικτή καύση αλλά επιλεκτική καύση ενός εκ των δύο καυσίμων. Εταιρίες που αναπτύσσουν τεχνολογίες μεικτής καύσης παρέχουν πακέτα τροποποίησης τα οποία μετατρέπουν τους υπάρχοντες βενζινοκινητήρες και πετρελαιοκινητήρες σε κινητήρες μεικτής καύσης. Κυρίαρχος στόχος των συγκεκριμένων πακέτων είναι η εξοικονόμηση χρημάτων για τον χρήστη του οχήματος και έμμεσα επέρχεται και η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.



*Εικόνα 3.5: Εφαρμογή καύσης CNG σε κινητήρα σπινθηρισμού*

Στον τομέα των χερσαίων μεταφορών η χρήση κινητήρων αυτανάφλεξης μεικτής καύσης παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Για τα οχήματα βαρέως τύπου υπάρχουν κατασκευαστές που διαθέτουν κινητήρες μεικτής καύσης αλλά και εταιρίες οι οποίες παρέχουν αντίστοιχα πακέτα τροποποίησης συμβατικών κινητήρων σε κινητήρες μεικτής καύσης. Η αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων κινητήρων είναι αντίστοιχη με αυτή που αναφέραμε και παραπάνω όπου την έγχυση φυσική αερίου ακολουθεί η πιλοτική έγχυση μικρής ποσότητας πετρελαίου. Αυτό που δεν είναι δεδομένο είναι ο τρόπος αποθήκευσης του φυσικού αερίου στα οχήματα βαρέως τύπου. Υπάρχουν δύο επιλογές, η αποθήκευση του ως συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) και η αποθήκευση του ως υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG).

Η κάθε μία από τις παραπάνω επιλογές έχει και τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η τελική απόφαση κρίνεται κατά κύριο λόγο από τα προγραμματισμένα δρομολόγια και την συνολική τους απόσταση αλλά και από το πόσο σημαντική είναι η εξοικονόμηση βάρους. Οι δεξαμενές αποθήκευσης CNG παρουσιάζουν το μειονέκτημα του μεγάλου βάρους και αυξημένου κόστους καθώς πρέπει να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές για να αντέχουν τις μεγάλες πιέσεις, σε αντίθεση με τις δεξαμενές LNG οι οποίες δεν χρειάζεται να είναι τόσο ανθεκτικές αλλά να είναι καλά μονωμένες. Ακόμη, λόγω των υψηλών πιέσεων στις δεξαμενές CNG παρατηρείται το φαινόμενο της θερμικής διαστολής του φυσικού αερίου, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι κατά τον ταχύ ανεφοδιασμό της δεξαμενής ή τις ημέρες με υψηλές θερμοκρασίες, η θερμοκρασία του αερίου είναι αυξημένη με αποτέλεσμα να καταλαμβάνει ακόμα μεγαλύτερο όγκο. Για το λόγο αυτό οι κατασκευαστές υπερ-διαστασιολογούν τις δεξαμενές CNG για να αντισταθμίσουν αυτό το φαινόμενο. Από την άλλη, το CNG έχει

χαμηλότερη τιμή από το LNG καθώς δεν απαιτεί τις τόσο ενεργοβόρες διεργασίες για να υγροποιηθεί και έτσι αντισταθμίζεται εν μέρη το αυξημένο κόστος των δεξαμενών CNG. Με βάση τα παραπάνω, συστήματα μεικτής καύσης με δεξαμενές CNG εφαρμόζονται για οχήματα βαρέως τύπου τα οποία κάνουν μικρές διαδρομές και δεν επηρεάζονται από το επιπλέον βάρος. Σε περιπτώσεις όμως που απαιτείται πραγματοποίηση μεγάλων αποστάσεων αλλά και το επιπλέον βάρος παίζει σημαντικό ρόλο τότε επιλέγονται συστήματα μεικτής καύσης με δεξαμενές LNG. Για τον συγκεκριμένο λόγο επιλέγεται η χρήση συστημάτων μεικτής καύσης με υγροποιημένο φυσικό αέριο και στον τομέα της ναυτιλίας, όπου το βάρος παίζει καθοριστικό ρόλο και η ανάγκη για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων είναι δεδομένη.



*Εικόνα 3.6: Δεξαμενές CNG σε όχημα βαρέως τύπου*



*Εικόνα 3.7: Δεξαμενή LNG σε όχημα βαρέως τύπου*

Ο τομέας στον οποία πραγματοποιείται ραγδαία ανάπτυξη των κινητήρων μεικτής καύσης είναι αυτός της ναυτιλίας. Ο τρόπος λειτουργίας των συγκεκριμένων κινητήρων αναφέρθηκε παραπάνω και θα αναλυθεί και σε επόμενο κεφάλαιο. Η χρήση κινητήρων μεικτής καύσης πετρελαίου - φυσικού αερίου άρχισε να πραγματοποιείται στα μεγάλα εμπορικά πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNGC- Liquefied Natural Gas Carrier). Ο λόγος ήταν το φαινόμενο της εξάτμισης του υγροποιημένου φυσικού αερίου. Το LNG διατηρείται σε

θερμοκρασίας  $-162^{\circ}\text{C}$  υπό ατμοσφαιρική πίεση. Από την επιφάνεια όμως του υγροποιημένου φυσικού αερίου λόγω του φαινομένου της εξάτμισης μια σημαντική ποσότητα φυσικού αερίου, περίπου 0,1%, εξατμίζεται κάθε μέρα. Με βάση τον συνολικό όγκο του μεταφερόμενου LNG, η ποσότητα του εξατμιζόμενου φυσικού αερίου ήταν αρκετά σημαντική και υπολογίσιμη. Αν θεωρήσουμε ότι ένα σχετικά μικρό LNGC μεταφέρει  $70000\text{m}^3$  υγροποιημένου φυσικού αερίου, τότε το 0,1% εξάτμισης της μέρα αντιστοιχεί σε  $70\text{m}^3$  την μέρα. Και επειδή ένα κυβικό μέτρο υγροποιημένου φυσικού αερίου αντιστοιχεί σε  $600\text{m}^3$  φυσικού αερίου τότε εξατμίζονταν  $48000\text{m}^3$  φυσικού αερίου την ημέρα. Αυτή η ποσότητα δεν επιτρεπόταν να διαφύγει στην ατμόσφαιρα λόγω των καταστροφικών συνεπειών του μεθανίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Άρα υπήρχαν τρεις επιλογές, η καύση του, η επανα-υγροποίηση του ή η καύση του στους κινητήρες του πλοίου. Όπως είναι λογικό, αναπτύχθηκαν τεχνολογίες που σκοπό είχαν την καύση του φυσικού αερίου στους ναυτικούς κινητήρες diesel.

Στην συνέχεια, λόγω και των όλο και αυστηρότερων κανονισμών εκπομπής ρύπων από τους ναυτικούς κινητήρες, η μεικτή καύση άρχισε να εφαρμόζεται σε όλο και περισσότερους τύπους πλοίων. Πλέον, υπάρχει μεγάλη γκάμα κινητήρων μεικτής καύσης η οποία καλύπτει μεγάλο εύρος εφαρμογών, από μικρά οχηματαγωγά πλοία μέχρι τα τελευταία τεχνολογίας και τεράστια σε διαστάσεις εμπορικά πλοία. Η πλειοψηφία όμως των εμπορικών και επιβατικών πλοίων διαθέτει συμβατικούς κινητήρες αυτανάφλεξης οι οποίοι σε αρκετές περιπτώσεις ήδη δεν πληρούν τις προδιαγραφές εκπομπής ρύπων στις περιοχές ECA, περιοχές ελεγχόμενων εκπομπών. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης του παλιού κινητήρα με κάποιον νέας τεχνολογίας μεικτής καύσης αλλά και η δυνατότητα τροποποίησης του σε κινητήρα μεικτής καύσης. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα, η Caterpillar, ανέπτυξε ένα πακέτο τροποποίησης των παλιών και συμβατικών τους κινητήρων σε κινητήρες μεικτής καύσης, χωρίς να απαιτείται η απεγκατάσταση του κινητήρα και επανατοποθέτηση του. Αντίστοιχα πακέτα τροποποίησης έχουν αναπτύξει και οι υπόλοιπες εταιρίες που ασχολούνται με την κατασκευή κινητήρων μεικτής καύσης.

Οι ναυτικοί κινητήρες μεικτής καύσης εκτός από εφαρμογή σε πλοία βρίσκουν εφαρμογή και σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο μεγάλος βαθμός απόδοσης, των δίχρονων κινητήρων αυτανάφλεξης, αλλά και οι μειωμένες εκπομπές ρύπων τους καθιστά αντικαταστάτες των παλιών, ρυπογόνων και ενεργοβόρων κινητήρων πετρέλαιο που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

#### 4.1 Κανονισμοί και νομοθεσία (Ευρωπαϊκή και Ελληνική) που ελέγχουν τα επίπεδα εκπομπής ρύπων από κινητήρες Diesel στην αυτοκίνηση

##### 4.1.1 Εισαγωγή

Εν έτη 2017 η χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε πλήθος εφαρμογών είναι δεδομένη και με την πάροδο των χρόνων γίνεται όλο και περισσότερο επιβεβλημένη. Παρόλα αυτά, η χρήση υδρογονανθράκων και η καύση τους για παραγωγή ενέργειας είναι και θα είναι για αρκετά ακόμα χρόνια αναγκαία. Πιο συγκεκριμένα, μεγάλη χρήση καυσίμων έχουμε στον βιομηχανικό, στον οικιακό και στον τομέα των μεταφορών. Η καύση αυτών των καυσίμων οδηγεί σε εκπομπές καυσαερίων τα οποία περιλαμβάνουν ρύπους όπως οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες, τα σωματίδια άνθρακα, το οξειδία του άνθρακα, του αζώτου και του θείου και διάφορες άλλες μικροποσότητες τοξικών αερίων με αποτέλεσμα το σύνολο αυτών των ρύπων να δημιουργεί προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου και στο περιβάλλον. Σε μια Ευρώπη όπου η ανάπτυξη δεν γνωρίζει σύνορα, βιομηχανικές περιοχές βρίσκονται σε όλο το μήκος και πλάτος της και μετακινήσεις πολιτών και εμπορευμάτων γίνεται διαμέσου όλων των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η από κοινού θέσπιση μέτρων για την αντιμετώπιση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και των αρνητικών συνθηκών που δημιουργούνται για τον άνθρωπο. Τέτοια μέτρα και συμφωνίες άρχισαν να εφαρμόζονται πριν από τουλάχιστον μισό αιώνα και με το πέρασμα των χρόνων τα μέτρα αυτά εκσυγχρονίζονταν και γίνονταν όλο και πιο αυστηρά.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τα θέματα που αφορούν την περιβαλλοντική και όχι μόνο νομοθεσία έχουν θεσπιστεί συμβούλια και επιτροπές τα οποία αναλαμβάνουν την πρόταση, την νομοθέτηση, την εφαρμογή και την επίβλεψη των μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος. Οι αρχές που είναι υπεύθυνες για τα παραπάνω είναι:

- Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο

Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο καθορίζει τις γενικές πολιτικές κατευθύνσεις και προτεραιότητες της ΕΕ. Δεν είναι νομοθετικό θεσμικό όργανο της ΕΕ, δηλαδή δεν διαπραγματεύεται ούτε εκδίδει τους νόμους της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αντί αυτού, καθορίζει το πολιτικό θεματολόγιο της ΕΕ, εγκρίνοντας κατά κανόνα «συμπεράσματα» κατά τις συνόδους του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου, στα οποία προσδιορίζονται ζητήματα άμεσου ενδιαφέροντος και δράσεις προς ανάληψη. Μέλη του

Ευρωπαϊκού Συμβουλίου είναι οι αρχηγοί κρατών και κυβερνήσεων των 28 κρατών μελών της ΕΕ, ο Πρόεδρος του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου και ο Πρόεδρος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

- Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, αναφέρεται συχνά ως Κομισιόν, είναι το εκτελεστικό όργανο της Ευρωπαϊκής Ένωσης και προωθεί το γενικό της συμφέρον. Προτείνει νέες ευρωπαϊκές νομοθετικές πράξεις, τις οποίες υποβάλλει στο Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αποτελεί συγχρόνως εκτελεστικό όργανο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αρμόδιο για την εφαρμογή των κοινών πολιτικών και την εξασφάλιση της εφαρμογής της ευρωπαϊκής νομοθεσίας, ενώ παράλληλα διαχειρίζεται τα προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθώς και τον οικονομικό προϋπολογισμό της.

- Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο είναι το νομοθετικό σώμα της ΕΕ. Εκλέγεται άμεσα από τους πολίτες της ΕΕ κάθε 5 χρόνια. Έχει τρεις κύριες αρμοδιότητες. Νομοθετικές αρμοδιότητες όπως, να εγκρίνει νομοθετικές πράξεις της ΕΕ, να αποφασίζει για διεθνείς συμφωνίες, να αποφασίζει για θέματα διεύρυνσης, να εξετάζει το πρόγραμμα εργασίας της Επιτροπής και να της ζητά να υποβάλλει νομοθετικές προτάσεις. Ακόμα έχει εποπτικές και δημοσιονομικές αρμοδιότητες.

- Το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης:

Στο Συμβούλιο, συνεδριάζουν οι υπουργοί όλων των κρατών μελών της ΕΕ για να συζητήσουν, να τροποποιήσουν και να θεσπίσουν νομοθετικές πράξεις και να συντονίσουν πολιτικές. Οι υπουργοί έχουν την εξουσία να δεσμεύουν τις κυβερνήσεις τους να αναλάβουν τις δράσεις που συμφωνήθηκαν στις συνεδριάσεις. Το Συμβούλιο, από κοινού με το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, είναι το βασικό όργανο λήψης αποφάσεων της ΕΕ και ασκεί νομοθετική και δημοσιονομική εξουσία σε συνεργασία με το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο.

Τα παραπάνω θεσμικά όργανα ορίζουν τους κανονισμούς (Regulations), τις αποφάσεις (Decisions) και τις οδηγίες (Directives). Οι Κανονισμοί έχουν άμεση ισχύ και υπάρχει απαίτηση για ομοιογενή εφαρμογή στο σύνολο της Ευρώπης. Οι Αποφάσεις έχουν άμεση ισχύ αλλά μεμονωμένη εφαρμογή και δυνατότητα για διορθωτικές κινήσεις. Οι Οδηγίες είναι ένα μέσο στήριξης της ενιαίας Ευρωπαϊκής αγοράς, και δίνεται το περιθώριο μεταφοράς στην εθνική νομοθεσία ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του κάθε κράτους-μέλους.

Η οδηγία 2008/50/ΕΚ με τελευταία τροποποίηση την 2015/1480/ΕΚ θεσπίζει μέτρα για την ποιότητα και καθαρότητα του ατμοσφαιρικού αέρα της Ευρώπης, έχοντας στόχο:

1. τον προσδιορισμό και καθορισμό των στόχων για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα



2. την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα στα κράτη μέλη βάσει κοινών μεθόδων και κριτηρίων
3. τη συγκέντρωση πληροφοριών όσον αφορά την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα
4. την εξασφάλιση της διάθεσης αυτών των πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα του αέρα στο κοινό
5. τη διατήρηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, όταν είναι καλή, και τη βελτίωσή της στις άλλες περιπτώσεις
6. την προαγωγή μεγαλύτερης συνεργασίας μεταξύ των κρατών μελών σε ό,τι αφορά τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων είναι απαραίτητη η νομοθέτηση κανονισμών που να περιορίζουν τους ρύπους που εκλύονται από τις διάφορες θερμικές μηχανές. Ο τομέας των μεταφορών και πιο συγκεκριμένα των οδικών μεταφορών ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για την ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα καθώς μαζί με την βιομηχανία και τον οικιακό τομέα είναι οι κύριοι υπεύθυνοι για την ατμοσφαιρική ρύπανση. Για τον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων από τις εξατμίσεις των οχημάτων, οι θεσμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης ήδη από το 1970 άρχισαν να νομοθετούν οδηγίες σχετικά με τις επιτρεπόμενες εκπομπές ρύπων των βενζινοκίνητων οχημάτων. Αυτές οι οδηγίες, στο σύνολο τους, καθόριζαν τις επιτρεπόμενες εκπομπές ρύπων και αναφέρονται σαν πρότυπα ρύπων ή προδιαγραφές ρύπων των κινητήρων των οχημάτων. Αυτές οι προδιαγραφές ρύπων, οι οποίες από το 1992 άρχισαν να ονομάζονται Euro όπως θα δούμε και στην συνέχεια, καθόριζαν αρχικά μόνο την ποσότητα των εκπεμπόμενων μονοξειδίων του άνθρακα φτάνοντας σήμερα να καθορίζουν το επίπεδο των παρακάτω εκπομπών:

- μονοξείδιο του άνθρακα CO,
- διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>, και
- οξείδια του θείου SO<sub>x</sub>,
- οξείδια του αζώτου NO<sub>x</sub>,
- άκαυστους υδρογονάνθρακες HC,
- σωματίδια PM (αιθάλη),
- θόρυβο.

Για κάθε τύπο οχήματος οι εκπομπές οι οποίες ελέγχονται δεν είναι οι ίδιες. Οι διαφορές αυτές οφείλονται είτε στον τύπο του κινητήρα είτε στον τύπο του οχήματος. Για παράδειγμα διαφορετικά επιτρεπόμενα επίπεδα εκπομπών έχουν οι diesel κινητήρες για τα μικροσωματίδια και διαφορετικά οι Otto. Ακόμα δεν ελέγχονται οι ίδιες εκπομπές για όλους τους τύπους των οχημάτων. Για παράδειγμα ο θόρυβος ελέγχεται μόνο στα επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα και

στις μοτοσυκλέτες. Τα οξειδία του θείου  $SO_x$  δεν ελέγχονται σε οποιοδήποτε τύπο οχήματος αλλά ελέγχονται μόνο στους ναυτικούς κινητήρες για το λόγο ότι το ναυτικό πετρέλαιο έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο. Τέλος, κάθε νέο πρότυπο ισχύει για τα οχήματα που θα κυκλοφορήσουν μετά την ημερομηνία ισχύος του αντίστοιχου προτύπου και δεν ισχύει για τα οχήματα που βρίσκονται ήδη σε κυκλοφορία. Τα οχήματα που δεν πληρούν τις αντίστοιχες προδιαγραφές δεν μπορούν να πάρουν έγκριση τύπου κυκλοφορίας.

#### **4.1.2 Προδιαγραφές εκπομπής ρύπων σε επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα**

Το πρώτο μέτρο το οποίο θεσπίστηκε για τον έλεγχο και περιορισμό εκπομπής ρύπων στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα ήταν με την εφαρμογή της οδηγίας 70/220/ΕΟΚ του 1970. Από τότε ακολούθησαν πλήθος οδηγιών σχετικά με τον περιορισμό εκπομπής ρύπων καθώς και η δημιουργία των προτύπων εκπομπών ρύπων γνωστά με την ονομασία Euro. Με την πάροδο των χρόνων οι οδηγίες περιελάμβαναν όλο και αυστηρότερους κανονισμούς με μείωση των οριακών τιμών αλλά και με την προσθήκη επιπλέον ρύπων προς έλεγχο. Οι πρώτοι ρύποι που μπήκαν στο μικροσκόπιο του ελεγκτικού μηχανισμού ήταν το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οι υδρογονάνθρακες (HC). Στην συνέχεια ακολούθησαν τα οξειδία του αζώτου (αναγόμενα πάντα σε διοξείδια του αζώτου) και αργότερα ακολούθησαν και οι σωματιδιακοί ρύποι.

Τον Ιούλιο του 1992 εφαρμόστηκε το πρώτο πρότυπο Euro, Euro 1, και έγινε για πρώτη φορά χρήση καταλυτών, σύμφωνα με την οδηγία 91/441/ΕΟΚ για επιβατικά οχήματα και 93/59/ΕΟΚ για ελαφρά επαγγελματικά οχήματα. Το πρότυπο Euro 2 εφαρμόστηκε από τις αρχές του 1996 σύμφωνα με τις οδηγίες 94/12/ΕΚ και 96/69/ΕΚ. Τα όρια εκπομπής ρύπων ήταν αυστηρότερα για τους κατασκευαστές χωρίς να υπάρχει κάποια επιπλέον αλλαγή. Από τις αρχές του 2000 εφαρμόστηκε το πρότυπο Euro 3, σύμφωνα με την οδηγία 98/69/ΕΚ ακολουθούμενη και από περαιτέρω τροποποιήσεις. Στην συνέχεια, αρχές του 2005, εφαρμόστηκε το πρότυπο Euro 4 βασιζόμενο στην οδηγία 2003/76/ΕΚ και τροποποιούμενο στην συνέχεια από την οδηγία 2006/96/ΕΚ. Στα επόμενα πρότυπα Euro, Euro 5-6, εκτός από αυστηρότερους περιορισμούς στην εκπομπή ρύπων είχαμε πλέον την έκδοση κανονισμών και όχι οδηγιών. Με αυτό τον τρόπο τα πρότυπα Euro 5 και 6 ήταν άμεσα εφαρμόσιμα σε κάθε κράτος-μέλος και δεν χρειαζόταν να ενσωματωθούν στην νομοθεσία του κάθε κράτους. Τα πρότυπα Euro 5 και 6, που εφαρμόστηκαν τον Σεπτέμβριο του 2009 και του 2014 αντίστοιχα, βασίστηκαν στον κανονισμό 715/2007/ΕΚ και εφαρμόστηκαν από τον 692/2008/ΕΚ και ακολούθησαν οι τροποποιήσεις τους, 136/2014/ΕΚ και 456/2016/ΕΚ. Συνοπτικά στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα όρια των εκπομπών ρύπων για κάθε ένα από τα πρότυπα Euro που εφαρμόστηκαν για τις διάφορες κατηγορίες οχημάτων με κινητήρα Diesel.

Tier	Date	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM	PN [#km]
<b>Diesel</b>								
Euro 1†	July 1992	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	0.14 (0.18)	-
Euro 2	January 1996	1.0	-	-	-	0.7	0.08	-
Euro 3	January 2000	0.66	-	-	0.50	0.56	0.05	-
Euro 4	January 2005	0.50	-	-	0.25	0.30	0.025	-
Euro 5a	September 2009	0.50	-	-	0.180	0.230	0.005	-
Euro 5b	September 2011	0.50	-	-	0.180	0.230	0.005	6 × 10 <sup>11</sup>
Euro 6	September 2014	0.50	-	-	0.080	0.170	0.005	6 × 10 <sup>11</sup>

\* Before Euro 5, passenger vehicles > 2500 kg were type approved as light commercial vehicles N<sub>1</sub>-I  
† Values in parentheses are conformity of production (COP) limits

Πίνακας 4.1: Πρότυπα Euro με τα όρια εκπομπής ρύπων (σε g/km) για επιβατικά οχήματα με κινητήρα Diesel.

Tier	Date	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM	P [#km]
<b>Diesel</b>								
Euro 1	October 1994	2.72	-	-	-	0.97	0.14	-
Euro 2	January 1998	1.0	-	-	-	0.7	0.08	-
Euro 3	January 2000	0.64	-	-	0.50	0.56	0.05	-
Euro 4	January 2005	0.50	-	-	0.25	0.30	0.025	-
Euro 5a	September 2009	0.500	-	-	0.180	0.230	0.005	-
Euro 5b	September 2011	0.500	-	-	0.180	0.230	0.005	6×10 <sup>11</sup>
Euro 6	September 2014	0.500	-	-	0.080	0.170	0.005	6×10 <sup>11</sup>

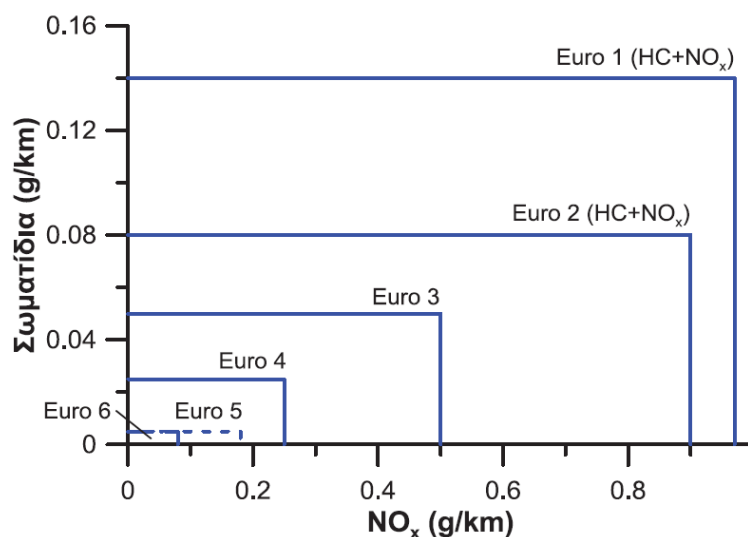
Πίνακας 4.2: Πρότυπα Euro με τα όρια εκπομπής ρύπων (σε g/km) για ελαφρά επαγγελματικά οχήματα με κινητήρα Diesel, μέχρι 1305kg.

Tier	Date	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM	PN [#km]
<b>Diesel</b>								
Euro 1	October 1994	5.17	-	-	-	1.4	0.19	-
Euro 2	January 1998	1.25	-	-	-	1.0	0.12	-
Euro 3	January 2001	0.80	-	-	0.65	0.72	0.07	-
Euro 4	January 2006	0.63	-	-	0.33	0.39	0.04	-
Euro 5a	September 2010	0.630	-	-	0.235	0.295	0.005	-
Euro 5b	September 2011	0.630	-	-	0.235	0.295	0.005	6×10 <sup>11</sup>
Euro 6	September 2015	0.630	-	-	0.105	0.195	0.005	6×10 <sup>11</sup>

Πίνακας 4.3: Πρότυπα Euro με τα όρια εκπομπής ρύπων (σε g/km) για ελαφρά επαγγελματικά οχήματα με κινητήρα Diesel, μέχρι 1760kg.

Tier	Date	CO	THC	NMHC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM	PN [# /km]
<b>Diesel</b>								
Euro 1	October 1994	6.9	-	-	-	1.7	0.25	-
Euro 2	January 1998	1.5	-	-	-	1.2	0.17	-
Euro 3	January 2001	0.95	-	-	0.78	0.86	0.10	-
Euro 4	January 2006	0.74	-	-	0.39	0.46	0.06	-
Euro 5a	September 2010	0.740	-	-	0.280	0.350	0.005	-
Euro 5b	September 2011	0.740	-	-	0.280	0.350	0.005	6×10 <sup>11</sup>
Euro 6	September 2015	0.740	-	-	0.125	0.215	0.005	6×10 <sup>11</sup>

Πίνακας 4.4: Πρότυπα Euro με τα όρια εκπομπής ρύπων (σε g/km) για ελαφρά επαγγελματικά οχήματα με κινητήρα Diesel, πάνω από 1760kg.



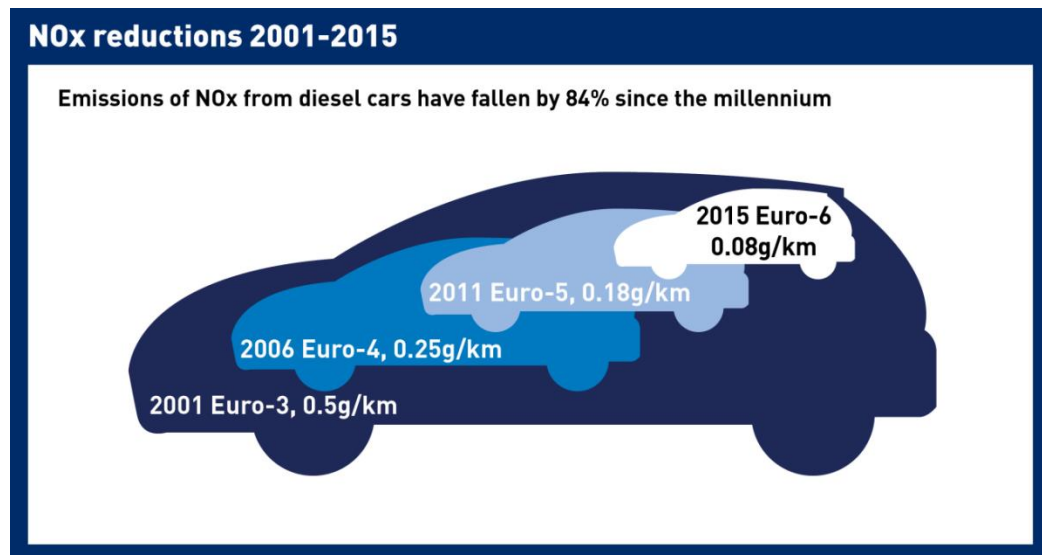
Εικόνα 4.1: Διαγραμματική απεικόνιση της σταδιακής μείωσης των ορίων εκπομπών σωματιδίων και NO<sub>x</sub> από το Euro 1 μέχρι σήμερα για επιβατικά οχήματα με κινητήρες Diesel

Με μια πιο προσεκτική ματιά διαπιστώνουμε την εξελικτικής πορεία των προτύπων με σκοπό πάντα την βελτίωση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Για να πάρουν έγκριση τύπου τα οχήματα είναι υποχρεωμένα να πληρούν και τις αντίστοιχες προδιαγραφές εκπομπής ρύπων. Τα πρότυπα, όπως είναι λογικό, είναι γνωστά στους κατασκευαστές μερικά χρόνια πριν την εφαρμογή τους έτσι ώστε να μπορέσουν να προσαρμόσουν τα οχήματα τους στις εκάστοτε προδιαγραφές.

Αρχικά παρατηρούμε πως στα πρότυπα Euro 5 και 6 δεν υπάρχει κάποιος διαχωρισμός στα επιβατικά οχήματα σχετικά με το μέγεθός τους κάτι το οποίο δεν ισχύει για τα προηγούμενα πρότυπα. Από το Euro 4 και πίσω τα επιβατικά οχήματα που είχαν μικτό βάρος μεγαλύτερο από 2500kg ακολουθούσαν άλλα όρια για τις εκπομπές ρύπων. Επίσης, από το Euro 3 και μετά έγινε διαχωρισμός μεταξύ υδρογονανθράκων και οξειδίων του αζώτου και τέθηκαν σε εφαρμογή

συστήματα αυτοδιάγνωσης (OBD-On Board Diagnostics) για άμεσο έλεγχο των εκπεμπόμενων ρύπων από το ίδιο το όχημα.

Μεγάλη αλλαγή πραγματοποιήθηκε κατά την μετάβαση από το πρότυπο Euro 4 στο Euro 5 καθώς επιβλήθηκε μια μείωση της τάξης του 80% στη μάζα των εκπεμπόμενων σωματιδίων από κινητήρες Diesel. Για το λόγο αυτό κατέστη αναγκαία η χρήση φίλτρου μικροσωματιδίων (DPF). Η μείωση στα οξείδια του αζώτου, από την άλλη μεριά, ήταν σχετικά μικρή, μόλις 28%, επιτρέποντας έτσι την αντιμετώπιση αυτής της μείωσης με εσωτερικά μέτρα στον κινητήρα, κάνοντας δηλαδή πιο αποδοτικό το σύστημα της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων (EGR). Αντίθετα στο πρότυπο Euro 6 η μείωση των οξειδίων του αζώτου ήταν αρκετά μεγαλύτερη, φτάνοντας το 55%, με αποτέλεσμα την αναγκαστική χρήση συστημάτων deNO<sub>x</sub> και πιο συγκεκριμένα να γίνει χρήση επιλεκτικού αναγωγικού καταλύτη (SCR). Στο πρότυπο Euro 6 δεν υπήρξε περαιτέρω μείωση στην μάζα των εκπεμπόμενων σωματιδίων αλλά επιβλήθηκε συγκεκριμένο όριο στον συνολικό αριθμό των εκπεμπόμενων σωματιδίων ( $6 \times 10^{11}$  PM/km). Για να μην συμπέσουν όμως στο πρότυπο Euro 6 η μείωση των NO<sub>x</sub> αλλά και ο περιορισμός στον αριθμό των σωματιδίων αποφασίστηκε η εφαρμογή ενός ενδιάμεσου προτύπου, του Euro 5b, το οποίο τέθηκε σε εφαρμογή τον Σεπτέμβρη του 2011. Ο λόγος που προέβησαν σε έναν τέτοιο περιορισμό είναι γιατί ενώ με τα φίλτρα θα ήταν εφικτή η περαιτέρω μείωση της μάζας των εκπεμπόμενων σωματιδίων, δεν θα ήταν εφικτός όμως ο περιορισμός των εκπεμπόμενων νανοσωματιδίων των οποίων το πλήθος είναι πολύ μεγάλο. Ορίζοντας έτσι έναν μέγιστο αριθμό σωματιδίων είναι εφικτή η προστασία του ατμοσφαιρικού αέρα από έναν σημαντικά υψηλό αριθμό νανοσωματιδίων, τα οποία όμως είναι επικίνδυνα για την υγεία του ανθρώπου.



Εικόνα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση του μεγέθους μείωσης της εκπομπής των οξειδίων του αζώτου σε χρονική διάρκεια μιας 15ετίας.

Πέρα όμως από τους τεχνολογικά εξελιγμένους κινητήρες και τον αντιρρυπαντικό εξοπλισμό, για την εναρμόνιση των κατασκευαστών των οχημάτων με τις όλο και αυστηρότερες προδιαγραφές, ήταν απαραίτητη και η ανάπτυξη και διάθεση στην αγορά καθαρότερων καυσίμων. Για τον λόγο αυτό, μέσω οδηγιών, υπάρχει συνεχής βελτίωση στην ποιότητα των καυσίμων με αντίστοιχη μείωση των επικίνδυνων προσμίξεων που περιέχουν. Αρχικά με την οδηγία 93/12/ΕΟΚ και στην συνέχεια με τις τροποποιήσεις 98/70/ΕΚ και 2003/17/ΕΚ ορίστηκαν ανώτατα όρια περιεκτικότητας θείου στο πετρέλαιο. Από 1/1/2000 ορίστηκε ο ελάχιστος αριθμός κετανίου να είναι 51 (CN) και η περιεκτικότητα του θείου στο πετρέλαιο να είναι 350mg/kg ή διαφορετικά, 350ppm. Από 1/1/2005 η μέγιστη τιμή περιεκτικότητας θείου στο πετρέλαιο ήταν τα 50ppm και από 1/1/2009 μέσω της τροποποίησης 2003/17/ΕΚ η μέγιστη περιεκτικότητα είναι 10ppm.

Τέλος, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη και στα πρότυπα εκπομπής ρύπων είναι και η διάρκεια ζωής του αντιρρυπαντικού εξοπλισμού του κάθε οχήματος. Εκτός από υψηλές αντιρρυπαντικές επιδόσεις κατά την διαδικασία της έγκρισης τύπου, είναι εξίσου σημαντική και η διάρκεια αυτών των αποτελεσμάτων και η απαίτηση καλής λειτουργίας αυτών των συστημάτων καθόλη την αναμενόμενη διάρκεια ζωής ενός οχήματος. Τα συστήματα αντιρύπανσης αλλά και ο κινητήρας υφίστανται φθορές μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την απόδοσή τους. Αρχικά, σύμφωνα με τα πρότυπα Euro 1, 2 και 3, είχε οριστεί σαν αναμενόμενη διάρκεια ζωής των συστημάτων τα 5 χρόνια ή τα 80000 χλμ. Στην συνέχεια, σύμφωνα με το Euro 4 η αναμενόμενη διάρκεια ζωής ήταν τα 100000χλμ. Μέχρι που στα πρότυπα Euro 5 και 6 η αναμενόμενη διάρκεια ζωής απεικόνιζε περισσότερο την πραγματικότητα καθώς τα συστήματα αντιρύπανσης έπρεπε να έχουν 160000χλμ διάρκεια ζωής.

Για να ελεγχθούν τα συστήματα αν ανταποκρίνονται στην απαιτούμενη διάρκεια ζωής υπάρχουν δύο μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος πραγματοποιείται με το όχημα να διανύει τα συγκεκριμένα χιλιόμετρα πάνω σε ειδική πέδη ακλουθώντας έναν συγκεκριμένο κύκλο δοκιμών (τον αμερικανικό SRC). Για να πραγματοποιηθούν όμως τα συγκεκριμένα χιλιόμετρα απαιτείται ένα μεγάλο χρονικό διάστημα κάτι το οποίο δεν είναι συμφέρον. Για το λόγο αυτό, εναλλακτικά πραγματοποιείται η διαδικασία επιταχυνόμενης γήρανσης όπου το όχημα λειτουργεί συνεχόμενα σε κατάλληλη εργαστηριακή πέδη και εκτελεί τον κύκλο δοκιμών SDBC για κινητήρες Diesel. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο η προσομοίωση της θερμικής καταπόνησης των αντιρρυπαντικών συστημάτων. Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στην χρήση συντελεστών ασφαλείας. Πιο συγκεκριμένα, η κατασκευαστής κατασκευάζουν τα συστήματα τους με σκοπό να είναι πιο αποδοτικά από ότι ορίζουν τα όρια των προτύπων την χρονική περίοδο της κυκλοφορίας του οχήματος. Έτσι, με την λογική αυτή ενώ τα συστήματα θα είναι πιο αποδοτικά στην αρχή της λειτουργίας του, μετά από 160000χλμ θα μπορούν οριακά να συμμορφώνονται στα αρχικά πρότυπα και κατά συνέπεια να πληρούν και τις συγκεκριμένες προδιαγραφές για όλη την διάρκεια ζωής των 160000χλμ.

Όσον αφορά το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που εκπέμπουν τα επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα δεν υπάρχει κανονισμός που να θέτει όριο εκπομπής CO<sub>2</sub> για κάθε ένα όχημα μεμονωμένα. Οι εργαστηριακές μετρήσεις περιλαμβάνουν βέβαια μέτρηση για την ποσότητα CO<sub>2</sub> (g/km) που εκπέμπει κάθε αυτοκίνητο χωρίς να υπάρχει όμως κάποιος άμεσος περιορισμός. Αυτό που συμβαίνει ουσιαστικά είναι η επιβολή ορίου εκπομπής CO<sub>2</sub> για το σύνολο των οχημάτων του κάθε κατασκευαστή. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον κανονισμό 443/2009/EK, από τα 2012 εάν οι μέσες εκπομπές CO<sub>2</sub> του στόλου οχημάτων ενός κατασκευαστή υπερβαίνουν την οριακή τιμή των 130 gCO<sub>2</sub>/km τότε ο κατασκευαστής είναι υποχρεωμένος να πληρώσει κάποιο χρηματικό πρόστιμο ανάλογα με το κατά πόσο υπερέβη αυτό το όριο εκπομπών. Η περίοδος 2012 με 2015 ήταν μια περίοδος προσαρμογής για τους κατασκευαστές και για αυτό το λόγο υπήρξε μια μορφή επιβραβεύσεις για κάθε όχημα που πουλούσαν με κάτω από 50 gCO<sub>2</sub>/km. Αυτή η επιβράβευση ήταν:

Κάθε όχημα χαμηλής εκπομπής (κάτω από 50 gCO<sub>2</sub>/km) αντιστοιχούσε σε:

- 3,5 οχήματα (συμβατικών εκπομπών) για το 2012 και το 2013
- 2,5 οχήματα για το 2014
- 1,5 οχήματα για το 2015

Το πρόστιμο που είναι αναγκασμένοι να πληρώνουν οι κατασκευαστές για κάθε ένα από τα οχήματα που ταξινομούν, σε περίπτωση που οι μέσες εκπομπές CO<sub>2</sub> για τον στόλο των οχημάτων τους υπερέβαινε τα 130 gCO<sub>2</sub>/km, υπολογίζεται με βάση τα παρακάτω:

- €5 για το πρώτο gCO<sub>2</sub>/km που υπερέβαινε το όριο των 130 gCO<sub>2</sub>/km επί το σύνολο των οχημάτων, άσχετα αν μερικά οχήματα ήταν και κάτω από 130 gCO<sub>2</sub>/km
- €15 για το δεύτερο gCO<sub>2</sub>/km
- €25 για το τρίτο gCO<sub>2</sub>/km και
- €95 για κάθε επόμενο gCO<sub>2</sub>/km

Από την στιγμή που τα οχήματα ευθύνονται για το 12% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην Ευρώπη, η αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου μέτρου κρίνεται άκρως ικανοποιητική καθώς το 2016 ο μέσος όρος των εκπομπών των οχημάτων που ταξινομήθηκαν στην Ευρώπη έφτασε τα 118,1 gCO<sub>2</sub>/km. Πρόκειται για μια μείωση της τάξης του 16% (22 gCO<sub>2</sub>/km) σε σχέση με το 2010, που έγινε η πρώτη καταμέτρηση τέτοιου είδους.

#### **4.1.3 Ελληνική Νομοθεσία κυκλοφορίας οχημάτων βάση εκπομπής ρύπων**

Περνώντας από την Ευρωπαϊκή στην Ελληνική νομοθεσία όπως είναι λογικό δεν υπάρχουν διαφορές όσον αφορά τους κανονισμούς για την έγκριση τύπου κυκλοφορίας οχημάτων. Υπήρχαν όμως περιορισμοί όσον αφορά την κυκλοφορία οχημάτων στα δύο μεγάλα αστικά κέντρα της χώρας. Σύμφωνα με νόμο που ίσχυε από το 1990 τα πετρελαιοκίνητα οχήματα δεν επιτρεπόταν να κυκλοφορήσουν στα δύο αστικά κέντρα, Αθήνα και Θεσσαλονίκη. Δύο χρόνια μετά την εφαρμογή

του προτύπου Euro 5 σε όλη την Ευρώπη και πιο συγκεκριμένα τον Νοέμβριο του 2011 με ψήφιση του νόμου 4030 /2011 επετράπη η αγορά και κυκλοφορία πετρελαιοκίνητων οχημάτων σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το άρθρο 50 ισχύει:

«1. Τα πετρελαιοκίνητα φορτηγά οχήματα ιδιωτικής χρήσης μικτού βάρους μέχρι τεσσάρων χιλιάδων (4.000) χιλιογράμμων και τα πετρελαιοκίνητα επιβατικά οχήματα ιδιωτικής χρήσης εξαιρούνται των περιορισμών κυκλοφορίας στις περιοχές των Νομών Αττικής και Θεσσαλονίκης, που καθορίστηκαν με τις διατάξεις του άρθρου 26 του ν.1959/1991 (Α΄ 123), εφόσον η τεχνολογία τους πληροί εκ κατασκευής τις προδιαγραφές του Κανονισμού (ΕΚ) 715/2007 της 20ής Ιουνίου 2007 (Euro 5 και Euro 6) ή μεταγενέστερου.

2. Οι διατάξεις του παρόντος αρχίζουν από τη δημοσίευσή του στην Εφημερίδα της Κυβερνήσεως.»

Όπως αναφέρει και το παραπάνω άρθρο, η κυκλοφορία πετρελαιοκίνητων οχημάτων στους Νομούς Αττικής και Θεσσαλονίκης προϋποθέτει να πληρούν τις προδιαγραφές Euro 5 και Euro 6. Εν συνεχεία, έχουμε και για πρώτη φορά την εφαρμογή του «πράσινου» δακτυλίου ο οποίος επιτρέπει την κυκλοφορία στο κέντρο της Αθήνας όλων οχημάτων τα οποία πληρούν τουλάχιστον τις προδιαγραφές Euro 5 και εκπέμπουν λιγότερο από 140 gCO<sub>2</sub>/km. Για τα υπόλοιπα οχήματα συνεχίζει να ισχύει ο περιορισμός της κυκλοφορίας των οχημάτων με μονό λήγοντα αριθμό στον αριθμό κυκλοφορίας τους τις «μονές» μέρες του μήνα και αντίστοιχα τα «ζυγά» στις «ζυγές» μέρες του μήνα.

#### **4.1.4 Τροποποιημένοι κανονισμοί ελέγχου εκπομπών στο άμεσο μέλλον**

Παρόλα αυτά, το πρόβλημα δεν έχει λυθεί και ακόμα και οι αυστηρότερες προδιαγραφές φαίνεται να μην είναι αρκετές. Αυτό συμβαίνει γιατί ενώ τα όρια που έχουν θεσπιστεί είναι ικανοποιητικά, αντίστοιχα ικανοποιητικά δεν είναι τα αποτελέσματα από τις εκπομπές των οχημάτων, ειδικά των diesel, σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η καταμέτρηση των εκπεμπόμενων ρύπων δεν είναι ορθός. Δεν είναι ορθός γιατί οι μετρήσεις πραγματοποιούνται μέσα σε εργαστήρια υπό συγκεκριμένες συνθήκες και σύμφωνα με έναν συγκεκριμένων κύκλο δοκιμών (τον Ευρωπαϊκό NEDC) ο οποίος με την σειρά του δεν καταφέρνει να προσομοιώσει την πραγματικότητα. Λόγω αυτής της συγκεκριμένης διαδικασίας, η οποία είναι απόλυτα γνωστή στους κατασκευαστές, τους δίνει το πλεονέκτημα να καταφέρνουν να είναι εντός ορίων εκπομπών. Σε πραγματικές συνθήκες όμως οι πραγματικές εκπομπές ρύπων είναι πολλαπλάσια μεγαλύτερες από αυτές που έχουν μετρηθεί εργαστηριακά.

Καταλήγουμε στο ότι ίσως δεν υπάρχει άμεση ανάγκη για κάποιο νέο πρότυπο, παραδείγματος χάριν Euro7 καθώς ήδη υπάρχουν βελτιώσεις στο Euro 6 και σταδιακά θα εφαρμόζονται. Αυτό που θα ωφελούσε είναι καταρχήν η απόσυρση των οχημάτων που πληρούν παλαιότερα πρότυπα, Euro 1, 2 ακόμα και 3, και ταυτόχρονα η εφαρμογή των τροποποιήσεων του Euro 6 να συνδυαστεί με μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίες. Στο άμεσο μέλλον θα



εφαρμοστεί ένας κύκλος δοκιμών σε πραγματικές συνθήκες ο οποίος σε συνδυασμό με τις εργαστηριακές μετρήσεις θα αποδίδουν πολύ πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Ο κύκλος πραγματικής οδήγησης (RDE – Real Driving Cycle) δεν θα αντικαταστήσει τις εργαστηριακές μετρήσεις αλλά ουσιαστικά θα τις συμπληρώνει. Σκοπός του RDE θα είναι να επιβεβαιώνει τις εργαστηριακές μετρήσεις και η Ευρώπη θα είναι η πρώτη που θα εφαρμόσει έναν τέτοιο κύκλο δοκιμών. Ο κύκλος πραγματικής οδήγησης θα περιλαμβάνει οδήγηση:

- Σε μικρά και μεγάλα υψόμετρα
- Με επιπλέον φορτίο στο όχημα
- Σε ανωφέρειες και κατωφέρειες
- Σε διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος
- Σε αστικό περιβάλλον (χαμηλές ταχύτητες)
- Σε επαρχιακό δρόμο (μεσαίες ταχύτητες)
- Σε αυτοκινητόδρομο (υψηλές ταχύτητες)

Για την πραγματοποίηση του νέου κύκλου δοκιμών θα γίνει χρήση συστημάτων φορητής παρακολούθησης εκπομπών ρύπων (PEMS – Portable Emission Monitoring System) τα αποτελέσματα των οποίων θα συγκρίνονται όπως είπαμε με τις εργαστηριακές μετρήσεις. Από το 2017 που θα αρχίσουν να γίνονται δοκιμές τέτοιου είδους για τα πραγματικά όρια εκπομπών θα ισχύει και ένας συντελεστής συμμόρφωσης  $CF=2.1$  σε σχέση με τις εργαστηριακές μετρήσεις. Από το 2021 θα ισχύσει ένας συντελεστής συμμόρφωσης της τάξης του 50% ( $CF=1.5$ ) για τα οξείδια του αζώτου ενώ για τα εκπεμπόμενα σωματίδια ακόμα δεν έχει οριστεί κάποιος συντελεστής συμμόρφωσης.

Τροποποίηση πραγματοποιήθηκε και το 2014 σχετικά με τα όρια εκπομπής διοξειδίων του άνθρακα. Ο κανονισμός 333/2014/EK, ο οποίος τροποποιεί τον κανονισμό 443/2009/EK, θέτει νέα αυστηρότερα όρια για τους κατασκευαστές επιβατικών οχημάτων. Το νέο όριο μέσω εκπομπών είναι  $95 \text{ gCO}_2/\text{km}$  για τον στόλο οχημάτων του κάθε κατασκευαστή. Οριστική εφαρμογή θα έχει το 2021, αλλά θα αρχίσει να ισχύει από το 2020 για το 95% του στόλου των οχημάτων κάθε κατασκευαστή. Ακόμη, από το 2019 θα ισχύει ότι για κάθε  $\text{gCO}_2/\text{km}$  που υπερβαίνει το όριο των εκπομπών, ο κάθε κατασκευαστής θα είναι υποχρεωμένος να πληρώνει €95 για κάθε παραπάνω  $\text{gCO}_2/\text{km}$  για κάθε όχημα που πουλάει. Ο συγκεκριμένος στόχος ( $95 \text{ gCO}_2/\text{km}$ ) είναι δύσκολα επιτεύξιμος από τους κατασκευαστές αλλά θα οδηγήσει σε μείωση εκπομπών  $\text{CO}_2$  που θα φτάνει το 36,7% σε σχέση με τις αντίστοιχες εκπομπές του 2010.

#### **4.1.5 Προδιαγραφές εκπομπής ρύπων για οχήματα βαρέως τύπου**

Οι κανονισμοί για το συγκεκριμένο τύπο οχημάτων θεσπίστηκαν αρχικά με την οδηγία 88/77/ΕΟΚ, ακολουθούμενες από ορισμένες τροπολογίες. Το 2005, οι κανονισμοί μεταφέρθηκαν και κωδικοποιήθηκαν με την οδηγία 2005/55/ΕΚ. Από το πρότυπο Euro VI και μετά, η νομοθεσία

απλουστεύθηκε, καθώς οι οδηγίες (Directives), οι οποίες έπρεπε να μεταφερθούν σε όλες τις εθνικές νομοθεσίες, αντικαταστάθηκαν από κανονισμούς (Regulations), που ισχύουν άμεσα για όλα τα κράτη μέλη. Όπως έγινε αντιληπτό η αρίθμηση των προτύπων Euro για τα οχήματα βαρέως τύπου γίνεται με λατινική αρίθμηση σε αντίθεση με την αραβική αρίθμηση που ισχύει για τα πρότυπα των επιβατικών και ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων. Στην συνέχεια ακολουθούν μερικά από τα πιο σημαντικά βήματα θέσπισης κανονισμών για τους Diesel κινητήρες βαρέως τύπου:

- Το πρότυπο Euro I θεσπίστηκε το 1992, ακολουθούμενο από το πρότυπο Euro II το 1996. Τα πρότυπα αυτά ίσχυαν τόσο για τους κινητήρες φορτηγών όσο και για τα αστικά λεωφορεία, αν και για τα αστικά λεωφορεία ήταν προαιρετική η εφαρμογή τους.
- Το 1999, η ΕΕ ενέκρινε την οδηγία 1999/96/ΕΚ η οποία εισήγαγε το πρότυπο Euro III που εφαρμόστηκε το 2000, καθώς και ορισμένες οδηγίες για τα πρότυπα Euro IV/V. Αυτή η οδηγία έδινε την δυνατότητα στους κατασκευαστές να υιοθετήσουν ακόμα αυστηρότερα όρια εκπομπής ρύπων χαρακτηρίζοντας έτσι τα οχήματα τους ως «ενισχυμένα οχήματα φιλικά προς το περιβάλλον» (EEVs - Enhanced Environmental-friendly Vehicles).
- Το 2001, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενέκρινε την οδηγία 2001/27/ΕΚ, η οποία απαγόρευε τη χρήση «μηχανισμών μείωσης των εκπομπών» και «παράλογων» στρατηγικών ελέγχου των εκπομπών, μέσω των οποίων θα μειωνόταν η αποτελεσματικότητα των συστημάτων ελέγχου εκπομπών όταν τα οχήματα θα λειτουργούσαν υπό κανονικές συνθήκες οδήγησης ενώ κατά την διαδικασία ελέγχου η αποτελεσματικότητά τους θα ήταν κατάλληλη με σκοπό την συμμόρφωση του κινητήρα με τα πρότυπα Euro.
- Η οδηγία 2005/55/Ε, που εγκρίθηκε το 2005, εισήγαγε απαιτήσεις σχετικά με την διάρκεια ζωής των συστημάτων αντιρύπανσης και επέβαλε τα συστήματα αυτοδιάγνωσης (OBD). Επίσης επαναδιατύπωσε τα όρια εκπομπών για τα πρότυπα Euro IV και Euro V που είχαν δημοσιευτεί αρχικά στην οδηγία 1999/96/ΕΚ.
- Τον Ιούλιο του 2009 θεσπίστηκε το πρότυπο εκπομπών Euro VI σύμφωνα με τον κανονισμό 595/2009/ΕΚ. Τα νέα όρια εκπομπών ήταν αυστηρότερα και συγκρίσιμα με το πρότυπο των ΗΠΑ του 2010. Το πρότυπο Euro VI, το οποίο τέθηκε σε εφαρμογή το 2013, εισήγαγε όρια για την εκπομπή σωματιδίων (PM), αυστηρότερες απαιτήσεις για τα συστήματα αυτοδιάγνωσης (OBD) και μια σειρά από νέες δόκιμες, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών PEMS.

Οι πίνακες που ακολουθούν περιλαμβάνουν μια περίληψη των προτύπων εκπομπών, τις ημερομηνίες εφαρμογής και των ορίων εκπομπής ρύπων. Οι ημερομηνίες στους πίνακες αναφέρονται σε νέες εγκρίσεις τύπου ενώ οι ημερομηνίες για όλα τα οχήματα είναι στις περισσότερες περιπτώσεις ένα έτος αργότερα. Ο πίνακας 4.5 περιλαμβάνει τα πρότυπα εκπομπών που ισχύουν μόνο για τους κινητήρες ντίζελ εξεταζόμενα στο στατικό κύκλο δοκιμών. Στον πίνακα 4.6 περιλαμβάνει πρότυπα που ισχύουν τόσο για κινητήρες Diesel όσο και για κινητήρες Otto εξεταζόμενα στον μεταβαλλόμενο κύκλο δοκιμών.

Stage	Date	Test	CO	HC	NOx	PM	PN	Smoke
			g/kWh					1/kWh
Euro I	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612		
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36		
Euro II	1996.10		4.0	1.1	7.0	0.25		
	1998.10		4.0	1.1	7.0	0.15		
Euro III	1999.10 EEV only	ESC & ELR	1.5	0.25	2.0	0.02		0.15
	2000.10		2.1	0.66	5.0	0.10 <sup>a</sup>		0.8
Euro IV	2005.10		1.5	0.46	3.5	0.02		0.5
Euro V	2008.10		1.5	0.46	2.0	0.02		0.5
Euro VI	2013.01	WHSC	1.5	0.13	0.40	0.01	8.0×10 <sup>11</sup>	

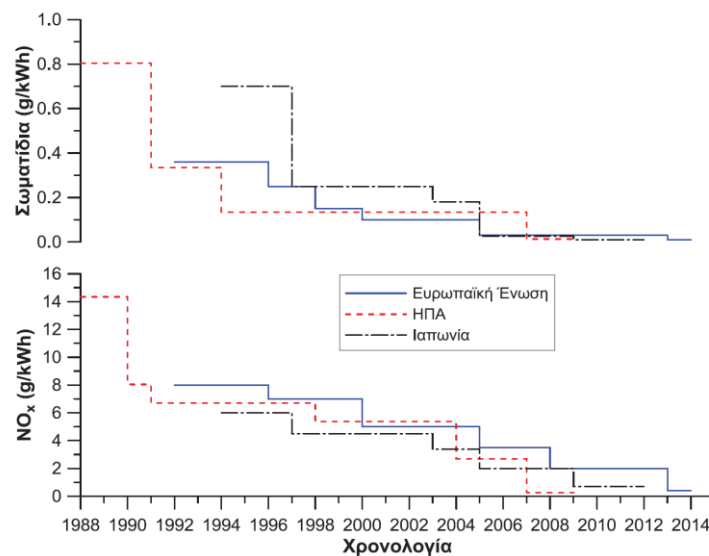
a - PM = 0.13 g/kWh for engines < 0.75 dm<sup>3</sup> swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min<sup>-1</sup>

Πίνακας 4.5: Πρότυπα Euro για οχήματα βαρέως τύπου με κινητήρα Diesel στον κύκλο δοκιμών στατικής λειτουργίας.

Stage	Date	Test	CO	NMHC	CH <sub>4</sub> <sup>a</sup>	NOx	PM <sup>b</sup>	PN <sup>c</sup>
			g/kWh					1/kWh
Euro III	1999.10 EEV only	ETC	3.0	0.40	0.65	2.0	0.02	
	2000.10		5.45	0.78	1.6	5.0	0.16 <sup>c</sup>	
Euro IV	2005.10		4.0	0.55	1.1	3.5	0.03	
Euro V	2008.10		4.0	0.55	1.1	2.0	0.03	
Euro VI	2013.01	WHTC	4.0	0.16 <sup>d</sup>	0.5	0.46	0.01	6.0×10 <sup>11</sup>

a - for gas engines only (Euro III-V: NG only; Euro VI: NG + LPG)  
b - not applicable for gas fueled engines at the Euro III-IV stages  
c - PM = 0.21 g/kWh for engines < 0.75 dm<sup>3</sup> swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min<sup>-1</sup>  
d - THC for diesel engines  
e - for diesel engines; PN limit for positive ignition engines TBD

Πίνακας 4.6: Πρότυπα Euro για οχήματα βαρέως τύπου με κινητήρα Otto και Diesel στον κύκλο δοκιμών μεταβατικής λειτουργίας.



Εικόνα 4.3: Μεταβολή ορίων εκπομπών με το πέρασμα των χρόνων για τα σωματίδια και τα οξίδια του αζώτου σε Ευρώπη, ΗΠΑ και Ιαπωνία.

Εκτός των παραπάνω έχει θεσπιστεί όριο εκπομπών αμμωνίας (NH<sub>3</sub>) της τάξης των 10 ppm για κινητήρες πετρελαίου (Κύκλοι WHSC και WHTC) με επιπλέον πιθανότητα καθορισμού συγκεκριμένου ορίου και για το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>). Όλοι οι κύκλοι δοκιμών οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί στα πρότυπα Euro αφορούν μόνο τον κινητήρα και όχι ολόκληρα τα οχήματα και είναι οι ακόλουθοι:

- ECE-R49: χρησιμοποιήθηκε κατά τα πρότυπα Euro I & II, περιελάμβανε 13 καταστάσεις σταθερής λειτουργίας του κινητήρα μη λαμβάνοντας έτσι υπόψη τις εκπομπές καυσαερίων κατά την μεταβολή φορτίου στον κινητήρα.
- ESC: ο ευρωπαϊκός στατικός κύκλος (European Stationary Cycle) δοκιμών ήταν ουσιαστικά η συνέχεια του ECE-R49 και εισήχθη μαζί με τον ETC και χρησιμοποιήθηκαν κατά τα πρότυπα Euro III, IV & V.
- ETC: ο ευρωπαϊκός μεταβατικός κύκλος (European Transient Cycle) δοκιμών προσομοίωσε την συνεχώς μεταβαλλόμενη λειτουργία των κινητήρων κατά την διάρκεια κυκλοφορίας τους σε αστικό, επαρχιακό και υπεραστικό περιβάλλον.
- ELC: ο ευρωπαϊκός κύκλος δοκιμών απόκρισης φορτίου (European Load Response), ο οποίος εφαρμόστηκε και αυτός στα πρότυπα Euro III, IV & V, προσομοίωσε την μεταβολή ανάμεση σε 3 επίπεδα φορτίου και μέτραγε την παραγωγή καπνού από τις εξατμίσεις του κινητήρα
- Τέλος, στο πρότυπο Euro VI έχουμε την εφαρμογή δύο νέων κύκλων δοκιμών, του παγκόσμιου κύκλου μόνιμης λειτουργίας (WHSC - World Heavy duty Stationary Cycle) και του παγκόσμιου κύκλου μεταβατικής λειτουργίας (WHTC - World Heavy duty Transient Cycle).

Όσον αφορά τις εκπομπές CO<sub>2</sub> των βαρέως τύπου οχημάτων η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν έχει προβεί σε κάποιο μέτρο ή κανονισμό για την παρακολούθηση και το περιορισμό αυτών. Το 2017 συζητιέται η εφαρμογή ενός ηλεκτρονικού συστήματος προσομοίωσης των εκπομπών των οχημάτων βαρέως τύπου με σκοπό να συλλέξουν δεδομένα και στην συνέχεια να προτείνουν κάποια νομοθεσία. Συζητιέται η εφαρμογή υποχρεωτικών ορίων των μέσων εκπομπών των οχημάτων βαρέως τύπου, με αντίστοιχο τρόπο όπως συμβαίνει και για τα επιβατικά και ελαφρά επαγγελματικά οχήματα. Όπως και να έχει, η επιβολή κάποιων μέτρων κρίνεται επιτακτική έτσι ώστε να καταφέρει η Ευρωπαϊκή Ένωση να πετύχει την επιθυμητή μείωση του 60% των εκπομπών CO<sub>2</sub> στον τομέα των μεταφορών μέχρι το 2050.

## **4.2 Διεθνείς κανονισμοί και νομοθεσία ελέγχου των επιπέδων εκπομπής ρύπων από κινητήρες Diesel τόσο στην εμπορική όσο και στην επιβατική ναυτιλία.**

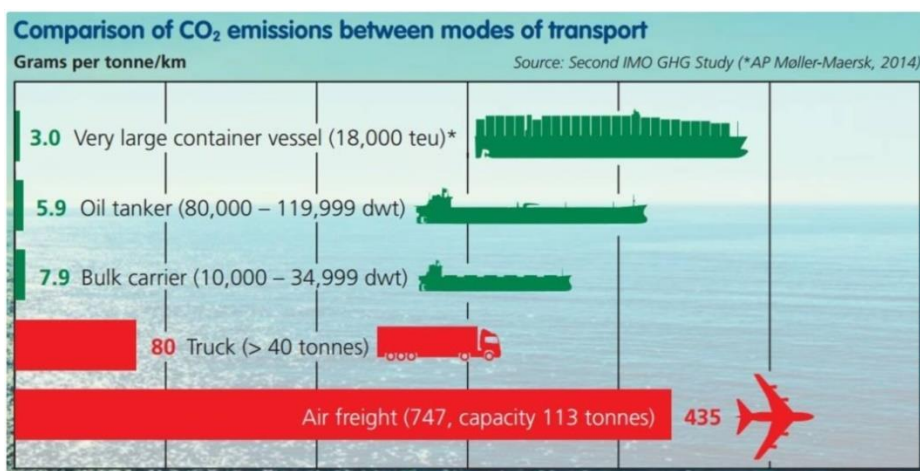
### **4.2.1 Εισαγωγή**

Βασικός λόγος θέσπισης κανονισμών για τις εκπομπές ρύπων είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση και η ανάγκη προστασίας της υγείας του ανθρώπου αλλά και του περιβάλλοντος. Η ναυτιλία είναι ο σημαντικότερος τομέας όσον αφορά την μεταφορά μεγάλου όγκου εμπορευμάτων. Οι ναυτικοί κινητήρες όμως, όπως και όλες οι μηχανές εσωτερικής καύσης, εκπέμπουν ρύπους επικινδύνους για την υγεία του ανθρώπου και για το περιβάλλον. Λόγω του μεγέθους των ναυτικών κινητήρων αλλά και λόγω της χρήσης αργού πετρελαίου ή ακόμα και μαζούτ οι εκπομπές των καυσαερίων τους είναι εξαιρετικά ρυπογόνες. Αυτό το μειονέκτημα έρχεται να αντισταθμίσει η δυνατότητα τους να μεταφέρουν τον κύριο όγκο των καταναλωτικών αγαθών σε όλοι την γη καθιστώντας την εμπορική ναυτιλία λιγότερο ρυπογόνα αναλογικά με τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς. Παρόλα αυτά, κρίνεται επιτακτική η θέσπιση μέτρων για περιορισμών των ρύπων από την εμπορική αλλά και επιβατική ναυτιλία.

Τα καυσαέρια ενός ναυτικού κινητήρα περιέχουν κατά κύριο λόγο άζωτο ( $N_2$ ), οξυγόνο ( $O_2$ ), υδρατμούς ( $H_2O$ ) και διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ). Σε μικρό ποσοστό περιέχουν ρύπους όπως τα οξειδία του αζώτου ( $NO_x$ ), τα οξειδία του θείου ( $SO_x$ ), το μονοξείδιο του άνθρακα ( $CO$ ), άκαυστους υδρογονάνθρακες και αιωρούμενα σωματίδια ( $PM$ ). Το διοξείδιο του άνθρακα, οι υδρατμοί, το οξυγόνο και το άζωτο είναι τα προϊόντα που προκύπτουν από την τέλεια καύση του καυσίμου. Τα ναυτιλιακά καύσιμα όμως περιέχουν και άλλες προσμίξεις εκτός από υδρογονάνθρακες, με πιο σημαντική και επιζήμια το θείο. Η υψηλή περιεκτικότητα σε θείο στα ναυτιλιακά καύσιμα ευθύνεται για την ύπαρξη των οξειδίων του θείου στα καυσαέρια. Το διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ) μετατρέπεται σε θειικό οξύ και μειώνει το pH της βροχής έχοντας σαν αποτέλεσμα την δημιουργία της όξινης βροχής με γνωστά σε όλους αποτελέσματα. Τα οξειδία του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια σχηματίζονται για τον ίδιο ακριβώς λόγο που σχηματίζονται και στις υπόλοιπες μηχανές εσωτερικής καύσης και η αντιμετώπισή τους γίνεται επίσης με τα συστήματα αντιρύπανσης που έχουν αναφερθεί και παραπάνω. Σύμφωνα με την μελέτη της Corbett et al. τα μικροσωματίδια από τη ναυτιλία είναι υπεύθυνα για περισσότερους από 60.000 θανάτους ετησίως σε όλο τον πλανήτη και με τους περισσότερους να λαμβάνουν χώρα κοντά στα μεγάλα εμπορικά λιμάνια. Το  $CO_2$  αν και δεν αποτελεί ρύπο και υπάρχει στην ατμόσφαιρα με φυσικό τρόπο, παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια οι υψηλές συγκεντρώσεις  $CO_2$  από τις εκπομπές των καυσαερίων έχει οδηγήσει στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Μετά την βιομηχανική επανάσταση, λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας η συγκέντρωση  $CO_2$  έχει αυξηθεί κατά 40%, από 280 ppm το 1750 σε 400ppm το 2015. Αυτή η σημαντική αύξηση ευθύνεται και για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη.

Σύμφωνα με την τρίτη μελέτη (2014) της IMO (International Maritime Organization- Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός) για τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG - GreenHouse Gases) για την περίοδο 2007-2012, η ναυτιλία αντιπροσώπευε κατά μέσο όρο το 3,1% του ετήσιου παγκόσμιου παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Κάνοντας μια 100ετή αναγωγή για την θέρμανσης του πλανήτη από το σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), τότε η ναυτιλία αντιπροσωπεύει περίπου το 2,8% των ετήσιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συμβολίζοντας τες ως CO<sub>2</sub>e. Μια μέση εκτίμηση για τις συνολικές εκπομπές από την ναυτιλία για την περίοδο 2007-2012 είναι 1.015 εκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub> και 1.036 εκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub>e για το σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου. Από την ποσότητα αυτή οι 846 εκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub> και οι 866 εκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub>e αντιπροσωπεύουν την διεθνή ναυτιλία με αντίστοιχα ποσοστά 2,6% CO<sub>2</sub> και το 2,4% CO<sub>2</sub>e. Αυτές οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι σχεδόν παρόμοιες με το 3,3% και 2,7% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub>, για το 2007, που αναφέρθηκαν στη δεύτερη μελέτη της IMO (2009) για τη συνολική ναυτιλία και τη διεθνή ναυτιλία αντίστοιχα.

Εκτός από το CO<sub>2</sub>, την περίοδο 2007-2012, υπολογίζεται πως η ναυτιλία εξέπεμψε περίπου 20,9 εκ. τόνους NO<sub>x</sub> και 11,3 εκ. τόνους SO<sub>x</sub>. Τα NO<sub>x</sub> είναι κλιματικά ουδέτερα καθώς ούτε απορροφούν ούτε ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία. Συμμετέχουν όμως σε χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην παραγωγή όζοντος (O<sub>3</sub>), το οποίο αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου. Βέβαια, τα NO<sub>x</sub> συμμετέχουν και σε χημικές αντιδράσεις διάσπασης του μεθανίου (CH<sub>4</sub>), το οποίο είναι ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η επίδραση των NO<sub>x</sub> στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ουδέτερη. Όσον αφορά τα οξείδια του θείου, σχηματίζουν στην ατμόσφαιρα σωματίδια θεικών τα οποία σκεδάζουν την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία συμβάλλοντας στην μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου ψύχοντας την ατμόσφαιρα. Από την άλλη, η αιθάλη που εκπέμπεται από τους ναυτικούς κινητήρες συμβάλει στην αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας καθώς λόγω του μαύρου χρώματος απορροφά μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμα επιτυγχάνει και σκίαση της επιφάνειας της γης η οποία όμως σε ανοιχτόχρωμες επιφάνειες (π.χ. Αρκτική) μειώνει την ανακλαστικότητα τους με αποτέλεσμα την επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Βέβαια, η ναυτιλία συγκριτικά με τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς αγαθών είναι πιο φιλική ως προς τις επιπτώσεις στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα μεταφερόμενου αγαθού είναι αρκετά χαμηλές και μπορούν να συγκριθούν μόνο με τις σιδηροδρομικές μεταφορές.



Εικόνα 4.4: Εκπομπές CO<sub>2</sub> για τα διάφορα μέσα μεταφοράς εμπορευμάτων

Πολλοί υποστηρίζουν πως λόγω των παραπάνω φαινομένων η επίδραση που έχει η ναυτιλία στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και εν τέλει στην θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι ουδέτερη. Αυτή η εκτίμηση όμως μπορεί να θεωρηθεί και λανθασμένη καθώς το SO<sub>2</sub> και το CO<sub>2</sub> λειτουργούν σε πολύ διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Το CO<sub>2</sub> (σχετικά αδρανές) μπορεί να παραμείνει στην ατμόσφαιρα από 5 έως 200 χρόνια την στιγμή που τα σωματίδια θειικού παραμένουν για λίγες μέρες. Συνεπώς, η θετική επίδραση που έχει μια ποσότητα διοξειδίου του θείου στο φαινόμενο το θερμοκηπίου είναι σημαντικά μικρότερη σε διάρκεια σε σχέση με την αρνητική επίδραση που έχει το διοξείδιο του άνθρακα. Πέρα όμως από τις επιπτώσεις που έχουν τα SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και PM στο φαινόμενο το θερμοκηπίου η ρύπανση που προκαλούν και τα προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου είναι εξαιρετικής σημασίας και επικινδυνότητας και για αυτό η επιβολή κανονισμών για τα όρια εκπομπών τους στην ναυτιλία είναι επιβεβλημένη.

Σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη προβλέπεται πως λόγω της αναμενόμενης ανάπτυξης της οικονομίας τα επόμενα χρόνια οι εκπομπές CO<sub>2</sub> θα παρουσιάσουν αύξηση από 50% μέχρι 250% μέχρι το 2050, αν μέχρι τότε συνεχίσει να μην ισχύει κάποιος περιορισμός όσον αφορά την μέγιστη ποσότητα εκπομπών CO<sub>2</sub>. Ακόμα, η μελέτη αναφέρει πως όσο και να βελτιωθούν οι τεχνολογίες και όσο και να αυξηθεί η αποδοτικότητα των κινητήρων, αν συνεχιστεί η χρήση ορυκτών καυσίμων δεν θα επιτευχθεί μείωση στις εκπομπές του CO<sub>2</sub> παρά μόνο θα μετριαστεί η προβλεπόμενη αύξηση τους. Οι εκπομπές μεθανίου (οι οποίες βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα) αναμένεται να αυξηθούν καθώς αυξάνεται το ποσοστό χρήσης LNG ως καύσιμο. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου θα αυξηθούν με χαμηλότερο ρυθμό από τις εκπομπές CO<sub>2</sub> λόγω των κανονισμών που επιβάλλονται και θα επιβληθούν στο μέλλον. Οι εκπομπές σωματιδίων παρουσιάζουν απόλυτη μείωση μέχρι το 2020 και τα θειούχα οξείδια θα συνεχίσουν να μειώνονται έως το 2050, κυρίως λόγω των απαιτήσεων του παραρτήματος VI της MARPOL το οποίο θα αναφέρουμε πιο αναλυτικά στην συνέχεια.

#### 4.2.2 Κανονισμοί για τον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων στην ναυτιλία

Οι κανόνες που ισχύουν σύμφωνα με τον ΙΜΟ για την προστασία του περιβάλλοντος από την ρύπανση που προκαλεί η ναυτιλία περιλαμβάνονται στην «Διεθνή σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία» γνωστή και ως MARPOL 73/78 (Marine Pollution). Στις 27 Σεπτεμβρίου του 1997 η σύμβαση MARPOL τροποποιήθηκε με βάση το Πρωτόκολλο του 1997 το οποίο περιλαμβάνει το Παράρτημα VI με τίτλο «Κανονισμοί για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία». Το συγκεκριμένο παράρτημα θέτει όρια στα εκπεμπόμενα οξείδια του αζώτου και του θείου από τις εξατμίσεις των κινητήρων των πλοίων και απαγορεύει σκόπιμες εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος. Τα πρότυπα εκπομπών του ΙΜΟ αναφέρονται συνήθως ως πρότυπα Tier (επίπεδα) I, II, III.

Το πρότυπο Tier I ορίστηκε σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του 1997 και θα άρχιζε να ισχύει 12 μήνες μετά την αποδοχή του από 15 κράτη τα οποία θα κατείχαν τουλάχιστον το 50% της παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας. Στις 18 Μαΐου 2004, η Σαμόα κατέθεσε την επικύρωσή της ως το 15<sup>ο</sup> κράτος (μαζί με Μπαχάμες, Μπαγκλαντές, Μπαρμπάντος, Δανία, Γερμανία, Ελλάδα, Λιβερία, νησιά Marshal, Νορβηγία, Παναμά, Σιγκαπούρη, Ισπανία, Σουηδία και Δημοκρατία της Βανουάτου). Τα 15 αυτά κράτη κατείχαν το 54,57% της παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας. Ως εκ τούτου, το παράρτημα VI τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005. Εφαρμόστηκε αναδρομικά σε νέους κινητήρες άνω των 130 kW που είναι εγκατεστημένοι σε σκάφη κατασκευασμένα από 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2000 ή τα οποία υπόκεινται σε σημαντική μετατροπή μετά από αυτήν την ημερομηνία. Ο κανονισμός αυτός ισχύει επίσης για σταθερές και πλωτές εξέδρες και για πλατφόρμες γεώτρησης. Λόγω της επικείμενης επικύρωσης του παραρτήματος VI, οι περισσότεροι κατασκευαστές ναυτικών κινητήρων κατασκεύαζαν ήδη κινητήρες που συμμορφώνονται με τα παραπάνω πρότυπα από το 2000.

Τα πρότυπα Tier II/III ορίστηκαν βάση της τροποποίησης του Παραρτήματος VI το 2008. Εισήγαγε νέες απαιτήσεις για την ποιότητα των καυσίμων από τον Ιούλιο του 2010, νέα επίπεδα εκπομπών NO<sub>x</sub> για τους νέους κινητήρες και νέες απαιτήσεις για τους υπάρχοντες κινητήρες κατασκευής όμως πριν το 2000. Μέχρι τον Οκτώβριο του 2008, το Παράρτημα VI είχε επικυρωθεί από 53 χώρες (συμπεριλαμβανομένων των Ηνωμένων Πολιτειών) και έτσι αντιπροσώπευε το 81,88% την παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας. Το αναθεωρημένο παράρτημα VI τέθηκε σε ισχύ την 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2010.

Σύμφωνα με το Παράρτημα VI δίνεται η δυνατότητα να ορισθούν περιοχές ελέγχου εκπομπών στις οποίες θα ισχύουν αυστηρότερα όρια εκπομπής ρύπων με σκοπό κατά κύριο λόγο την προστασία των παράκτιων περιοχών στις οποίες υφίσταται σημαντική ναυτιλιακή δραστηριότητα. Αυτές οι περιοχές ονομάζονται ECAs (Emission Control Areas) και σχετίζονται είτε με επιπλέον περιορισμό εκπομπής SO<sub>x</sub> και PM ή NO<sub>x</sub> είτε συνδυασμό αυτών. Έτσι προκύπτουν οι περιοχές SECA (SO<sub>x</sub> Emission Control Areas) και NECA (NO<sub>x</sub> Emission Control Areas).



Μέχρι στιγμής σαν περιοχές ελέγχου εκπομπών έχουν ορισθεί:

- Βαλτική Θάλασσα (SO<sub>x</sub>: εγκρίθηκε το 1997 / τέθηκε σε ισχύ το 2005 - NO<sub>x</sub>: 2016/2021)
- Βόρεια Θάλασσα (SO<sub>x</sub>: 2005/2006 - NO<sub>x</sub>: 2016/2021)
- Βόρειος Αμερική, περιλαμβάνει ακτές ΗΠΑ και Καναδά (NO<sub>x</sub> & SO<sub>x</sub>: 2010/2012).
- ΗΠΑ της Καραϊβικής, συμπεριλαμβανομένου του Πουέρτο Ρίκο και των Παρθένων Νήσων των ΗΠΑ (NO<sub>x</sub> & SO<sub>x</sub>: 2011/2014).

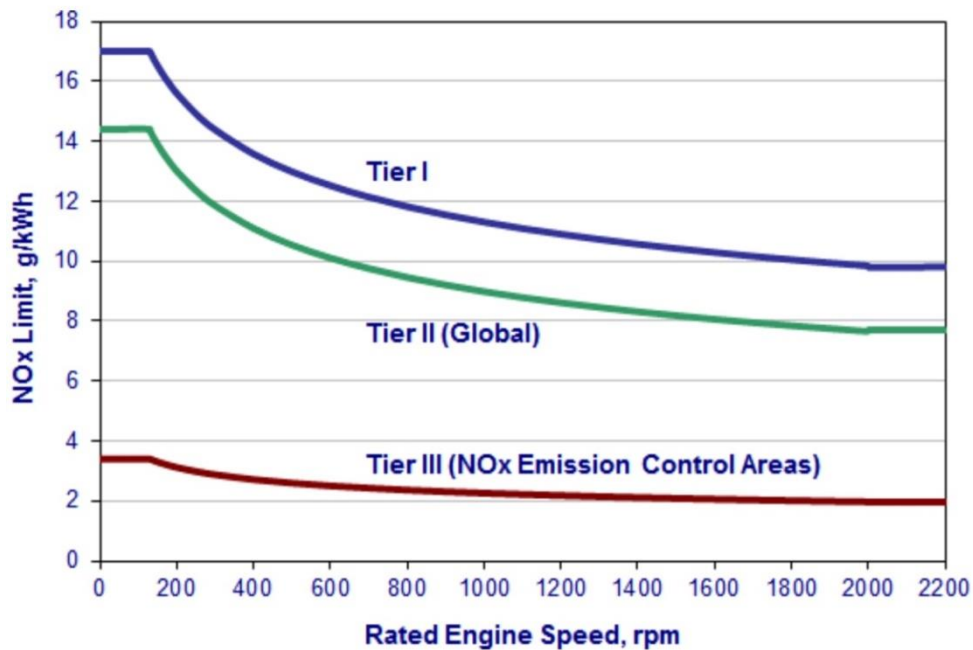
Το πρότυπο Tier II σε σχέση με το Tier I απαιτούσε μείωση 25% των NO<sub>x</sub> και για να επιτευχθεί οι κατασκευαστές των κινητήρων βελτιστοποίησαν της διαδικασίες της καύσης. Οι κατασκευαστές πραγματοποίησαν βελτιστοποίηση του χρονισμού έγχυσης του καυσίμου, της ροής του καυσίμου, του χρονισμού των βαλβίδων εξαγωγής και της συμπίεσης των κυλίνδρων. Το πρότυπο Tier II τέθηκε σε εφαρμογή από το 2011.

Το πρότυπο Tier III που εφαρμόζεται είναι αρκετά πιο αυστηρό από το Tier II καθώς απαιτεί περαιτέρω μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> μέχρι και 76% (για τους δίχρονους κινητήρες Diesel μεγάλης ισχύος (n<130)). Για την επίτευξη μειώσεων τέτοιας κλίμακας απαιτήθηκαν ειδικές τεχνολογίες ελέγχου των εκπομπών NO<sub>x</sub>, όπως διάφορες μορφές έγχυσης νερού στο θάλαμο καύσης για μείωση των θερμοκρασιών, ανακυκλοφορία καυσαερίων ή/και εκλεκτική καταλυτική αναγωγή. Σύμφωνα με τις τροποποιήσεις του Παραρτήματος VI του 2008, το πρότυπο Tier I θα ισχύει επιπλέον και για υπάρχοντες κινητήρες εγκατεστημένους σε πλοία που κατασκευάστηκαν από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 1990 έως την 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 1999, με όγκο εμβολισμού μεγαλύτερο από 90 λίτρα ανά κύλινδρο και ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη από 5000 kW. Για την μέτρηση των εκπομπών οι κινητήρες δοκιμάζονται σε διάφορους κύκλους ISO-8178. Αν και σε πραγματικές συνθήκες οι κινητήρες δουλεύουν σε μεγάλο ποσοστό με βαρύ πετρέλαιο, οι μετρήσεις γίνονται με αποσταγματικό πετρέλαιο.

Tier	Date	NOx Limit, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	45 · n <sup>-0.2</sup>	9.8
Tier II	2011	14.4	44 · n <sup>-0.23</sup>	7.7
Tier III	2016†	3.4	9 · n <sup>-0.2</sup>	1.96

† In NOx Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).

Πίνακας 4.7: Πρότυπα εκπομπής NO<sub>x</sub> από ναυτικούς κινητήρες



Εικόνα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση των ορίων NO<sub>x</sub> για κάθε πρότυπο Tier

Όσον αφορά τις εκπομπές SO<sub>x</sub> το Παράρτημα VI της MARPOL προβλέπει έμμεσο τρόπο για τη μείωση τους καθώς ορίζει περιορισμούς σχετικά με την περιεκτικότητα του θείου στο πετρέλαιο. Ο σχηματισμός των SO<sub>x</sub> εξαρτάται από την περιεκτικότητα του θείου στο πετρέλαιο και με αυτόν τον περιορισμό μειώνονται οι εκπομπές SO<sub>x</sub>. Έμμεσα μειώνονται και τα αιωρούμενα σωματίδια στα καυσαέρια καθώς αναγκαστικά το πετρέλαιο που χρησιμοποιείτε είναι πιο ελαφρύ απόσταγμα από το βαρύ μαζούτ που καιγόταν στους ναυτικούς κινητήρες τα προηγούμενα χρόνια.

Το Παράρτημα VI αρχικά όριζε παγκόσμια σαν άνω όριο το 4,5% κ.β. θείο στο καύσιμο πετρέλαιο που χρησιμοποιείται από τα πλοία. Το όριο αυτό μειώθηκε στο 3,5% το 2012 και προβλέπεται να μειωθεί περαιτέρω στο 0,5% έως το 2020. Αυτό θα συμβεί αν μετά από έρευνα που θα ολοκληρωθεί το 2018 διαπιστωθεί ότι η ζήτηση σε πετρέλαιο χαμηλής περιεκτικότητας μπορεί να καλυφτεί. Σε αντίθετη περίπτωση το όριο 0,5% θα ισχύσει από το 2025.

Το Παράρτημα VI περιέχει επίσης πρόβλεψη για τις περιοχές ελέγχου εκπομπών SO<sub>x</sub> (SECAs) όπου τα όρια περιεκτικότητας του θείου στο πετρέλαιο είναι ακόμα αυστηρότερα. Πιο συγκεκριμένα στις περιοχές αυτές το όριο ήταν 1,5% κ.β το 2000. Το όριο αυτό μειώθηκε στο 1% το 2010 και έγινε 0,1% από το 2015. Εναλλακτικά, τα πλοία που χρησιμοποιούν καύσιμο υψηλής περιεκτικότητας σε θείο μπορούν να εφαρμόσουν κάποιο σύστημα καθαρισμού των καυσαερίων ή να χρησιμοποιήσουν οποιαδήποτε άλλη τεχνολογία που θα μειώνει τις εκπομπές SO<sub>x</sub> στο επιθυμητό επίπεδο.

Date	Sulfur Limit in Fuel (% m/m)	
	SO <sub>x</sub> ECA	Global
2000	1.5%	4.5%
2010.07	1.0%	
2012	0.1%	3.5%
2015		
2020		0.5%

Πίνακας 4.8: Όρια περιεκτικότητας θείου στο πετρέλαιο παγκόσμια και στις περιοχές SECA

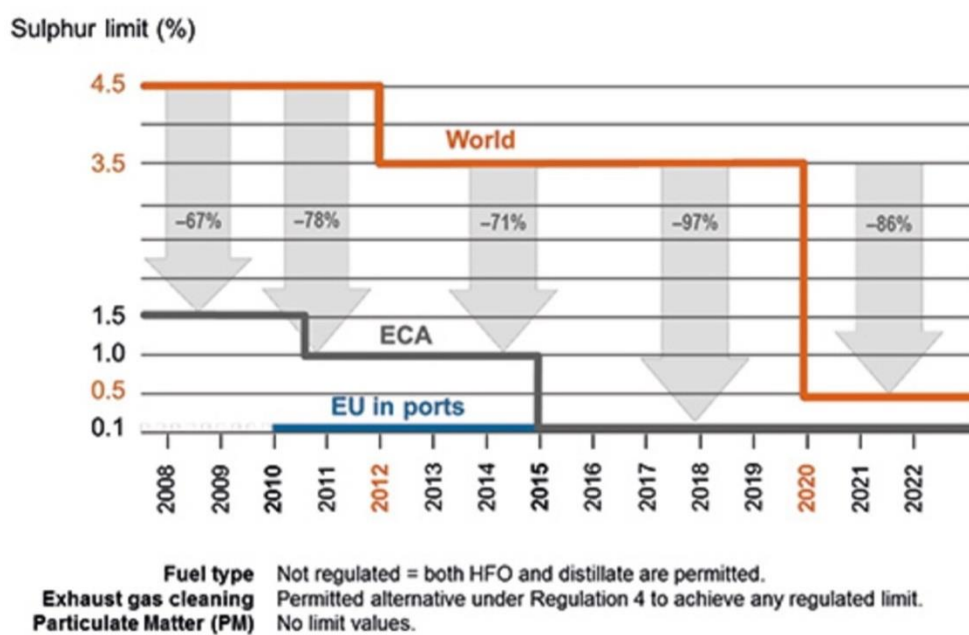
Όσον αφορά τα αέρια του θερμοκηπίου (GHG) το Παράρτημα VI της MARPOL με τροποποίηση το 2011 εισάγει στο κεφάλαιο 4 δύο υποχρεωτικούς μηχανισμούς που αποσκοπούν στην δημιουργία ενός προτύπου ενεργειακής απόδοσης των πλοίων. Με την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων και με την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου επιτυγχάνεται η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ο πρώτος μηχανισμός είναι ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Απόδοσης (EEDI - Energy Efficiency Design Index) και εφαρμόζεται για τα νέα πλοία. Οι σχεδιαστές και κατασκευαστές του πλοίου είναι ελεύθεροι να επιλέξουν τις κατάλληλες τεχνολογίες για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του δείκτη EEDI. Ο δεύτερος μηχανισμός είναι ένα Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης (SEEMP - Ship Energy Efficiency Management Plan) για όλα τα πλοία. Το SEEMP αφορά λειτουργικά κυρίως μέτρα. Για να μπορέσει ένα πλοίο να αποκτήσει το Διεθνές Πιστοποιητικό Ενεργειακής Αποδοτικότητας (International Energy Efficiency Certificate – IEEC), θα πρέπει να τηρεί τις απαιτήσεις των μηχανισμών EEDI και SEEMP.

### 4.2.3 Ρυθμιστικό πλαίσιο Ευρωπαϊκής Ένωσης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των σχετικών ναυτιλιακών κανονισμών στον IMO, οι οποίοι κανονισμοί υιοθετούνται από το ευρωπαϊκά δίκαιο. Σε γενικές γραμμές η Ευρωπαϊκή Ένωση συντάσσεται με τους κανονισμούς του IMO αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες δρα μονομερώς με σκοπό την θέσπιση αυστηρότερων κανονισμών για τα πλοία που ελλιμενίζονται σε ευρωπαϊκά λιμάνια ή φέρουν ευρωπαϊκή σημαία.

Το πρώτο βήμα με σκοπό την μείωση των SO<sub>x</sub> από την ναυτιλία ήταν η οδηγία 1999/32/EK που σχετίζεται με την μείωση της περιεκτικότητας ορισμένων καυσίμων σε θείο. Πιο συγκεκριμένα έθετε όρια στην μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο του μαζούτ και του πετρελαίου. Η οδηγία αυτή τροποποιήθηκε από την οδηγία 2005/33/EK η οποία ευθυγράμμιζε την ευρωπαϊκή νομοθεσία με τα προβλεπόμενα από το παράρτημα VI της MARPOL. Ορίστηκαν περιοχές ελέγχου SO<sub>x</sub> (SECA) η Βαλτική, η Βόρεια Θάλασσα και το στενό της Μάγχης στις οποίες ίσχυε το όριο του 1,5% κ.β. που αναφέραμε και παραπάνω. Οι περιοχές αυτές ορίστηκαν πρώτες ως SECA γιατί ήταν αυτές που υπέφεραν περισσότερο από όξινη βροχή. Το όριο αυτό, βάση της οδηγίας, εφαρμόζεται και σε επιβατικά πλοία που λειτουργούν σε τακτικά δρομολόγια ακόμα και εκτός SECAs.

Επιπλέον, η συγκεκριμένη οδηγία προέβλεπε ότι από 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου του 2010 θα έπρεπε να ληφθούν από τα κράτη μέλη όλα τα απαραίτητα μέτρα έτσι ώστε τα πλοία που είναι προσδεδεμένα σε ευρωπαϊκά λιμάνια να μην χρησιμοποιούν καύσιμα με περιεκτικότητα σε θείο μεγαλύτερη από 0,1% κ.β.. Η μεγάλη διαφορά μεταξύ της ευρωπαϊκής οδηγίας και του Παραρτήματος VI της MARPOL είναι ότι το συγκριμένο όριο περιεκτικότητας σύμφωνα με το Παράρτημα VI τέθηκε σε ισχύ την 1<sup>η</sup> Ιουλίου του 2015 και μόνο για τις περιοχές SECA. Ακόμα, το Παράρτημα VI προβλέπει πως το συγκεκριμένο όριο δεν ισχύει για πλοία που παραμένουν λιγότερο από 2 ώρες στο λιμάνι ή σε πλοία τα οποία έχουν σβήσει τις μηχανές του και χρησιμοποιούν ενέργεια από την ξηρά. Αυτό ουσιαστικά συνεπάγεται ότι τα πλοία είναι αναγκασμένα να αλλάζουν από βαρύ πετρέλαιο (HFO – Heavy Fuel Oil) σε ελαφρύ (MGO – Marine Gas Oil) μέσα στα ευρωπαϊκά λιμάνια.



Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση των ορίων SO<sub>x</sub> παγκόσμια και σε περιοχές SECA και στα λιμάνια της Ευρώπης

Με την οδηγία 2003/96/EK η Ευρωπαϊκή Ένωση δίνει την δυνατότητα στα κράτη μέλη να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στα πλοία που είναι προσδεδεμένα στα ευρωπαϊκά λιμάνια με μειωμένη ή και καθόλου φορολογία. Ο λόγος είναι η μείωση των εκπεμπόμενων καυσαερίων και ρύπων καθώς και η μείωση του θορύβου, ειδικά όταν τα λιμάνια είναι κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτονται οι απαιτήσεις σε ενέργεια για τα προσδεδεμένα πλοία και δεν θα είναι αναγκαία η λειτουργία των κινητήρων τους.

Ακόμα, με την οδηγία 2012/33/EK, η οποία ήταν τροποποίηση της 1992/32/EK, ορίστηκαν τα όρια περιεκτικότητας του πετρελαίου σε θείο αντίστοιχα με τα αυτά που όριζε το Παράρτημα VI με την διαφορά όμως ότι από το 2020 το όριο του 0,5% εκτός SECA θα ισχύσει κανονικά. Στην

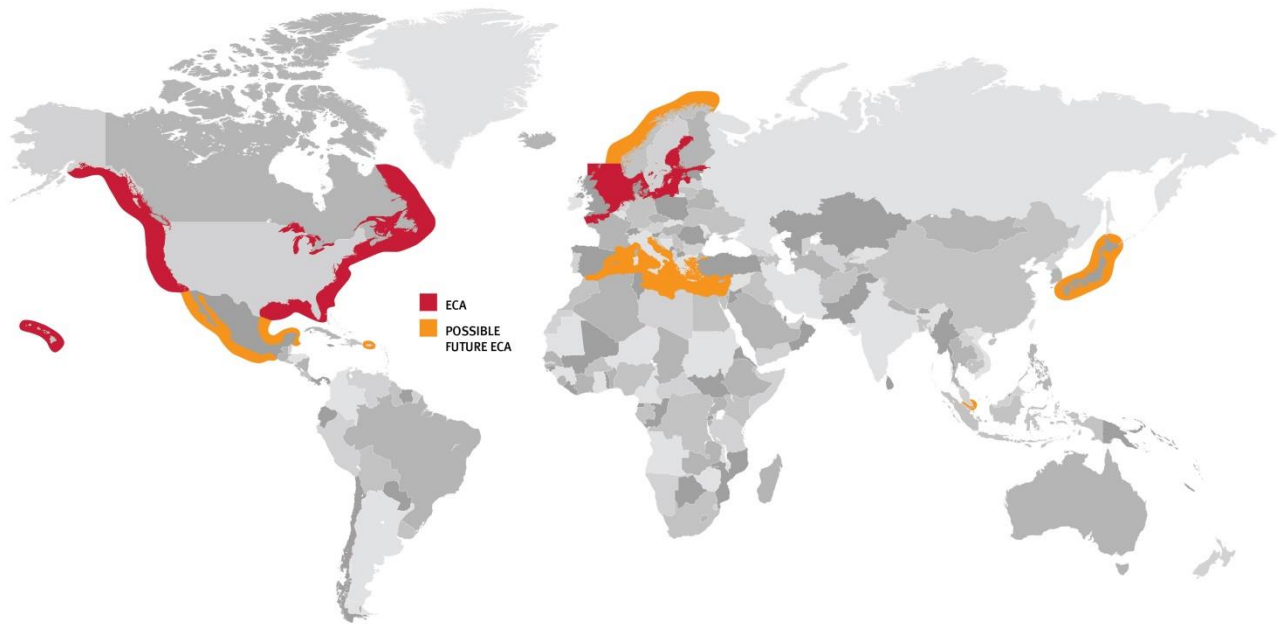
περίπτωση του Παραρτήματος VI υπήρχε πρόβλεψη ότι αν η μελέτη, που θα έχει πραγματοποιηθεί μέχρι το 2018, αναδείξει πρόβλημα επάρκειας σε πετρέλαιο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο τότε το όριο 0,5% θα μετατεθεί για το 2025.

Έχοντας ως στόχο η Ευρωπαϊκή Ένωση την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 40% (αν είναι εφικτό και 50%) σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, πρότεινε ένα νέο σύστημα παρακολούθησης των εκπομπών CO<sub>2</sub>, το MRV (Monitoring, Reporting and Verification). Με το συγκεκριμένο σύστημα τα πλοία θα παρακολουθούν τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, την διανυθέντα απόσταση καθώς και το μεταφερόμενο φορτίο. Τέλος, τα παραπάνω δεδομένα αφού επιβεβαιωθούν από έναν ανεξάρτητο φορέα στέλνονται κάθε χρόνο στο κράτος της σημαίας του πλοίου και στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Μια ακόμα επιλογή της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι να δώσει την δυνατότητα στην ναυτιλία να συμμετάσχει στο εμπόριο των δικαιωμάτων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Με αυτόν τον τρόπο η ναυτιλία θα μπορέσει να επενδύσει σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με σκοπό να αντισταθμίσει τις δικές της μεγάλες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Μέχρι στιγμή έχουν εξαιρεθεί η ναυτιλία και η αεροπορία από το εμπόριο εκπομπής ρύπων αλλά αν στο μέλλον ο IMO δεν αναιρέσει την συγκεκριμένη εξαίρεση για την ναυτιλία ίσως το κάνει μονομερώς η Ευρωπαϊκή Ένωση.

#### **4.2.4 Μέτρα περιορισμού εκπομπών στο άμεσο μέλλον**

Η επιβολή πρόσθετων μέτρων για τον περιορισμό των εκπομπών από την ναυτιλία κρίνεται επιτακτική. Παρά ταύτα, δεν υπάρχει κάποιος νομοθετημένος κανονισμός και χρονοδιάγραμμα σχετικά με την επιβολή επιπρόσθετων μέτρων παρά μόνο ότι αναφέραμε και παραπάνω. Γίνονται πολλές συζητήσεις όμως σε θέματα που αφορούν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και τις περιοχές ECA.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για τον περιορισμό του CO<sub>2</sub> έχουν εφαρμοστεί κάποιοι μηχανισμοί που σκοπό έχουν την καλύτερη ενεργειακή απόδοση των πλοίων αλλά συζητιέται και η ένταξη της ναυτιλίας στην αγορά εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Το συγκεκριμένο σενάριο είναι πολύ πιθανό αλλά δεν είναι επιβεβαιωμένο. Σχετικά με τις ζώνες ECA, είναι υπό συζήτηση η ένταξη και άλλων περιοχών όπως η Μεσόγειος, ο κόλπος του Τόκιο και η ακτογραμμή της Αυστραλίας.



*Εικόνα 4.7: Ο Παγκόσμιος Χάρτης με τις υπάρχουσες και μελλοντικές περιοχές ECA*

Κλείνοντας, κρίνεται απαραίτητη η επιπλέον επίβλεψη των εκπεμπόμενων ρύπων καθώς και ο περιορισμός τους. Για να επιτευχθούν οι κανονισμοί που ήδη ισχύουν αλλά και οι μελλοντικοί και πιο αυστηροί κανονισμοί, είναι αναγκαία η χρήση κατάλληλων τεχνολογικών λύσεων που θα επιφέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα, όπως είναι τα ήδη γνωστά συστήματα αντιρύπανσης. Εκτός όμως από την ανάπτυξη συστημάτων αντιρύπανσης πολύ διαδεδομένη και ελπιδοφόρα λύση είναι η μεικτή καύση πετρελαίου και φυσικού αερίου. Εφαρμογές και τεχνολογίες μεικτής καύσης υπάρχουν ήδη και αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι υπάρχουσες τεχνολογίες καθώς και εξέλιξη αυτών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

# Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ LNG ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ, ΟΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΜΕΙΚΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΑΥΤΑΝΑΦΛΕΞΗΣ ΚΑΙ ΤΑ ΟΦΕΛΟΙ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΥΤΩΝ

### 5.1 Η επίδραση της αυξανόμενης χρήσης φυσικού αερίου στις μεταφορές και ειδικότερα στην ναυτιλία

Το φυσικό αέριο την σημερινή εποχή ικανοποιεί μεγάλο πλήθος αναγκών που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας, τις μεταφορές, την θέρμανση καθώς και άλλες οικιακές ανάγκες. Αυτή η αυξημένη ζήτηση φυσικού αερίου έχει οδηγήσει στην ανεύρεση διαφόρων μεθόδων μεταφοράς και διάθεσης του στους τελικούς καταναλωτές. Οι δύο κύριες μέθοδοι μεταφοράς του φυσικού αερίου είναι είτε με χερσαίο ή υποθαλάσσιο σύστημα αγωγών είτε με οδική ή θαλάσσια μεταφορά του σε υγροποιημένη όμως μορφή (LNG). Οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου μεταφέρουν φυσικό αέριο υπό πίεση (μέχρι 100 bar) από τις πηγές φυσικού αερίου μέχρι του τελικού καταναλωτές. Αυτός ο τρόπος μεταφοράς είναι οικονομικός και αξιόπιστος όταν η απόσταση μεταξύ πηγής και κατανάλωσης είναι μέχρι μερικά χιλιάδες χιλιόμετρα και εφόσον δεν παρεμβάλετε μεγάλη θαλάσσια έκταση. Μεταφορά φυσικού αερίου μπορεί να γίνει και με χρήση δεξαμενών υψηλής συμπίεσης (200bar) αλλά λόγω του ότι οι δεξαμενές αυτές καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο και η ποσότητα του φυσικού αερίου δεν είναι ικανοποιητική έχει επικρατήσει η μεταφορά του σε υγροποιημένη μορφή σε κρυογονικές δεξαμενές.

Η μεταφορά υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) είναι αυτή που έχει επικρατήσει για τις περιοχές όπου δεν υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο αγωγών φυσικού αερίου. Στον τομέα των οδικών μεταφορών η μεταφορά LNG γίνεται μέσω οχημάτων βαρέως τύπου των οποίων οι δεξαμενές είναι ικανές για την μεταφορά μέχρι και 60 m<sup>3</sup> LNG. Η πυκνότητα του LNG κυμαίνεται μεταξύ 430 kg/m<sup>3</sup> και 470 kg/m<sup>3</sup> κάτι το οποίο σημαίνει πως ένα όχημα βαρέως τύπου είναι ικανό να μεταφέρει κάτι λιγότερο από 30 τόνους LNG. Στον τομέα όμως των ναυτικών μεταφορών η ποσότητα του μεταφερόμενου φυσικού αερίου είναι πολύ μεγαλύτερη. Τα πιο εξελιγμένα και μεγάλα πλοία μεταφοράς LNG (LNG Carriers) είναι ικανά να μεταφέρουν πάνω από 260.000 m<sup>3</sup> LNG. Για τον λόγο αυτό η μεταφορά LNG μέσω της ναυτιλίας είναι εξαιρετικής σημασίας και παρουσιάζει ιδιαίτερη ανάπτυξη.





*Εικόνα 5.1: Πλοίο μεταφοράς LNG*

Το LNG, όπως έχουμε αναφέρει, είναι υπό πίεση περιβάλλοντος και σε θερμοκρασία  $-162^{\circ}\text{C}$ . Η εξάτμιση μιας μικρής ποσότητας LNG μέσα στις δεξαμενές είναι φυσικό φαινόμενο και λόγω της μεγάλης μεταφερόμενης ποσότητας, στις δεξαμενές των πλοίων προκύπτει μια σχετικά μεγάλη ποσότητα εξατμισμένου φυσικού αερίου. Αυτή η ποσότητα είναι αρκετή για να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύον καύσιμο στους ναυτικούς κινητήρες. Λόγω αυτού του φαινομένου και επειδή δεν ήταν επιτρεπτό το εξατμιζόμενο LNG να διαφύγει στην ατμόσφαιρα, τα LNG Carriers ήταν τα πρώτα που εφάρμοσαν την τεχνολογία μεικτής καύσης. Τα οφέλη της καύσης φυσικού αερίου καθώς και η αναγκαιότητα για περιβαλλοντολογικά καθαρότερους ναυτικούς κινητήρες οδήγησαν στην εξάπλωση της τεχνολογίας μεικτής καύσης και στα υπόλοιπα είδη πλοίων. Πλέον, κινητήρες διπλού καυσίμου υπάρχουν σε μικρά Ferry Boats μέχρι και σε μεγάλα Container Ships. Αυτή η εξέλιξη έχει οδηγήσει στην ανάγκη για ανάπτυξη νέων τεχνολογιών στην αποθήκευση καυσίμου, στον ανεφοδιασμό των πλοίων και φυσικά σε νέους κανόνες ασφαλείας.

### **5.1.1 Δεξαμενές αποθήκευσης LNG σε πλοία με κινητήρες μεικτής καύσης**

Οι δεξαμενές αποθήκευσης LNG είναι ένα από τα πιο σημαντικά συστήματα πάνω σε ένα πλοίο που κινείται με κινητήρες μεικτής καύσης. Είτε πρόκειται για μετατροπή ενός κινητήρα μονού καυσίμου σε διπλού καυσίμου είτε γενικά για την κατασκευή πλοίων με κινητήρα διπλού καυσίμου το κόστος των κρυογονικών δεξαμενών του LNG είναι επίσης σημαντικό. Ακόμη, ο χώρος που καταλαμβάνουν είναι αρκετά μεγαλύτερος από αντίστοιχες δεξαμενές πετρελαίου, περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερος. Όπως επίσης και οι κανόνες ασφαλείας και τα μέτρα προστασίας είναι πιο αυστηρά σε σχέση με της δεξαμενές πετρελαίου.

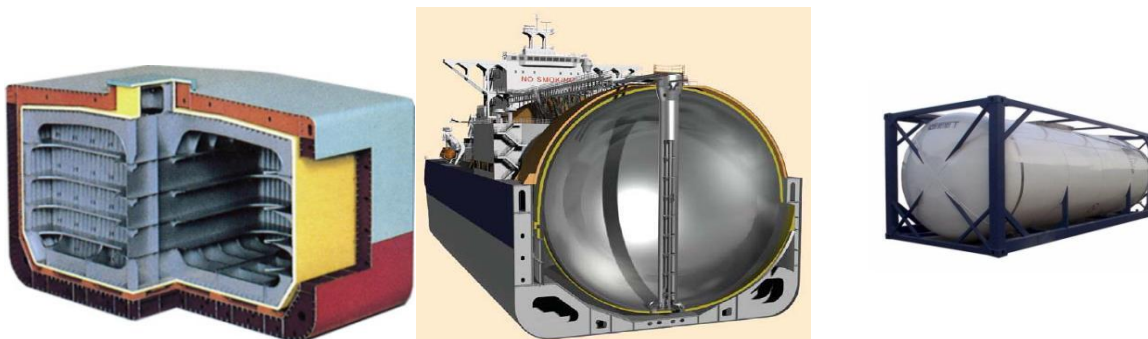
Ο IMO (International Maritime Organization) επιτρέπει την χρήση τριών ειδών δεξαμενών LNG οι οποίες είναι ανεξάρτητες και δεν είναι μέρος του σκελετού των πλοίων. Ο πρώτος τύπος (Type A) δεξαμενής LNG είναι οι πρισματικές δεξαμενές οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν στο



σχήμα του σκελετού του πλοίου και για αυτό το λόγο να επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση χώρου. Το πρόβλημα όμως με αυτές τις δεξαμενές είναι ότι απαιτείται εξωτερικός συμπιεστής για να τροφοδοτηθεί το σύστημα τροφοδοσίας γιατί η πίεση που επικρατεί στο εσωτερικό της δεξαμενής είναι 0,7 bar. Ακόμα, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη και δεύτερου τοιχώματος στην δεξαμενή καθώς σε περίπτωση πιθανής διαρροής κρυογονικού LNG ο σκελετός του πλοίου κινδυνεύει από ρηγματώσεις καθώς δεν είναι κατασκευασμένος από μέταλλα τα οποία είναι ανθεκτικά σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες. Η ποσότητα LNG που μπορεί να μεταφέρει μια Type A δεξαμενή είναι περισσότερη από 5000 m<sup>3</sup>. Τέλος, το κόστος της είναι αρκετά υψηλό και για όλους του παραπάνω λόγους δεν προτιμάται ιδιαίτερα.

Ο δεύτερος τύπος (Type B) δεξαμενής LNG είναι αυτός που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στα πλοία μεταφοράς LNG, ο σφαιρικός τύπος δεξαμενής ή τύπος Moss. Μια Type B δεξαμενή, λόγω του σχεδιασμού της, εμφανίζει μικρότερες πιθανότητα διαρροής LNG και για αυτό κρίνεται απαραίτητη μόνο η τμηματική τοποθέτηση διπλού τοιχώματος. Η πίεση που επικρατεί στο εσωτερικό της είναι της τάξης του 1 bar και για αυτό το λόγο απαιτείται, όπως και στην Type A, συμπιεστής για το σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου. Η εκμετάλλευση χώρου που επιτυγχάνεται είναι πολύ χειρότερη συγκρινόμενη με την δεξαμενή Type A. Τέλος, το κόστος μια τέτοιας δεξαμενής είναι επίσης υψηλό αλλά η ποσότητα μεταφερόμενου LNG είναι μεγαλύτερη από 5000m<sup>3</sup>. Είναι αρκετά διαδεδομένος τύπος δεξαμενής καθώς χρησιμοποιείται στα περισσότερα πλοία μεταφοράς LNG.

Ο τρίτος τύπος (Type C) δεξαμενής LNG είναι αρκετά διαδεδομένος σε πλοία τα οποία κάνουν χρήση κινητήρων μεικτής καύσης. Μπορεί να μην επιτυγχάνεται σημαντική εκμετάλλευση χώρου αλλά έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα τα οποία τις κάνουν καταλληλότερες για τέτοιου είδους εφαρμογές. Καταρχήν δίνουν την δυνατότητα για χρήση και σε μικρές εφαρμογές καθώς οι χωρητικότητά τους κυμαίνεται από 30 m<sup>3</sup> έως 1000 m<sup>3</sup>. Επιπλέον, το κόστος τους είναι μικρότερο σε σχέση με τους δύο προηγούμενους τύπους. Τέλος, η μέγιστη πίεση που μπορεί να επικρατήσει στο εσωτερικό των Type C δεξαμενών είναι τα 10 bar κάτι το οποίο βοηθάει στην διαχείριση του εξαμιζόμενου LNG αλλά και στη τροφοδοσία του συστήματος καυσίμου. Όλες οι δεξαμενές LNG γεμίζουν μέχρι το 95% της χωρητικότητάς τους για λόγους ασφαλείας.



Εικόνα 5.2: Τύποι δεξαμενών αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου

### 5.1.2 Ανεφοδιασμός LNG σε πλοία με κινητήρα μεικτής καύσης.

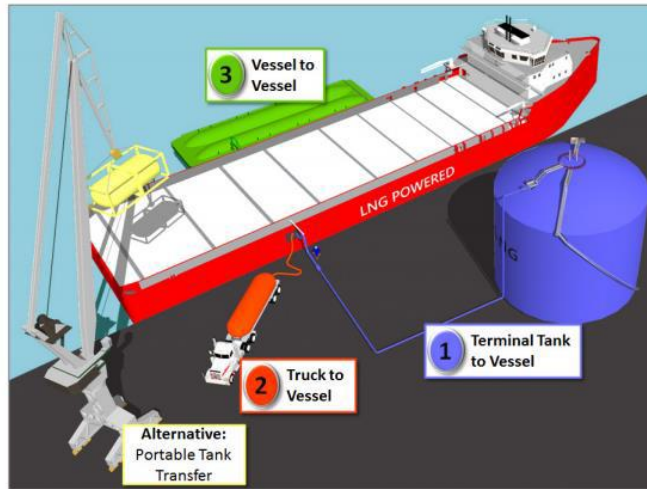
Οι συνθήκες στις οποίες βρίσκεται το LNG και πιο συγκεκριμένα οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για την συντήρηση του φυσικού αερίου σε υγροποιημένη μορφή, κάνουν τον ανεφοδιασμό των πλοίων με LNG μια ιδιαίτερη διαδικασία. Σε κάθε περίπτωση όμως ο ανεφοδιασμός μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε απευθείας στο λιμάνι είτε ακόμα και μακριά από την στεριά. Ουσιαστικά υπάρχουν 4 μέθοδοι ανεφοδιασμού με την κάθε μία να παρουσιάζει τα δικά της πλεονεκτήματα.

Η πρώτη και πιο κλασική μέθοδος είναι αυτή του ανεφοδιασμού στο λιμάνι (Shore-Pipeline to Ship, PTS) από υπάρχουσα εγκατεστημένη δεξαμενή LNG. Η μεταφορά του LNG από το λιμάνι στις δεξαμενές του πλοίου πραγματοποιείται από κρυογονικό αγωγό ο οποίος προσδένεται στην υποδοχή ανεφοδιασμού του πλοίου. Αυτή η μέθοδος δίνει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να γίνει ανεφοδιασμός ολόκληρης της δεξαμενής του πλοίου καθώς και να ανεφοδιαστούν, με την σειρά, παραπάνω από ένα πλοία.

Η δεύτερη μέθοδος ανεφοδιασμού είναι από φορτηγό όχημα μεταφοράς LNG στο πλοίο (Truck to Ship, TTS). Είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος καθώς δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα αρκετοί τερματικοί σταθμοί ανεφοδιασμού LNG στα λιμάνια και για να επιτευχθεί ο ανεφοδιασμός των πλοίων απαιτείται η οδική μεταφορά του LNG στα λιμάνια. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι είναι εύλικτη και μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πλήθος λιμανιών αλλά μειονεκτεί στο ότι η δεξαμενή του φορτηγού οχήματος μπορεί να μεταφέρει μέχρι 50 m<sup>3</sup> περίπου και ο ανεφοδιασμός διαρκεί περίπου μία ώρα. Κατά συνέπεια απαιτούνται πολλά φορτηγά οχήματα και αρκετές ώρες για να ανεφοδιαστεί ένα αρκετά μεγάλο πλοίο με μεγάλες δεξαμενές.

Η τρίτη μέθοδος ανεφοδιασμού (Portable tanks) είναι μια βελτίωση της προηγούμενης μεθόδου. Ουσιαστικά, γίνεται χρήση μεταφερόμενων δεξαμενών, ίδιου μεγέθους με τις προηγούμενες από το λιμάνι στο πλοίο μέσω γερανού, και με αυτόν τον τρόπο ο ανεφοδιασμός διαρκεί αρκετά λιγότερο και δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη πολλών φορτηγών οχημάτων. Οι δεξαμενές μπορεί να είναι η ίδιες που υπήρχαν στο πλοίο και να μεταφέρονται στο λιμάνι για ανεφοδιασμό είτε να είναι εναλλάξιμες αλλά ίδιο τύπου και σε κάθε ανεφοδιασμό το πλοίο να αλλάζει δεξαμενές.

Τέταρτη και τελευταία μέθοδος είναι αυτή του ανεφοδιασμού από πλοίο σε πλοίο (Ship to Ship, STS). Η συγκεκριμένη μέθοδος προσφέρει την μεγαλύτερη ευελιξία από όλες καθώς υπάρχει η δυνατότητα ανεφοδιασμού είτε στην στεριά είτε στην θάλασσα από ένα πλοίο που μεταφέρει το LNG σε ένα πλοίο που καίει LNG. Με αυτή την μέθοδο δεν υπάρχει περιορισμός στην ποσότητα ανεφοδιασμού καθώς επίσης και η ταχύτητα ανεφοδιασμού μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις ανάγκες.



Εικόνα 5.3: Μέθοδοι ανεφοδιασμού πλοίου με LNG

Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν είτε μεμονωμένα είτε και όλες μαζί για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν ταχύτερος ανεφοδιασμός του πλοίου. Ανεξάρτητα όμως από το ποια μέθοδος εφαρμόζεται επιβάλλονται ορισμένοι κανόνες ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται. Καταρχήν, ο ανεφοδιασμός με LNG θα πρέπει να γίνεται σε περιβάλλοντα χώρο ο οποίος έχει ικανοποιητικό εξαερισμό. Στα σημεία όπου υπάρχουν συνδέσεις και γενικά πιθανότητα διαρροής LNG υπάρχουν κατάλληλοι αγωγοί από ανοξείδωτο ασάλι έτσι ώστε να απομακρύνουν το LNG από τον σκελετό του πλοίου στον οποίο μπορεί να προκαλέσει ρωγμές. Ακόμα, θα πρέπει να διασφαλίζεται ότι δεν υπάρχει γενικά διαρροή LNG στον ατμοσφαιρικό αέρα μιας και το μεθάνιο είναι πολύ δραστικό αέριο του θερμοκηπίου. Θα πρέπει να υπάρχουν βαλβίδες ασφαλείας που να κλείνουν είτε χειροκίνητα είτε με απομακρυσμένο χειρισμό σε περίπτωση οποιασδήποτε δυσλειτουργίας κατά τον ανεφοδιασμό. Οι αγωγοί πριν από κάθε ανεφοδιασμό δεν πρέπει να περιέχουν υγρασία και οξυγόνο και μετά το τέλος κάθε ανεφοδιασμού θα πρέπει να αδειάζουν από το LNG με την βοήθεια αδρανούς αερίου. Γενικά, για όλα τα παραπάνω υπάρχουν συγκεκριμένοι κανόνες ασφαλείας όσον αφορά τον εξαερισμό, την ανίχνευση φυσικού αερίου και την προστασία από την φωτιά στους χώρους των δεξαμενών του κινητήρα και γενικά του σταθμού ανεφοδιασμού.

Ένας τυπικός ανεφοδιασμός ενός πλοίου με LNG ακολουθεί τέσσερα συγκεκριμένα στάδια. Το πρώτο στάδιο αφορά την ανταλλαγή γενικών πληροφοριών σχετικά με την διαδικασία του ανεφοδιασμού που θα πραγματοποιηθεί ανάμεσα στον σταθμό ανεφοδιασμού και το πλήρωμα του πλοίου. Στο δεύτερο στάδιο έχουμε την προετοιμασία του αγωγού για τον ανεφοδιασμό. Ο αγωγός πρέπει να ψυχθεί σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του αγωγού και του LNG. Το LNG, λόγω της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας του, μπορεί να προκαλέσει ζημιά σε περίπτωση που έρθει σε επαφή με τα ζεστά τοιχώματα του αγωγού και να υπάρξει απότομη αύξηση της πίεσης λόγω της εξάτμισης του LNG. Ακόμα, πριν την εκκίνηση του ανεφοδιασμού, ο αγωγός δεν θα πρέπει να περιέχει οξυγόνο μιας και το φυσικό αέριο είναι εύφλεκτο σε ορισμένη συγκέντρωση οξυγόνου. Αφού προετοιμαστεί ο

αγωγός, ξεκινάει το τρίτο στάδιο, αυτό του ανεφοδιασμού. Με την ολοκλήρωση του ανεφοδιασμού, το τέταρτο και τελευταίο στάδιο είναι αυτό του αδειάσματος του αγωγού από το εναπομείναντο LNG. Ο αγωγός καθαρίζει από το LNG με την χρήση αδρανούς αερίου, αζώτου.

### 5.1.3 Θέματα ασφαλείας σχετικά με την χρήση του LNG ως καύσιμο

Το LNG σαν ναυτικό καύσιμο άρχισε να χρησιμοποιείται από το 2001 αλλά μόνο σε κινητήρες πλοίων που μετέφεραν το LNG σαν εμπόρευμα παρόλο που το εμπόριο του LNG πραγματοποιείται εδώ και πάνω από 50 χρόνια. Κατά την εφαρμογή νέων τεχνολογιών προκύπτουν διάφορα προβλήματα τα οποία δεν μπορούν να προβλεφθούν και μόνο κατά την χρήση και με βάση την εμπειρία μπορούν να διαπιστωθούν και να διορθωθούν. Στον τομέα της ασφαλούς χρήσης του LNG ως καύσιμο ήταν καθοριστική η εμπειρία των 50 αυτών χρόνων. Τα μέτρα ασφαλείας κατά την κανονική λειτουργία και ανεφοδιασμό των πλοίων είναι τόσα πολλά που οι πιθανότητες διαρροής LNG είναι πραγματικά αμελητέες. Το LNG δεν είναι εύφλεκτο και το πόσο επικίνδυνο είναι εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν βέβαια από μια πιθανή διαρροή LNG είναι αρκετά και για αυτό λαμβάνονται πολλά μέτρα ασφαλείας.

Το LNG, λόγω της πολύ χαμηλής του θερμοκρασίας, σε περίπτωση διαρροής μπορεί να προκαλέσει βλάβες στην δομή του πλοίου καθώς τα μέταλλα με τα οποία κατασκευάζονται γίνονται ψαθυρά και δημιουργούνται ρωγμές. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων, στα σημεία που γίνεται ο ανεφοδιασμός του LNG και γενικά όπου μπορεί να υπάρξει πιθανή διαρροή του, τοποθετούνται μέταλλα ανθεκτικά σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες. Η χαμηλή θερμοκρασία του LNG μπορεί να προκαλέσει και τραυματισμούς στα μέλη του πληρώματος του πλοίου. Η επαφή με το δέρμα έχει αποτελέσματα παρόμοια με σοβαρά εγκαύματα είτε κρυοπαγήματα. Σε περίπτωση επαφής με τα μάτια ή άλλους ευαίσθητους ιστούς του ανθρώπινου σώματος προκαλεί ακόμα και ολοκληρωτική τους βλάβη. Για όλους τους παραπάνω λόγους, το προσωπικό των πλοίων LNG εκπαιδεύεται κατάλληλα για να αντιμετωπίζει και κατά κύριο λόγο να προλαμβάνει αυτούς τους κινδύνους.



*Εικόνα 5.4: Ρηγμάτωση στο κατάστρωμα πλοίου λόγω διαρροής LNG*

Σε περιπτώσεις διαρροής μεγάλης ποσότητας LNG υπάρχει ο κίνδυνος ασφυξίας για τους παρευρισκόμενους, είτε επειδή μπορεί να βρίσκονται πολύ κοντά στην κηλίδα LNG είτε γιατί ο χώρος δεν αερίζεται καλά. Για αποφυγή τέτοιων περιπτώσεων, οι χώροι όπου μπορεί να υπάρξει διαρροή LNG, έχουν πολύ καλά μελετημένο σύστημα εξαερισμού. Μεγαλύτερος όμως κίνδυνος είναι να δημιουργηθεί η λεγόμενη πισίνα φωτιάς. Όταν μεγάλη ποσότητα LNG έχει διαφύγει και έχει συγκεντρωθεί είτε στο πάτωμα είτε ακόμα και στην επιφάνεια της θάλασσας, εφόσον ο ρυθμός με τον οποίο εξατμίζεται το LNG είναι τέτοιος ώστε να δημιουργείται μίγμα αέρα - φυσικού αερίου με 5 έως 15% περιεκτικότητα σε φυσικό αέριο τότε οι συνθήκες είναι κατάλληλες για ανάφλεξη του φυσικού αερίου (π.χ. από κάποιον σπινθηρισμό). Καθώς το LNG εξατμίζεται συνεχώς και εφόσον τον ποσοστό ανάμιξης του φυσικού αερίου με τον αέρα είναι 5-15% τότε η φωτιά συνεχίζει να υπάρχει και να δημιουργείται η αναφερόμενη πισίνα φωτιάς. Η πιθανότητες δημιουργίας έκρηξης είναι μικρές και μόνο σε κλειστούς χώρους μπορούν να πραγματοποιηθεί όπου έχει εγκλωβιστεί το εξατμισμένο φυσικό αέριο. Τέλος, ένα είδος έκρηξης (όχι όμως λόγω ανάφλεξης) είναι και η περίπτωση απότομης μετάβασης του LNG σε φυσικό αέριο (από την υγρή στην αέρια φάση).

## 5.2 Τεχνολογίες ναυτικών κινητήρων μεικτής καύσης

Η αυξημένη ζήτηση φυσικού αερίου τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην ανάγκη της μεταφοράς του σε μορφή υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) μέσω θαλάσσης. Για αυτό το λόγο έχουν κατασκευαστεί μεγάλα πλοία με δυνατότητα μεταφοράς μέχρι και 260.000 m<sup>3</sup> LNG. Τα πρώτα πλοία μεταφοράς LNG χρησιμοποιούσαν κινητήρες πρόωσης ατμοστροβίλου. Επειδή όμως η αποδοτικότητα τους ήταν αρκετά μικρή αναγκαστικά αντικαταστάθηκαν από ναυτικού κινητήρες πετρελαίου. Με την κατασκευή όλο και μεγαλύτερων πλοίων μεταφοράς LNG και κατά συνέπεια λόγω της αυξημένης ποσότητας LNG που εξατμιζόταν, αναπτύχθηκε η ανάγκη για εκμετάλλευση αυτής της ποσότητας φυσικού αερίου. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας και με σκοπό την εκμετάλλευση του περισσευούμενου φυσικού αερίου αναπτύχθηκαν οι πρώτοι κινητήρες μεικτής καύσης. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες έπρεπε να καίνε το περισσευούμενο φυσικό αέριο όταν το πλοίο ήταν πλήρως φορτωμένο αλλά να υπάρχει και η δυνατότητα να μεταβαίνουν και στην κλασσική λειτουργία της καύσης πετρελαίου όταν το πλοίο θα επέστρεφε άδειο.

Έχοντας πλέον λυθεί το πρόβλημα του περισσευούμενου φυσικού αερίου που προέκυπτε από το εξατμιζόμενο LNG οι εταιρίες διαπίστωναν σιγά σιγά τα σημαντικά οφέλη της καύσης του φυσικού αερίου. Έτσι, οι εταιρίες κατασκευής κινητήρων άρχισαν να αναπτύσσουν ολοκληρωμένα συστήματα πρόωσης τα οποία θα μπορούσαν να καίνε φυσικό αέριο σε ποσοστό μεγαλύτερο του πετρελαίου και σε πλοία τα οποία δεν μετέφεραν LNG. Τα περιβαλλοντολογικά οφέλη ήταν πολύ σημαντικά και με την θέσπιση όλο και αυστηρότερων κανονισμών εκπομπής ρύπων, ειδικά στα πολυσύχναστα λιμάνια, κρινόταν επιτακτική η ανάγκη είτε ανάπτυξης συστημάτων αντιρύπανσης είτε χρήσης του φυσικού αερίου ως κύριο καύσιμο. Αυτός ήταν ένας από τους βασικούς παράγοντες που οι κατασκευαστές στράφηκαν στους κινητήρες μεικτής καύσης.

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας, ίσως και σημαντικότερος, είναι ο οικονομικός. Η χρήση του φυσικού αερίου ως καύσιμο μειώνει αρκετά τα έξοδα λειτουργίας των ναυτικών κινητήρων. Παρόλο που για την παραγωγή του LNG απαιτείται περίπου το 10-15% του ενεργειακού περιεχομένου του φυσικού αερίου, με την τιμή του LNG να διπλασιάζεται σε σχέση με αυτή του το φυσικό αέριο και πάλι όμως το LNG καταφέρνει να είναι φθηνότερο ακόμα και από το υπολειμματικό βαρύ πετρέλαιο. Από την άλλη, το κόστος κατασκευής ή μετατροπής ενός κινητήρα μονού σε διπλού καυσίμου είναι αρκετά μεγάλο και πιο συγκεκριμένα το κόστος των δεξαμενών και του συστήματος τροφοδοσίας μπορεί να είναι και πενταπλάσιο του κόστους μετατροπής του κινητήρα. Βέβαια η απόσβεση αυτού του κόστους έρχεται συνήθως σε λιγότερο από 10 χρόνια καθώς εξαρτάται και από το είδος των δρομολογίων του πλοίου.

Οι τεχνολογίες κινητήρων που κάνουν χρήση φυσικού αερίου είναι ουσιαστικά τρεις. Είναι οι κινητήρες σπινθηρισμού φτωχού μίγματος, οι κινητήρες διπλού καυσίμου με πιλοτική έγχυση πετρελαίου και έγχυση φυσικού αερίου σε χαμηλή πίεση και οι κινητήρες διπλού καυσίμου με πιλοτική έγχυση πετρελαίου και έγχυση φυσικού αερίου σε υψηλή πίεση. Οι πρώτοι κινητήρες, σπινθηρισμού, ουσιαστικά κάνουν αποκλειστική καύση φυσικού αερίου άρα δεν είναι κινητήρες μεικτής καύσης και δεν δίνουν την δυνατότητα της ευελιξίας χρήσης δύο καυσίμων. Οι δύο άλλες τεχνολογίες είναι αυτές οι οποίες παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι πρώτοι κινητήρες μεικτής καύσης που βρήκαν εφαρμογή ήταν οι τετράχρονοι κινητήρες χαμηλής πίεσης. Αυτοί οι κινητήρες αρχικά τοποθετούνταν όπως είπαμε στα πλοία μεταφοράς LNG, στην συνέχεια όμως αναπτύχθηκε η γκάμα των συγκεκριμένων κινητήρων με σκοπό την τοποθέτηση τους σε πλήθος άλλων εφαρμογών.

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία της μεικτής καύσης σε δίχρονους κινητήρες (που είναι και η πλειοψηφία των μεγάλων ναυτικών κινητήρων) παρουσίασε ανάπτυξη οδηγώντας στην δημιουργία δύο διαφορετικών φιλοσοφιών λειτουργίας. Κύριοι εκπρόσωποι αυτών των δύο τεχνολογιών είναι οι γνωστές εταιρίες κατασκευής ναυτικών κινητήρων, MAN Diesel & Turbo και Wärtsilä. Η MAN Diesel & Turbo κατασκευάζει μεγάλη γκάμα δίχρονων κινητήρων μεικτής καύσης υψηλής πίεσης ενώ η Wärtsilä δίχρονους κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης. Οι δύο αυτές τεχνολογίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και η κάθε μία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της.

### **5.2.1 Τετράχρονοι κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης**

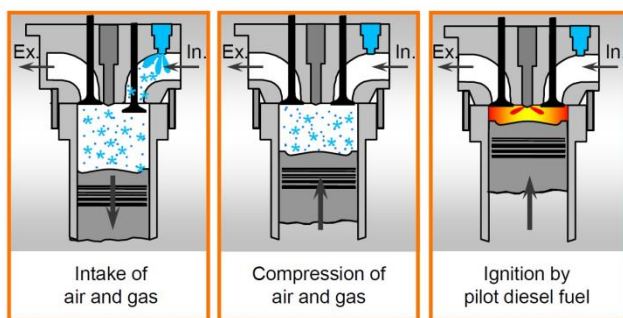
Οι δύο μεγάλοι κατασκευαστές στην περίπτωση των τετράχρονων κινητήρων ακολουθούν την ίδια φιλοσοφία και έχουν σχεδιάσει και οι δύο συστήματα χαμηλής πίεσης. Ξεκινώντας από τα βασικά, οι τετράχρονοι ναυτικοί κινητήρες είναι μεσόστροφοι κινητήρες με υπερσυμπιεστή καυσαερίων και ταχύτητα περιστροφής από 500 έως 1200 rpm. Σαν κινητήρες μονού καυσίμου ακολουθούν τις αρχές λειτουργίας κινητήρων αυτανάφλεξης δηλαδή τον κύκλο λειτουργίας του Diesel. Σαν κινητήρες όμως διπλού καυσίμου θα μπορούσαμε να πούμε ότι ακολουθούν τον κύκλο



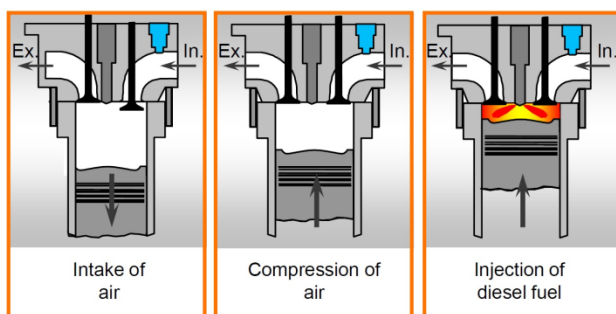
λειτουργίας του Otto. Αυτό συμβαίνει γιατί το φυσικό αέριο εισάγεται την κατάλληλη χρονική στιγμή, μέσω της εισαγωγής αέρα του κινητήρα, στον κύλινδρο και το προαναμεμειγμένο αυτό μείγμα αέρα – φυσικού αερίου αναφλέγεται λόγω της ενέργειας που απελευθερώνεται από την αυτανάφλεξη της μικρής ποσότητας πετρελαίου που εγχέεται σαν πιλοτικό καύσιμο. Ουσιαστικά η πιλοτική έγχυση πετρελαίου λειτουργεί σαν πηγή έναυσης, σπινθηριστής, για το μείγμα αέρα – φυσικού αερίου και για αυτό λέμε πως στην λειτουργία μεικτής καύσης ο κινητήρας ακολουθεί το κύκλο λειτουργίας του Otto. Όταν βέβαια ο κινητήρας μεικτής καύσης κάνει χρήση μόνο πετρελαίου τότε εννοείται πως ακολουθεί τον κλασικό κύκλο λειτουργίας του Diesel. Η εναλλαγή μεταξύ των καυσίμων γίνεται αστραπιαία και δεν παρατηρείται πτώση της ισχύος είτε έχουμε μετάβαση από πετρέλαιο σε φυσικό αέριο είτε αντίστροφα. Ακόμη, δεν υπάρχει περιορισμός ως προς το είδος του πετρελαίου καθώς σαν πιλοτικό, αλλά και σαν κύριο καύσιμο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ναυτικό πετρέλαιο (MDO) είτε και βαρύ πετρέλαιο (HFO) αποδίδοντας την ίδια ισχύ.

Gas mode:

- Otto principle
- Low-pressure gas admission
- Pilot diesel injection



Εικόνα 5.5: Τετράχρονος κινητήρας μεικτής καύσης σε λειτουργία καύσης φυσικού αερίου



Diesel mode:

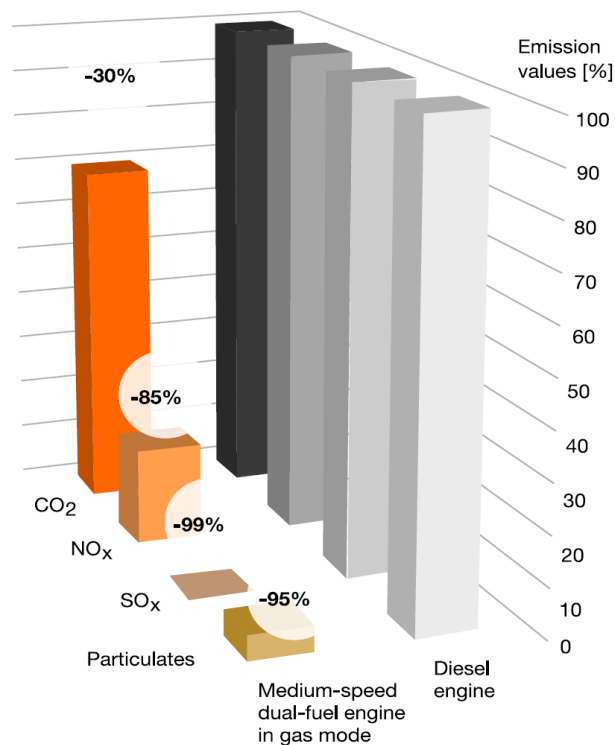
- Diesel principle
- Diesel injection

Εικόνα 5.6: Τετράχρονος κινητήρας μεικτής καύσης σε λειτουργία καύσης πετρελαίου

Το σύστημα τροφοδοσίας του πετρελαίου παραμένει το ίδιο με τους κινητήρες μονού καυσίμου με την διαφορά ότι το ακροφύσιο έγχυσης πετρελαίου έχει πλέον δύο οπές. Η πρώτη και κύρια οπή είναι υπεύθυνη για την τροφοδοσία μεγάλης ποσότητας πετρελαίου σε περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί κάνοντας χρήση μόνο πετρελαίου. Η δεύτερη είναι υπεύθυνη για την πιλοτική έγχυση του πετρελαίου και επιτυγχάνει τον σωστό διασκορπισμό της μικρής αυτής ποσότητας πετρελαίου όταν ο κινητήρας είναι σε λειτουργία μεικτής καύσης. Όσον αφορά το σύστημα τροφοδοσίας φυσικού αερίου είναι πιο πολύπλοκο αλλά λειτουργεί σε πιέσεις λίγο μεγαλύτερες από

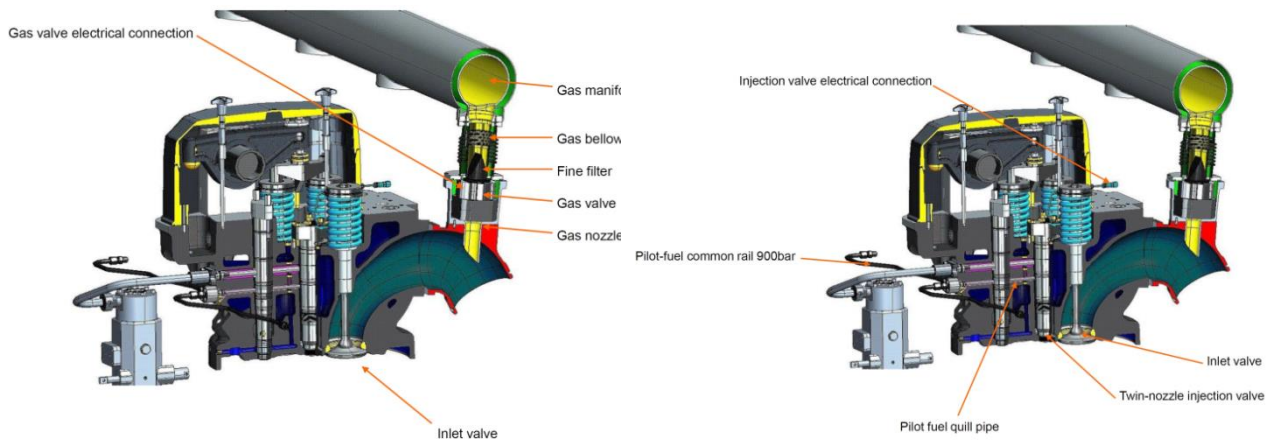
την ατμοσφαιρική. Το φυσικό αέριο προέρχεται είτε από το εμπορεύσιμο LNG που εξατμίζεται είτε από δεξαμενές καυσίμου LNG. Και στις δύο περιπτώσεις μετατρέπεται από υγρή σε αέρια μορφή και μέσω αγωγών τροφοδοτεί την μονάδα ελέγχου φυσικού αερίου η οποία με την σειρά της στέλνει την κατάλληλη ποσότητα προς καύση. Οι αγωγοί όπως έχουμε αναφέρει είναι διπλού τοιχώματος έτσι ώστε σε περίπτωση διαρροής φυσικού αερίου το βοηθητικό τοίχωμα να το οδηγήσει σε μη επιβλαβής περιοχές μέσω συστήματος εξαερισμού.

Οι τετράχρονοι κινητήρες μεικτής καύσης ακολουθούν την αρχή της φτωχής καύσης (lean burn principle), δηλαδή στο μείγμα αέρα – φυσικού αερίου το ποσοστό του φυσικού αερίου είναι μικρότερο από όσο χρειάζεται για να γίνει τέλεια καύση. Για τον λόγο αυτό η θερμοκρασία της καύσης είναι μικρότερη και κατά συνέπεια και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) είναι σημαντικά μειωμένες. Όπως έχουμε αναφέρει, το φυσικό αέριο δεν περιέχει θείο με αποτέλεσμα οι εκπομπές οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) να είναι σχεδόν ανύπαρκτες όπως αμελητέες είναι και οι εκπομπές μικροσωματιδίων (PM). Λόγω όλων των παραπάνω, οι κινητήρες μεικτής καύσης με καύση φυσικού αερίου υπερκαλύπτουν τα πρότυπα Tier III χωρίς την ανάγκη εφαρμογής συστημάτων αντιρύπανσης στην εξαγωγή των καυσαερίων. Στην περίπτωση καύσης πετρελαίου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο οι κινητήρες μεικτής καύσης πληρούν το πρότυπο Tier II και για να εναρμονιστούν με το πρότυπο Tier III είναι απαραίτητη η χρήση συστημάτων αντιρύπανσης.



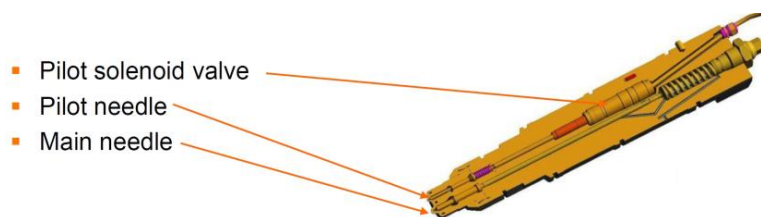
Εικόνα 5.7: Σχηματική αναπαράσταση της ποσοστιαίας μείωσης των εκπομπών ενός τετράχρονου κινητήρα μεικτής καύση σε σχέση με έναν συμβατικό τετράχρονο κινητήρα πετρελαίου.





Εικόνα 5.8: Σύστημα τροφοδοσία φυσικού αερίου (αριστερά) και πετρελαίου (δεξιά) (Wärtsilä)

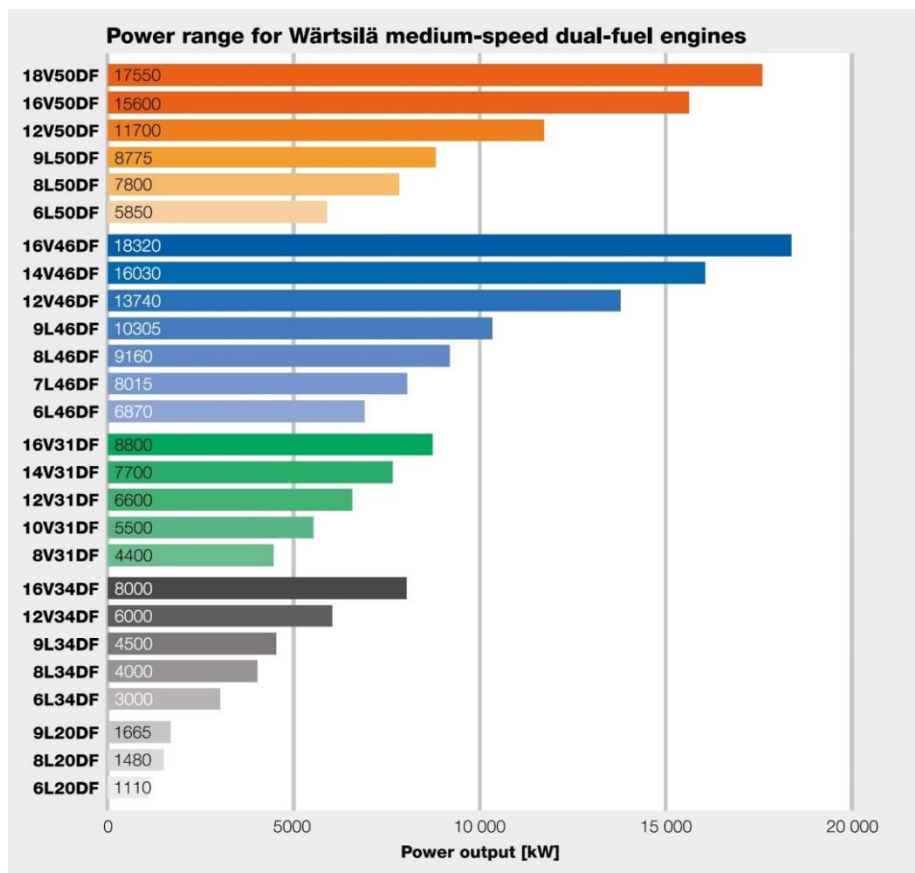
Αν και η φτωχή καύση του φυσικού αερίου είναι σκόπιμη, το πόσο φτωχή πρέπει να είναι καθορίζεται από συγκεκριμένα όρια. Αν το μίγμα είναι πολύ φτωχό τότε μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία καύσης και να διαφύγει άκαυστο καύσιμο στην εξαγωγή και εκεί, λόγω υψηλών θερμοκρασιών, να καεί στην εξαγωγή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της πίεσης του υπερσυμπιεστή καυσαερίων ο οποίος με την σειρά θα στείλει περισσότερο αέρα στην εισαγωγή κάνοντας το μίγμα ακόμα πιο φτωχό. Συνεχιζόμενη αυτή η κατάσταση μπορεί να οδηγήσει σε συνεχόμενες αστοχίες καύσης και τελικά να χαθεί ο έλεγχος του κινητήρα. Από την άλλη μεριά αν το μίγμα γίνει πιο πλούσιο από όσο πρέπει τότε αυτό μπορεί να οδηγήσει στην αυτανάφλεξη του μίγματος νωρίτερα με αποτέλεσμα την κρουστική καύση. Κρουστική καύση πραγματοποιείται γιατί το πολύ πλούσιο μίγμα που υπάρχει μέσα στον κύλινδρο αναφλέγεται ακαριαία μόλις γίνει η εισαγωγή και αυτανάφλεξη του πιλοτικού καυσίμου. Έτσι έχουμε απότομη αύξηση της πίεσης στον κύλινδρο η οποία μπορεί να οδηγήσει και σε αυξημένες θερμοκρασίες, αυξημένες εκπομπές  $\text{NO}_x$  και εν τέλει να προκληθεί βλάβη στον κινητήρα. Τα όρια που καθορίζουν το πόσο φτωχό θα πρέπει είναι το μίγμα εξαρτώνται από τις περιεκτικότητες στις οποίες συμβαίνει αστοχία καύσης και κρουστική καύση και επηρεάζονται επίσης και από τις ιδιότητες του φυσικού αερίου, την θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής και από τον λόγο συμπίεσης.



Εικόνα 5.9: Ακροφύσιο εγχύσεως πετρελαίου, πιλοτική και κύρια έγχυση (Wartsila)

Το εύρος της ισχύος των τετράχρονων κινητήρων μεικτής καύσης καλύπτει ένα τεράστιο πλήθος εφαρμογών, είτε από μικρά ferry boat μέχρι και μεγάλα εμπορικά πλοία και σταθμούς

παραγωγής ενέργειας. Ενδεικτικά η γκάμα των κινητήρων των δύο μεγάλων εταιριών MAN Diesel & Turbo και Wärtsilä παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 5.10: Πλήρης γκάμα ισχύος τετράχρονων κινητήρων μεικτής καύσης της εταιρίας Wärtsilä.

Η σειρά κινητήρων 20DF της Wärtsilä προορίζεται για εφαρμογές μικρής ισχύος οι οποίες κυμαίνονται από 1,1 MW μέχρι 1,7 MW με διάταξη 6, 8 ή 9 κυλίνδρων εν σειρά. Η ταχύτητα περιστροφείς των κυμαίνεται μεταξύ 1000 και 1200 rpm. Οι κινητήρες της οικογένειας 34DF καλύπτουν ισχύς από 3 MW έως 8 MW και με διάταξη 6, 8 και 9 κυλίνδρων εν σειρά ή 12 και 16 κυλίνδρων σε διάταξη V και με ταχύτητα περιστροφής 720-750 rpm. Εν συνέχεια οι κινητήρες των οικογενειών 46DF και 50DF προορίζονται για μεγαλύτερες και πιο απαιτητικές εφαρμογές με εύρος ισχύος από 6 MW έως 18,3 MW. Ο αριθμός των κυλίνδρων ξεκινάει από 6 σε εν σειρά διάταξη και φτάνει μέχρι 18 σε διάταξη V. Η ταχύτητα περιστροφής των κυμαίνεται μεταξύ 500 και 600 rpm. Βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλα πλοία μεταφοράς LNG καθώς και σε οχηματαγωγά πλοία. Όλοι οι παραπάνω κινητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σαν κύριοι κινητήρες πρόωσης είτε και σαν βοηθητικοί κινητήρες ή γεννήτριες παραγωγής ρεύματος.



Εικόνα 5.11: Πλήρης γκάμα ισχύος τετράχρονων κινητήρων μεικτής καύσης της εταιρίας MAN Diesel & Turbo

Η MAN Diesel & Turbo διαθέτει στην αγορά τρεις κύριες κατηγορίες κινητήρων που καλύπτουν επίσης ένα πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η σειρά κινητήρων 28/32S-DF διαθέτει κινητήρες με 5 έως 9 κυλίνδρους εν σειρά, με ταχύτητα περιστροφής 720/750 rpm και ισχύς από 0,9 MW έως 1,7 MW. Η σειρά 35/44DF διαθέτει κινητήρες με 6, 8 ή 10 κυλίνδρους εν σειρά, με ταχύτητα περιστροφής 720/750 rpm και εύρος ισχύος από 2,9 έως 5,8 MW. Τέλος η σειρά 51/60DF διαθέτει κινητήρες με 9 κυλίνδρους εν σειρά ή με 12, 14 ή 18 κυλίνδρους σε διάταξη V. Είναι κατάλληλοι για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε ισχύ καθώς μπορούν να αποδώσουν από 8,8 MW έως 17.8 MW και με ταχύτητες περιστροφής 500/514 rpm.

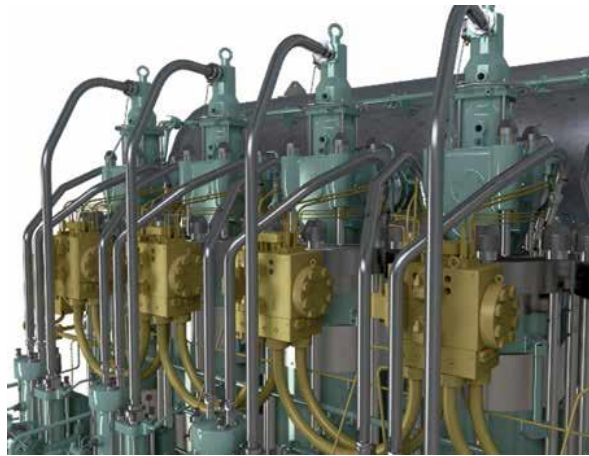
### 5.2.2 Δίχρονοι κινητήρες μεικτής καύσης υψηλής πίεσης

Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον έχει στραφεί στους δίχρονους κινητήρες μεικτής καύσης καθώς οι δίχρονοι κινητήρες παρουσιάζουν υψηλό βαθμό απόδοσης όταν πρόκειται για εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Στην κατασκευή δίχρονων κινητήρων μεικτής καύσης υψηλής πίεσης ειδικεύεται η MAN Diesel & Turbo. Έχει αναπτύξει όλη την απαραίτητη τεχνολογία για την απρόσκοπτη λειτουργία τέτοιων συστημάτων. Αν και η Wärtsilä στα τέλη της δεκαετίας του '80 είχε παρουσιάσει την δικιά της τεχνολογική πρόταση στους δίχρονους κινητήρες μεικτής καύσης υψηλής πίεσης, παρόλα αυτά ίσως ήταν αρκετά νωρίς για μια τέτοια τεχνολογία να ευδοκιμήσει καθώς δεν υπήρχε και η ανάγκη για χαμηλότερες εκπομπές ρύπων και το πετρέλαιο σαν καύσιμο ήταν αρκετά φθηνό. Επειδή όμως στην εποχή μας η μετάβαση στο φυσικό αέριο γίνεται όλο και περισσότερο επιτακτική, η Wärtsilä ανέπτυξε και αναπτύσσει τεχνολογίες για δίχρονους κινητήρες μεικτής καύσης σε χαμηλή όμως πίεση. Είναι μια αρκετά ενδιαφέρουσα τεχνολογία με την οποία θα ασχοληθούμε στην επόμενη υπό-ενότητα.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των τεχνολογιών χαμηλής και υψηλής πίεσης είναι ουσιαστικά ο τρόπος έγχυσης του φυσικού αερίου στον κύλινδρο και κατά συνέπεια η διαφορετική αρχή λειτουργίας που ακολουθεί κάθε τεχνολογία. Στους κινητήρες χαμηλής πίεσης έχουμε την

προανάμειξη του φυσικού αερίου με τον αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα (έμμεση έγχυση) και στην συνέχεια την λειτουργία του κινητήρα βάση του κύκλου του Otto. Αντίθετα, στους κινητήρες υψηλής πίεσης έχουμε την εισαγωγή του φυσικού αερίου απευθείας στον θάλαμο καύσης (άμεση έγχυση) και ουσιαστικά την λειτουργία του κινητήρα με βάση τον κύκλο του Diesel. Αν και στις δύο περιπτώσεις οι κινητήρες χαρακτηρίζονται ως διπλού καυσίμου (Dual Fuel-DF) έχει επικρατήσει οι κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης να αναφέρονται ως διπλού καυσίμου-DF (Dual Fuel) και οι κινητήρες υψηλής πίεσης ως αερίου πετρελαίου-GD (Gas Diesel) λόγω του ότι ακόμα και κατά την καύση φυσικού αερίου ο κινητήρας ακολουθεί την αρχή λειτουργίας του κύκλου του Diesel.

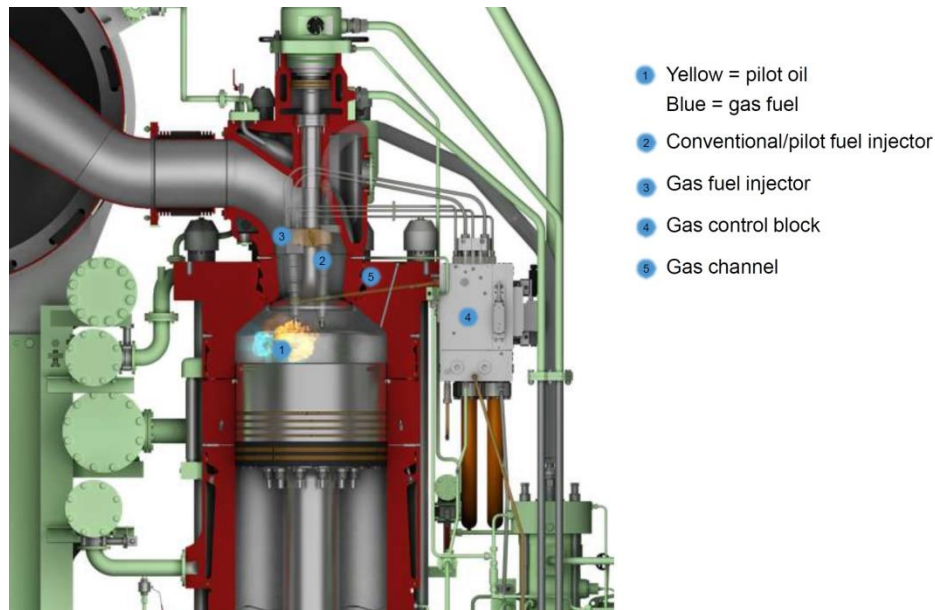
Η MAN Diesel & Turbo (MDT) έχει χρόνια παράδοση στους δίχρονους ναυτικούς κινητήρες. Ξεκινώντας από τους MC κινητήρες οι οποίοι ήταν μηχανικά ελεγχόμενοι τους αντικατέστησε με του ηλεκτρονικά ελεγχόμενους ME κινητήρες. Οι οικογένεια των ME κινητήρων προσφέρει πληθώρα επιλογών για κάθε είδους εφαρμογή. Με τους κινητήρες ME-GI (Gas Injection) η MDT δίνει την δυνατότητα στους κατασκευαστές πλοίων, αλλά και σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, να επιλέξουν τον κατάλληλο δίχρονο κινητήρα μεικτής καύσης υψηλής πίεσης. Οι πρώτοι ME-GI κινητήρες αναπτύχθηκαν την δεκαετία του '90 δίνοντας μια πρώτη γεύση των δυνατοτήτων τους.



*Εικόνα 5.12: Κινητήρας της οικογένειας ME-GI με προσαρμοσμένες τα μπλοκ φυσικού αερίου*

Στα τέλη του 2012 όμως παρουσιάστηκαν οι εξελιγμένοι κινητήρες ME-GI οι οποίοι διέθεταν κάποιες επιπλέον μονάδες ελέγχου και χειρισμού του συστήματος τροφοδοσίας φυσικού αερίου. Οι αγωγοί διπλού τοιχώματος της τροφοδοσίας του φυσικού αερίου απέκτησαν σύστημα εξαερισμού με ανεμιστήρες έτσι ώστε σε περίπτωση διαρροής φυσικού αερίου από τον εσωτερικό αγωγό αυτό να οδηγηθεί σε κάποιο πιο ασφαλές μέρος μέσω του εξωτερικού αγωγού. Με την τοποθέτηση αισθητήρων υδρογονανθράκων στον εξωτερικό αγωγό γίνεται άμεσα αντιληπτή η διαρροή φυσικού αερίου. Οι αγωγοί τροφοδοσίας ή ανεφοδιασμού του φυσικού αερίου, μετά την ολοκλήρωση της λειτουργίας του κινητήρα ή του ανεφοδιασμού, αδειάζουν από το φυσικό αέριο με

την βοήθεια αδρανούς αερίου (αζώτου). Τέλος, γίνεται χρήση λιπαντικού στεγανοποίησης έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος των βαλβίδων εισαγωγής του φυσικού αερίου αλλά και να μην διαφεύγει φυσικό αέριο κατά τον ψεκασμό του στον θάλαμο καύσης.



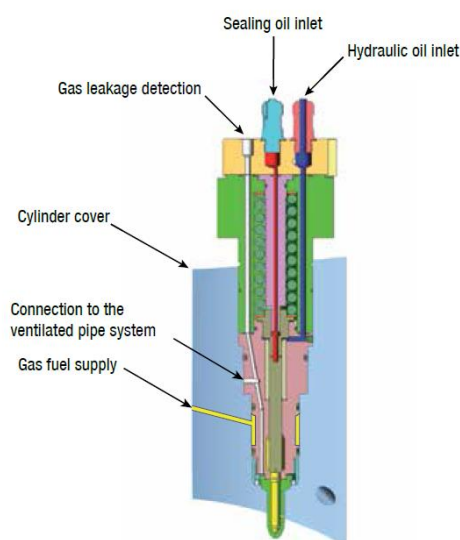
Εικόνα 5.13: Τρόπος λειτουργίας ενός ME-GI κινητήρα

Όλες οι βλάβες οι οποίες σχετίζονται με την τροφοδοσία ή ακόμα και την μονάδα ελέγχου του φυσικού αερίου θέτουν τον κινητήρα σε κατάσταση ασφαλούς λειτουργίας κατά την οποία ο κινητήρας μεταβαίνει απευθείας σε λειτουργία πετρελαίου. Στην συνέχεια όλοι οι αγωγοί τροφοδοσίας φυσικού αερίου καθαρίζονται με εισαγωγή αδρανούς αερίου και όλα τα συστήματα που αφορούν την λειτουργία του κινητήρα με φυσικό αέριο σταματούν κατευθείαν. Η μετάβαση σε λειτουργία καύσης πετρελαίου είναι ακαριαία και δεν παρατηρείται μείωση της ισχύος ούτε κάποια αισθητή μετάβαση ή διαφορά στον ήχο λειτουργίας του κινητήρα. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τους κινητήρες ME-GI απόλυτα ευέλικτους στο είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Η ισχύς του κινητήρα είτε με καύση φυσικού αερίου είτε πετρελαίου διατηρείται η ίδια και σχεδόν εφάμιλλη με την απόδοση ενός κινητήρα αντίστοιχων διαστάσεων και χαρακτηριστικών αλλά μονού καυσίμου. Σε περίπτωση λειτουργίας του κινητήρα μεικτής καύσης μόνο με πετρέλαιο για μεγάλο χρονικό διάστημα κρίνεται σκόπιμη η αλλαγή των ακροφυσίων ψεκασμού πετρελαίου με τα αντίστοιχα ενός κινητήρα μονού καυσίμου, έτσι ώστε η αποδοτικότητα του κινητήρα να αυξηθεί κατά 1%.

Για την λειτουργία των ME-GI κινητήρων γίνεται χρήση δύο βαλβίδων για την πιλοτική έγχυση πετρελαίου και δύο βαλβίδων για την έγχυση φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο εισάγεται στην βαλβίδα μέσω οπών που υπάρχουν στο κάλυμμα του κυλίνδρου. Για να επιτευχθεί η σωστή στεγανοποίηση μεταξύ του καλύμματος του κυλίνδρου με την βαλβίδα έγχυσης αλλά και τις



ατράκτου της βαλβίδας έγχυσης με το σώμα της βαλβίδα γίνεται χρήση στεγανοποιητικών δακτυλιδιών που είναι κατασκευασμένα από υλικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες και το φυσικό αέριο. Οποιαδήποτε διαρροή από τα δακτυλίδια στεγανοποίησης οδηγείται μέσω οπών που υπάρχουν στην βαλβίδα στον χώρο ανάμεσα από το πρωτεύον και δευτερεύον αγωγό της τροφοδοσίας του φυσικού αερίου όπου η διαρροή θα ανιχνευτεί από τους αισθητήρες υδρογονανθράκων. Το φυσικό αέριο βρίσκεται μέσα στην άτρακτο της βαλβίδας υπό πιέσεις που φτάνουν τα 300 bar με κίνδυνο το φυσικό αέριο να εισέλθει στον ενεργοποιητή της βαλβίδας. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται σύστημα στεγανοποίησης της ατράκτου με την βοήθεια στεγανοποιητικού λαδιού το οποίο είναι υπό πίεση 25 με 50 bar μεγαλύτερη από την πίεση έγχυσης του φυσικού αερίου. Η βαλβίδα έγχυσης πιλοτικού καυσίμου είναι αντίστοιχης σχεδίασης με τις βαλβίδες των κινητήρων Diesel μονού καυσίμου με μόνη αλλαγή στο ακροφύσιο.



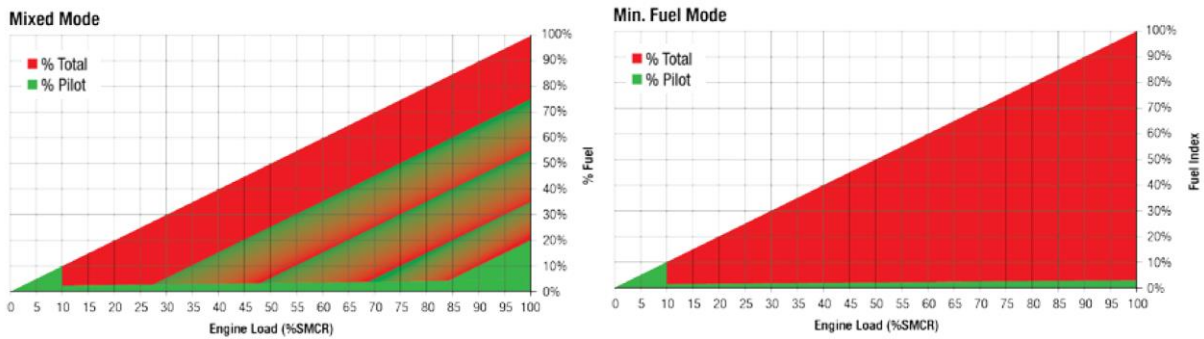
*Εικόνα 5.14: Βαλβίδα έγχυσης φυσικού αερίου*

Οι αγωγοί τροφοδοσίας του φυσικού αερίου όπως αναφέρθηκε είναι διπλού τοιχώματος (δύο αγωγοί ο ένας μέσα στον άλλον) και η τροφοδοσία του φυσικού αερίου βασίζεται στην αρχή της σταθερής πίεσης, είναι ένα common rail σύστημα, κάτι αντίστοιχο με το σύστημα τροφοδοσίας του πετρελαίου. Ο εσωτερικός αγωγός είναι αυτός που τροφοδοτεί με φυσικό αέριο το μπλοκ του φυσικού αερίου με τον εξωτερικό αγωγό να αναλαμβάνει ρόλο προστασίας από πιθανό ράγισμα του εσωτερικού αγωγού και πιθανή διαφυγή του φυσικού αερίου. Το διαφεύγον φυσικό αέριο συγκρατείται από τον εξωτερικό αγωγό και μέσω συστήματος εξαερισμού οδηγείται σε χώρο στον οποίο δεν υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξής του. Οι ανεμιστήρες βρίσκονται στο τέλος του εξωτερικού αγωγού και τροφοδοτείται με αέρα από μη επικίνδυνη περιοχή. Όλοι οι σύνδεσμοι και οι ενώσεις στους αγωγούς ανήκουν στο σύστημα εξαερισμού και σε οποιαδήποτε περίπτωση διαρροής αυτή ανιχνεύεται από τους αισθητήρες υδρογονανθράκων.

Όλο το σύστημα τροφοδοσίας είναι κατασκευασμένο με ενώσεις συγκόλλησης έτσι ώστε να είναι ενιαίο και μόνο στα σημεία που απαιτείτε έλεγχος ή επισκευή χρησιμοποιούνται φλατζοτές συνδέσεις. Ακόμα και οι εύκαμπτοι αγωγοί που έχουν αλυσιδωτή διάταξη (chain pipe design) και χρησιμοποιούνται για την τελική τροφοδοσία των μπλοκ φυσικού αερίου που είναι στην σειρά πάνω σε κάθε κύλινδρο είναι και αυτοί διπλού τοιχώματος. Αυτός ο εύκαμπτος σχεδιασμός είναι κατάλληλος για να ανταπεξέρχεται στις θερμικές διαστολές-συστολές του κινητήρα κατά την λειτουργία του. Οι αγωγοί αυτοί είναι σχεδιασμένοι για πιέσεις 50% μεγαλύτερες από την μέγιστη πίεση λειτουργίας και είναι καλά στερεωμένοι έτσι ώστε να αποφεύγονται μηχανικές ταλαντώσεις. Ακόμα είναι κατασκευασμένοι με αντοχή τέτοια ώστε να μην υποστούν βλάβη σε περίπτωση πτώσης βαριών αντικειμένων.

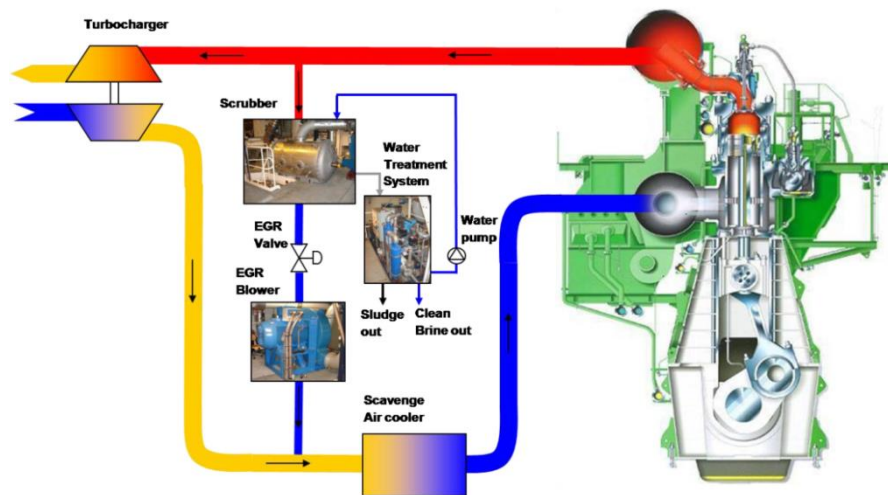
Με σκοπό τον καθαρισμό του συστήματος τροφοδοσίας μετά από την χρήση του φυσικού αερίου, οι αγωγοί είναι συνδεδεμένοι με σύστημα τροφοδοσίας αδρανούς αερίου με πίεση 9 bar. Σε περίπτωση βλάβης του συστήματος τροφοδοσίας φυσικού αερίου, ο αγωγός αποσυμπιέζεται και πραγματοποιείται η αφαίρεση του φυσικού αερίου με την βοήθεια του αδρανούς αερίου (αζώτου). Τέλος σε περίπτωση κανονικής διακοπής της τροφοδοσίας φυσικού αερίου το σύστημα καθαρισμού του αγωγού τίθεται σε λειτουργία 30 λεπτά αργότερα. Η καθυστέρηση αυτή υφίσταται σε περίπτωση που χρειαστεί σε σύντομο χρονικό διάστημα να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας και πάλι με φυσικό αέριο.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των κινητήρων μεικτής καύσης υψηλής πίεσης είναι ότι η απόδοση τους δεν επηρεάζεται από την ποιότητα του φυσικού αερίου. Για αυτό το λόγο μπορούν να χρησιμοποιήσουν το μεγαλύτερο ποσοστό (θεωρητικά όλο) των ποιοτήτων φυσικού αερίου που υπάρχει διαθέσιμο σήμερα. Υπάρχουν τρεις επιλογές λειτουργίας των ME-GI κινητήρων. Η πρώτη ουσιαστικά είναι η λειτουργία με καύση αποκλειστικά και μόνο πετρελαίου, είτε βαρύ πετρέλαιο (HFO) είτε ναυτικό πετρέλαιο (MDO). Η δεύτερη βασίζεται στην μεικτή καύση με δυνατότητα επιλογής του ποσοστού χρήσης του φυσικού αερίου και της πιλοτικής έγχυσης. Αυτή η επιλογή γίνεται χειροκίνητα και την καθορίζει ο χειριστής. Το σύστημα ελέγχου επιτρέπει στον χειριστή οποιαδήποτε αναλογία πετρελαίου φυσικού αερίου αλλά ανάμεσα σε κάποια όρια ανάλογα με το φορτίο του κινητήρα, όπως φαίνεται και την παρακάτω εικόνα (αριστερά). Τέλος, η τρίτη λειτουργία, αφού επιλεγεί από τον χειριστή, καθορίζει από μόνη της την αναλογία φυσικού αερίου και πιλοτικής έγχυσης πετρελαίου έχοντας ως στόχο πάντα την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση πετρελαίου. Σε περίπτωση οποιασδήποτε δυσλειτουργία στο σύστημα φυσικού αερίου, ο κινητήρας μεταβαίνει σε λειτουργία πετρελαίου.



Εικόνα 5.15: Οι δύο επιλογές λειτουργίας κατά την μεικτή καύση.

Οι ME-GI κινητήρες παρουσιάζουν σοβαρά περιβαλλοντολογικά οφέλη όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων. Καταρχήν, λόγω της άμεσης έγχυσης του φυσικού αερίου, η διαφυγή μεθανίου από τον θάλαμο καύσης είναι αμελητέα μειώνοντας έτσι κατά 25-30% τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Το φυσικό αέριο δεν περιέχει προσμίξεις θείου συντελώντας έτσι στην εξάλειψη σχεδόν των οξειδίων του θείου ( $SO_x$ ). Μείωση παρατηρείται και στις εκπομπές μικροσωματιδίων αλλά και αμελητέα αύξηση παρατηρείται στο μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και στους υδρογονάνθρακες (HC). Όσον αφορά τα οξείδια του αζώτου ( $NO_x$ ), με την καύση φυσικού αερίου, παρατηρείται μια μείωση της τάξης του 20-30%. Η μείωση θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη αλλά λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στον θάλαμο καύσης κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό. Έτσι, με την καύση φυσικού αερίου μπορούν οι κινητήρες να εναρμονιστούν με τα πρότυπα Tier II αλλά για να πληρούν τα πρότυπα Tier III είναι αναγκαία η χρήση των γνωστών συστημάτων αντιρύπανσης που σκοπό έχουν την μείωση των  $NO_x$ . Με 30% ανακυκλοφορία των καυσαερίων επιτυγχάνεται αρκετή μείωση των  $NO_x$  έτσι ώστε οι κινητήρες να εναρμονίζονται με τα πρότυπα Tier III. Με συνδυασμό επιλεκτικού καταλύτη αναγωγής (SCR) και ανακυκλοφορίας των καυσαερίων (EGR) επιτυγχάνεται μείωση μεγαλύτερη από 98% στα  $NO_x$ . Σε κάθε περίπτωση όμως, με τους ME-GI κινητήρες κρίνεται επιτακτική και η χρήση συστημάτων αντιρύπανσης για την μείωση των  $NO_x$  στα επίπεδα του προτύπου Tier III.

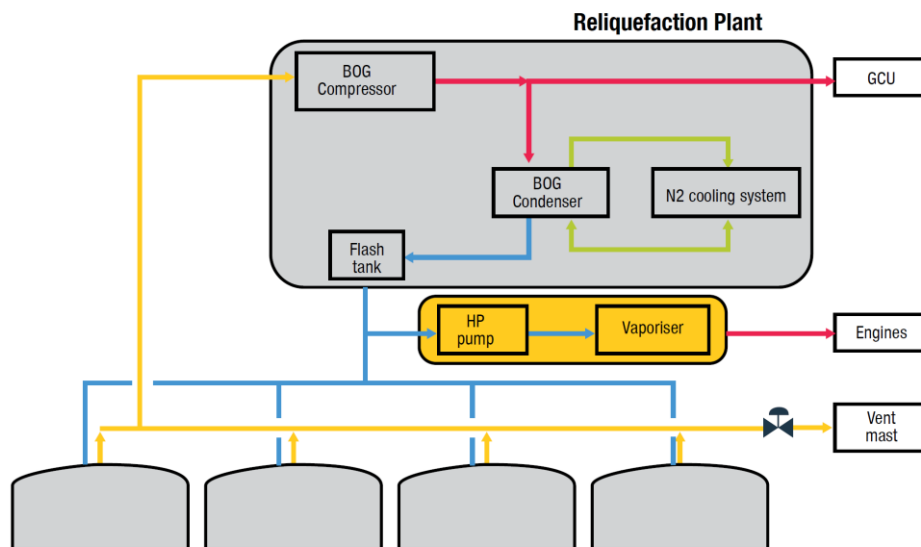


Εικόνα 5.16: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος αντιρύπανσης σε ME-GI κινητήρα



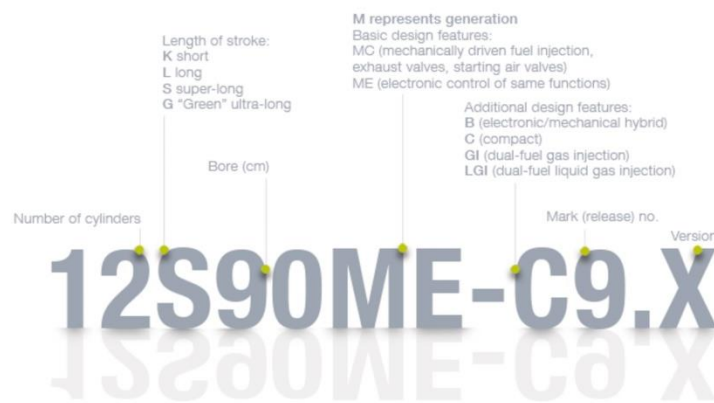
Μια επιπλέον δυνατότητα που δίνουν οι κινητήρες ME-GI είναι αυτή της ρύθμισης των εκπεμπόμενων  $\text{NO}_x$  με σκοπό την αύξηση της απόδοσης των κινητήρων. Σε ορισμένες εφαρμογές κρίνεται πιο σημαντική η αύξηση της ισχύος από την μείωση των  $\text{NO}_x$ . Με την προσαρμογή του χρόνου κλεισίματος της βαλβίδας εξαγωγής μπορεί να γίνει εφικτή η αύξηση της αποδοτικότητας έως και 3,5%.

Για την τροφοδοσία των μονάδων ελέγχου φυσικού αερίου με πιέσεις λειτουργίας που φτάνουν μέχρι και τα 300 bar είναι απαραίτητη η χρήση αντλιών υψηλής πίεσης. Ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής γίνεται και η χρήση των κατάλληλων συστημάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις απαιτείται η χρήση κρυογονικής αντλίας υψηλής πίεσης. Για την πλήρη εκμετάλλευση του φυσικού αερίου το οποίο προέρχεται από φυσική εξάτμιση ποσότητας LNG, σε πλοίο μεταφοράς LNG, γίνεται επιπλέον χρήση μονάδας επαναυγροποίησης του φυσικού αερίου. Γενικά, σε πλοία μεταφοράς LNG και για την εκμετάλλευση του εξατμιζόμενου LNG γίνεται χρήση κρυογονικής αντλίας υψηλής πίεσης ακολουθούμενη από εξατμιστήρα που σκοπό έχει να φέρει το φυσικό αέριο στην κατάλληλη κατάσταση και θερμοκρασία για να τροφοδοτήσει στην συνέχεια τον κινητήρα. Το φυσικό αέριο το οποίο περισσεύει, μέσω της μονάδας επαναυγροποίησης επιστρέφει στις δεξαμενές LNG. Η παραπάνω διάταξη παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Καταρχήν, τα πλοία μεταφοράς LNG, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αναγκασμένα να περιμένουν σε κάποια λιμάνια, με την μονάδα επαναυγροποίησης έχουν την δυνατότητα να μην χάνουν την ποσότητα του LNG που εξατμίζεται λόγω φυσικού φαινομένου. Σε περιπτώσεις που η ταχύτητα του πλοίου είναι αρκετά μικρή τότε υπάρχει μεγάλη ποσότητα φυσικού αερίου που περισσεύει και η οποία μετατρέπεται με επαναυγροποίηση και πάλι σε LNG. Ακόμα δίνεται η δυνατότητα για πλήρη ευελιξία στο είδος του καυσίμου. Αν είναι πιο οικονομική η χρήση πετρελαίου τότε δεν υπάρχει η υποχρέωση για καύση φυσικού αερίου μιας και αυτό μπορεί να επαναυγροποιηθεί.



Εικόνα 5.17: Σύστημα τροφοδοσία πλοίου μεταφοράς LNG

Στις περιπτώσεις που δεν κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη η μονάδα επαναυγροποίησης του φυσικού αερίου γίνεται χρήση ενός απλού θαλάμου καύσης όπου στις ελάχιστες περιπτώσεις που υπάρχει περίσσειμα φυσικού αερίου αυτό καίγεται για να μην διαφύγει άκαυστο στην ατμόσφαιρα. Η αντλία υψηλής πίεσης και ο εξατμιστήρας παραμένουν καθώς αυτές οι μονάδες είναι που τροφοδοτούνε τον κινητήρα με φυσικό αέριο στην απαιτούμενη κατάσταση. Η μονάδα εξάτμισης του φυσικού αερίου όπως είναι λογικό είναι και αυτή υπό πίεση και χρησιμοποιεί κύκλωμα εναλλαγής θερμότητας μεταξύ του νερού που ψύχει τον κινητήρα και του φυσικού αερίου. Για αποφυγή όμως του κινδύνου διαρροής φυσικού αερίου μέσα στο νερό ψύξης του κινητήρα χρησιμοποιείται συνήθως ανεξάρτητο κύκλωμα άλμης ή γλυκόλης. Η ενέργεια που απαιτείται για την χρήση αυτών των συστημάτων κυμαίνεται στο 0,5% της απόδοσης του κινητήρα, κάτι το οποίο σημαίνει ότι είναι αρκετά αποδοτικά και δεν εμφανίζουν μεγάλα λειτουργικά έξοδα.



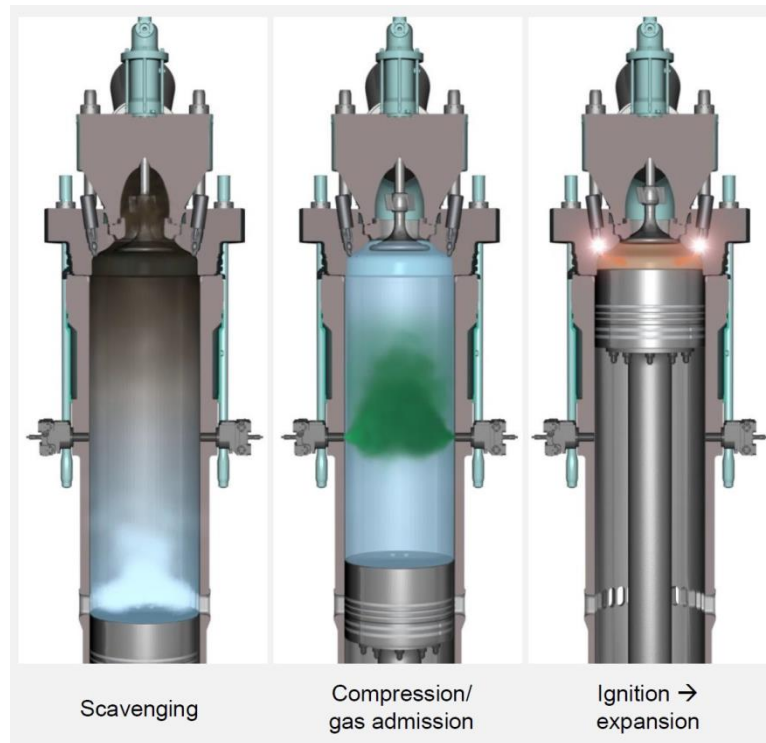
Εικόνα 5.18: Συμβολισμός και ονοματολογία των ναυτικών κινητήρων της MAN Diesel & Turbo

### 5.2.3 Δίχρονοι κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης

Όπως και στους τετράχρονους κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης έτσι και στους δίχρονους κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στον κύκλο του Otto ή αλλιώς στην αρχή της φτωχής καύσης. Την τεχνολογία της κατασκευής δίχρονων κινητήρων μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης την έχει αναπτύξει τα τελευταία χρόνια η γνωστή σε τέτοιου είδους εφαρμογές, Wärtsilä. Με μεγάλη εμπειρία στους τετράχρονους κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης, 20 χρόνια λειτουργίας 1300 κινητήρων και με συνολική διάρκεια λειτουργίας πάνω από 12 εκ. ώρες, κατάφερε να κατασκευάσει δίχρονους κινητήρες μεικτής καύσης με τροφοδοσία του φυσικού αερίου υπό χαμηλή πίεση.

Ο τρόπος λειτουργίας ενός τέτοιου κινητήρα βασίζεται όπως είπαμε στην αρχή της φτωχής καύσης, όπου έχουμε λιγότερο καύσιμο από ότι χρειάζεται για στοιχειομετρική καύση και το μίγμα αυτό προαναμειγνύεται με αέρα πριν φτάσει το έμβολο στο άνω νεκρό σημείο. Κατά την διαδικασία της σάρωσης, καθώς το έμβολο κινείται από το κάτω νεκρό σημείο προς το πάνω νεκρό σημείο, στο μέσο περίπου της διαδρομής και πριν το έμβολο φτάσει σε αυτό γίνεται ο ψεκασμός του φυσικού

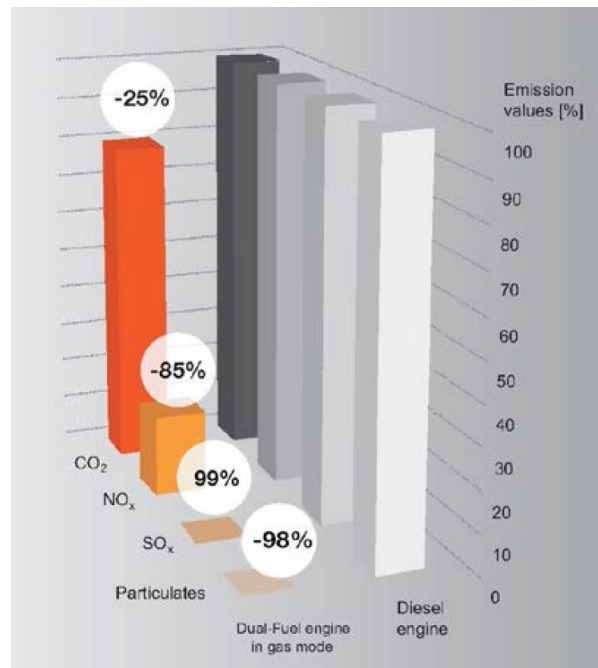
αερίου. Πριν φτάσει το μίγμα στο άνω νεκρό σημείο κλείνουν οι βαλβίδες εξαγωγής και την κατάλληλη χρονική στιγμή γίνεται ο ψεκασμός του πιλοτικού καυσίμου που αντιστοιχεί στο 1% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου και η αυτανάφλεξη του πραγματοποιείται σε ένα προθάλαμο καύσης. Καθώς το μίγμα έχει φτάσει στο άνω νεκρό και λόγω της ενέργειας που εκλύετε στον προθάλαμο από την αυτανάφλεξη του πιλοτικού καυσίμου έχουμε την ανάφλεξη του φτωχού μίγματος του φυσικού αερίου. Στην παρακάτω εικόνα γίνεται περισσότερο κατανοητή η παραπάνω διαδικασία.



Εικόνα 5.19: Φάσεις λειτουργίας δίχρονου κινητήρα μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτών των κινητήρων είναι ότι λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας καύσης είναι εφικτή η εναρμόνιση με τα πρότυπα εκπομπών ρύπων Tier III χωρίς την ανάγκη χρήσης επιπλέον συστημάτων αντιρύπανσης (όπως EGR, SCR). Με αυτόν τον τρόπο το οικονομικό όφελος από την μη εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων είναι σημαντικό. Επιπλέον, το κόστος μειώνεται ακόμα περισσότερο λόγω της μη ύπαρξης μεγάλων κρυογονικών αντλιών και συμπιεστών καθώς οι πιέσεις λειτουργίας φτάνουν το πολύ τα 16 bar. Εκτός από το κόστος, η συντήρηση των συστημάτων ενός δίχρονου κινητήρα μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης είναι αρκετά ευκολότερη καθώς τα συστήματα είναι πιο απλά και βασίζονται στα συστήματα που χρησιμοποιούνται και στους τετράχρονους κινητήρες χαμηλής πίεσης. Ακόμη, λόγω του πολύ χαμηλού ποσοστού πιλοτικού καυσίμου που εγχέεται και είναι σταθερό σχεδόν για όλο το εύρος ισχύος δίνεται η δυνατότητα στο πλοίο να κινείται με αργούς ρυθμούς ή να κάνει ελιγμούς

μέσα στα λιμάνια καταναλώνοντας φυσικό αέριο με αποτέλεσμα ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις να συμμορφώνεται με τα πρότυπα Tier III.

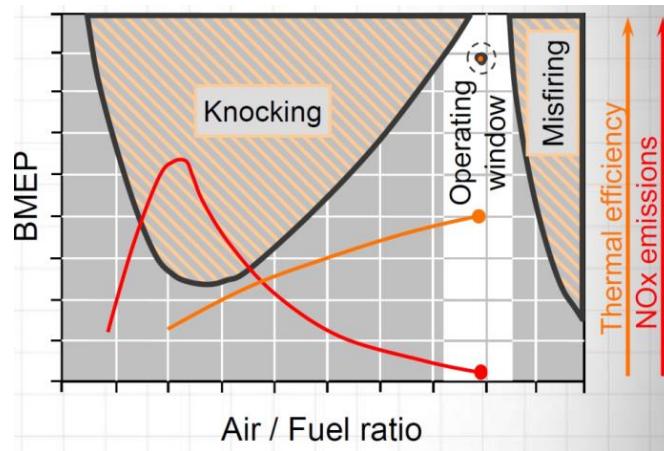


Εικόνα 5.20: Ενδεικτική μείωση εκπομπών ενός κινητήρα μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης σε σχέση με έναν συμβατικό κινητήρα καύσης ναυτικού πετρελαίου

Όπως και στην περίπτωση των κινητήρων της MAN Diesel & Turbo έτσι και η Wärtsilä προσφέρει πακέτα τροποποίησης υπάρχουσών μηχανών μονού καυσίμου σε κινητήρες διπλού καυσίμου. Η διάρκεια ζωής ενός πλοίου είναι μερικές δεκαετίες οπότε η οποιαδήποτε επένδυση σε υπάρχον πλοίο προσδίδει και αξία στο ίδιο αλλά προσφέρει και άμεσο οικονομικό όφελος στον ιδιοκτήτη καθώς τα λειτουργικά έξοδα είναι αρκετά μειωμένα. Η διάρκεια των εργασιών τροποποίησης δεν είναι μεγάλη και μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια της καθορισμένης συντήρησης του πλοίου.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των δίχρονων κινητήρων μεικτής καύσης χαμηλή πίεσης το οποίο οφείλεται στο ότι ακολουθεί την αρχής την φτωχής καύσης, είναι ο περιορισμός στο πόσο φτωχό πρέπει να είναι το μίγμα. Υπάρχει ένα στενό παράθυρο λειτουργίας αυτών των κινητήρων όσον αφορά το μίγμα καυσίμου καθώς σε περίπτωση που αυτό είναι πιο πλούσιο από όσο πρέπει τότε οδηγούμαστε σε κρουστική καύση ενώ αν είναι πιο φτωχό από όσο πρέπει υπάρχει ο κίνδυνος της αστοχίας καύσης. Για να βρίσκεται ο κινητήρας εντός αυτού του παραθύρου λειτουργίας πρέπει να γίνεται σωστός έλεγχος της ποσότητας έγχυσης του φυσικού αερίου, η έγχυση αυτή να γίνεται την κατάλληλη χρονική στιγμή και το κλείσιμο των βαλβίδων εξαγωγής να γίνεται επίσης την σωστή χρονική στιγμή. Σε αντίθετη περίπτωση, εκτός από τα προβλήματα της κρουστικής καύσης ή της αστοχίας καύσης θα έχουμε και την διαφυγή φυσικού αερίου από τις ανοιχτές βαλβίδες εξαγωγής στην ατμόσφαιρα. Κύριο συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο το οποίο όμως είναι πολύ

δραστικό αέριο του θερμοκηπίου. Υπολογίζεται πως οι επιπτώσεις του μεθανίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου για χρονικό διάστημα 100 χρόνων είναι 25 φορές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του διοξειδίου του άνθρακα.



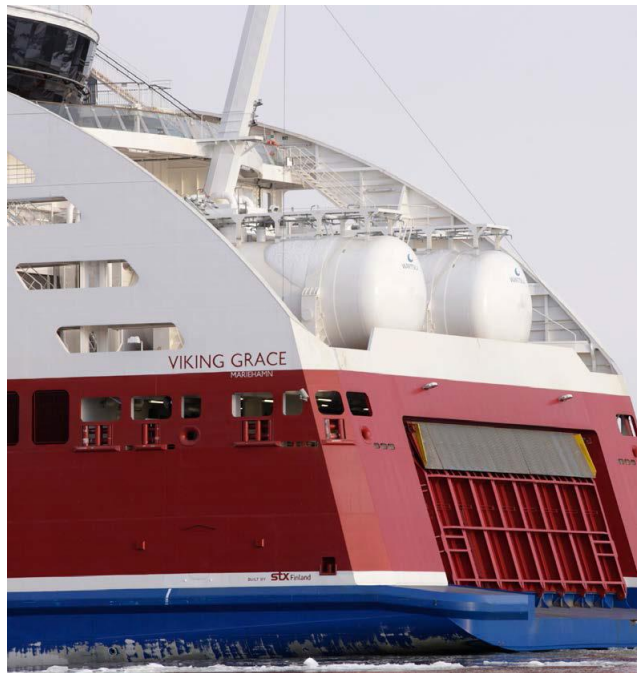
Εικόνα 5.21: Σχηματική αναπαράσταση του περιορισμένου παραθύρου λειτουργίας του κινητήρα με βάση το λόγο αέρα/φυσικού αερίου

Η ποιότητα της καύσης και η απόδοση αυτού του είδους των κινητήρων επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό και από την ποιότητα του φυσικού αερίου και πιο συγκεκριμένα από την περιεκτικότητα του σε μεθάνιο. Για τα πλοία μεταφοράς LNG όπου το φυσικό αέριο προέρχεται από την φυσική εξάτμιση του LNG τότε αυτό το φυσικό αέριο έχει χαμηλή θερμογόνο δύναμη μιας και περιέχει αρκετό άζωτο. Αντίθετα, σε περίπτωση που το φυσικό αέριο προέρχεται από εξαναγκασμένη εξάτμιση τότε αυτό έχει μεγαλύτερο ποσοστό αιθανίου και προπανίου με αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη. Για τον λόγο αυτό η απόδοση των δίχρονων κινητήρων μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης είναι μικρότερη από την απόδοση των αντίστοιχων δίχρονων κινητήρων μονού καυσίμου.

Όπως και στην περίπτωση των κινητήρων της MAN έτσι και σε αυτή των κινητήρων της Wärtsilä, τα συστήματα τροφοδοσίας τους είναι επίσης ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για την σωστή και αποδοτική λειτουργία των κινητήρων. Η Wärtsilä έχει αναπτύξει ένα πολύ αποδοτικό και συμπαγές σύστημα τροφοδοσίας (LNGPac System) το οποίο συνδυάζεται με δεξαμενές και μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε κινητήρα χαμηλής πίεσης, είτε είναι της Wärtsilä είτε όχι, είτε είναι τετράχρονος είτε δίχρονος.

Ξεκινώντας από τις δεξαμενές (LNGPac tanks) η Wärtsilä επέλεξε δεξαμενές Type C διότι αυτός ο τύπος δεξαμενών δίνει την δυνατότητα στο εξατμισμένο φυσικό αέριο να φτάνει πιέσεις της τάξεως των 10 bar. Αυτό δίνει την δυνατότητα στους κινητήρες να λειτουργήσουν με ναυτικό ή βαρύ πετρέλαιο για αρκετό χρονικό διάστημα χωρίς να χρειαστεί να κάψουν το εξατμισμένο φυσικό αέριο που υπάρχει στο εσωτερικό της δεξαμενής. Βέβαια αυτή είναι μια δυνατότητα την οποία

μπορούν να εκμεταλλευτούν σε συγκεκριμένες μόνο περιπτώσεις καθώς η καύση φυσικού αερίου εκτός από καθαρότερη είναι και οικονομικότερη. Βασικός λόγος που έγινε χρήση αυτού του είδους των δεξαμενών είναι ότι με την διατήρηση μια σταθερής πίεσης στο εσωτερικό τους, περίπου 5 bar, είναι δυνατή η απευθείας τροφοδότηση της μονάδας ελέγχου του φυσικού αερίου χωρίς την ανάγκη χρήσης κάποιου συμπιεστή. Σε περίπτωση που γινόταν χρήση δεξαμενών τύπου Α ή Β στο εσωτερικό των οποίων επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση, θα ήταν αναγκαία η χρήση συμπιεστή για να ανεβάσει την πίεση στα 5 bar για να τροφοδοτηθεί η μονάδα ελέγχου του φυσικού αερίου.

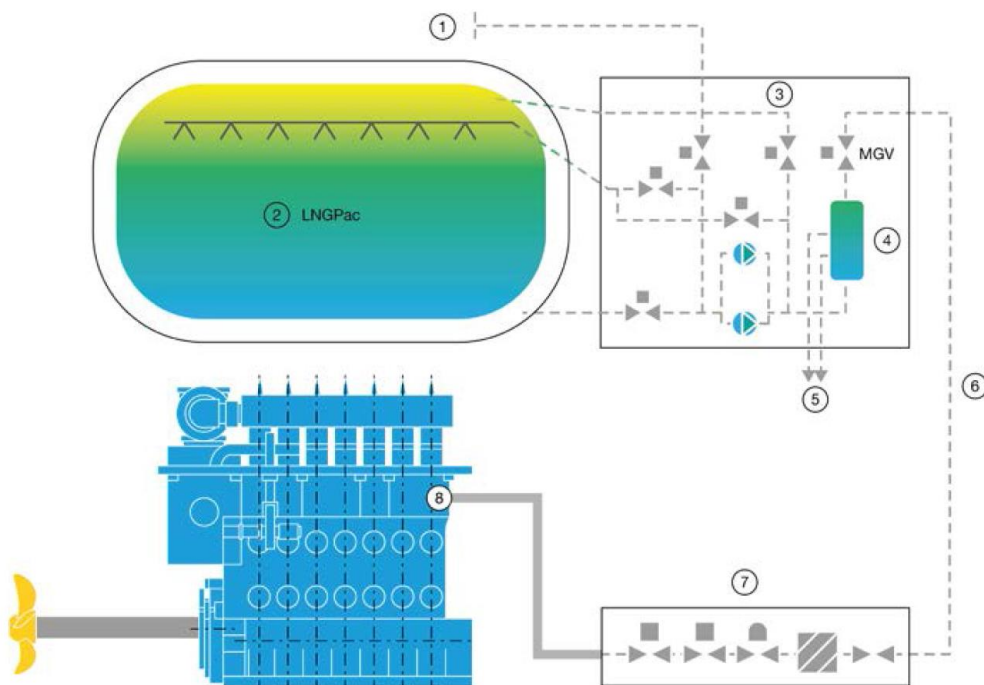


*Εικόνα 5.22: Δεξαμενές LNGPac 200 σε οχηματαγωγό πλοίο*

Δύο κύριες μονάδες που περιλαμβάνει το σύστημα τροφοδοσίας της Wärtsilä είναι η μονάδα ανάκτησης πίεσης και η μονάδα του εξατμιστήρα. Η μονάδα ανάκτησης πίεσης έχει σκοπό να διατηρεί σταθερή την πίεση στο εσωτερικό της δεξαμενής, περίπου 5 bar, έτσι ώστε να υπάρχει πάντα διαθέσιμο φυσικό αέριο να τροφοδοτήσει την μονάδα ελέγχου και να αποδώσει άμεσα ο κινητήρας το 100%. Αυτή η μονάδα αποτελείται από μονωμένους αγωγούς, από αγωγούς μονού τοιχώματος, βαλβίδες, αισθητήρες υδρογονανθράκων και έναν εξατμιστήρα. Μετά τον ανεφοδιασμό της δεξαμενής, όπου η πίεση είναι κάτω από 5 bar, αλλά και κατά την τροφοδοσία του κινητήρα όπου λόγω κατανάλωσης φυσικού αερίου η πίεση πέφτει, είναι απαραίτητη η λειτουργία της μονάδας ανάκτησης πίεσης. Ο εξατμιστήρας της μονάδας μετατρέπει ουσιαστικά το υγροποιημένο φυσικό αέριο σε αέρια μορφή και το τροφοδοτεί στο πάνω μέρος της δεξαμενής. Η κυκλοφορία στο εσωτερικό της μονάδας ανάκτησης πίεσης πραγματοποιείται λόγω υγροστατικής πίεσης, όπου LNG από το κάτω μέρος της δεξαμενής τροφοδοτεί τον εξατμιστήρα και το φυσικό αέριο στην συνέχεια εισάγεται στο πάνω μέρος της δεξαμενής. Αυτή η κυκλοφορία πραγματοποιείται μέχρι η πίεση στην δεξαμενή να φτάσει τα 5 bar.



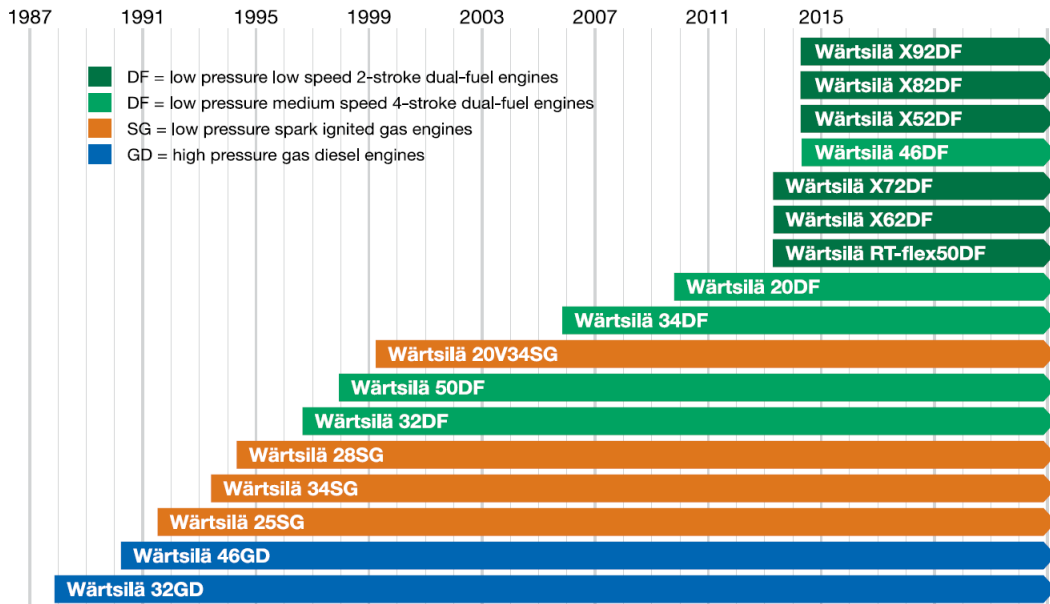
Η μονάδα τους εξατμιστήρα έχει σκοπό την μετατροπή του φυσικού αερίου από υγρή σε αέρια μορφή και με θερμοκρασία πάνω από 0°C για να τροφοδοτηθεί στην η μονάδα ελέγχου του φυσικού αερίου μέσω αγωγού διπλού τοιχώματος. Στην συνέχεια η μονάδα έλεγχου θα φέρει το φυσικό αέριο στην κατάλληλη θερμοκρασία και πίεση για να τροφοδοτήσει τους εγχυτήρες φυσικού αερίου στα πλευρικά τοιχώματα του κινητήρα. Η μονάδα του εξατμιστήρα αποτελείται επίσης από μονωμένους αγωγούς, αγωγούς μονού τοιχώματος, βαλβίδες, αισθητήρες υδρογονανθράκων και έναν εξατμιστήρα. Οι εξατμιστήρες και των δύο παραπάνω μονάδων κάνουν χρήση κυκλώματος με διάλυμα νερού/γλυκόλης το οποίο ανταλλάσει θερμότητα μέσω εναλλάκτη ο οποίος θερμαίνεται από τα ζεστά νερά του κυκλώματος ψύξης του κινητήρα.



Εικόνα 5.23: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος τροφοδοσίας 1. Αγωγός ανεφοδιασμού, 2. Δεξαμενή LNG, 3. Μονάδα ανάκτησης πίεσης, 4. Μονάδα εξατμιστήρα, 5. Εναλλάκτης θερμότητας με διάλυμα νερού/γλυκόλης, 6. Αγωγός διπλού τοιχώματος, 7. Μονάδα ελέγχου φυσικού αερίου, 8. Αγωγός τροφοδοσίας κινητήρα.

Οι μονάδες της ανάκτησης πίεσης και του εξατμιστήρα είναι τοποθετημένες σε ένα κουτί που τα τοιχώματα του είναι από ανοξείδωτο ατσάλι και είναι συγκολλημένο πάνω στο εξωτερικό τοίχωμα της δεξαμενής LNG. Τα τοιχώματα προστατεύουν σε περίπτωση διαρροής LNG τα μέταλλα του πλοίου και το προσωπικό του. Έχει κατάλληλο εξαερισμό και αισθητήρες υδρογονανθράκων έτσι ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί τυχόν διαρροή. Λόγω των τοιχωμάτων αυτών οι αγωγοί είναι μονού και όχι διπλού τοιχώματος.

Η εξέλιξη του LNGPac System περιλαμβάνει την τοποθέτηση της μονάδα ελέγχου φυσικού αερίου μέσα στο κουτί που είναι τοποθετημένες οι δύο άλλες μονάδες οδηγώντας έτσι σε μείωση του καταλαμβανόμενου χώρου. Το LNGPac System γίνεται πιο συμπαγές και το κόστος του συστήματος τροφοδοσίας μειώνεται. Στις περιπτώσεις που οι κινητήρες διπλού καυσίμου χρησιμοποιούνται σε εμπορικά πλοία LNG τότε το σύστημα τροφοδοσίας είναι παρόμοιο με αυτό των τετράχρονων κινητήρων μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης. Σε όλες τις περιπτώσεις, η μετάβαση από λειτουργία μονού καυσίμου σε λειτουργία διπλού καυσίμου και αντίστροφα γίνεται ακαριαία.



Εικόνα 5.24: Η πλήρης γκάμα κινητήρων μεικτής καύσης της Wärtsilä

### 5.3 Σύγκριση των τεχνολογιών μεικτής καύσης.

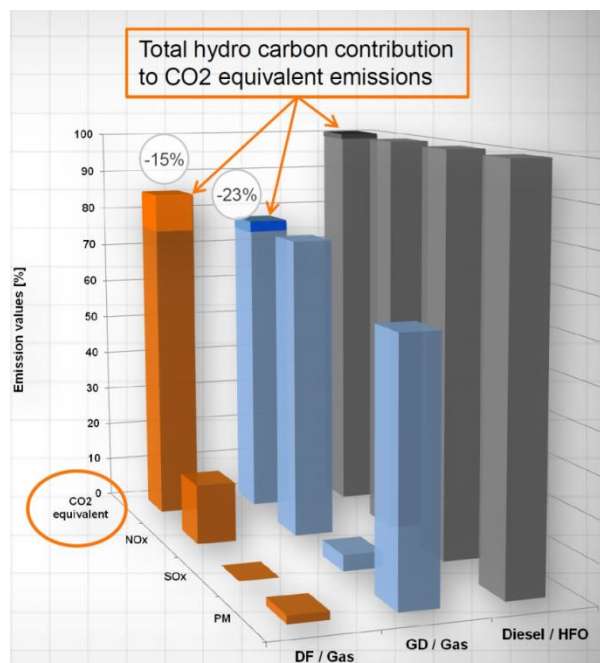
Αναλύοντας τις διάφορες τεχνολογίες μεικτής καύσης που παρουσιάσαμε παραπάνω διαπιστώνουμε ότι δεν είναι όλοι οι κινητήρες διπλού καυσίμου κατασκευασμένοι με τον ίδιο τρόπο αλλά ούτε και για τον ίδιο σκοπό. Η κάθε τεχνολογία έχει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάνοντας τις έτσι κατάλληλες για διαφορετικές εφαρμογές. Ουσιαστικά, οι δύο κύριες τεχνολογίες που έχουν επικρατήσει είναι αυτή της υψηλής και της χαμηλής πίεσης τροφοδοσίας του φυσικού αερίου. Η επιλογή του ποια από τις δύο τεχνολογίες ταιριάζει σε κάθε εφαρμογή κρίνεται από τρεις χαρακτηριστικούς παράγοντες, την θερμοκρασία καύσης (επηρεάζει τον σχηματισμό των NO<sub>x</sub>), το κόστος (εξαρτάται από το αν είναι υψηλής ή χαμηλής πίεσης) και την απόδοση του κινητήρα (εξαρτάται από την μέγιστη πίεση συμπίεσης και τη θερμική απόδοση).



Αυτοί οι παράγοντες παίζουν καθοριστικό ρόλο για το ποια τεχνολογία κινητήρων θα διαλέξει ο κάθε ιδιοκτήτης πλοίων. Δίνοντας περισσότερη προσοχή στους μεγάλους και αποδοτικούς δίχρονους κινητήρες, όπως έχουμε αναφέρει, υπάρχουν δύο στρατόπεδα, η MAN και πρόσφατα και η MHI (Mitsubishi Heavy Industries) που αναπτύσσουν την τεχνολογία υψηλής πίεσης η οποία βασίζεται στον κύκλο του Diesel γνωστοί ως Gas-Diesel (GD) ME-GI κινητήρες, και το στρατόπεδο της Wärtsilä που αναπτύσσει του κινητήρες χαμηλής πίεσης που βασίζονται στον κύκλο του Otto και είναι γνωστοί ως Dual Fuel (DF) X-DF κινητήρες.

### 5.3.1 Σύγκριση δίχρονων κινητήρων μεικτής καύσης υψηλής πίεσης με τους χαμηλής πίεσης

Στα χρόνια που ζούμε αλλά και σε αυτά που έρχονται, οι εκπομπές ρύπων θα παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή κινητήρα. Όσο αυστηρότερα γίνονται τα όρια και όσο περισσότερο αυξάνονται οι περιοχές ECA τόσο πιο καθοριστικός παράγοντας θα είναι η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων. Με την μεικτή καύση σε όλες τις περιπτώσεις οι εκπομπές σωματιδίων (PM) και οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>) σχεδόν εξαλείφονται. Όσον αφορά όμως τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) αυτές επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία καύσης. Στους κινητήρες υψηλής πίεσης που ακολουθούν τον κύκλο του Diesel οι θερμοκρασίες είναι αρκετά υψηλότερες από ότι στους κινητήρες χαμηλής πίεσης. Ως αποτέλεσμα έχουμε ότι στους κινητήρες χαμηλής πίεσης επιτυγχάνεται μείωση των NO<sub>x</sub> έως και 85% σε σχέση με ένα κινητήρα μονού καυσίμου που καίει βαρύ πετρέλαιο. Στους κινητήρες υψηλής πίεσης η αντίστοιχη μείωση είναι μόνο 25%.



Εικόνα 5.25: Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων δίχρονων κινητήρων μεικτής καύσης χαμηλής και υψηλής πίεσης

Με αυτόν τον τρόπο οι κινητήρες υψηλής πίεσης καταφέρνουν να εναρμονιστούν μόνο με τα πρότυπα Tier II ενώ οι κινητήρες χαμηλής πίεσης μπορούν απευθείας να εναρμονιστούν με τα πρότυπα Tier III. Αυτό το γεγονός αναγκάζει τους κινητήρες υψηλής πίεσης να κάνουν χρήση συστημάτων αντιρύπανσης και πιο συγκεκριμένα συστημάτων μείωσης των NO<sub>x</sub> σε αντίθεση με τους κινητήρες χαμηλής πίεσης όπου δεν χρειάζονται κανένα επιπλέον σύστημα αντιρύπανσης.

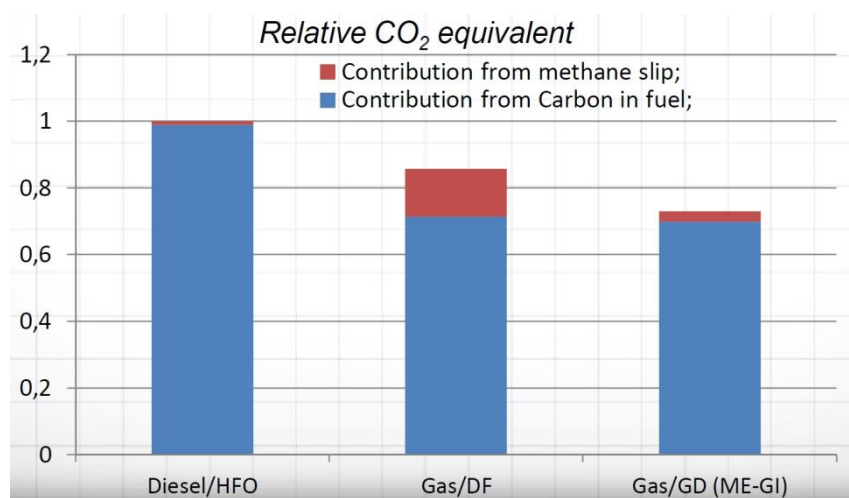
Η απαραίτητη όμως χρήση των συστημάτων αντιρύπανσης στους κινητήρες υψηλής πίεσης αυξάνει το κόστος του. Δεν είναι όμως ο μοναδικός παράγοντας που αυξάνει το κόστος των κινητήρων αυτών συγκριτικά με των χαμηλής πίεσης. Λόγω του ότι η πίεση στους κινητήρες χαμηλής πίεσης φτάνει το μέγιστο 16 bar ενώ η πίεση λειτουργίας κυμαίνεται στα 12 bar δεν απαιτείται κάποιος μεγάλος συμπιεστής και γενικά συστήματα τα οποία να αντέχουν μεγάλες πιέσεις. Οι κινητήρες υψηλής πίεσης έχουν πιέσεις λειτουργίας που κυμαίνονται από 200 έως 300 bar. Αυτό οδηγεί σε συστήματα τα οποία είναι ακριβά, έχουν μεγάλο βάρος και καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο. Επιπλέον, τα συστήματα χαμηλής πίεσης είναι λιγότερο πολύπλοκα και υπάρχει πλήθος προμηθευτών που μπορεί να προσφέρει ανταλλακτικά για τέτοια συστήματα καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις τα ανταλλακτικά είναι κοινά με αυτά των τετράχρονων κινητήρων χαμηλής πίεσης. Ακόμα, ο χρόνος συντήρησης είναι μικρότερος και οι εργασίες ευκολότερες καθώς σε περίπτωση που χρειαστεί να αλλαχθεί μια βαλβίδα έγχυσης φυσικού αερίου, αυτή βρίσκεται στο πλάι των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και δεν χρειάζεται να βγει ολόκληρο το καπάκι των κυλίνδρων για να αντικατασταθεί, κάτι το οποίο πρέπει να γίνει στους κινητήρες υψηλής πίεσης.

Ένα σημαντικό επίσης πλεονέκτημα των κινητήρων χαμηλής πίεσης είναι ότι η ποσότητα έγχυσης πιλοτικού καυσίμου είναι, σε όλο το εύρος των φορτίων, λιγότερο και από 1% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου. Αντίθετα στους κινητήρες υψηλής πίεσης κυμαίνεται από 1,5 έως 3% ή και περισσότερο, ανάλογα με το φορτίο. Ακόμη, η κινητήρες χαμηλής πίεσης μπορούν να είναι σε λειτουργία μεικτής καύσης ακόμα και όταν το φορτίο είναι στο 5% του μεγίστου (πραγματοποίηση ελιγμών) ενώ οι κινητήρες υψηλής πίεσης με φορτίο κάτω από 10% αλλάζουν σε λειτουργία μονού καυσίμου. Έτσι, οι κινητήρες χαμηλής πίεσης μπορούν να καίνε φυσικό αέριο ακόμα και κατά την διάρκεια ελιγμών μέσα στα λιμάνια ενώ οι υψηλής πίεσης θα πρέπει να μπαίνουν σε λειτουργία μονού καυσίμου, να καίνε ναυτικό πετρέλαιο και να κάνουν χρήση των συστημάτων αντιρύπανσης για να συμμορφώνονται με τα πρότυπα Tier III.

Συγκεντρωτικά, τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας χαμηλής πίεσης είναι τα παραπάνω. Από την άλλη μεριά όμως πλεονεκτήματα έχει και η τεχνολογία της υψηλής πίεσης και ανάλογα με το είδος των εφαρμογών ίσως κρίνονται και πιο σημαντικά. Οι κινητήρες υψηλής πίεσης υπερτερούν ξεκάθαρα στον τομέα της απόδοσης ισχύος. Καθοριστικό ρόλο σε αυτό παίζει η άμεση έγχυση του φυσικού αερίου στον κύλινδρο υπό υψηλή πίεση.

Αρχικά, τα συστήματα υψηλής πίεσης δίνουν την δυνατότητα για ακριβή ρύθμιση της ποσότητας έγχυσης και του χρόνου έγχυσης του φυσικού αερίου στον θάλαμο καύσης. Οι κινητήρες

χαμηλής πίεσης κινδυνεύουν να βγουν εκτός παραθύρου λειτουργίας αν το μείγμα δεν είναι όσο φτωχό χρειάζεται ενώ στους κινητήρες υψηλής πίεσης αυτός ο κίνδυνος δεν υπάρχει. Ακόμα, οι κινητήρες χαμηλής πίεσης επηρεάζονται από την ποιότητα του φυσικού αερίου και σε περίπτωση χαμηλής περιεκτικότητας του σου σε μεθάνιο η απόδοση του κινητήρα μειώνεται. Κάτι τέτοιο δεν υφίσταται στους κινητήρες υψηλής πίεσης και για αυτό η απόδοση του διατηρείται σταθερή άσχετα με την ποιότητα του φυσικού αερίου. Επίσης, ενώ οι κινητήρες χαμηλής πίεσης τα πάνε πολύ καλά με τις εκπομπές των NO<sub>x</sub> δεν τα πάνε αντίστοιχα καλά με τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) γενικά μειώνεται με την καύση φυσικού αερίου, η διαφυγή άκαυτου φυσικού αερίου και κατά συνέπεια μεθανίου αυξάνεται. Κατά την διαδικασία της σάρωσης του κυλίνδρου, μεγάλη ποσότητα μεθανίου διαφεύγει προς το περιβάλλον από τις βαλβίδες εξαγωγής. Για τον λόγο αυτό η μείωση των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου από τους κινητήρες χαμηλής πίεσης φτάνει μόνο το 10% την στιγμή που η αντίστοιχη μείωση για τους κινητήρες υψηλής πίεσης φτάνει το 23%.



Εικόνα 5.26: Συσχετισμός εκπομπών CO<sub>2</sub> (συνυπολογίζοντας την συνεισφορά του μεθανίου) με βάση αναφοράς τις εκπομπές CO<sub>2</sub> συμβατικού κινητήρα μονού καυσίμου καίγοντας βαρύ πετρέλαιο.

Το σημαντικότερο όμως πλεονέκτημα των κινητήρων υψηλής πίεσης είναι όπως είπαμε η απόδοση τους η οποία παραμένει ίδια με αυτή αντίστοιχων κινητήρων μονού καυσίμου. Επειδή οι κινητήρες χαμηλής πίεσης κινδυνεύουν να εμφανίσουν φαινόμενα κρουστικής καύσης, η μέση αποδοτική πίεση υπολογισμένη με βάση την ροπή πέδησης (BMEP) για ένα κινητήρα μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης έχει μέγιστο όριο τα 17,3 bar. Η αντίστοιχη πίεση (BMEP) στους μοντέρνους κινητήρες υψηλής πίεσης μπορεί να φτάσει και τα 21 bar. Αυτές οι διαφορές φανερώνουν μικρότερη πυκνότητα ισχύος για του κινητήρες χαμηλής πίεσης. Για παράδειγμα, όταν ο δίχρονος κινητήρας μονού καυσίμου της Wärtsilä, X-72, έχει ισχύ 21,660kW τότε ο αντίστοιχος δίχρονος κινητήρας μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης, X-72DF, έχει ισχύ 19,350kW. Στους κινητήρες υψηλής πίεσης όμως οι ισχύς μεταξύ κινητήρων μονού και διπλού καυσίμου δεν παρουσιάζει διαφορά. Βέβαια γίνονται προσπάθειες έτσι ώστε η μεγάλη αυτή διαφορά ισχύος στους

κινητήρες χαμηλής πίεσης να εξαλειφθεί και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με λεπτομερέστατη ρύθμιση των παραμέτρων της καύσης, της ποιότητας σάρωσης, του χρονισμού κλεισίματος των βαλβίδων, του χρονισμού έγχυσης, της ποσότητας έγχυσης και πολλών άλλων παραμέτρων.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, η επιλογή κινητήρα είναι μια πολύπλοκη υπόθεση. Η κάθε τεχνολογία έχει σημαντικά πλεονεκτήματα και ανάλογα με την εφαρμογή θα πρέπει να γίνετε και η επιλογή του αντίστοιχου κινητήρα. Με τα μέχρι τώρα δεδομένα αν μια εφαρμογή απαιτεί μεγάλη απόδοση και όσο γίνεται μικρότερη ειδική κατανάλωση η επιλογή ενός δίχρονου κινητήρα μεικτής καύσης υψηλής πίεσης κρίνεται ως πιο σωστή. Από την άλλη αν η απόδοση και η ισχύς του κινητήρα δεν είναι πρωταρχικής σημασίας αλλά η μειωμένες εκπομπές και η εύκολη συντήρηση είναι αυτό που έχει περισσότερη σημασία τότε η σωστή επιλογή είναι ένας δίχρονος κινητήρας μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης.

### **5.3.2 Σύγκριση δίχρονου κινητήρα υψηλής πίεσης σε λειτουργία διπλού και μονού καυσίμου**

Έχοντας κάνει μια συνοπτική σύγκριση των δύο τεχνολογιών, στην συνέχεια θα παρουσιαστεί μια σύγκριση αριθμητικών δεδομένων που αφορούν την ισχύ, την ειδική κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων δύο κινητήρων υψηλής πίεσης, μονού και διπλού καυσίμου. Ο κινητήρας που επιλέχθηκε είναι της MAN Diesel & Turbo της οικογένειας 70ME με 6 κυλίνδρους εν σειρά. Είναι δίχρονος κινητήρας υψηλής πίεσης και κατασκευάζεται είτε ως μονού καυσίμου είτε ως διπλού καυσίμου. Πρόκειται για κινητήρα που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μεσαίων και μεγάλων απαιτήσεων σε ισχύ καθώς αποδίδει 20.580 kW και στις δύο περιπτώσεις, μονού και διπλού καυσίμου. Παρατηρούμε έτσι ότι στους κινητήρες υψηλής πίεσης δεν υφίσταται πτώση της απόδοσης. Ο κινητήρας μονού καυσίμου είναι ο 6S70ME-C ενώ ο διπλού καυσίμου ο 6S70ME-GI. Οι μετρήσεις και από τους δύο κινητήρες έγιναν με χρήση πετρελαίου χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και με τις εκπομπές να πληρούν τις προδιαγραφές Tier III.

Στους παρακάτω πίνακες και διαγράμματα παρατηρούμε την ειδική κατανάλωση καυσίμου των κινητήρων αυτών. Ο 6S70ME-GI σε λειτουργία καύσης πετρελαίου παρατηρούμε ότι έχει ακριβώς την ίδια ειδική κατανάλωση καυσίμου με τον 6S70ME-C, κάτι το οποίο επαληθεύει και το γιατί η απόδοση των δύο κινητήρων ακριβώς ίδια. Όταν ο 6S70ME-GI βρίσκεται σε λειτουργία μεικτής καύσης παρατηρούμε ότι σε πλήρες φορτίο η ειδική κατανάλωση πετρελαίου αντιπροσωπεύει το 3,5% της συνολικής ειδικής κατανάλωσης, ένα ποσοστό σχετικά υψηλό σε σχέση με το αντίστοιχο των κινητήρων χαμηλής πίεσης. Στην περίπτωση δε που το φορτίο είναι μόλις στο 25% η ειδική κατανάλωση πετρελαίου φτάνει το 8,8% της συνολικής ειδικής κατανάλωσης. Οι μετρήσεις έχουν γίνει σε τρεις διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

SFOC	Tier II		Tier III	
	SMCR g/kWh	NCR g/kWh	SMCR g/kWh	NCR g/kWh
ISO	168.0	168.0	171.0	171.0
Tropical	169.8	169.8	172.8	172.8
Specified	166.0	166.0	169.0	169.0

SFOC: Specific Fuel Oil Consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)

Πίνακας 5.1: Ειδική κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα 6S70ME-C υπολογισμένη σε τρεις διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος και με βάση τα δύο πρότυπα εκπομπών Tier II και Tier III.

SFOC	Tier II		Tier III	
	SMCR g/kWh	NCR g/kWh	SMCR g/kWh	NCR g/kWh
ISO	168.0	168.0	171.0	171.0
Tropical	169.8	169.8	172.8	172.8
Specified	166.0	166.0	169.0	169.0

SFOC: Specific Fuel Oil Consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)

SPOC/SGC	Tier II		Tier III	
	SMCR g/kWh	NCR g/kWh	SMCR g/kWh	NCR g/kWh
ISO	5.1 / 139.1	5.1 / 139.1	5.1 / 141.7	5.1 / 141.7
Tropical	5.1 / 140.6	5.1 / 140.6	5.1 / 143.2	5.1 / 143.2
Specified	5.1 / 137.4	5.1 / 137.4	5.1 / 139.9	5.1 / 139.9

SPOC: Specific Pilot Oil Consumption (LCV: 42,700 kJ/kg)

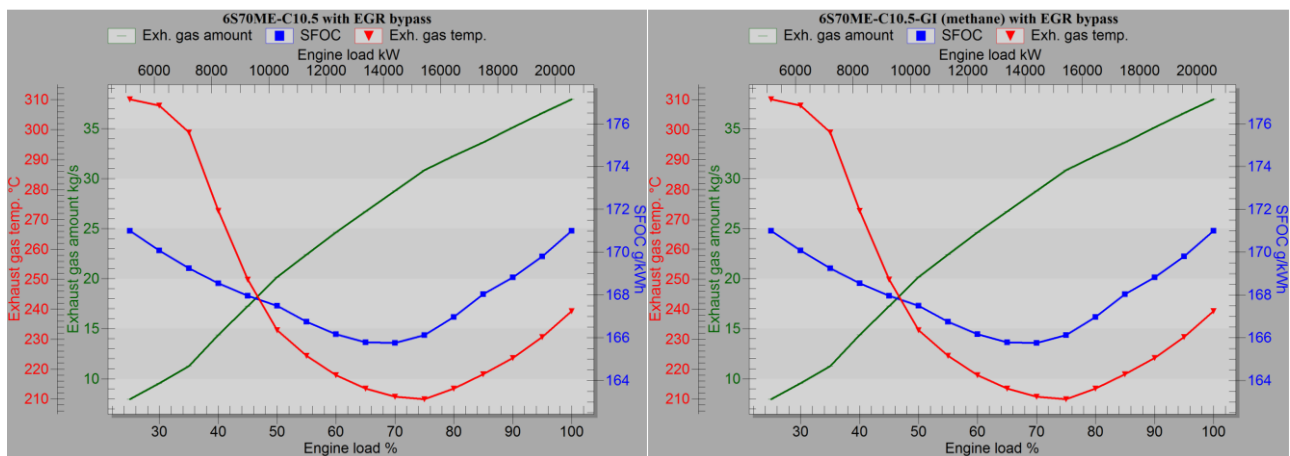
SGC: Specific Gas Consumption (LCV: 50,000 kJ/kg)

Πίνακας 5.2: Ειδική κατανάλωση πετρελαίου και φυσικού αερίου του κινητήρα 6S70ME-GI υπολογισμένη σε τρεις διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος και με βάση τα δύο πρότυπα εκπομπών Tier II και Tier III.

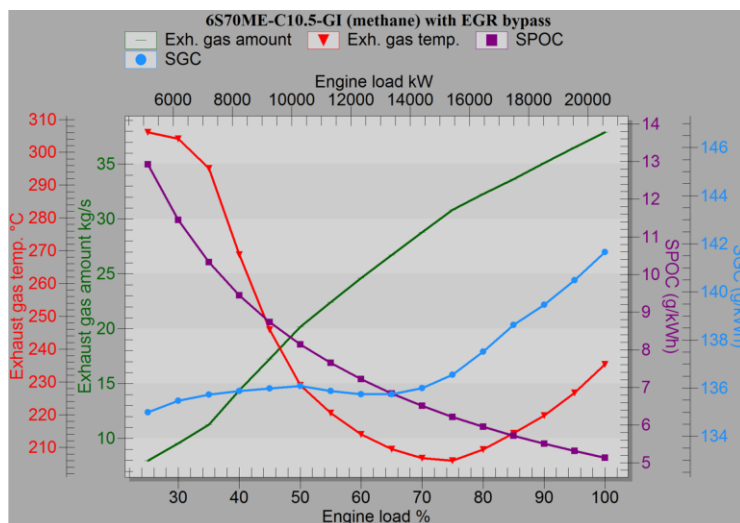
Ambient condition	Scavenge air coolant temperature <sup>1)</sup> °C	Ambient air temperature °C	Relative air humidity %	Barometric pressure mbar	Exhaust back pressure mmWC
ISO	25	25	30	1,000	300
Tropical	36	45	60	1,000	300
Specified	10	10	60	1,000	300

Πίνακας 5.3: Πρότυπα συνθηκών στα οποία γίνονται οι μετρήσεις

Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε την μεταβολή των ειδικών καταναλώσεων για κάθε περίπτωση καθώς και της ποσότητα και θερμοκρασίας των εκπεμπόμενων καυσαερίων. Γίνεται φανερό πως για φορτία τα οποία αντιπροσωπεύουν το 70-80% της μέγιστης απόδοσης η ειδική κατανάλωση είναι η ελάχιστη δυνατή. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι οι κινητήρες είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε σε συνεχή λειτουργία να δουλεύουν στο 70-80% των μέγιστων δυνατοτήτων τους.



Εικόνα 5.27: Διαγράμματα ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και ποσότητας-θερμοκρασίας καυσαερίων στον κινητήρα μονού καυσίμου (αριστερά) και στον κινητήρα διπλού καυσίμου σε λειτουργία καύσης πετρελαίου (δεξιά) συναρτήσει του φορτίου του κινητήρα.



Εικόνα 5.28: Διάγραμμα ειδικής κατανάλωσης πετρελαίου και φυσικού αερίου στον κινητήρα μεικτής καύσης και ποσότητας-θερμοκρασίας καυσαερίων συναρτήσει του φορτίου του κινητήρα.

Τέλος, στον πίνακα 5.4 παρατηρούμε τις διαφορές στους εκπεμπόμενους ρύπους μεταξύ του 6S70ME-C και του 6S70ME-GI κάνοντας χρήση όμως βαριού πετρελαίου. Με τον κινητήρα διπλού καυσίμου παρατηρούμε μείωση 22,7% του εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub>, μείωση 24,3% των NO<sub>x</sub>, μείωση 37% των μικροσωματιδίων, 92% μείωση των SO<sub>x</sub>, μια μικρή αύξηση 15,6% των μονοξειδίων του άνθρακα και 50% αύξηση των υδρογονανθράκων. Τα μονοξειδία του άνθρακα και οι υδρογονάνθρακες που αυξήθηκαν είναι και πάλι σε πολύ μικρή ποσότητα μην δημιουργώντας έτσι πρόβλημα με την ποσοστιαία αύξηση τους.

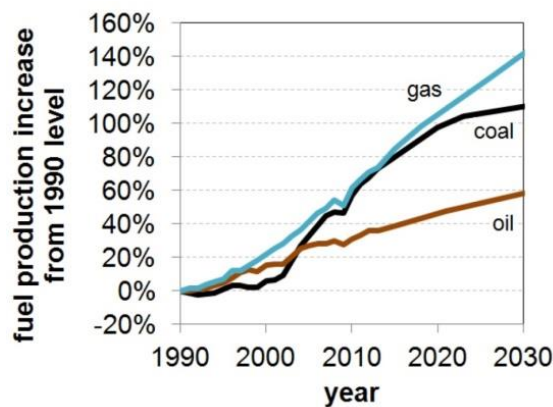
**Comparison of emissions from an HFO burning and a gas burning 70ME type engine**

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

Πίνακας 5.4: Σύγκριση εκπεμπόμενων ρύπων μεταξύ ίδιων κινητήρων μονού και διπλού καυσίμου

## 5.4 Κόστος εγκατάστασης, κόστος χρήσης και χρόνος απόσβεσης κινητήρων μεικτής καύσης

Τα συνεχώς αυστηρότερα πρότυπα εκπομπής ρύπων για τους ναυτικούς κινητήρες έχει οδηγήσει τους κατασκευαστές ναυτικών κινητήρων στην ανάπτυξη τεχνολογιών για κινητήρες μεικτής καύσης. Πέρα όμως από τον περιβαλλοντολογικό παράγοντα, τα οικονομικά οφέλη από την καύση φυσικού αερίου είναι εξίσου σημαντικά και καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή κινητήρων μεικτής καύσης από τους ιδιοκτήτες ναυτιλιακών εταιριών. Τα τελευταία χρόνια οι τιμές του φυσικού αερίου είναι αρκετά χαμηλότερες από του ναυτικού πετρελαίου και θα συνεχίσουν να είναι χαμηλότερες μιας και προβλέπεται ότι η παραγωγή φυσικού αερίου θα παρουσιάζει μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξης από τον αντίστοιχο του πετρελαίου.



Εικόνα 5.29: Ρυθμός ανάπτυξης της παραγωγής φυσικού αερίου, κάρβουνου και πετρελαίου

Τα μεγαλύτερα έξοδα για ένα εμπορικό πλοίο είναι τα λειτουργικά έξοδα, όπου κύριο ρόλο παίζει το κόστος των καυσίμων. Αν και οι δίχρονοι κινητήρες μεικτής καύσης υψηλής πίεσης



παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση και κατά συνέπεια καλύτερη ειδική κατανάλωση στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα κόστη αγοράς, κόστη χρήσης αλλά και ο χρόνος απόσβεσης για τους δίχρονους κινητήρες μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης μέσω μελέτης που είχε πραγματοποιήσει η εταιρία Wärtsilä. Η μελέτη αφορά την σύγκριση του αρχικού κόστους αγοράς ενός δίχρονου κινητήρα μονού καυσίμου και ενός δίχρονου κινητήρα διπλού καυσίμου. Ακόμα, η μελέτη υπολογίζει και τα λειτουργικά κόστη των κινητήρων για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας καθώς και τον χρόνο απόσβεσης του επιπλέον κόστους αγοράς ενός κινητήρα μεικτής για κάθε ένα από αυτά τα σενάρια.

Η υποτιθέμενη αγορά κινητήρα προορίζεται για ένα εμπορικό ή επιβατηγό πλοίο μεσαίου μεγέθους που οι απαιτήσεις σε ισχύ πρόωσης φτάνει μέχρι τα 8000kW. Εκτός όμως από την ισχύ πρόωσης απαιτούνται και βοηθητικοί κινητήρες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο σύστημα κινητήρων πρόωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σαν κύριοι κινητήρες πρόωσης θα επιλεγεί από την σειρά των δίχρονων κινητήρων μονού καυσίμου της Wärtsilä ο 5RT-flex50D με μέγιστη απόδοση ισχύος τα 8725kW στις 124rpm και 5 κυλίνδρους εν σειρά. Λόγω της μειωμένης ισχύος του αντίστοιχου 5κύλινδρου δίχρονου κινητήρα μεικτής καύσης χαμηλής πίεσης, επιλέχθηκε κινητήρας της ίδιας οικογένειας, αλλά με 6 κυλίνδρους εν σειρά και ισχύ 8640Kw στις 124rpm. Σαν ισχύ συνεχούς λειτουργίας επιλέχθηκε και για τους δύο κινητήρες τα 7620kW στις 115,4rpm. Σαν βοηθητικοί κινητήρες επιλέχθηκαν οι τετράχρονοι 8L20 και 8L20DF αντίστοιχα.

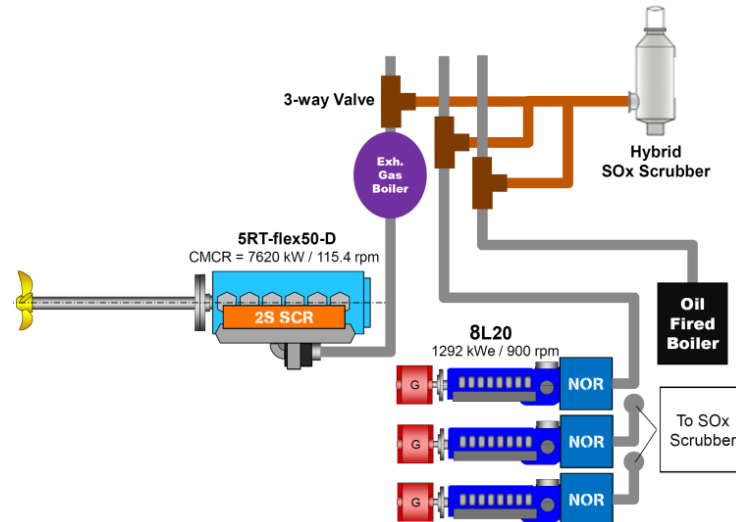
<b>WinGD RT-flex50-D</b>						IMO Tier II/Tier III (SCR)		<b>WinGD RT-flex50DF</b>						IMO Tier III in gas mode									
Cylinder bore						500 mm		Cylinder bore						500 mm									
Piston stroke						2050 mm		Piston stroke						2050 mm									
Speed						95-124 rpm		Speed						99-124rpm									
Mean effective pressure at R1						21.0 bar		Mean effective pressure at R1						17.3 bar									
Stroke / bore						4.10		Stroke/bore						4.10									
<b>Rated power, principal dimensions and weights</b>								<b>Rated power, principal dimensions and weights</b>															
Cyl.	Output in kW at				Length A mm	Length A' mm	Weight tonnes	Cyl.	Output in kW at				Length A mm	Length A' mm	Weight tonnes								
	124 rpm		95 rpm						124 rpm	124 rpm	99 rpm	99 rpm											
	R1	R2	R3	R4				R1	R2	R3	R4												
5	8 725	6 650	6 700	5 100	5 576	6 793	200	5	7 200	6 000	5 750	4 775	5 576	6 793	200								
6	10 470	7 980	8 040	6 120	6 456	7 670	225	6	8 640	7 200	6 900	5 730	6 456	7 670	225								
7	12 215	9 310	9 380	7 140	7 336		255	7	10 080	8 400	8 050	6 685	7 336		255								
8	13 960	10 640	10 720	8 160	8 216		280	8	11 520	9 600	9 200	7 640	8 216		280								
Dimensions (mm)	B		C		D		E		E'		Dimensions (mm)	B		C		D		E		E'			
	3 150		1 088		7 646		3 570		1 900			3 150		1 088		7 646		3 570		1 900			
	F1		F2		F3		G					F1		F2		F3		G					
	9 270		9 270		8 800		1 636				9 270		9 270		8 800		1 636						
<b>Brake specific fuel consumption (BSFC) in g/kWh</b>						<b>Brake specific consumptions in gas mode</b>																	
<b>Full load</b>						<b>Rating point</b>																	
Rating point		R1		R2		R3		R4		R1		R2		R3		R4							
BMEP, bar		21.0		16.0		21.0		16.0		kJ/kWh		7 200		7 158		7 200		7 158					
BSFC		Standard Tuning		168.8		162.8		168.8		162.8		BSGC (gas)		g/kWh		142.7		141.6		142.7		141.6	
										BSPC (pilot fuel)		g/kWh		1.5		1.8		1.5		1.8			
<b>Part load, % of R1</b>						<b>Brake specific fuel consumption in diesel mode</b>																	
Tuning variant		Standard		Standard		Delta		Delta		Low-Load		<b>Rating point</b>											
BSFC		165.2		163.5		164.5		162.0		158.9		g/kWh		R1		R2		R3		R4			
												182.1		182.1		182.1		182.1		182.1			

Πίνακας 5.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά οικογενείας κινητήρων RT-flex50D (μονού καυσίμου-αριστερά) και RT-flex50DF (διπλού καυσίμου-δεξιά)

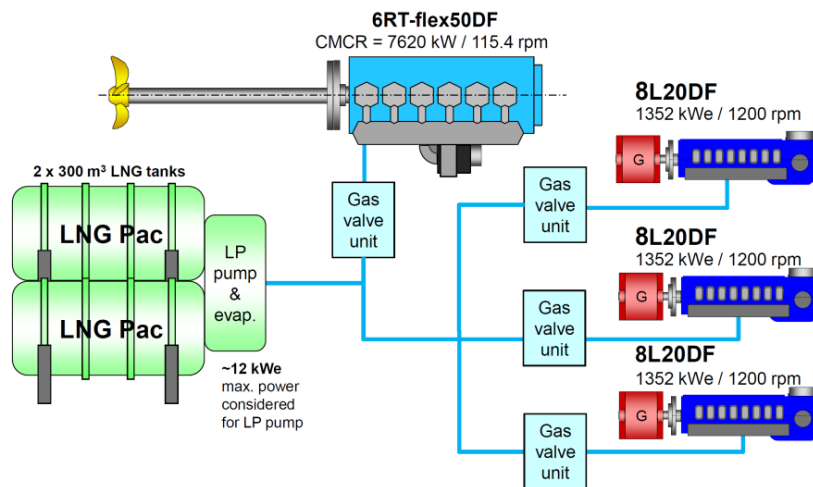


Το κόστος της αρχικής αγοράς του κινητήρα μονού καυσίμου είναι 8εκ. USD ενώ του κινητήρα διπλού καυσίμου είναι 12,5εκ. USD. Τα λειτουργικά κόστη όμως και ο χρόνος απόσβεσης υπολογίστηκαν για τρία διαφορετικά σενάρια λειτουργίας:

- 1<sup>ο</sup> σενάριο: χρήση σε περιοχές ECA σε ποσοστό 100%
- 2<sup>ο</sup> σενάριο: χρήση σε περιοχές ECA σε ποσοστό 80%
- 3<sup>ο</sup> σενάριο: χρήση σε περιοχές ECA σε ποσοστό 60%



Εικόνα 5.30: Σύστημα πρόωσης και βοηθητικοί κινητήρες μονού καυσίμου



Εικόνα 5.31: Σύστημα πρόωσης και βοηθητικοί κινητήρες διπλού καυσίμου

Τα λειτουργικά κόστη εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το κόστος των καυσίμων. Σύμφωνα με τις τιμές που έχουν διαμορφωθεί το τελευταίο διάστημα και με μια στρογγυλοποίηση προς τα πάνω προκύπτουν οι παρακάτω τιμές για κάθε ένα από τα καύσιμα:

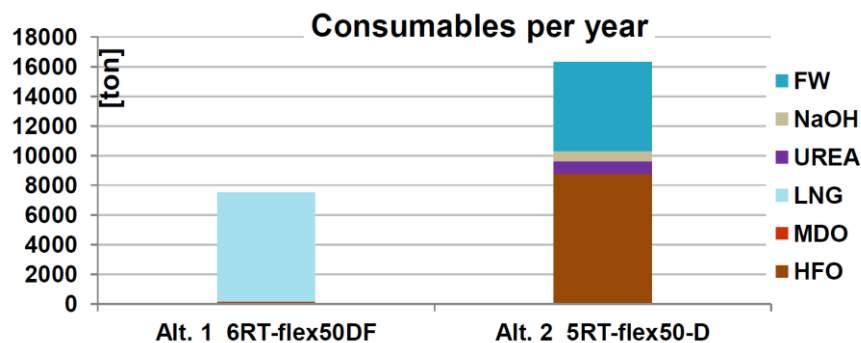
- Βαρύ πετρέλαιο (HFO): 350 USD/ton
- Ναυτικό πετρέλαιο χ. περ. σε θείο(MDO): 500 USD/ton
- LNG: 300 USD/ton

Παρατηρούμε πως το LNG είναι σε κάθε περίπτωση φθηνότερο από το βαρύ και ελαφρύ πετρέλαιο. Βέβαια στα σενάρια που θα ακολουθήσουμε θα κάνουμε και την υπόθεση ότι για κάποιο ποσοστό χρήσης το βαρύ πετρέλαιο είναι φθηνότερο από το LNG οπότε κι επιλέγεται, κάτι το οποίο όμως δύσκολα υφίσταται. Σε κάθε περίπτωση, αυτές οι υποθέσεις δυσχεραίνουν ακόμα περισσότερο την κατάσταση για το LNG αλλά και πάλι παρατηρούμε πως είναι μια συμφέρουσα επιλογή ο κινητήρας μεικτής καύσης.

Ένας κινητήρα μονού καυσίμου εκτός από τα καύσιμα έχει και αλλά λειτουργικά κόστη όπως είναι:

- η ουρία (Urea): 150 USD/ton
- το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH): 200 USD/ton και
- η τροφοδοσία φρέσκου νερού στις πλυντρίδες με κόστος 2 USD/ton.

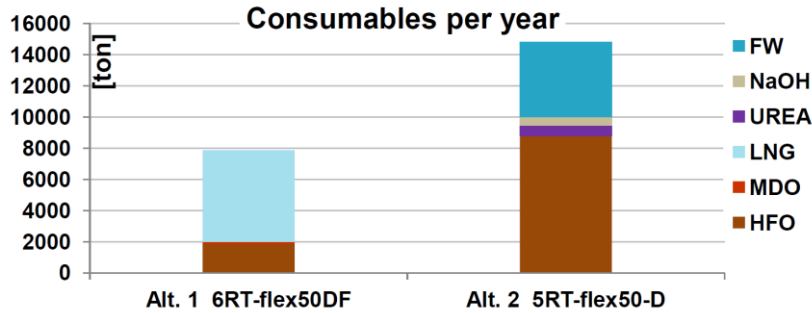
Σύμφωνα με τις καταναλώσεις που προκύπτουν από μετρήσεις και αναπαριστούνται στο παρακάτω διάγραμμα τα λειτουργικά κόστη για το πρώτο σενάριο λειτουργίας είναι 2,3εκ. USD ετησίως για τον κινητήρα διπλού καυσίμου και 3,4 εκ. USD.



Εικόνα 5.32: Διάγραμμα αναπαράστασης κατανάλωσης καυσίμων για τους δύο κινητήρες σύμφωνα με το πρώτο σενάριο λειτουργίας.

Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι με κέρδος κάθε χρόνο 1,1εκ. USD από τα λειτουργικά έξοδα το επιπλέον κόστος αγοράς του κινητήρα διπλού καυσίμου (4,5 εκ. USD) αποσβένεται σε διάστημα τεσσάρων περίπου ετών. Η τόσο γρήγορη απόσβεση είναι απολύτως λογική μιας και σύμφωνα με το πρώτο σενάριο το πλοίο καθόλη την διάρκεια του έτος κινείται μέσα σε περιοχές ECA οδηγώντας σε αποκλειστική κατανάλωση LNG που είναι το πιο οικονομικό καύσιμο.

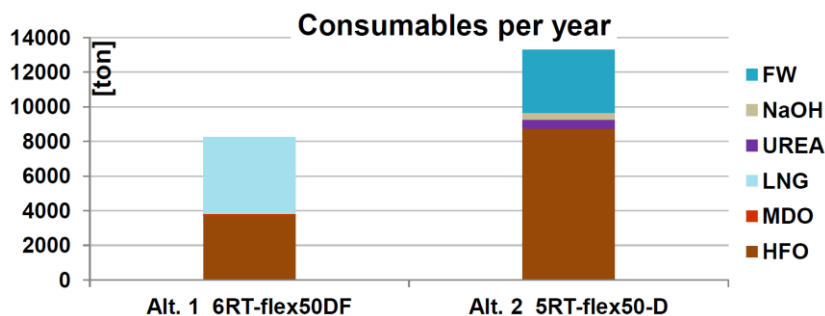
Στην περίπτωση του δευτέρου σεναρίου λειτουργίας και υποθέτοντας επίσης πως το πλοίο κατά το 20% που θα κινούταν εκτός ECA δεν θα έχει πρόσβαση σε τόσο οικονομικό LNG τότε θα αναγκαζόταν να καταναλώσει βαρύ πετρέλαιο και οι καταναλώσεις θα ήταν οι ακόλουθες, όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 5.33: Διάγραμμα αναπαράστασης κατανάλωσης καυσίμων για τους δύο κινητήρες σύμφωνα με το δεύτερο σενάριο λειτουργίας.

Σύμφωνα με τις παραπάνω καταναλώσεις τα λειτουργικά έξοδα για τον κινητήρα διπλού καυσίμου θα ήταν 2,5εκ. USD και για τον κινητήρα μονού καυσίμου 3,3εκ. USD. Άρα, για το δεύτερο σενάριο λειτουργίας και για κέρδος 0,8εκ. USD από τα λειτουργικά έξοδα η απόσβεση των 4,5εκ. USD από το παραπάνω κόστος αγοράς του κινητήρα διπλού καυσίμου έρχεται σε 5,6 χρόνια περίπου.

Τέλος, στην περίπτωση του τρίτου σεναρίου λειτουργίας και υποθέτοντας και σε αυτή την περίπτωση πως το πλοίο κατά το 40% που θα κινούταν εκτός ECA δεν θα έχει πρόσβαση σε τόσο οικονομικό LNG τότε θα καταναλώνει βαρύ πετρέλαιο και οι καταναλώσεις θα ήταν οι ακόλουθες, όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 5.34: Διάγραμμα αναπαράστασης κατανάλωσης καυσίμων για τους δύο κινητήρες σύμφωνα με το τρίτο σενάριο λειτουργίας.

Σύμφωνα με τις παραπάνω καταναλώσεις τα λειτουργικά έξοδα για τον κινητήρα διπλού καυσίμου θα ήταν 2,7εκ. USD και για τον κινητήρα μονού καυσίμου 3,3εκ. USD. Άρα, για το δεύτερο σενάριο λειτουργίας και για κέρδος 0,6εκ. USD από τα λειτουργικά έξοδα η απόσβεση των 4,5εκ. USD από το παραπάνω κόστος αγοράς του κινητήρα διπλού καυσίμου έρχεται σε 7,5 χρόνια περίπου.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω σενάρια γίνεται κατανοητό πως η αγορά ενός κινητήρα μεικτής καύσης αποσβένεται σε σύντομο χρονικό διάστημα καθώς τα λειτουργικά έξοδα είναι αρκετά μικρότερα. Επιπλέον, η δυνατότητα καύσης οικονομικού LNG ακόμα και εκτός περιοχών ECA είναι σχεδόν δεδομένη καθώς με την χρήση μεγάλων δεξαμενών δεν θα υπάρχει η ανάγκη καύσης άλλου καυσίμου. Επίσης, άσχετα με το υποθετικό σενάριο, πλέον στα περισσότερα λιμάνια μπορεί να γίνει ανεφοδιασμός με LNG ακόμα και αν δεν υπάρχει τερματικός σταθμός LNG στο λιμάνι αυτό.

Άρα, η επιλογή χρήσης κινητήρα μεικτής καύσης δεν εξαρτάται πλέον ιδιαίτερα από το κόστος αγοράς, καθώς η απόσβεση είναι πολύ σύντομη, αλλά εξαρτάται από το κόστος των εξαρτημάτων και των δεξαμενών αλλά και από χωροταξικά προβλήματα που μπορεί να προκύπτουν λόγω της ανάγκης ύπαρξης των δεξαμενών. Παρόλα αυτά, με την ταχύτατη πρόοδο της τεχνολογίας και με την μείωση του κόστους που υφίστανται αυτές οι τεχνολογίες είναι σίγουρο πως τα επόμενα χρόνια όλο και περισσότερα πλοία θα κατασκευάζονται με κινητήρες μεικτής καύσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η τεχνολογία της μεικτής καύσης και πιο συγκεκριμένα της καύσης του φυσικού αερίου σε συνδυασμό με το πετρέλαιο έχει να προσφέρει πολλά αλλά και να επεκτείνει την διάρκεια ζωής των τεχνολογιών των μηχανών εσωτερικής καύσης πριν την ολοκληρωτική επικράτηση του ηλεκτρισμού και των ηλεκτροκινητήρων.

Στην παρούσα εργασία παρατηρήσαμε ότι το φυσικό αέριο είναι ουσιαστικά το νέο πετρέλαιο μιας και αυτό το βρίσκουμε σε υπόγεια κοιτάσματα. Βέβαια, εκτός του ότι τα αποθέματα του είναι μεγαλύτερα, η καύση του είναι πολύ καθαρότερη από αυτή του πετρελαίου. Οι εκπεμπόμενοι ρύποι και γενικά τα καυσαέρια είναι πολύ λιγότερα με αποτέλεσμα, συγκρινόμενο με το πετρέλαιο, να αποκαλείται και ως πράσινο καύσιμο. Πέρα από τα περιβαλλοντολογικά οφέλη παρατηρήσαμε ότι το φυσικό αέριο προσφέρει και πολλά οικονομικά οφέλη καθώς είναι φθηνότερο ακόμα και από το βαρύ υπολειμματικό πετρέλαιο.

Πέρα όμως από αυτά τα πλεονεκτήματα υπάρχουν παράγοντες που καθιστούν την διάδοση του φυσικού αερίου σε απομακρυσμένες περιοχές αρκετά δύσκολη και αυτό ουσιαστικά είναι το μεγάλο μειονέκτημα στην χρήση του φυσικού αερίου. Καταρχήν, το φυσικό αέριο σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι ελαφρύτερο και από τον ατμοσφαιρικό αέρα, έχοντας σαν αποτέλεσμα πολύ μικρή ενεργειακή πυκνότητα. Για αυτό το λόγο συμπιέζεται σε δοχεία υψηλής πίεσης για την μεταφορά τους και για την χρήση σου ως καύσιμο στα οχήματα. Την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα όμως την αποκτά όταν υγροποιείται. Η διαδικασία της υγροποίησης είναι αρκετά ενεργοβόρα και απαιτείται ειδικές εγκαταστάσεις και ειδικές δεξαμενές αποθήκευσης. Άρα, σε σχέση με το πετρέλαιο το οποίο μεταφέρεται και αποθηκεύεται εύκολα, το φυσικό αέριο παρουσιάζει αυτό το μεγάλο μειονέκτημα. Όσον αφορά βέβαια τον οικιακό και βιομηχανικό τομέα, η μεταφορά του φυσικού αερίου γίνεται μέσω αγωγών κάτι το οποίο στην συγκεκριμένη είναι πλεονέκτημα καθώς η παροχή είναι συνεχόμενη.

Πριν οδηγηθούμε στην μεγάλη ανάπτυξη των τεχνολογιών της μεικτής καύσης δύο παράγοντας έπαιξαν καθοριστικό ρόλο. Αρχικά, ο οικονομικός παράγοντας υπήρξε ένα καθοριστικό κίνητρο για τις εταιρίες να αναπτύξουν συστήματα μεικτής καύσης καθώς το φυσικό αέριο όπως είπαμε είναι αρκετά φθηνότερο από το πετρέλαιο. Ο άλλος καθοριστικός και υποχρεωτικός παράγοντας ο οποίος οδήγησε στην ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών είναι τα αυστηρά όρια εκπομπής ρύπων που έχουν επιβληθεί τα τελευταία χρόνια.

Τόσο στην αυτοκίνηση όσο και στην ναυσιπλοΐα εφαρμόζονται εδώ και χρόνια αυστηροί περιορισμοί όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων. Αυτό έχει αναγκάσει τους ιδιοκτήτες οχημάτων και πλοίων αλλά και πολύ περισσότερο της εταιρίες κατασκευής κινητήρων να αναζητήσουν και να αναπτύξουν συστήματα τα οποία θα περιορίσουν αυτούς τους ρύπους. Αρχικά, αυτό γινόταν εφικτό με την ανάπτυξη συστημάτων αντιρύπανσης αλλά με τις όλο και αυστηρότερες προδιαγραφές ήταν αναγκαία μια πιο δραστική και οικονομική λύση. Αυτή η λύση ήταν οι κινητήρες μεικτής καύσης οι οποίοι παρουσιάζουν σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Σύμφωνα με την παραπάνω εργασία γίνεται άμεσα κατανοητό ότι οι κινητήρες μεικτής καύσης πετρελαίου – φυσικού αερίου προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Ειδικά στον τομέα της ναυτιλίας αυτά τα πλεονεκτήματα είναι ακόμα πιο σημαντικά. Ο λόγος που στους ναυτικούς κινητήρες η καύση φυσικού αερίου είναι ευεργετική είναι γιατί ακόμα κι σήμερα οι ναυτικοί κινητήρες καίνε επί το πλείστον βαρύ υπολειμματικό πετρέλαιο επιβαρύνοντας εξαιρετικά το περιβάλλον και επηρεάζοντας αρνητικά την υγεία των ανθρώπων. Με το φυσικό αέριο να είναι πιο οικονομικό δίνεται επιπλέον ένα κίνητρο στους ιδιοκτήτες πλοίων να επιλέξουν κινητήρες μεικτής καύσης για τους στόλους τους. Με την αντικατάσταση του υπολειμματικού πετρελαίου από τον φυσικό αέριο, οι εκπεμπόμενοι ρύποι μειώνονται δραστικά. Τα οξείδια του θείου και τα μικροσωματίδια σχεδόν εξαλείφονται και τα οξείδια του αζώτου μπορούν να μειωθούν μέχρι και 85% χωρίς να απαιτείται κάποιο επιπλέον σύστημα αντιρύπανσης. Μείωση επιτυγχάνεται και στα εκπεμπόμενα αέρια του θερμοκηπίου κάτι το οποίο είναι και αυτό σημαντικό για τον πλανήτη μας καθώς τα φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι παγκόσμιο και επιβάλετε να ληφθούν μέτρα προστασίας του.

Τέλος, στην παρούσα εργασία έγινε μια αναφορά και στα οικονομικά οφέλη που προσφέρουν οι κινητήρες μεικτής καύσης. Το όφελος στα λειτουργικά έξοδα είναι σημαντικό και με την πάροδο 5-10 χρόνων επιτυγχάνεται η απόσβεση του αρχικού επιπλέον κόστους αγοράς κινητήρα μεικτής καύσης. Σαν συνέχεια της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μια αναλυτική οικονομοτεχνική μελέτη όσον αφορά τους ναυτικούς κινητήρες μονού και διπλού καυσίμου. Την σύγκριση κινητήρων μονού και διπλού καυσίμου για διάφορους τύπους πλοίων και μια τελικά επιλογή της πιο συμφέρουσας λύσης με βάση της υπάρχουσες διαθέσιμες λύσης. Ακόμα, εφικτή θα ήταν και η ανάπτυξη και δημιουργία κάποιου υπολογιστικού φύλλου δεδομένων το οποίο θα περιελάμβανε τα δεδομένα από πλήθος κινητήρων μονού και διπλού καυσίμου και ανάλογα με τα ζητούμε και τα σενάρια χρήσης να μας παρουσίαζε κάποια αποτελέσματα τα οποία θα βοηθούσαν στην τελική επιλογή κάποιου από τους διαθέσιμου κινητήρες.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αρχές Μηχανών Εσωτερικής Καύσης, Μέρος Β' Πραγματικός Κύκλος Λειτουργίας, Ευάγγελος Γ. Γιακουμής, Ανάπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 2016
2. Ρύπανση και Συστήματα Αντιρύπανσης Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ., Ευάγγελος Γ. Γιακουμής, Ανάπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 2015
3. Διερεύνηση της Επίδρασης της Διακύμανσης της Ταχύτητας Περιστροφής στη Διάρκεια του Κύκλου στην Εκτίμηση της Ισχύος Κινητήρων Ντήζελ, Διπλωματική εργασία, Μάριος Ι. Βλαϊκίδης Αθήνα 2014
4. Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, Πτυχιακής Εργασία, Σουλτισιώτης Νικόλαος, Θεσσαλονίκη 2011
5. Χρήση Κινητήρων Diesel για Παραγωγή Ενέργειας στην Ελλάδα, Πτυχιακή Εργασία, Γαλανοπούλου Αγγελική, Ηράκλειο 2011
6. Τεχνολογία Φυσικού Αερίου, Δημήτρης Γ. Παπανίκας Καθηγητής Πολυτεχνικής Σχολής Πανεπιστημίου Πατρών, Αθήνα 2007
7. Τεχνολογία Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου, Δ. Καρώνης, Ε. Λόης, Φ. Ζαννίκος, Σημειώσεις Μαθήματος Ε.Μ.Π.
8. Μελέτη της Συμπεριφοράς Κινητήρων Ντήζελ με Χρήση Υγρών και Αέριων Καυσίμων, Διδακτορική Εργασία, Παπαγιαννάκης Γ. Ρούσσοι, Αθήνα 2002
9. Το Διεθνές Εμπόριο του Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου, Διδακτορική Εργασία, Χριστίνα Καραμπέτσου-Αγρογιάννη, Πειραιάς 2003
10. Εισαγωγή και Διανομή Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα, Μεταπτυχιακή Εργασία, Φώσκολος Ματθαίος, Αθήνα 2015
11. Ανάπτυξη και Αξιοποίηση Φυσικού Αερίου στην Ελλάδα, Διπλωματική Εργασία, Αρετή Παπαδοπούλου, Χάνια 2006
12. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions, T. Korakianitis, A.M. Namasivayam, R.J.Crookes, 8 June 2010
13. Natural gas as marine fuel, Heather Thomson, James J. Corbett, James J. Winebrake 19 September 2015

14. Pilot-ignited Natural gas combustion in Diesel Engines, Peter Mtui, The University of British Columbia, October 1996
15. Dual fuel engine combustion and emissions- An experimental investigation coupled with computer simulation, Wan Nurdiyana Wan Mansor, Colorado State University, Fall 2014
16. Liquefied Natural Gas (LNG) as a Marine Fuel and Impact on Energy Efficiency Design Index (EEDI), Athanasopoulos Christos, NTUA 2016
17. Προδιαγραφές Καυσαερίων και Κύκλοι Δοκιμής Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ., Ευαγγ. Γ. Γιακουμής, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π., Αθήνα 2015
18. Ναυτιλία και Περιβάλλον, Άννα Μαρία Κοτρίκλα, Επίκουρη Καθηγήτρια Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 2015
19. Delphi, Worldwide Emissions Standards, Passenger Car and Light Duty Vehicles, Brochure, 2017-2018
20. Delphi, Worldwide Emissions Standards, Heavy Duty and Off-Highway Vehicles, Brochure, 2016-2017
21. Propulsion and Auxiliary Systems for Gas Fueled Ships – Guide from ABS, Updated January 2017
22. LNG Bunkering – Guide from ABS, January 2017
23. LNG Shipping Solutions – Wärtsilä brochure, Copyright 2017
24. Dual-Fuel Engines – Wärtsilä brochure, Copyright 2015
25. Wärtsilä Low Speed Dual-Fuel Solution – Wärtsilä brochure, Copyright 2015
26. World LNG Report 2017 – IGU, sponsored by Chevron
27. LNG Engines Specifications and Economics – Wärtsilä presentation, Mattias Hagedorn, 2014
28. Enabling the Safe Storage of Gas Onboard Ships with the Wärtsilä LNGPac – Marine / in detail, Sören Karlsson and Leonardo Sonzio



29. Comparison of Properties of Marine Diesel Engines Run on Two Kinds of Fuel Using Performance Indicators – Scientific Journals, Maritime University of Szczecin, Andrzej Adamkiewicz, Przemysław Deska, 2011
30. Dual-Fuel ME-GI Engine Performance and the Economy – MAN presentation, Rene Sejer Laursen, 2012
31. MAN B&W ME-GI Engines, Recent Research and Results - Lars R. Juliussen, Michael J. Kryger and Anders Andreasen, 2011
32. ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fueled by Gas – MAN Diesel & Turbo brochure, 2014
33. Gas 2-stroke Marine Engine Design and Operation - GREEK CIMAC ASSOCIATION SEMINAR, 2015
34. LNG Fuel Tanks, Benefits and Challenges – DNV, 2013
35. <http://2epal-am.weebly.com/thetaepsilonrhoiotaakappaepsilonsigma-kappaiotanuetaetaetarhoiotaepsilonsigma-muetachialphanuepsilonsigma.html>
36. <http://mechanicstips.blogspot.gr/2016/01/engine-types.html>
37. <http://www.enginebuildermag.com/2015/10/what-is-selective-catalytic-reduction/>
38. [https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine)
39. [https://www.dieselnets.com/tech/engine\\_egr\\_sys.php](https://www.dieselnets.com/tech/engine_egr_sys.php)
40. [https://el.wikipedia.org/wiki/Φυσικό\\_αέριο](https://el.wikipedia.org/wiki/Φυσικό_αέριο)
41. <https://www.aerioattikis.gr/>
42. [http://www.marinediesels.info/2\\_stroke\\_engine\\_parts/Other\\_info/dual\\_fuel.htm](http://www.marinediesels.info/2_stroke_engine_parts/Other_info/dual_fuel.htm)
43. <http://www.fuelspace.org/blog/2014/10/20/cng-vs-lng-for-heavy-duty-trucks>
44. <http://www.marineinsight.com/shipping-news/caterpillar-completes-industrys-first-dual-fuel-engine-retrofit/>

45. [https://www.yanmar.com/global/technology/technical\\_review/2015/0727\\_2.html](https://www.yanmar.com/global/technology/technical_review/2015/0727_2.html)
46. <https://www.dnvgl.com/maritime/Ing/current-price-development-oil-and-gas.html>
47. [http://publications.europa.eu/el/index\\_en.htm](http://publications.europa.eu/el/index_en.htm)
48. [http://www.europedia.moussis.eu/books/Book\\_2/5/16/03/04/index.tkl?term=&s=1&e=10&pos=219&all=1](http://www.europedia.moussis.eu/books/Book_2/5/16/03/04/index.tkl?term=&s=1&e=10&pos=219&all=1)
49. [https://en.wikipedia.org/wiki/European\\_emission\\_standards](https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards)
50. <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>
51. [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars\\_en#tab-0-2](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en#tab-0-2)
52. [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy\\_el](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_el)
53. <http://www.acea.be/industry-topics/tag/category/real-driving-emissions-test>
54. <https://www.k-lagan.com/euro-6-and-adblue-what-do-they-mean-for-us/>
55. <http://www.e-nautilia.gr/>
56. <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Greenhouse-Gas-Studies-2014.aspx>
57. <https://www.dieselnet.com/standards/inter/imo.php>
58. <http://meproduction.dk/emission-standarts/emission-control-areas/>
59. <https://www.marinelink.com/news/>
60. <http://www.marine.man.eu/two-stroke/ceas>
61. <https://www.wingd.com/en/>
62. <https://www.wartsila.com/>
63. <http://www.motorship.com/news101/Ing/dual-fuel-two-stroke-technology-advances>