



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΕΩΣ

Διπλωματική Εργασία:

**"Τεχνικές Περιστολής Εκπομπών Αερίων Ρύπων
Ναυτικών Κινητήρων και Οικονομική Αξιολόγηση
αυτών"**

Ερμίδου Μαρία Αλεξία

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δρ. Δ. Θ. Χουντάλας

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2011



Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την εποπτεία του Καθηγητή κ. Δημητρίου Χουντάλα, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις που μου παρείχε.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ- Σκοπός διπλωματικής εργασίας.....	5
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ Μ.Ε.Κ.....</u>	6
1.1 Εισαγωγή στις εμβολοφόρους Μ.Ε.Κ.....	6
1.2 Ιστορική αναδρομή στις Μ.Ε.Κ.....	7
1.3 Δίχρονοι κινητήρες DIESEL.....	9
1.3.1 Δίχρονοι Κινητήρες Diesel στην Ναυτιλία.....	13
1.3.2 Δίχρονοι Κινητήρες Diesel στην Ηλεκτροπαραγωγή.....	17
1.4 Καύσιμα DIESEL.....	20
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΙΟΝΤΑ ΚΑΥΣΗΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....</u>	25
2.1 Μηχανισμός σχηματισμού οξειδίων του αζώτου (NO_x).....	29
2.2 Μηχανισμός σχηματισμού σωματιδίων του καπνού (PM).....	37
2.3 Μηχανισμός σχηματισμού οξειδίων του θείου (SO_x).....	41
2.4 Μηχανισμός σχηματισμού μονοξειδίου (CO)και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).....	41
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΟΡΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ.....</u>	45
3.1 Όρια για τις εκπομπές NO_x και SO_x.....	46
3.1.1 MARPOL Annex VI.....	46
3.1.2 EPA.....	52
3.1.3 Διαφορές μεταξύ E.P.A. και MARPOL Annex VI.....	54
3.1.4 Ο νόμος "Maritime Pollution Prevention Act" του 2008.....	56
3.1.5 Συμπεράσματα.....	56
3.2 Όρια για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases- GHGs)	57
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ DIESEL-ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ SO_x.....</u>	58
4.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ SO_x.....	59
4.1.1 Μείωση της συγκέντρωσης θείου (S) στα καύσιμα.....	59
4.1.2 Απόπλυση καυσαερίων με νερό - EGS (Exhaust Gas Scrubber).....	63
4.1.3 Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών μείωσης των οξειδίων του θείου.....	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x.....76

5.1 Μείωση των παραγόμενων NO_x – Πρωτεύουσες Τεχνικές	76
5.1.1 Εσωτερικές τροποποιήσεις του κινητήρα	77
5.1.1.1 Εγχυτήρες "Slide valves" και βελτιστοποίηση του ακροφυσίου έγχυσης καυσίμου	77
5.1.1.2 Ελεγχόμενη έγχυση του καυσίμου	81
5.1.1.3 Μεταβολή του βαθμού συμπίεσης	87
5.1.1.4 Ψύξη του αέρα σάρωσης και κύκλος Miller.....	88
5.1.1.5 Κόστος εσωτερικών τροποποιήσεων του κινητήρα.....	89
5.1.2 Ανακυκλοφορία των καυσαερίων (EGR)	91
5.1.3 Εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης	97
5.1.3.1 Χρήση γαλακτώματος νερού – καυσίμου.....	97
5.1.3.2 Απευθείας έγχυση νερού (Direct Water Injection – DWI).....	100
5.1.3.3 Ύγρανση του αέρα καύσης (HAM).....	103
5.1.3.4 CASS - Combustion Air Saturation System.....	108
5.2 Μείωση των ήδη παραγμένων εκπομπών NO_x – Δευτερεύουσες Τεχνικές	110
5.2.1 Σύστημα επιλεκτικής Καταλυτικής μείωσης (S.C.R.)	110
5.2.2 Non-thermal Plasma Catalytic Reduction (PACR)	116
5.3 Συγκριτική Αξιολόγηση των τεχνικών μείωσης των εκπομπών NO_x	118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6.1 Τεχνικές μείωσης των σωματιδίων καπνού (PM)	121
6.2 Τεχνικές μείωσης των υδρογονανθράκων (HC), του μονοξειδίου (CO) και του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)	123
6.2.1 Παρουσίαση των τεχνικών μείωσης των εκπομπών HC,CO και CO₂	123
6.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών μείωσης των εκπομπών CO₂	132

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7. Συμπεράσματα	134
------------------------------	-----

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	137
----------------------------------	-----

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση των τεχνικών περιστολής των εκπομπών ρύπων στους ναυτικούς κινητήρες και η συγκριτική τους αξιολόγηση βάσει της αποτελεσματικότητας τους στην μείωση των ρύπων και του κόστους επένδυσης, εγκατάστασης και λειτουργίας τους. Πιο συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία πρώτη γνωριμία με τις μηχανές εσωτερικής καύσεως, την ιστορία τους, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και τις εφαρμογές τους, δίνοντας περισσότερη έμφαση στους δίχρονους κινητήρες Diesel χαμηλών και μεσαίων στροφών καθώς αυτοί αποτελούν σήμερα την πλειονότητα των ναυτικών κινητήρων στο θαλάσσιο εμπόριο και τις μεταφορές. Επιπλέον, περιγράφεται συνοπτικά ο ρόλος των μηχανών αυτών στην ναυτιλία και στην ηλεκτροπαραγωγή λόγω των αυξημένων πλεονεκτημάτων τους.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι συνήθεις ρύποι των μηχανών Diesel, τα χαρακτηριστικά τους και οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Επιπλέον αναλύεται ο μηχανισμός σχηματισμού των ρύπων αυτών και περιγράφεται η σχέση εξάρτησης των μηχανισμών αυτών από τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής.

Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει τα υπάρχοντα όρια για τις εκπομπές ρύπων από ναυτικούς κινητήρες καθώς και την μελλοντική τους εξέλιξη, όπως αυτά έχουν θεσπιστεί από τον ευρωπαϊκό οργανισμό IMO (International Maritime Organization) και την αμερικανική υπηρεσία EPA (Environmental Protection Agency). Τα όρια αυτά αφορούν τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) και οξειδίων του θείου (SO_x) καθώς νομοθετημένα όρια για τους υπόλοιπους ρύπους των ναυτικών κινητήρων δεν έχουν θεσπιστεί έως σήμερα.

Το Κεφάλαιο 4 αναλύει τις υπάρχουσες τεχνικές περιστολής, πρωτεύουσες και δευτερεύουσες, για τα οξείδια του θείου δηλαδή την τεχνική χρήσης καυσίμων με μικρό ποσοστό θείου και την εναλλαγή τους με τα κοινά καύσιμα όταν αυτό καθίσταται απαραίτητο καθώς επίσης και την τεχνική απόπλυσης καυσαερίων με νερό (EGR). Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναλυτική παρουσίαση του μηχανισμού δράσης και του εξοπλισμού της τεχνικής EGR και παρουσιάζεται το κόστους επένδυσης, εγκατάστασης και λειτουργίας της. Τέλος γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των δύο αυτών τεχνικών αυτών με βάση το κόστος τους και την αποδοτικότητα τους στην καταπολέμηση των ρύπων.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι τεχνικές περιστολής των εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Οι τεχνικές που αναλύονται είναι η μείωση των εκπομπών μέσω εσωτερικών τροποποιήσεων του κινητήρα, ανακυκλοφορία των καυσαερίων, εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης καθώς και του συστήματος επιλεκτικής, καταλυτικής μείωσης SCR. Για κάθε επιμέρους τεχνική παρουσιάζεται ο μηχανισμός δράσης, ο απαραίτητος εξοπλισμός καθώς και το κόστος επένδυσης, εγκατάστασης και λειτουργίας. Στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών αυτών ως προς την αποδοτικότητα τους στην μείωση των οξειδίων του αζώτου και το κόστος τους.

Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι τεχνικές μείωσης των σωματιδίων καπνού (PM), των υδρογονανθράκων, του μονοξειδίου και του διοξειδίου του άνθρακα. Για τις τεχνικές μείωσης του διοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζεται ο μηχανισμός δράσης τους, το κόστος αποδοτικότητας τους, η μέγιστη δυνατότητα μείωσης των εκπομπών και το οριακό κόστος τους.

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΟΥΣ Μ.Ε.Κ.

Η μηχανή εσωτερικής καύσης ανήκει στην κατηγορία των θερμικών μηχανών δηλαδή των μηχανών που παράγουν μηχανικό έργο εκμεταλλευόμενες την θερμική ενέργεια που εκλύεται κατά την καύση, λόγω της χημικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στα καύσιμα. Οι θερμικές μηχανές διακρίνονται σε εσωτερικής και εξωτερικής καύσης. Η ιδιαιτερότητα των μηχανών εσωτερικής καύσης έγκειται στο γεγονός ότι χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο για την παραγωγή της μηχανικής ενέργειας τα ίδια τα προϊόντα της καύσης του καύσιμου μείγματος δηλαδή τα παραγόμενα καυσαέρια. Στις μηχανές εξωτερικής καύσης αντίθετα, τα καυσαέρια μεταφέρουν την θερμότητα σε διαφορετικό εργαζόμενο μέσο μέσω μιας επιφάνειας συναλλαγής. Στην κατηγορία των Μ.Ε.Κ. (Μηχανές Εσωτερικής Καύσης) ανήκουν οι εμβολοφόροι κινητήρες, οι αεριοστρόβιλοι, οι στροβιλοαντιδραστήρες, οι στατοί θερμοαντιδραστήρες και οι πυραυλοκινητήρες.

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες Μ.Ε.Κ. είναι οι εμβολοφόροι κινητήρες, οι οποίοι λόγω της απλής σχετικά κατασκευής τους, του ικανοποιητικού βαθμού απόδοσης τους και της υψηλής συγκέντρωσης ισχύος τους προτιμούνται στις μεταφορές, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στην βιομηχανία. Η βασική διάταξη των εμβολοφόρων κινητήρων αποτελείται από έναν αριθμό κυλίνδρων ειδικά διατεταγμένων ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά και την χρήση για την οποία προορίζεται ο κινητήρας. Μέσα στον κάθε κύλινδρο παλινδρομεί ένα έμβολο το οποίο μεταφέρει την ισχύ από την καύση του καυσίμου μείγματος στην στροφαλοφόρο άτρακτο δια μέσου του διωστήρα.

Οι εμβολοφόροι κινητήρες διακρίνονται ως προς τον κύκλο λειτουργίας τους σε τετράχρονους και δίχρονους και ως προς την εσωτερική λειτουργία τους σε κινητήρες Otto και Diesel .

Στους τετράχρονους κινητήρες ένας κύκλος λειτουργίας διαρκεί δύο πλήρεις περιστροφές της στροφαλοφόρου ατράκτου δηλαδή περιλαμβάνει τέσσερις διαδρομές του εμβόλου. Κατά την πρώτη και τέταρτη διαδρομή λαμβάνει χώρα η εναλλαγή των αερίων δηλαδή η εισαγωγή αέρα στον κύλινδρο και η εξαγωγή των καυσαερίων. Κατά την δεύτερη γίνεται η συμπίεση και η καύση και κατά την τρίτη διαδρομή η εκτόνωση. Στους δίχρονους κινητήρες ο θερμοδυναμικός κύκλος ολοκληρώνεται σε μία μόνο περιστροφή της στροφαλοφόρου δηλαδή περιλαμβάνει δύο πλήρεις διαδρομές του εμβόλου. Η πλήρωση και η εκκένωση του κυλίνδρου γίνονται ταυτόχρονα με την βοήθεια ειδικής αντλίας.

Η διάκριση σε κινητήρες Otto και Diesel βασίζεται κυρίως στον τρόπο ανάφλεξης του καυσίμου μείγματος. Στους κινητήρες Otto το μείγμα αέρα-καυσίμου εισάγεται στον κύλινδρο μέσω συστήματος έγχυσης, συμπιέζεται και στη συνέχεια αναφλέγεται με τη βοήθεια κάποιου εξωτερικού μέσου, συνήθως ηλεκτρικού σπινθήρα. Στους κινητήρες Diesel το καύσιμο εισάγεται στον κύλινδρο όταν ο αέρας είναι ήδη συμπιεσμένος και σε υψηλή θερμοκρασία

οπότε μετά την εισαγωγή του προκαλείται αυτανάφλεξη χωρίς την βοήθεια κάποιου μηχανικού μέσου.

Σημαντικές λειτουργίες για τις Μ.Ε.Κ. που συνεισφέρουν στην εύρυθμη και οικονομική λειτουργία τους, είναι η ψύξη και λίπανση τους. Η ψύξη μπορεί να γίνει με αέρα ή συνηθέστερα με νερό αν και η ψύξη με νερό αυξάνει το βάρος του κινητήρα. Παρόλο που στις Μ.Ε.Κ. οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι στιγμιαίες, η ψύξη επιτρέπει στα μέταλλα του κινητήρα να διατηρούν θερμοκρασία μικρότερη από αυτή των αερίων. Η λίπανση του κινητήρα συνεισφέρει επίσης στον ίδιο σκοπό μειώνοντας τις τριβές που αναπτύσσονται στον κινητήρα. Αυτές οι δύο βασικές λειτουργίες επιτρέπουν την χρησιμοποίηση στην κατασκευή του κινητήρα οικονομικότερων μετάλλων χωρίς να κινδυνεύουν να αστοχήσουν.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ Μ.Ε.Κ

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης, με τα σημερινά χαρακτηριστικά τους, εμφανίστηκαν ουσιαστικά τον 19^ο αιώνα με την έναρξη της εξόρυξης και παραγωγής πετρελαίου για εμπορικούς σκοπούς. Παρόλα αυτά, οι πρώτες αναφορές μηχανών εσωτερικής καύσης χρονολογούνται από τον 12^ο και 13^ο αιώνα όταν και πρωτοεμφανίστηκε η ιδέα ενός κινηματικού μηχανισμού εμβόλου-διωστήρα-στροφάλου. Οι πρώτοι αυτοί μηχανισμοί χρησιμοποιήθηκαν σε αντλίες νερού και οπτικά συστήματα από Κινέζους, Μογγόλους και Άραβες.

Τον 16^ο αιώνα ο Leonardo da Vinci περιγράφει ήδη στα σχέδια του μία υποτυπώδη μηχανή εσωτερικής καύσης ενώ τον 17^ο αιώνα, αναπτύσσοντας περαιτέρω την αρχική σύλληψη του Jean de Hautefeuille, ο Δανός φυσικός και μηχανικός Christian Huygen, χρησιμοποιώντας ως καύσιμο την πυρίτιδα, κατασκευάζει ουσιαστικά την πρώτη στοιχειώδη εμβολοφόρο μηχανή εσωτερικής καύσης. Η μηχανή αυτή που κατασκευάστηκε για την τροφοδοσία με νερό των βασιλικών κήπων των Βερσαλλιών, παρήγαγε μηχανικό έργο λόγω της πίεσης που ασκούσε η ατμόσφαιρα στο έμβολο κατά την φάση ψύξης των προϊόντων της καύσης. Η ιδέα της παραγωγής μηχανικού έργου από την εκτόνωση των προϊόντων της καύσης εμφανίστηκε αρκετά αργότερα. Εν τω μεταξύ, το 1794 ο Robert Street κατασκευάζει μία μηχανή χωρίς συμπίεση της οποίας οι αρχές λειτουργίας θα κυριαρχήσουν για σχεδόν έναν αιώνα. Το 1807 ο Ελβετός μηχανικός Francois Isaac de Rivar, θα κατασκευάσει μια μηχανή εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιεί ένα μείγμα υδρογόνου-οξυγόνου και αναφλέγεται με τη βοήθεια ηλεκτρικού σπινθήρα. Το 1823 ο Samuel Brown κατασκευάζει την πρώτη μηχανή εσωτερικής καύσης για βιομηχανική χρήση η οποία όμως είναι πολύ πιο πίσω από την εποχή της καθώς στηρίζεται στον κύκλο λειτουργίας που είχε προτείνει ο da Vinci (Leonardo circle).

Το 1824 ο Γάλλος φυσικός και μηχανικός Sadi Carnot παρουσιάζει την θερμοδυναμική θεωρία των ιδανικών θερμικών μηχανών, γνωστή ως κύκλος Carnot, αναδεικνύοντας την ανάγκη συμπίεσης του καύσιμου μείγματος πριν την ανάφλεξη ώστε να αυξάνεται η θερμοκρασιακή διαφορά των εργαζόμενων μέσων. Η μηχανή που κατασκεύασε ο Άγγλος William Barnett το 1838, είναι η πρώτη καταγεγραμμένη πρόταση για χρήση συμπίεσης μέσα στον κύλινδρο. Το 1860 ο Βέλγος Jean Joseph Etienne Lenoir κατάφερε να κατασκευάσει μία

μηχανή $\frac{1}{2}$ ίππου η οποία χρησιμοποιούσε υγραέριο και στην οποία η ανάφλεξη γινόταν με χρήση ηλεκτρικού σπινθήρα. Η μηχανή του Lenoir ήταν η πρώτη μηχανή εσωτερικής καύσης που παράχθηκε σε μεγάλες ποσότητες.

Το 1876, ο Γερμανός εφευρέτης Nikolaus Otto ήταν ο πρώτος που κατασκεύασε και διέθεσε στην αγορά τετράχρονους κινητήρες. Οι μηχανές αυτές ήταν εσωτερικής καύσης με συμπίεση, βασισμένες στον τετράχρονο κύκλο λειτουργίας που είχε προτείνει ο Beau de Rochas το 1862 και γνώρισαν μεγάλη επιτυχία στην, μέχρι τότε, μικρή αγορά χάρη στην καλό βαθμό απόδοσης τους. Ο βασικός κύκλος λειτουργίας των μηχανών αυτών χρησιμοποιείται και στη σημερινή εποχή. Το 1879, ο Karl Benz δημιούργησε μία αξιόπιστη δίχρονη μηχανή βασισμένη και αυτή στην ιδέα του De Rochas. Αργότερα σχεδίασε και κατασκεύασε τον δικό του τετράχρονο κινητήρα που χρησιμοποίησε στην συνέχεια στα αυτοκίνητα που κατασκεύασε το 1885 τα οποία και αποτέλεσαν τα πρώτα αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής.

Τον 19^ο αιώνα, η ανάπτυξη των μηχανών εσωτερικής καύσης περιοριζόταν από τις μηχανικές και θερμοκρασιακές αντοχές των υφιστάμενων μετάλλων, των υλικών κατασκευής και των λιπαντικών. Παρόλα αυτά, στις επόμενες δεκαετίες όπου η ενέργεια παρέμενε φθηνή και το πρόβλημα της μόλυνσης του περιβάλλοντος δεν ήταν ακόμα ορατό και επομένως δεν υπήρχαν περιορισμοί στις εκπομπές των μηχανών, η εξέλιξη των μηχανών εσωτερικής καύσης ήταν ραγδαία και οδήγησε σταδιακά στην χρήση πλουσιότερων μειγμάτων με αναλογίες μεγαλύτερες από την στοιχειομετρική τιμή. Το φαινόμενο της κρουστικής καύσης, δηλαδή η ακαριαία καύση εκρηκτικής μορφής του καύσιμου μείγματος που συνοδεύεται από βίαια κύματα κρούσεως με καταστροφικές συνέπειες για τον κινητήρα, ήταν ένα σοβαρό πρόβλημα της εποχής που αντιμετωπίστηκε το 1923 με την προσθήκη στα καύσιμα τετρααιθυλιούχου μολύβδου.

Το 1893 ο Γερμανός Rudolf Diesel σχεδίασε μια τετράχρονη μηχανή εσωτερικής καύσης βασισμένη στον θερμικό κύκλο του Carnot στην οποία γινόταν αυτόματη ανάφλεξη του καύσιμου μείγματος. Στην πρώτη αυτή μηχανή που κατασκεύασε χρησιμοποίησε μέσα στον κύλινδρο αμμωνία ώστε να αποφύγει την πρόωρη ανάφλεξη. Το 1898 η πρώτη μηχανή εσωτερικής καύσης που παράχθηκε μαζικά χρησιμοποιούσε ως καύσιμο την κηροζίνη και απέδιδε 20 ίππους. Το 1902 η εταιρία M.A.N. κατασκεύασε έναν κινητήρα δύο κυλίνδρων και 250 ίππων ενώ η εταιρία Sulzers Co. κατασκεύασε, 4 χρόνια αργότερα, έναν κινητήρα τριών κυλίνδρων και 300 ίππων. Το 1910, γερμανικές και βρετανικές εταιρίες κατασκεύασαν υποβρύχια κινούμενα με μηχανές Diesel και το 1920 οι μηχανές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά και σε επιβατηγά πλοία. Τα προβλήματα που εμφάνιζαν οι τετράχρονοι κινητήρες εκείνης της περιόδου στις βαλβίδες εξαγωγής αερίων λόγω του λιθάνθρακα οδήγησαν την εταιρία Sulzers να κατασκευάσει δίχρονους κινητήρες Diesel. Έτσι, ήδη πριν τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο χρησιμοποιούνταν μηχανές 2000 ίππων ανά κύλινδρο και από το 1939 ο μισός παγκόσμιος στόλος χρησιμοποιούσε μηχανές Diesel. Κινητήρες Diesel υψηλών στροφών για εμπορικούς και βιομηχανικούς σκοπούς αναπτύχθηκαν αργότερα λόγω των αυξημένων απαιτήσεων για ισχυρά κατασκευαστικά υλικά.

Η σταδιακή βελτίωση των καυσίμων, των λιπαντικών και των υλικών επέτρεψε την περαιτέρω αύξηση του λόγου αέρα-καυσίμου από το 3,6:1 σε 8,1:1 στις μηχανές εσωτερικής καύσης του 1960. Η αύξηση του λόγου μπορεί να είχε φθάσει ακόμα και το 12:1 αλλά περιορίστηκε από τους κανονισμούς που θεσπίστηκαν για την μείωση των εκπομπών καυσαερίων ειδικά του μονοξειδίου του αζώτου (NO). Τότε εμφανίστηκαν και οι πρώτοι

καταλύτες με σκοπό την μείωση του εκπεμπόμενου μονοξειδίου του αζώτου, μονοξειδίου του άνθρακα και των άκαυστων υδρογονανθράκων. Οι καταλύτες καταστρέφονταν από τον μόλυβδο στα καύσιμα γεγονός που οδήγησε στην οριστική απομάκρυνσή του το 1996 με αποτέλεσμα την περεταίρω μείωση του λόγου αέρα- καυσίμου.

Η εξέλιξη των μηχανών εσωτερικής καύσης συνεχίζεται ραγδαία μέχρι σήμερα παρουσιάζοντας συνεχώς νέους κινητήρες με βελτιωμένα χαρακτηριστικά και επιδόσεις. Οι Μ.Ε.Κ. έχουν πλέον κατακλίσει την ανθρώπινη καθημερινότητα βρίσκοντας εφαρμογές στην βιομηχανία, στις μεταφορές και στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εκτοπίζοντας σταδιακά, χάρη στα αυξημένα πλεονεκτήματά τους, τους άλλους τύπους μηχανών. Σήμερα, γνωρίζοντας τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από τις μηχανές εσωτερικής καύσης και όντας υποχρεωμένες να συμμορφώνονται με τα διεθνή όρια εκπομπών, οι κατασκευάστριες εταιρίες επικεντρώνονται στην σχεδίαση και ανάπτυξη μηχανών εσωτερικών καύσης με μειωμένες εκπομπές ρύπων και μικρή κατανάλωση καυσίμου, ικανές να χρησιμοποιούν καύσιμα φιλικότερα προς το περιβάλλον.

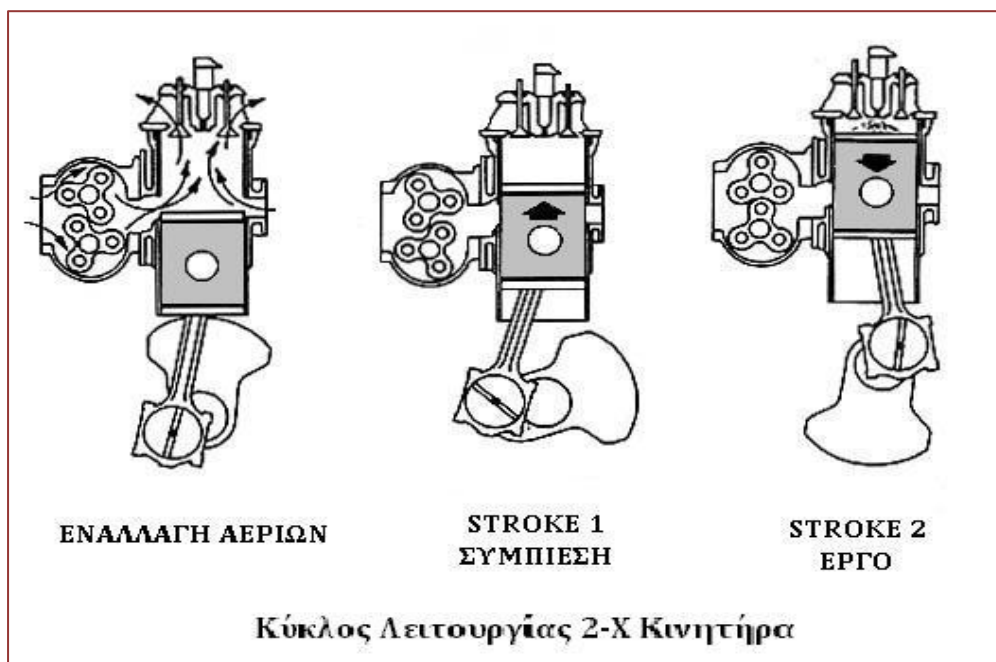
1.3 ΔΙΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ DIESEL

Οι κινητήρες Diesel σε αντίθεση με τους κινητήρες Otto μπορούν να χρησιμοποιήσουν μία μεγάλη ποικιλία καυσίμων. Λόγω του συστήματος μηχανικής έγχυσης του καυσίμου στους κινητήρες αυτούς και καθώς δεν υπάρχει ο κίνδυνος πρόωρης αυτανάφλεξης όπως στους κινητήρες Otto, μπορούν να χρησιμοποιηθούν καύσιμα λιγότερο πτητικά και φτωχής ποιότητας που είναι όμως πιο οικονομικά και πιο ασφαλή στην αποθήκευση τους όπως τα βαρύτερα της βενζίνης υγρά καύσιμα της κατηγορίας των πετρελαίων δηλαδή το μαζούτ (βαρύ πετρέλαιο), το αεριέλαιο (καύσιμο Diesel), το βαρύ καύσιμο λεβήτων και το Biodiesel.

Ανάλογα με τον αριθμό των στροφών που μπορούν να αναπτύξουν, οι μηχανές Diesel διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Οι κινητήρες μικρής ταχύτητας μπορούν να αποδώσουν μέχρι 300 rpm, είναι συνήθως μεγάλες σε διαστάσεις μηχανές που χρησιμοποιούνται σε μεγάλα φορτηγά και επιβατηγά πλοία. Οι κινητήρες μεσαίας ταχύτητας λειτουργούν μεταξύ 300 και 900 rpm και τους συναντάμε σε μικρότερα πλοία και ηλεκτρικές γεννήτριες. Τέλος οι κινητήρες μεγάλης ταχύτητας επιτυγχάνουν ταχύτητες μεγαλύτερες από 900 rpm και είναι οι πλέον συνηθισμένοι καθώς χρησιμοποιούνται σε φορτηγά, λεωφορεία και άλλα είδη οχημάτων.

Το κυρίως τμήμα των δίχρονων κινητήρων Diesel αποτελείται από έναν αριθμό κυλίνδρων με θυρίδες εισαγωγής σε απόσταση 2/3 από το ανώτερο σημείο του κυλίνδρου και βαλβίδες εξαγωγής στην κορυφή. Το έμβολο μέσα στο κύλινδρο συνδέεται με την στροφαλοφόρο άτρακτο μέσω του διωστήρα. Στις μεγαλύτερες μηχανές, λόγω των μεγάλων δυνάμεων που αναπτύσσονται και μπορούν να φθείρουν τον κύλινδρο και το έμβολο, ο διωστήρας συνδέεται με την στροφαλοφόρο με τη βοήθεια ενός βάρου μετάδοσης κίνησης το οποίο δέχεται τις δυνάμεις προστατεύοντας το έμβολο. Όπως γίνεται φανερό από την μορφολογία του κυλίνδρου στους δίχρονους κινητήρες, η φυσική αναπνοή του κινητήρα διεξάγεται υπό δυσμενείς συνθήκες που καθιστούν απαραίτητη τη βίαιη πλήρωση του κυλίνδρου με αέρα με την βοήθεια ειδικής αντλίας αποπλύσεως. Για την αύξηση της ισχύος

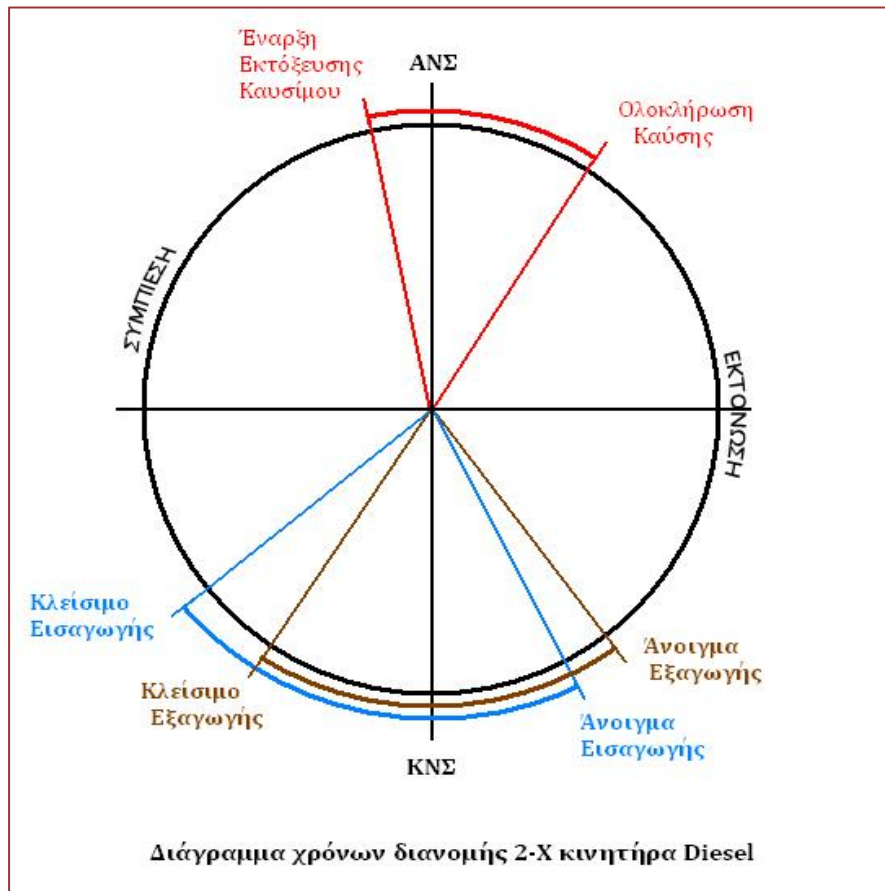
του κινητήρα η φυσική αναπνοή αντικαθίσταται τις περισσότερες φορές με εξαναγκασμένη πλήρωση του κυλίνδρου με αέρα υπό πίεση, λειτουργία που ονομάζεται υπερπλήρωση. Η υπερπλήρωση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός συμπιεστή υπερπλήρωσης που κινείται από την στροφαλοφόρο άτρακτο ή συνθηθέστερα σήμερα, μέσω ενός ζεύγους στροβίλου-συμπιεστή. Ο στρόβιλος παράγει ισχύ χρησιμοποιώντας τα υψηλά θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των καυσαερίων και κινεί τον συμπιεστή. Η λειτουργία της υπερπλήρωσης βοηθά στην αύξηση της ισχύος του κινητήρα καθώς επιτρέπει την καλύτερη αναπνοή του και την καύση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου (λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας αέρα στον κύλινδρο) επιβάλλει όμως στιβαρότερη κατασκευή του κινητήρα λόγω των υψηλότερων πιέσεων που εμφανίζονται. Η υπερπλήρωση χρησιμοποιείται ευρύτερα στους κινητήρες Diesel μεσαίων και μεγάλων διαστάσεων ενώ στους κινητήρες Otto την συναντάμε σε πολύ μικρή κλίμακα.



Σχήμα 1.1 Κύκλος λειτουργίας δίχρονου κινητήρα

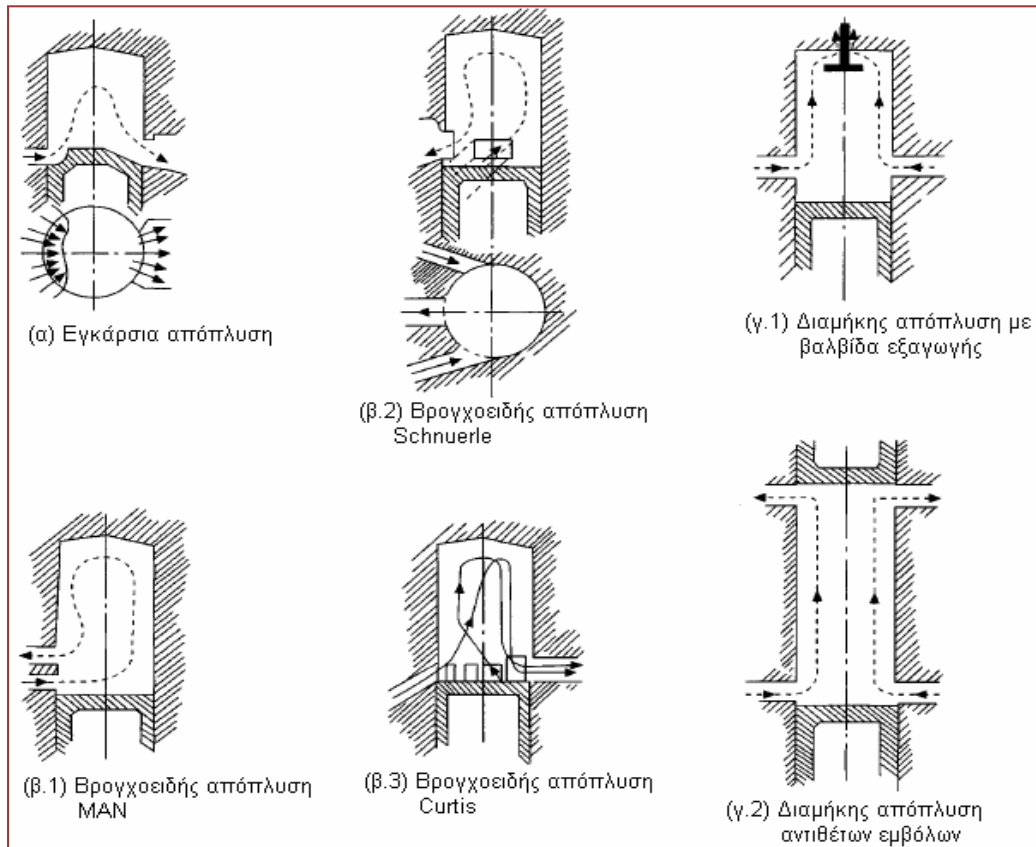
Ο κύκλος λειτουργίας στον δίχρονο κινητήρα Diesel είναι πιο σύντομος από αυτόν του τετράχρονου και επιτρέπει μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος. Αρχίζει με το έμβολο στο κάτω νεκρό σημείο του κυλίνδρου. Το έμβολο καθώς κινείται προς τα πάνω, αφού έχει καλύψει τις θυρίδες εισαγωγής, συμπιέζει τον αέρα (περίπου στα 42bar) ο οποίος σταδιακά θερμαίνεται. Ελάχιστα πριν το άνω νεκρό σημείο του κυλίνδρου (περίπου 10°) αρχίζει η ανάφλεξη του καυσίμου λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που δημιούργησε η συμπίεση του αέρα, και διαρκεί περίπου 30° ανάλογα με το φορτίο. Η καύση ολοκληρώνεται 15° μετά το ανώτερο νεκρό σημείο. Σε αυτή την φάση παρατηρείται και η μεγαλύτερη πίεση στον κύλινδρο, περίπου 180-195 bar, γεγονός που απαιτεί την ανθεκτική και στιβαρή κατασκευή τους. Η πίεση που αναπτύσσεται επιδρά στο έμβολο πιέζοντας το προς τα κάτω και μεταδίδοντας στρεπτική δύναμη στη στροφαλοφόρο άτρακτο. 45° πριν το κατώτερο νεκρό σημείο και πριν την αποκάλυψη των θυρίδων εισαγωγής, ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής εκτονώνοντας την πίεση και απομακρύνοντας τα προϊόντα της καύσης τα οποία βρίσκονται σε θερμοκρασία περίπου 600° . Συνεχίζοντας την καθοδική του πορεία το έμβολο αποκαλύπτει τις θυρίδες εισαγωγής από όπου εισέρχεται αέρας ο οποίος βοηθά στην έξοδο των υπολοίπων καυσαερίων ψύχοντας ταυτόχρονα και τον κύλινδρο. 35° μετά το κάτω νεκρό σημείο η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει, 50°

μετά το κάτω νεκρό σημείο οι θυρίδες εισαγωγής καλύπτονται από το έμβολο και η συμπίεση ξεκινάει πάλι με φρέσκο αέρα.



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα χρόνων διανομής δίχρονου κινητήρα Diesel

Θα πρέπει να αναφέρουμε εδώ πως στους δίχρονους κινητήρες, σε αντίθεση με τους τετράχρονους, τα καυσαέρια απομακρύνονται από τον κύλινδρο με την εισαγωγή σε αυτόν αέρα, μια διαδικασία που ονομάζεται απόπλυση. Η απόπλυση μειώνει σημαντικά την ισχύ του κινητήρα καθώς καταλαμβάνει σημαντικό μέρος του όγκου εμβολισμού και επομένως ακυρώνει σε κάποιο βαθμό το πλεονέκτημα των δύο μόνο διαδρομών του εμβόλου. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι απόπλυσης που χρησιμοποιούνται στους δίχρονους κινητήρες με σκοπό την μείωση αφενός του απαιτούμενου χρόνου καθαρισμού του θαλάμου καύσης και αφετέρου την μείωση του ποσοστού των εγκλωβισμένων καυσαερίων που τελικά θα παραμείνουν στον κύλινδρο. Όταν οι κινητήρες διαθέτουν θυρίδες εξαγωγής καυσαερίων στην επιφάνεια των εμβόλων τους η απόπλυση ονομάζεται βρογχοειδής λόγω των βρόγχων αέρα που σχηματίζονται κατά την διαδικασία εξαγωγής των καυσαερίων και την ταυτόχρονη εισαγωγή φρέσκου αέρα. Όταν οι κινητήρες διαθέτουν, αντί για θυρίδες εξαγωγής, βαλβίδες εξαγωγής επί των κεφαλών των κυλίνδρων τους, η απόπλυση ονομάζεται διαμήκης. Οι κινητήρες με βρογχοειδή απόπλυση είναι πιο απλής κατασκευής και διαθέτουν μεγαλύτερο μήκος εμβόλου συγκριτικά με αυτούς με διαμήκη απόπλυση, αλλά είναι λιγότερο αποδοτικοί καθώς το αυξημένο ποσοστό εγκλωβισμένων καυσαερίων στον κύλινδρο μειώνει την ποσότητα αέρα και καυσίμου που μπορεί να εισαχθεί σε αυτόν.



Σχήμα 1.3 Διατάξεις απόπλυσης δίχρονων κινητήρων

Στους κινητήρες Diesel ο ρυθμός καύσης εξαρτάται από τον ρυθμό έγχυσης του καυσίμου και από το επίπεδο τύρβης του συμπιεσμένου αέρα μέσα στον κύλινδρο. Επειδή ο χρόνος που αφιερώνεται στην καύση είναι σχετικά μικρός, στους κινητήρες Diesel, είναι αναγκαία για την επίτευξη ικανοποιητικής καύσης μία περίσσεια αέρα με ελάχιστο λόγο μαζών αέρα-καυσίμου 18:1 έως 25:1 ανάλογα βέβαια με τον τύπο της μηχανής και αν αυτή χρησιμοποιεί υπερπλήρωση ή όχι.

Το γεγονός αυτό μειώνει την συγκέντρωση ισχύος στις μηχανές Diesel σε σύγκριση με τις Otto όπου ο ελάχιστος λόγος είναι 17:1. Η ικανοποιητική λειτουργία των κινητήρων Diesel εξαρτάται από τον έλεγχο έγχυσης καυσίμου και την κίνηση του αέρα στον θάλαμο καύσης. Είναι επιθυμητή μία καλή ποιότητα έγχυσης και ένα υψηλό επίπεδο κίνησης του αέρα ώστε να επιτυγχάνεται ένα καλά αναμειγμένο μείγμα αέρα-καυσίμου. Η καλή ποιότητα έγχυσης εξασφαλίζεται με τη χρήση κατάλληλων ακροφυσίων πολλών οπών και έγχυση υψηλής πίεσης ώστε το καύσιμο να μεταφέρεται ομοιόμορφα σε κάθε θέση μέσα στον θάλαμο καύσης. Την καλή κίνηση του αέρα μέσα στο έμβολο συμβάλλει η διαμόρφωση της άνω επιφάνειας του εμβόλου και τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης.

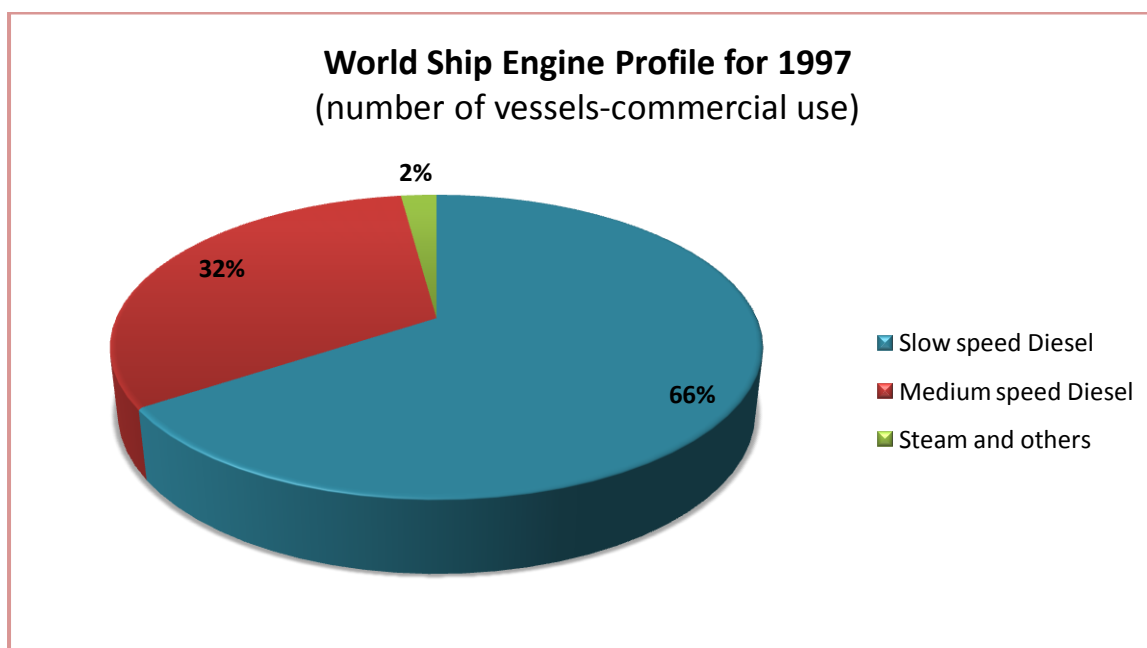
Στους κινητήρες Diesel η ρύθμιση του έργου και της ισχύος είναι ποιοτική δηλαδή αυξομειώνεται με την μεταβολή της ποιότητας του καυσίμου μείγματος δηλαδή με την μεταβολή του λόγου καυσίμου-αέρα. Καθώς όμως η ποσότητα αέρα που μπορεί να εισαχθεί στον κύλινδρο είναι σταθερή, η ισχύς του κινητήρα αυξάνεται με την αύξηση της ποσότητας του καυσίμου. Για τον λόγω αυτό οι κινητήρες με υπερπλήρωση αποδίδουν μεγαλύτερη ισχύ. Επιπλέον, ενώ στους κινητήρες Otto το μέγιστο φορτίο καθορίζεται από την μέγιστη δυνατή

πλήρωση του κυλίνδρου, στους Diesel το μέγιστο φορτίο ορίζεται από την καύση δηλαδή είναι το φορτίο πέρα από το οποίο έχουμε ιδιαιτέρως ατελή καύση με αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονου καπνού στα καυσαέρια.

Οι δίχρονοι κινητήρες Diesel εμφανίζονται πιο συχνά σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη απόδοση ισχύος όπως μεγάλα πλοία και ηλεκτρικές γεννήτριες.

1.3.1 Κινητήρες Diesel στην Ναυτιλία

Οι ναυτικοί κινητήρες Diesel είναι ο επικρατέστερος τύπος μηχανής στην ναυτιλία τόσο για την κίνηση όσο και για την παραγωγή βοηθητικής ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία. Μόνο τα μικρότερα σε μέγεθος σκάφη χρησιμοποιούν δίχρονους και τετράχρονους κινητήρες Otto. Τα μεγάλα σε μέγεθος, ποντοπόρα, φορτηγά πλοία χρησιμοποιούν κυρίως για την κίνηση τους μηχανές Diesel χαμηλών και μεσαίων στροφών ενώ κάποια επιβατηγά ή πολεμικά πλοία, στα οποία είναι επιθυμητή η ταχύτητα, είναι εξοπλισμένα με αμοστροβίλους ή αεριοστροβίλους. Ο αριθμός των πλοίων αυτών είναι ιδιαίτερα μικρός καθώς αυτού του τύπου οι μηχανές δεν είναι αποδοτικές συγκρινόμενες με τις μηχανές Diesel. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4, το 1997 το 98% του παγκόσμιου στόλου έφερε μηχανές Diesel και μόνο το 2% άλλου τύπου μηχανές.



Σχήμα 1.4 Κατηγοριοποίηση παγκόσμιου στόλου σύμφωνα με τον τύπο κινητήρα

Οι ναυτικοί κινητήρες Diesel, σύμφωνα με την χρήση για την οποία προορίζονται, διακρίνονται σε ναυτικούς κινητήρες αναψυχής και σε εμπορικούς ναυτικούς κινητήρες. Οι κινητήρες αναψυχής αποτελούν μηχανές υψηλών αποδόσεων, περιορισμένων διαστάσεων και προορίζονται για μικρή σχετικά χρήση 200-1000 ωρών τον χρόνο. Είναι σχεδιασμένοι για εφαρμογές που απαιτούν μέγιστη ισχύ για σύντομα χρονικά διαστήματα όχι μεγαλύτερα από

δεκαπέντε λεπτά και όχι συχνότερα από 8-12 ωρών λειτουργίας. Οι κινητήρες αυτοί ανήκουν στην κατηγορία μηχανών 1 της αμερικανικής υπηρεσίας προστασίας περιβάλλοντος EPA. Οι κατηγορίες μηχανών της EPA θα παρουσιασθούν εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 3.

Οι εμπορικοί κινητήρες διακρίνονται σε ελαφριάς, διακοπτόμενης, μεσαίας και βαρέας χρήσης και διαφοροποιούνται ως προς τις ετήσιες ώρες λειτουργίας τους έχοντας όμως σαν κοινό χαρακτηριστικό την αυξημένη αντοχή τους χάρη στην πιο στιβαρή κατασκευή τους συγκριτικά με τους κινητήρες αναψυχής. Οι εμπορικοί κινητήρες ελαφριάς χρήσης είναι σχεδιασμένοι για να λειτουργούν 750-3000 ώρες τον χρόνο και εξοπλίζουν αλιευτικά σκάφη, σκάφη διάσωσης ή χρησιμοποιούνται ως βοηθητικοί κινητήρες σε μεγαλύτερα πλοία. Ανήκουν στην κατηγορία μηχανών 1 της EPA. Οι κινητήρες διακοπτόμενης χρήσης ανταποκρίνονται σε χρήση 2000-4000 ωρών τον χρόνο με την λειτουργία μέγιστου φορτίου να μην ξεπερνάει το μισό των συνολικών ωρών λειτουργίας. Οι κινητήρες αυτού του τύπου απαντώνται σε εμπορικά αλιευτικά σκάφη, πορθμεία και παράκτια φορτηγά πλοία. Χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή βοηθητικής ηλεκτρικής ενέργειας και εμπίπτουν κυρίως στην κατηγορία μηχανών 1 της EPA και κάποιες την κατηγορία 2. Οι εμπορικοί κινητήρες μεσαίας χρήσης λειτουργούν 3000-5000 ώρες τον χρόνο με χρόνο λειτουργίας στο μέγιστο φορτίο που δεν ξεπερνά το 80%. Οι μηχανές αυτές έχουν καλή αντοχή και κατανάλωση καυσίμου ενώ διατηρούν και σχετικά καλές επιδόσεις. Ανήκουν κατά κύριο λόγο στην κατηγορία μηχανών 2 με κάποιες από αυτές στην κατηγορία 1. Τέλος οι κινητήρες βαρέας χρήσης είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν στο μέγιστο φορτίο 24 ώρες/μέρα για περισσότερες από 5000 ώρες τον χρόνο. Οι μηχανές αυτού του τύπου έχουν εξαιρετική αντοχή και απόδοση γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα οικονομικές. Εξοπλίζουν από ρυμουλκά πλοία έως μεγάλα ποντοπόρα πλοία. Οι κινητήρες αυτοί ανήκουν στις κατηγορίες μηχανών 3 και 2.¹

Οι ναυτικοί κινητήρες Diesel χαμηλών στροφών είναι δίχρονοι και ογκώδεις και διαθέτουν συνήθως 4-12 κυλίνδρους. Οι κινητήρες αυτοί είναι μεγάλοι σε διαστάσεις ώστε το έμβολο να εκτελεί μεγαλύτερη διαδρομή και να επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση. Οι πιο σύγχρονοι κινητήρες αυτού του τύπου παράγουν ισχύ μεγαλύτερη από 4000 kW/ κύλινδρο. Ως συνέπεια του μεγάλου μεγέθους τους οι στροφές λειτουργίας τους κυμαίνονται από 80 έως 140 rpm. Οι χαμηλές αυτές ταχύτητες προσφέρουν σχεδιαστικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα καθώς επιτρέπουν την επιτυχή καύση του βαρύ πετρελαίου παρέχοντας επαρκή χρόνο για την καλή ανάμειξη και καύση του μείγματος αέρα-καυσίμου. Επιπλέον, οι χαμηλές στροφές καθιστούν δυνατή την απευθείας σύνδεσης του εκκεντροφόρου άξονα με την στροφαλοφόρο άτρακτο χωρίς να απαιτούνται επιπρόσθετοι μηχανισμοί. Η κατασκευή του κινητήρα είναι με αυτόν τον τρόπο απλούστερη και συνεπώς οικονομικότερη και συμβάλει στην μείωση των πιθανών σφαλμάτων που μπορούν να εμφανιστούν κατά την λειτουργία της μηχανής. Οι κινητήρες τέτοιου τύπου, χάρη στην απλότητα τους, έχουν μεγάλη μακροζωία και προτιμούνται από τους πλοιοκτήτες που επιθυμούν πλοία με μία μόνο μηχανή και μία έλικα. Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά των δίχρονων κινητήρων τους καθιστούν την καλύτερη επιλογή για όλα σχεδόν τα μεγαλύτερα σε μέγεθος φορτηγά πλοία παραμερίζοντας τους τετράχρονους κινητήρες σε αυτή την κατηγορία μεταφορών. Αποτελούν μια απλή και αξιόπιστη μηχανή, εύκολη στον χειρισμό και στην συντήρηση που καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις των πλοίων αυτών.

¹ Environmental Protection Agency (EPA), 1999, "Final Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions from Marine Diesel Engines"

Όσον αφορά του ναυτικούς κινητήρες Diesel μεσαίων στροφών, αυτοί είναι συνήθως τετράχρονοι με ταχύτητες 400-1000 rpm με έως και 12 κυλίνδρους σε σειρά ή έως 20 κυλίνδρους σε σχηματισμό "V". Τα σύγχρονα σχέδια τέτοιων κινητήρων παράγουν ισχύ μεταξύ 100-2000 kW/κύλινδρο και χρησιμοποιούνται τόσο για την κίνηση πλοίων όσο και τις παραγωγή βοηθητικής ισχύος. Οι μηχανές κίνησης συνήθως δεν χρησιμοποιούνται ως μονάδες αλλά σε εγκαταστάσεις πολλών μηχανών και δεν συνδέονται απευθείας με τις έλικες του πλοίου αλλά μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων.

Το σχήμα 1.5 παρουσιάζει τις κατασκευάστριες εταιρίες ναυτικών κινητήρων μεσαίων και χαμηλών στροφών. Οι πιο σημαντικές από αυτές η MAN B&W, η Wartsila Corporation (SULZER) και η Mitsubishi Heavy Industries.

Produce Own Designs	Produce Engines Using Licensed Designs
Akasaka	Bazan
Allen Diesel	Cegielski
Daihatsu	Coltec Industries
Deutz-MWM	Dieselmotorenwerk Vulcan
Fincantier Group/GMT	GMBH
Hanshin	Jadranbrod ULJANK
MAN-B&W	Kawasaki Heavy Ind.
MaK	Kirloskar Oil Engines Ltd.
Matsui Iron Works	Koloma Plant Joint Stock
Mitsubishi Heavy Ind. LTD	Maschinenbau Halberstadt
SEMT-Pielstick	Niigata
Wartsila-NSD	

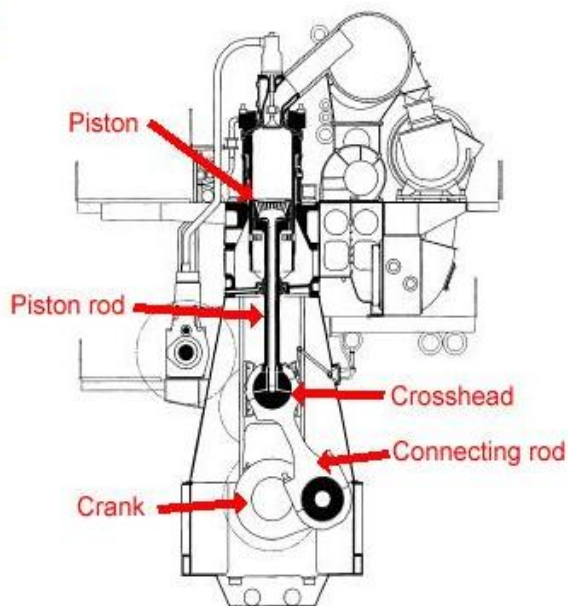
Σχήμα 1.5 Κατασκευαστές ναυτικών κινητήρων κατηγορίας 3 (κατά EPA)²

Η εταιρία Wartsila έχει κατασκευάσει και αναπτύξει τα τελευταία είκοσι χρόνια την σειρά δίχρονων κινητήρων RTA που αποτελούνται από έναν αριθμό κυλίνδρων σε σειρά, με διαμήκη απόπλυση και βαλβίδες εξαγωγής στην κεφαλή. Η σειρά αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κινητήρων ώστε να καλύπτουν όλες τις απαιτήσεις ακόμα και των πιο σύγχρονων σχεδίων πλοίων. Τελευταία έχει κατασκευάσει έναν από τους ισχυρότερους και πιο αποδοτικούς κινητήρες, τον RTA96-C. Ο κινητήρας αυτός έχει από 6 έως 14 κυλίνδρους σε σειρά και ζυγίζει 2.300 τόνους (μόνο η στροφαλοφόρος άτρακτος ζυγίζει 300 τόνους) . Κάθε κύλινδρος έχει όγκο 1.820 liters και παράγει 7.780 bhp (5.720kW), έχει ύψος 44 feet και πλάτος 89 feet. Η μέγιστη ισχύς του στις 102 rpm είναι 80.080 kW και η κατανάλωση καυσίμου του στη μέγιστη αυτή ισχύ είναι 171-163 g/kWh (Σχήμα 1.6).

² Environmental Protection Agency (EPA), 1999, "Final Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions from Marine Diesel Engines", Chapter 2.

Principal particulars of the Sulzer RTA96C

Bore	mm	960
Stroke	mm	2500
Power MCR (R1)	kW/cylinder bhp/cylinder	5720 7780
Speed (R1)	rev/min	102
BMEP	bar	18.6
Mean piston speed	m/s	8.5
Maximum pressure	bar	145
Cylinders:		6 - 12, 14
Power, 12-cylinder engine	kW bhp	68,640 93,360
Power, 14-cylinder engine	kW bhp	80,080 108,920
Fuel consumption, BSFC at full load:	g/kWh g/bhp	171-163 126-120



Σχήμα 1.6 Ο δίχρονος ναυτικός κινητήρας RTA96-C της εταιρίας Wartsila³

Οι ναυτικοί κινητήρες Diesel συνήθως δεν σχεδιάζονται και κατασκευάζονται εξ αρχής για ναυτική χρήση. Πολλές φορές η αρχική τους σχεδίαση αφορά χερσαίες μηχανές οι οποίες στην συνέχεια υφίστανται τροποποιήσεις, από τις ίδιες τις κατασκευάστριες εταιρίες ή άλλους εξειδικευμένους μηχανικούς εκτός εργοστασίου, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ναυτικές εφαρμογές.

Μία βασική τροποποίηση που γίνεται στους κινητήρες που προορίζονται για ναυτική χρήση αφορά το σύστημα ψύξης τους καθώς οι ναυτικοί κινητήρες λειτουργούν σε κλειστούς χώρους χωρίς μεγάλη ροή αέρα ικανή για την επαρκή ψύξη τους. Ο περιορισμένος αυτός χώρος μπορεί να προκαλέσει θέματα ασφάλειας και επιδόσεων στον κινητήρα. Για τον λόγο αυτό οι ναυτικές μηχανές κάνουν χρήση του περιβάλλοντος νερού ώστε να απομακρύνουν την θερμότητα και διαθέτουν περιορισμένες θερμές επιφάνειες για την εξάλειψη των κινδύνων ασφαλείας. Επιπρόσθετες τροποποιήσεις απαιτούνται για την διατήρηση των επιδόσεων των κινητήρων. Οι αλλαγές αυτές περιλαμβάνουν βελτιώσεις στο σύστημα έγχυσης καυσίμου, στις κεφαλές των κυλίνδρων και στον χρονισμό της έγχυσης, στα έμβολα και στο σύστημα λίπανσης με σκοπό την καύση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου. Τέλος, η μετατροπή ενός χερσαίου κινητήρα σε ναυτικό απαιτεί την αλλαγή των υλικών κάποιων εξαρτημάτων ώστε να αποφεύγονται προβλήματα διάβρωσης. Γίνεται χρήση χρωμίου και ορείχαλκου σε εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένου των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, ώστε να αντέχουν στην υγρασία. Επίσης, άνοδοι ψευδαργύρου χρησιμοποιούνται συχνά ώστε εξαρτήματα της μηχανής όπως οι εναλλάκτες θερμότητας, να μην καταστρέφονται από ηλεκτρόλυση.

Η διαδικασία αυτή τροποποίησης ενός κινητήρα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα χαρακτηριστικά των καυσαερίων του δηλαδή μία χερσαία μηχανή που συμμορφώνεται στα όρια εκπομπών μπορεί εξαιτίας των αλλαγών που θα υποστεί να μην ικανοποιεί τα όρια αυτά

³ www.wartsila.com

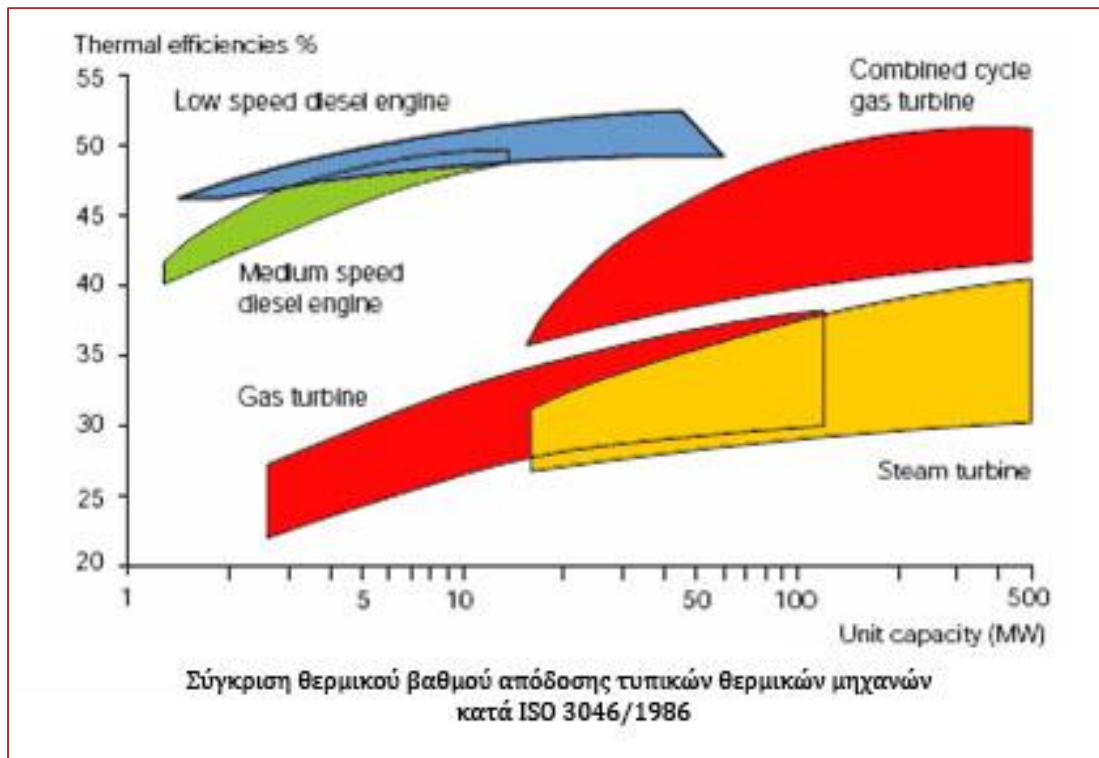
όταν θα μετατραπεί σε ναυτικό κινητήρα. Η πρόκληση για τις κατασκευάστριες εταιρίες είναι πλέον να κατασκευάσουν ναυτικούς κινητήρες με υψηλές επιδόσεις που να ανταποκρίνονται ταυτόχρονα στα υφιστάμενα αλλά και τα μελλοντικά όρια εκπομπών.

1.3.2 Κινητήρες Diesel στην Ηλεκτροπαραγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τον συνδυασμό μίας θερμικής μηχανής και μίας ηλεκτρικής γεννήτριας. Οι θερμικές μηχανές που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό είναι ατμοπαραγωγοί, αεριοστρόβιλοι ή μηχανές εσωτερικής καύσης (τετράχρονοι και δίχρονοι κινητήρες).

Οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια παγκοσμίως καλύπτονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους από ατμοηλεκτρικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα και κατά κύριο λόγο γαιάνθρακες. Μόνο το 6% της παγκόσμιας ζήτησης καλύπτεται από πυρηνικούς σταθμούς και δεν προβλέπεται αύξηση του ποσοστού αυτού μέχρι το 2020. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μηχανές εσωτερικής καύσης είναι εξίσου μικρό. Οι μηχανές Diesel που έχουν επικρατήσει στον χώρο της ηλεκτροπαραγωγής έστω και σε μικρό ποσοστό είναι οι τετράχρονοι κινητήρες μεσαίων στροφών και οι αεριοστρόβιλοι. Η κατάσταση όμως αυτή τείνει να διαφοροποιηθεί τα τελευταία χρόνια και οι δίχρονοι κινητήρες χαμηλών στροφών έχουν έρθει στο προσκήνιο. Βασικοί παράγοντες που έχουν οδηγήσει στο φαινόμενο αυτό είναι η μείωση των αποθεμάτων των καυσίμων καθώς και η επακόλουθη αύξηση της τιμής τους. Η ανάγκη για μηχανές με καλό βαθμό απόδοσης που να καταναλώνουν φθηνά καύσιμα καθιστά τους δίχρονους κινητήρες Diesel την καλύτερη επιλογή για ηλεκτροδότηση μικρών περιοχών αποκομμένων από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης(π.χ. νησιά), επιχειρήσεων και γενικά ανεξάρτητων ιδιωτών.

Μέχρι πρόσφατα οι δίχρονοι κινητήρες Diesel χρησιμοποιούνταν ως μονάδες υποστήριξης της ηλεκτροπαραγωγής σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ή σε περιόδους αιχμής που οι ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια αυξάνονται πέραν από το φυσιολογικό. Πλέον αποτελούν εξαιρετική επιλογή για τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ως αυτόνομες μονάδες όταν οι ανάγκες σε ισχύ κυμαίνονται σε 10-50MW. Οι κινητήρες Diesel είναι οι πιο αποδοτικές θερμικές μηχανές όταν η ανάγκη για ηλεκτρική ισχύ δεν είναι πολύ μεγάλες όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 1.7). Οι στροφές των κινητήρων αυτών είναι 100-150 rpm και ο θερμικός βαθμός απόδοσης τους 48-52% τον οποίο διατηρούν κοντά στο μέγιστο του πρακτικά σε όλα τα φορτία λειτουργίας γεγονός πολύ σημαντικό για την ηλεκτροπαραγωγή όπου το φορτίο δεν παραμένει σταθερό αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την εποχή του χρόνου. Ενώ οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας επιτρέπουν αύξηση του φορτίου κατά 3% ανά λεπτό, οι μηχανές Diesel μπορούν να δεχτούν αύξηση του φορτίου λειτουργίας από 0 σε 100% μέσα σε ένα λεπτό και ο χρόνος που παρεμβάλλεται μεταξύ της εκκίνησης τους μέχρι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερος από 10 λεπτά όταν ο αντίστοιχος χρόνος για έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό είναι 6 ώρες.



Σχήμα 1.7 Σύγκριση θερμικού βαθμού απόδοσης τυπικών θερμικών μηχανών κατά ISO 3046/1986 ⁴

Επιπλέον πλεονέκτημα των κινητήρων Diesel είναι το μικρότερο λειτουργικό κόστος τους καθώς μπορούν να καταναλώσουν μια μεγάλη ποικιλία καυσίμων χαμηλής ποιότητας όπως τα βαρύτερα της βενζίνης υγρά καύσιμα της κατηγορίας των πετρελαίων αλλά και ανανεώσιμα καύσιμα φυτικής ή ζωικής προέλευσης όπως Biodiesel, αέριο χωματερών κλπ. Η ικανότητα χρήσης πολλών καυσίμων επιτρέπει την επιλογή του οικονομικότερου ανάλογα με τις τιμές στην αγορά σε κάθε χρονική στιγμή. Αρκετά οικονομικότερη είναι και η κατασκευή και η συντήρηση μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν δίχρονους κινητήρες Diesel καθώς η σχεδίαση τους είναι σχετικά απλή και καταλαμβάνουν μικρότερη έκταση σε σύγκριση με άλλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με αποτέλεσμα μικρότερο κόστος επένδυσης. Τέλος, η απόδοση των δίχρονων κινητήρων Diesel δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες όπως συμβαίνει με άλλες θερμικές μηχανές όπως οι αεριοστρόβιλοι.

Γενικά, η χρήση ενός αριθμού γεννητριών εφοδιασμένες με εμβολοφόρους μηχανές σε παραλληλία προσφέρει πολλά πλεονέκτημα συγκριτικά με την χρήση ενός μεγάλου κεντρικού σταθμού παραγωγής ενέργειας. Η περίπτωση ξαφνικής βλάβης ενός τέτοιου σταθμού θα προκαλούσε μεγάλη απώλεια ισχύος και το σύστημα δεν θα ήταν σε θέση να διατηρήσει την συχνότητα και την τάση της ηλεκτρικής ενέργειας σταθερή μέσα στα επιτρεπτά όρια. Αντίθετα, με την χρήση πολλών εμβολοφόρων μηχανών σε παραλληλία, η βλάβη μιας από αυτές δεν θα δημιουργούσε σημαντικό πρόβλημα στο σύστημα καθώς θα αντισταθμιζόταν εύκολα από τις υπόλοιπες γεννήτριες. Επιπλέον, το σύστημα, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες μπορεί να διατηρεί κάποιες από τις γεννήτριες κλειστές και να τις θέτει σε λειτουργία σε περίπτωση αυξημένων απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια ή σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης κάποιων από τις υπόλοιπες μηχανές.

⁴ MAN B&W, Low Speed Engines in Stationary Diesel Power Plants, Technical Report

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα, σε συνδυασμό με το σημερινό ενδιαφέρον για πιο αποδοτικές και ευέλικτες μηχανές στο εύρος των 30-150MW και πιο φιλικές με το περιβάλλον αναμένεται να αυξήσουν την ζήτηση για τους κινητήρες αυτούς.

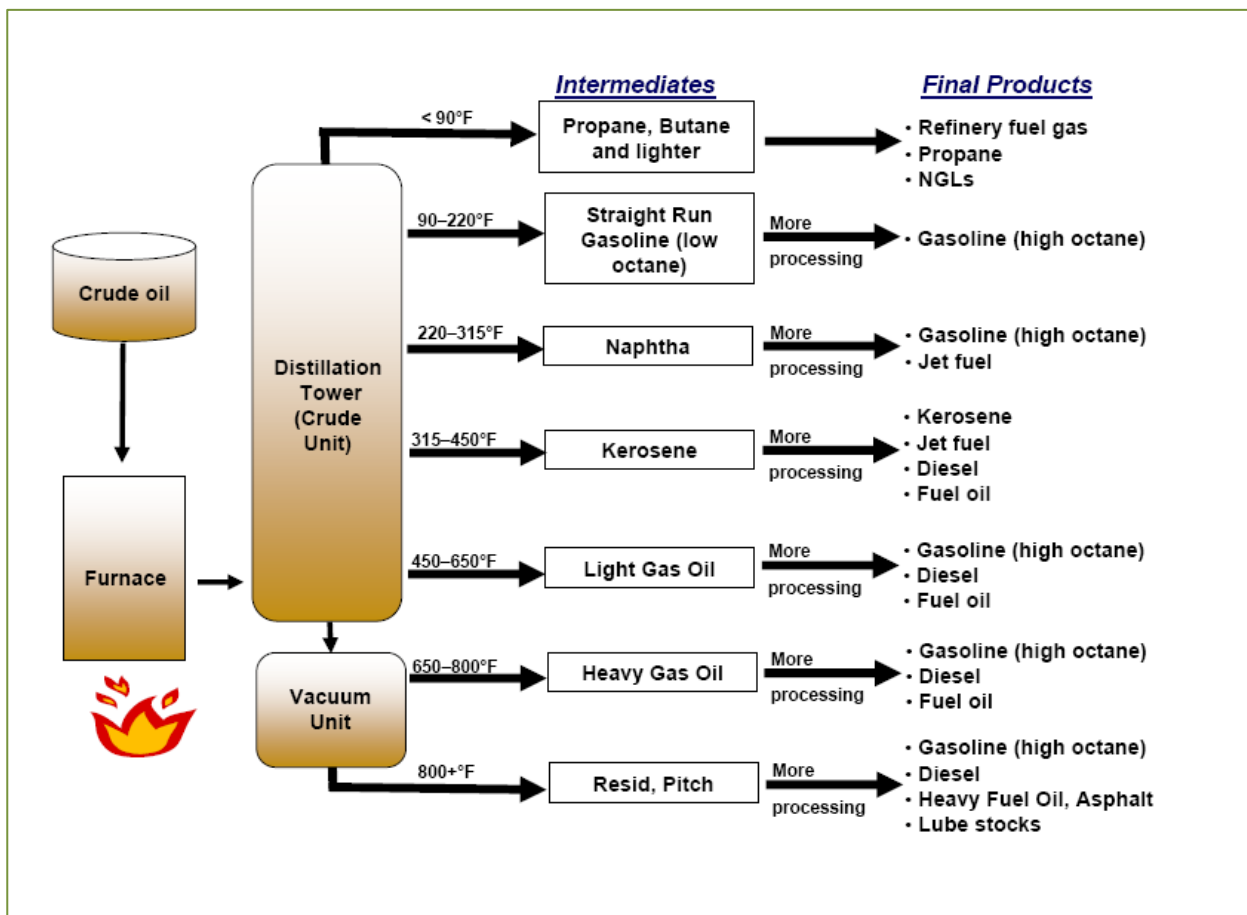


Σχήμα 1.8 Δίχρονος κινητήρας Diesel σε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος

Στην Ελλάδα η χρήση δίχρονων κινητήρων Diesel χαμηλών στροφών αλλά και γενικότερα μηχανών εσωτερικής καύσης περιορίζεται στα νησιά και σε άλλες περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το κεντρικό δίκτυο, σε επιχειρήσεις και σε αυτόνομους ιδιώτες. Επίσης συναντώνται στην ηπειρωτική Ελλάδα ως μονάδες έκτακτης ανάγκης σε περίπτωση μη επάρκειας του κεντρικού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, το 93% της ελληνικής ηλεκτροπαραγωγής προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων κυρίως λιγνίτη ενώ μόνο το 7% από υδροηλεκτρικά έργα και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανάμεσα τους και οι μηχανές εσωτερικής καύσης. Το 88% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής καταναλώνεται από την ενδοχώρα και το 12% από τα νησιά τα οποία όντας αποκομμένα στην πλειοψηφία τους από το κεντρικό σύστημα ηλεκτροδότησης χρησιμοποιούν ως καύσιμα βαρύ και ελαφρύ πετρέλαιο.

1.4 ΚΑΥΣΙΜΑ DIESEL

Στους εμβολοφόρους κινητήρες εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούνται μόνο υγρά και αέρια καύσιμα, κατά λόγο υγρά (σε ποσοστό 99%). Τα καύσιμα αυτά είναι προϊόντα της κλασματικής απόσταξης του αργού πετρελαίου μέσω της κλασσικής στήλης απόσταξης και διαχωρίζονται κατά την τάξη του σημείου ζέσης τους⁵ (Σχήμα1.9).



Σχήμα 1.9 Προϊόντα διύλισης του αργού πετρελαίου⁶

Από την διύλιση του αργού πετρελαίου (crude oil) παράγονται τέσσερις ευρείες κατηγορίες προϊόντων: αέριο διυλιστηρίου (κυρίως μεθάνιο, αιθάνιο και υδρογόνο), υγραέριο (κυρίως προπάνιο και βουτάνιο), τα καύσιμα κατάλοιπα (residual fuels) και τα καύσιμα αποστάγματα (distillate fuels). Τα τελευταία διαχωρίζονται περαιτέρω σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται. Το πιο ελαφρύ και πτητικό από τα αποστάγματα αυτά είναι η βενζίνη. Λαμβάνεται κατά την απόσταξη μετά το υγραέριο και έχει πυκνότητα 0,70-0,76 kg/lit και κατώτερη θερμογόνο δύναμη 42000-44000 kJ/kg. Ακολουθεί η κηροζίνη, με την ίδια θερμογόνο δύναμη και πυκνότητα 0,78-0,82 kg/lit, οι οποία χρησιμοποιείται για θέρμανση και φωτισμό και ως καύσιμο στους στροβιλοαντιδραστήρες. Στην συνέχεια είναι το καύσιμο Diesel που χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών

⁵ Δημ. Θ. Χουντάλας, Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος, "Καύση-Ρύπανση εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.", Εκδόσεις Φούντας.

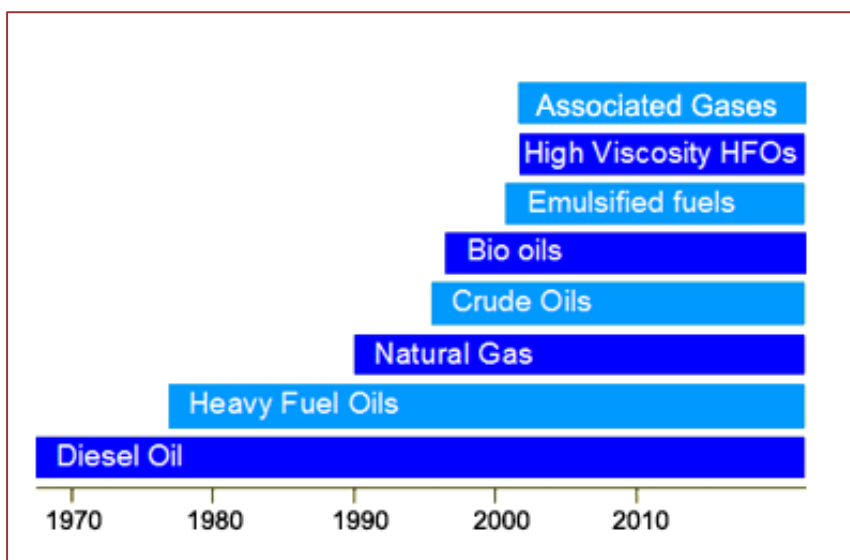
⁶ Tetra Tech, Inc and UltraSystems Environmental Incorporated, " Low-Sulfur Marine Fuel Availability Study", 2008

για οικιακή θέρμανση και κίνηση οχημάτων με πυκνότητα 0,82-0,87 kg/lit. Ακολουθεί το πετρέλαιο θέρμανσης το οποίο χρησιμοποιείται για ανάγκες οικιακής θέρμανσης αλλά και σε μηχανές μεγάλου μεγέθους για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή κίνησης μικρού ή μεσαίου μεγέθους πλοίων. Τέλος συναντάμε τα βαρέα καύσιμα προϊόντα της απόσταξης τα οποία συνήθως αναμειγνύονται με τα κατάλοιπα της διύλισης (residual oil) και χρησιμοποιούνται από τις μεγάλες σε μέγεθος, δίχρονες μηχανές Diesel που κινούν ποντοπόρα πλοία. Υπάρχουν 681 διυλιστήρια παγκοσμίως που μπορούν και επεξεργάζονται περίπου 85 χιλιάδες βαρέλια αργού πετρέλαιο ημερησίως (περίπου 4,5 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως). Από αυτά, το 26% βρίσκεται στην Βόρεια Αμερική (Καναδάς, Μεξικό, Η.Π.Α.) και το 20% στην Ευρώπη.

Οι μεγάλες σε μέγεθος δίχρονες μηχανές Diesel που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήριες μηχανές πλοίων, μπορούν να λειτουργήσουν με μία μεγάλη ποικιλία καυσίμων. Το καύσιμο Diesel όμως που παράγεται από το αργό πετρέλαιο είναι το πλέον κοινό. Οι μηχανές αυτές μπορούν να κάψουν κάθε προϊόν της απόσταξης του αργού πετρελαίου από φυσικό αέριο και βενζίνη μέχρι και τα κατάλοιπα της απόσταξης του. Πιο αναλυτικά τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα από αυτού του τύπου μηχανές τόσο στην ναυτιλία όσο και στην ηλεκτροπαραγωγή είναι τα εξής:

- **Diesel Oil (distillate oil).** Το καύσιμο Diesel είναι ένα μείγμα υδρογονανθράκων που προέρχεται από την απόσταξη του αργού πετρελαίου σε θερμοκρασία 200-350 °C , έχει 43,1 MJ/kg θερμογόνο δύναμη και συνήθως αποτελείται από 8-21 άτομα άνθρακα ανά μόριο. Οι σημαντικές ιδιότητες που το χαρακτηρίζουν είναι ο αριθμός των οκτανίων, η πτητικότητα, η πυκνότητα, το ιξώδες και το περιεχόμενο του σε θείο. Στις μεγάλες σε μέγεθος μηχανές, αυξάνοντας των αριθμό των οκτανίων, μειώνονται οι εκπομπές σε NO_x, CO και HC ενώ μειώνοντας την πυκνότητα του, μειώνονται οι εκπομπές σε NO_x και PM αλλά αυξάνονται οι εκπομπές HC και CO. Το Diesel Oil αποτελεί το παραδοσιακό καύσιμο των κινητήρων Diesel. Για την χρήση του δεν απαιτεί κάποια ιδιαίτερη προετοιμασία, διαχωρισμό ή προθέρμανση πριν την καύση αν και συχνά οι ιδιότητες του βελτιώνονται με την προσθήκη ουσιών με σκοπό την καλύτερη απόδοση του κινητήρα, την σταθερότητα των καυσίμων κλπ. Είναι το βασικό καύσιμο των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ιδιαίτερα των μικρότερων μονάδων και των ναυτικών κινητήρων. Η τιμή του αυξάνεται συνήθως κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών λόγω της αυξημένης χρήσης του στην οικιακή θέρμανση. Αύξηση της τιμής του έχουν προκαλέσει επίσης και τα νέα όρια εκπομπών οξειδίων του θείου που αναγκάζουν τα διυλιστήρια σε περαιτέρω επεξεργασία του καυσίμου ώστε να μειώνεται το ποσοστό θείου σε αυτό.

- **Heavy Fuel Oils (HFO).** Τα καύσιμα αυτά αποτελούν τα κατάλοιπα της διύλισης του αργού πετρελαίου η ποιότητα των οποίων ποικίλει ανάλογα με την διαδικασία διύλισης που ακολουθείται και την σύνθεση του ακατέργαστου πετρελαίου που χρησιμοποιείται. Τα καύσιμα HFO έχουν μεγάλο ιξώδες και υψηλό ποσοστό θείου. Εξαιτίας του μεγάλου ιξώδες τους απαιτούν προθέρμανση πριν την εισαγωγή τους στον θάλαμο καύσης καθώς επίσης την διατήρηση συγκεκριμένης θερμοκρασίας κατή την αποθήκευσή τους. Τα αρνητικά αυτά χαρακτηριστικά τους επιτρέπουν την χρήση του μόνο από τα μεγάλα ποντοπόρα πλοία και το καθιστούν τα πιο οικονομικά από τα καύσιμα.



Σχήμα 1.10 Καύσιμα μηχανών Diesel ⁷

- **Emulsified Fuels (γαλακτοποιημένα καύσιμα).** Αποτελούν βαρέα κλάσματα υδρογονανθράκων και προέρχονται είτε από φυσικές πηγές με την μορφή της πίσσας είτε είναι προϊόντα διύλισης τα οποία υφίστανται επεξεργασία με νερό ώστε να ομογενοποιηθούν. Χρησιμοποιούνται από τους ίδιους κινητήρες που χρησιμοποιούν καύσιμα HFO.
- **Crude Oil.** Πρόκειται για το αργό αδιύλιστο πετρέλαιο η ποιότητα του οποίου εξαρτάται από την πετρελαιοπηγή και την τοποθεσία της. Μετά την αρχική επεξεργασία του που ακολουθεί την εξόρυξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις μεγάλες σε μέγεθος μηχανές Diesel.
- **Μαζούτ.** Ο όρος μαζούτ αναφέρεται γενικότερα στα βαρέα προϊόντα χαμηλής ποιότητας τα οποία είναι κατάλοιπα της απόσταξης του αργού πετρελαίου (HFO, Heavy residues, Crude Oil). Γενικά, το μαζούτ είναι ένα μαύρο, παχύρευστο σε συνήθεις συνθήκες θερμοκρασίας υγρό που χρησιμοποιείται σαν καύσιμο σε μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ατμού ή ηλεκτρισμού και για την κίνηση πλοίων. Τα μαζούτ είναι τα προϊόντα του διυλιστηρίου με τη χαμηλότερη τιμή πώλησης χαρακτηριστικό που μειώνει το λειτουργικό κόστος των μεγάλων, δίχρονων μηχανών Diesel δίνοντας τους σημαντικό πλεονέκτημα στον τομέα της ναυτιλίας και της ηλεκτροπαραγωγής.

Τα πιο κοινά καύσιμα για τους ναυτικούς κινητήρες παρουσιάζονται παρακάτω (σχήμα 1.11). Αυτά αποτελούν ουσιαστικά μείγματα HFO και Diesel Oil σε διάφορες αναλογίες.

- **Residual Oil (RO).** Αποτελεί το βαρύτερο κλάσμα της απόσταξης του αργού πετρελαίου και εξαιτίας του μεγάλου ιξώδους του απαιτεί προθέρμανση πριν την εισαγωγή του στον θάλαμο καύσης ώστε να είναι δυνατή η σωστή ροή του. Τείνει να έχει υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων, μεταξύ αυτών και θείου και είναι το πιο φθηνό υγρό καύσιμο στην αγορά. Ουσιαστικά ταυτίζεται με την κατηγορία HFO.

⁷ www.wartsila.com

- **Intermediate Fuel Oil (IFO).** Το καύσιμο αυτό αποτελεί μείγμα 2% Diesel Oil και 98% HFO και ονομάζεται IFO380 ή μείγμα 12% Diesel και 88% HFO και ονομάζεται IFO180. Το IFO 180 είναι πιο ακριβό από το IFO380 καθώς περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό Diesel Oil .

- **Marine Diesel Oil (MDO).** Αποτελούνται κυρίως από Diesel Oil και περιέχουν χαμηλό ποσοστό θείου. Το MDO έχει μικρότερο ποσοστό θείου από τα IFO 180, IFO 380 και RO αλλά μεγαλύτερο από τα MGO.

- **Marine Gas Oil (MGO).** Αποτελείται ουσιαστικά από Diesel Oil και έχει το χαμηλότερο ποσοστό θείου.

INDUSTRIAL NAME	ISO NAME	COMPOSITION	ISO SPECIFICATION SULFUR WEIGHT %	WORLD AVERAGE
IFO380	RMG 35	98% residual oil 2% distillate oil	5%	2,67%
IFO 180	RME 25	88% residual oil 12% distillate oil	5%	2,67%
MDO	DMB	Distillate oil with trace of residual oil	2%	0,65%
MGO	DMA	100% distillate oil	1,5%	0,38%

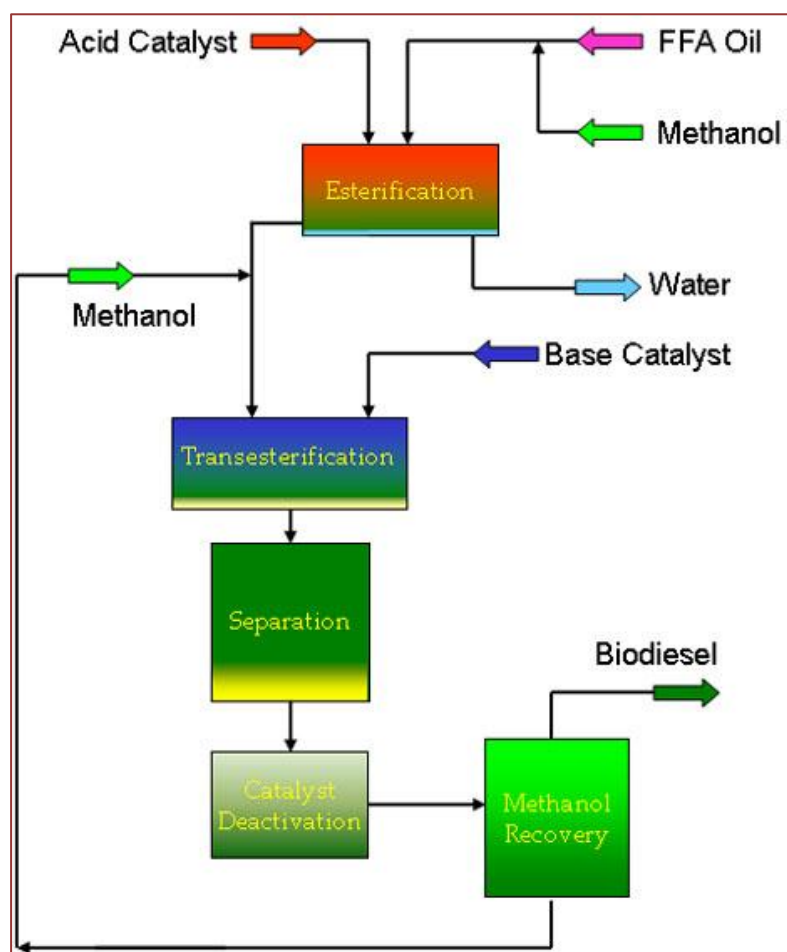
Σχήμα 1.11 Τα πιο κοινά ναυτικά καύσιμα

Οι κλιματικές αλλαγές καθώς και τα περιορισμένα αποθέματα ορυκτών καυσίμων έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση νέων, εναλλακτικών καυσίμων τα οποία θα περιορίζουν τις εκπομπές ρύπων και θα είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Τα πιο σημαντικά εναλλακτικά καύσιμα είναι τα συνθετικά, το biodiesel, ο βιοδιμεθυλεθέρας, οι αλκοόλες, το μεθάνιο και το υδρογόνο.

- **Τα συνθετικά καύσιμα Diesel** προέρχονται πρώτες ύλες που περιέχουν άνθρακα όπως το φυσικό αέριο, το κάρβουνο ή η βιομάζα διαμέσου μιας διαδικασίας που αναπτύχθηκε το 1920 από τους Fischer και Tropsch. Η διαδικασία αυτή έχει αναπτυχθεί περαιτέρω από της πετρελαϊκές εταιρίες και θεωρείται μία βιώσιμη χρήση του φυσικού αερίου. Τα συνθετικά καύσιμα Diesel χαρακτηρίζονται από εξαιρετικές ιδιότητες όπως ο μεγάλος αριθμός οκτανίων και η απουσία θείου. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις υπάρχουσες μηχανές Diesel χωρίς να απαιτούν κάποια τροποποίηση τους. Μελέτες έχουν δείξει πως η χρήση τους οδηγεί σε σημαντικά μειωμένες εκπομπές NO_x και PM.

- **Vegetable Based Oils.** Τα καύσιμα αυτά προέρχονται από προϊόντα γεωργίας όπως ελαιόλαδο, φοινικέλαιο, σογιέλαιο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως έχουν από τις μηχανές Diesel.

• Το **Biodiesel** (γνωστό και ως FAME) παράγεται από φυτικά ή ζωικά έλαια μέσω της διαδικασίας μετεστεροποίησης (transesterification), συνήθως από ελαιοκράμβη στην Ευρώπη και έλαια σόγιας στις Η.Π.Α. Το Biodiesel έχει χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο συγκριτικά με το Diesel λόγω του περιεχομένου του σε οξυγόνο. Επιπλέον, προκαλεί μεγαλύτερες εκπομπές NO_x, οξειδώνεται πιο εύκολα και είναι επίφοβο για ανάπτυξη μικροοργανισμών. Επίσης προκαλεί διάβρωση της μηχανής και δημιουργεί προβλήματα στο σύστημα ψεκασμού καυσίμου. Η μείωση της ισχύς όταν χρησιμοποιείται καθαρό Biodiesel είναι 5-7%. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του, πέρα από την προέλευση του, είναι η μικρή περιεκτικότητα σε θείο, οι μειωμένες εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων (κατά 93%), μονοξειδίου του άνθρακα (κατά 50%) και σωματιδίων (κατά 30%).



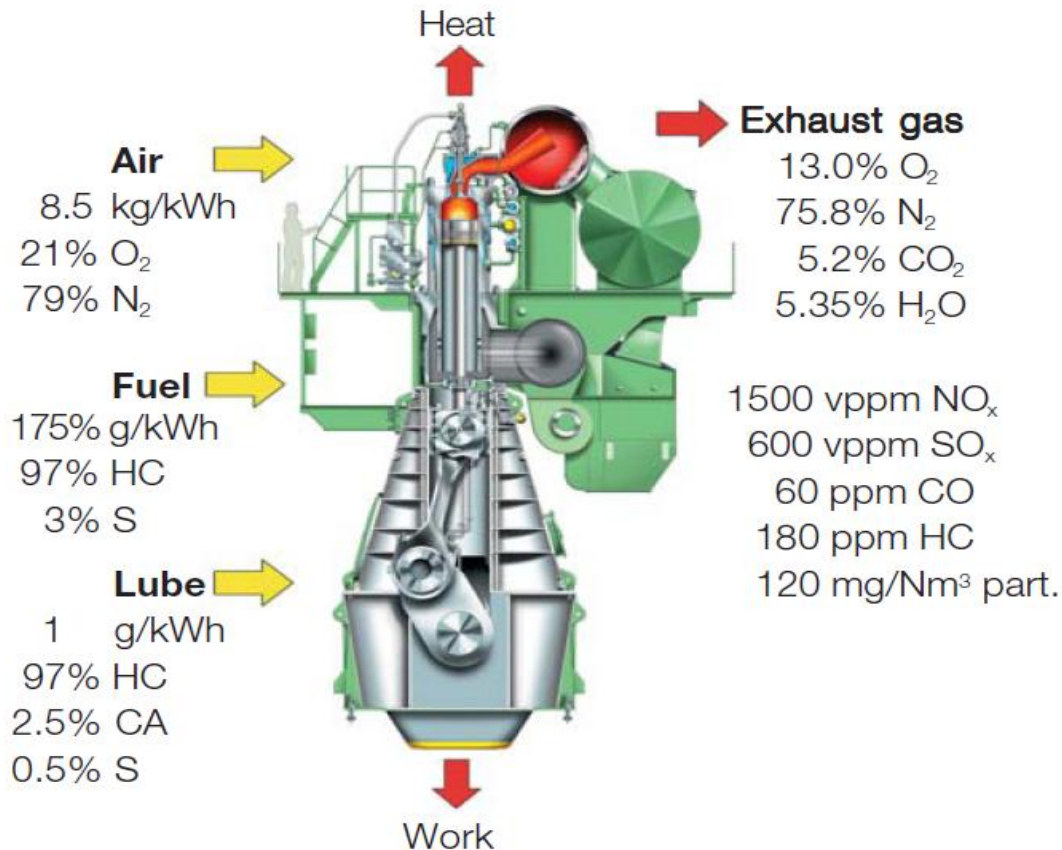
Σχήμα 1.10 Περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής του Biodiesel

2. ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΥΣΗΣ ΕΜΒΟΛΟΦΟΡΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Κατά την πλήρη, τέλεια καύση των υδρογονανθράκων με περίσσεια αέρα τα μόνα προϊόντα καύσης είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), νερό (H_2O), διοξείδιο του θείου (SO_2) (αν το καύσιμο περιέχει θείο), οξυγόνο (O_2) και άζωτο (N_2). Σε πραγματικές όμως συνθήκες καύσης σε κινητήρες, η τέλεια καύση είναι πρακτικά αδύνατον να επιτευχθεί, συνεπώς, εκτός από τις παραπάνω χημικές ενώσεις, στα καυσαέρια εμφανίζονται επιπλέον ενώσεις, προϊόντα της ατελούς καύσης, όπως οξειδία του αζώτου (NO_x), άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξυγονούχες οργανικές ενώσεις, ενώσεις μολύβδου καθώς, σωματίδια καπνού (PM) καθώς και οξειδία του θείου. Οι ενώσεις αυτές είναι ιδιαίτερα επιβλαβής για το περιβάλλον αλλά και τον ίδιο τον άνθρωπο, πιο συγκεκριμένα:

- Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι άχρωμο και άοσμο αέριο. Λόγω της μικρής ταχύτητας διάχυσης του δημιουργεί πρόβλημα κυρίως στην περιοχή στην οποία εκπέμπεται. Το CO αντιδρά με την αιμοσφαιρίνη του αίματος 200 φορές ταχύτερα σε σύγκριση με το οξυγόνο με αποτέλεσμα την ελλειμματική τροφοδοσία των ιστών με οξυγόνο γεγονός που οδηγεί στον θάνατο. Το φυσικό περιβάλλον εκτός πόλης περιέχει CO σε συγκεντρώσεις 10-200 ppb ενώ μέσα στις πόλεις μπορεί να φθάσουν και μέχρι 500 ppm. Μείωση των εκπομπών του μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας καύσης και την βελτίωση της μίξης αέρα-καυσίμου κατά την καύση.
- Το διοξείδιο του θείου (SO_2) είναι αέριο άχρωμο και άοσμο που οξειδώνεται με φωτοχημική ή καταλυτική διαδικασία σε τριοξείδιο του θείου το οποίο απορροφώντας την ατμοσφαιρική υγρασία σχηματίζει θειικό οξύ το οποίο και καταλήγει στο έδαφος. Τα οξειδία του θείου ερεθίζουν το αναπνευστικό σύστημα και προκαλούν μείωση ορατότητας. Επιπλέον προκαλεί σοβαρές βλάβες στον φυτικό κόσμο μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των αγροτικών περιοχών. Τα οξειδία του θείου είναι επίσης υπεύθυνα για την καταστροφή των μνημείων καθώς προκαλούν διάβρωση των τεχνικών υλικών τους. Είναι επιπλέον υπεύθυνα σε μεγάλο βαθμό για την διάβρωση της ίδιας της μηχανής. Μελέτες των παγκόσμιων εκπομπών του SO_2 δείχνουν ότι το 16% του αερομεταφερόμενου θείου προέρχεται από την καύση καυσίμων όπως το πετρέλαιο και ο ορυκτός άνθρακας. Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου σχετίζονται άμεσα με την ποσότητα θείου που υπάρχει στα καύσιμα που χρησιμοποιούνται.
- Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC) οφείλονται στο φαινόμενο της ψύξεως κοντά στα τοιχώματα του θαλάμου καύσεως, στην ατελή καύση και στην απόπλυση. Παίρνουν μέρος στις φωτοχημικές διαδικασίες και παράγουν αλδεύδες και ακόρεστους πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες που έχουν καρκινογόνες επιδράσεις στους

οργανισμούς. Μείωση της συγκέντρωσης τους στα καυσαέρια επιτυγχάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας καύσης και καλύτερης μίξης αέρα- καυσίμου.

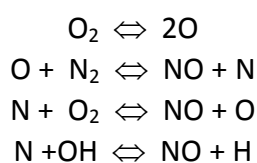


Σχήμα 2.1 Τυπική σύσταση καυσαερίων⁸

- Ο μόλυβδος (Pb) είναι τοξικό μέταλλο που η ύπαρξη του στον αέρα αποτελεί πραγματικό κίνδυνο για την δημόσια υγεία. Η κύρια πηγή του μολύβδου στον αέρα είναι η χρησιμοποίηση βενζίνης με μολύβδο στους κινητήρες Otto, σε αναλογία 0,5g Pb ανά λίτρο βενζίνης. Ενώσεις τετραμεθυλιούχου και τετρααιθυλιούχου μολύβδου προστίθενται στην βενζίνη για την αύξηση των οκτανίων της ώστε να επιτυγχάνεται η παραγωγή της μέγιστης ισχύος του κινητήρα και η βέλτιστη λειτουργία του. Ο μολύβδος δεν είναι απαραίτητος στην βενζίνη αλλά προτιμάται επειδή είναι πιο οικονομικός από άλλα μέσα που ανεβάζουν τον αριθμό των οκτανίων. Ο μολύβδος εισέρχεται στον ανθρώπινο οργανισμό είτε μέσω της αναπνοής είτε μέσω της τροφικής αλυσίδας. Στην συνέχεια διαλύεται στο αίμα και καταλήγει σε διάφορα όργανα και κυρίως στα οστά όπου και συσσωρεύεται. Επιπλέον επιδρά στην καρδιά και στο νεφρικό σύστημα. Η οξεία δηλητηρίαση από μολύβδο προκαλεί κώμα και ακόμα και θάνατο. Περίπου το 3% κατά βάρος των αιωρούμενων σωματιδίων στις μεγάλες πόλεις αποτελείται από άλατα μολύβδου.

⁸ "Emission Control, Two-stroke low-speed Diesel Engines", MAN B&W Diesel A/S , Copenhagen, Denmark,1996

- Τα οξειδία του αζώτου (NO_x) παράγονται κατά την ατελή καύση ορυκτών καυσίμων. Η κύρια ένωση του αζώτου που περιέχεται στα καυσαέρια είναι το μονοξείδιο του αζώτου (NO) αλλά και το διοξείδιο (NO_2) σε μικρότερες συγκεντρώσεις. Κατά την καύση οι ποσότητες του παραγόμενου NO_2 είναι ελάχιστη όμως η τελική ποσότητα αυξάνεται λόγω της οξειδωσης που υφίσταται μέρος του NO προς τον σχηματισμό NO_2 . Από τις δύο αυτές ενώσεις μόνο το NO_2 θεωρείται τοξικό στις συνήθεις συγκεντρώσεις. Έχει έντονη μυρωδιά και κόκκινο-καφέ χρώμα και ερεθίζει τα μάτια, την μύτη, το βρογχικό σύστημα και τους πνεύμονες. Όταν έρθει σε επαφή με υγρασία, είτε στον αέρα είτε στο ανθρώπινο σώμα, σχηματίζει το εξαιρετικά διαβρωτικό νιτρικό οξύ. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της καύσης τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα οξειδίου του αζώτου που σχηματίζεται. Ο σχηματισμός του μονοξειδίου του αζώτου (NO) στις εμβολοφόρους Μ.Ε.Κ. γίνεται κατά μη ευσταθή τρόπο που απεικονίζεται από τις εξισώσεις Zeldovich:



- Τα αιωρούμενα σωματίδια καπνού (PM) αποτελούν έναν ιδιαίτερα σύνθετο ρύπο καθώς παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία στο μέγεθος, στην χημική σύσταση και στο σχήμα τους. Συνήθως τα σωματίδια καπνού αποτελούνται από αιθάλη (soot), οξειδία μετάλλων, καθώς και θειικά άλατα, όλα προερχόμενα από την ατελή καύση του καυσίμου ή από τις ακαθαρσίες στα καύσιμα και στα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται. Το μέγεθος τους δεν είναι συγκεκριμένο, αλλά έχουν διάμετρο μικρότερη από 10 μm .

Έρευνες έχουν δείξει πως το 90% των αεροσωματιδίων παγκοσμίως προέρχεται από φυσικές πηγές (όπως τα ηφαίστεια) αλλά κοντά στις βιομηχανικές πόλεις τα ποσοστά αντιστρέφονται και οι εκπομπές των σωματιδίων προέρχονται από ανθρωπογενείς πηγές. Οι πηγές αυτές είναι η βαριά βιομηχανία όπως η χαλυβουργία και η τσιμεντοβιομηχανία, η ηλεκτροπαραγωγή που χρησιμοποιεί ως καύσιμο τον λιγνίτη, τα αυτοκίνητα και η οικιακή θέρμανση. Η συνεισφορά των δίχρονων, ναυτικών μηχανών Diesel στις παγκόσμιες εκπομπές σωματιδίων είναι πολύ μικρή, μόλις 1%, καθώς η καύση που λαμβάνει χώρα στον θάλαμο καύσης τους είναι ιδιαίτερα καλής ποιότητας, αλλά εντείνεται στα λιμάνια και στις παράκτιες περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση πλοίων γεγονός που καθιστά απαραίτητο τον έλεγχο των εκπομπών αυτών από τα πλοία.

Η εκπομπή σωματιδίων καπνού μπορεί να προκαλέσει ποικίλα προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα που εξαρτώνται από το μέγεθος των σωματιδίων αυτών. Τα σωματίδια με διάμετρο 7-10 μm πέφτουν κατευθείαν στο έδαφος εξαιτίας του βάρους τους και δημιουργούν προβλήματα στην χλωρίδα καθώς μειώνουν την απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα και της ηλιακής ενέργειας από τα φύλλα των φυτών. Επιπλέον δημιουργούν προβλήματα διάβρωσης σε κτήρια και μνημεία λόγω της αυξημένης τοξικότητάς τους και των διαβρωτικών χημικών ουσιών που περιέχουν. Τα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 7 μm αιωρούνται στην ατμόσφαιρα για μεγαλύτερο

χρονικό διάστημα πριν καταλήξουν στο έδαφος και μπορούν να παρασυρθούν από την βροχή και άλλους καιρικούς μηχανισμούς.

Τα σωματίδια με διάμετρο μέχρι 5 μm εισπνέονται από τον άνθρωπο αλλά κατακρατούνται από το ρινικό σύστημα. Τα σωματίδια διαμέτρου μικρότερης των 5 μm μπορούν να εισέλθουν με την εισπνοή στους πνεύμονες φράζοντας σταδιακά τις αναπνευστικές διόδους ενώ τα ακόμα μικρότερα σωματίδια διαμέτρου 1-2μm φράζουν τις αναπνευστικές κυψελίδες δημιουργώντας αναπνευστικά προβλήματα. Η διαφορετική επικινδυνότητα των σωματιδίων, λόγω διαμέτρου, οδήγησε στον διαχωρισμό τους από την νομοθεσία σε σωματίδια PM₁₀ (εσπνεύσιμα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 10μm) και σε σωματίδια PM_{2,5}.

Στους κινητήρες Otto, για μόνιμη λειτουργία, τα ποσοστά του CO και των άκαυστων HC είναι υψηλότερα κατά δύο τάξεις και μία τάξη αντίστοιχα σε σύγκριση με αυτά των κινητήρων Diesel ενώ η τάξη μεγέθους για τα NO_x είναι η ίδια με μεγαλύτερες τιμές όμως στους Otto. Στα καυσαέρια του κινητήρα Diesel εμφανίζεται επίσης καπνός. Ο καπνός αυτός μπορεί να είναι λευκός ή κυανός ή μελανός. Είναι λευκός από τα υγρά άκαυστα σωματίδια καυσίμου κατά την εκκίνηση του κινητήρα ή σε πολύ χαμηλά φορτία λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας. Ο καπνός είναι κυανός λόγω των άκαυστων σωματιδίων λιπαντικού ελαίου όταν υπάρχει πρόβλημα στην λίπανση του κινητήρα και το λιπαντικό εισέρχεται μέσα στον κύλινδρο με αποτέλεσμα τη μερική καύση του. Τέλος ο καπνός είναι μελανός όταν υπάρχουν σωματίδια άκαυστου στερεού άνθρακα λόγω ατελής καύσης. Το φαινόμενο αυτό υποδηλώνει την έλλειψη οξυγόνου μέσα στον κύλινδρο καθώς επίσης, για τις μηχανές Diesel, ότι λειτουργούν σε μεγάλο φορτίο. Είναι επομένως φανερό πως η χροιά των καυσαερίων στους κινητήρες Diesel αποτελεί κριτήριο για την ικανοποιητική λειτουργία τους και πρέπει να παρακολουθείται.

Στην εποχή μας οι εκπομπές των παραπάνω ενώσεων από την καύση υδρογονανθράκων ανήκουν στις κυριότερες αιτίες αστικής ρύπανσης. Το φαινόμενο αυτό ανέκυψε από τις αρχές της βιομηχανικής επανάστασης και ολοένα και προσλαμβάνει πιο ανησυχητικές διαστάσεις λόγω της ανάπτυξης και της εξάπλωσης της τεχνολογίας παγκοσμίως και της άρρηκτης εξάρτησης της από την χρήση ορυκτών καυσίμων. Ο αγώνας ενάντια στην ρύπανση του περιβάλλοντος έχει ήδη αρχίσει τις τελευταίες δεκαετίες και βασίζεται σε τεχνικά και νομοθετικά μέτρα. Διεξάγεται εντατική έρευνα από τις κατασκευάστριες εταιρίες με σκοπό την μείωση των συγκεντρώσεων τέτοιων ουσιών μέσω της ανάπτυξης των κατάλληλων τεχνικών που θα περιορίσουν τον σχηματισμό τους και την χρησιμοποίηση νέων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ταυτόχρονα θεσπίζονται όλο και αυστηρότερα όρια για τα επιτρεπόμενα ποσοστά των επιβλαβών ενώσεων στα καυσαέρια των κινητήρων.

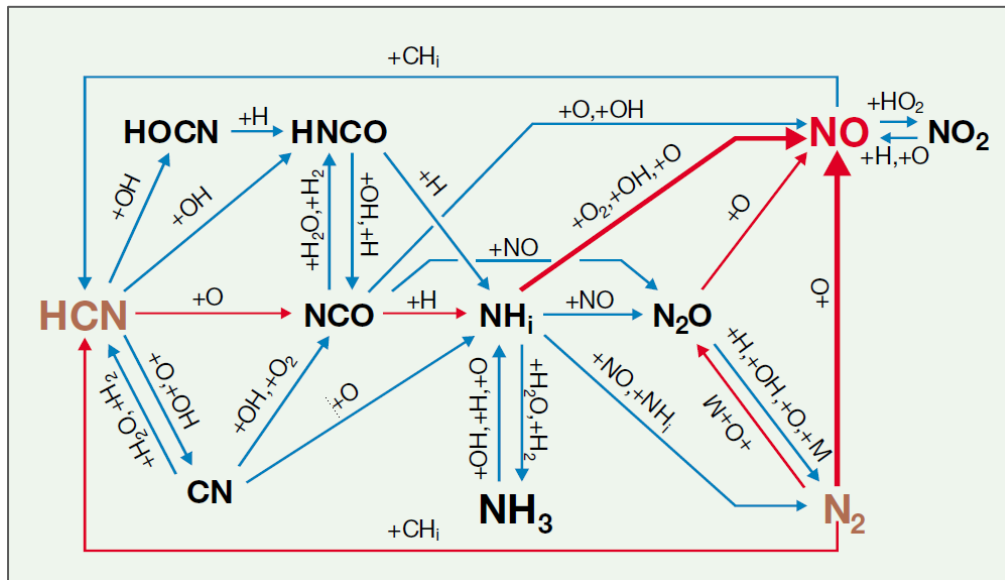
2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ (NO_x)

Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου από τις μηχανές Diesel αποτελούνται κυρίως από μονοξείδιο του αζώτου (NO) και διοξείδιο του αζώτου (NO₂) τα οποία συνήθως αποκαλούνται απλουστευμένα εκπομπές NO_x. Ενδεχομένως στα καυσαέρια να υπάρχουν και ίχνη άλλων οξειδίων όπως το N₂O₅ αλλά σε αμελητέες συγκεντρώσεις. Συνήθως, οι εκπομπές NO_x στα καυσαέρια των εμβολοφόρων μηχανών αποτελούνται κατά 98% από NO και μόνο κατά 1-2% από NO₂ με εξαίρεση τα χαμηλά φορτία λειτουργίας των μηχανών Diesel όπου το ποσοστό NO₂ αυξάνεται σε 10-25%.⁹

• ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ NO

Τα οξείδια του αζώτου NO_x που σχηματίζονται κατά την διαδικασία της καύσης προέρχονται από δύο πηγές, το ατμοσφαιρικό άζωτο (N₂) και το οργανικό άζωτο που περιέχεται στα καύσιμα (N_{fuel}). Τυπικά, στους κινητήρες Diesel η βασική πηγή αζώτου είναι το ατμοσφαιρικό N₂. Ακόμα και στην περίπτωση που το καύσιμο περιέχει σημαντική ποσότητα οργανικού αζώτου (μεγαλύτερο από 1% -wt), όπως συμβαίνει με μερικά καύσιμα, η τελικές εκπομπές NO δεν θα αυξηθούν περισσότερο από 10-30%.

Το οργανικό άζωτο στο καύσιμο (N_{fuel}) απελευθερώνεται κατά την εξαέρωση του καυσίμου και σχηματίζει ταχύτατα μικρότερα μόρια όπως υδροκυάνιο (HCN) και αμμωνία (NH₃) τα οποία στη συνέχεια αντιδρούν περαιτέρω και παράγουν μόρια NO. Οι χημικές αντιδράσεις του N₂, του HCN και της NH₃ προς σχηματισμό NO παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Απλοποιημένη απεικόνιση των αντιδράσεων σχηματισμού και καταστροφής των NO κατά τη διάρκεια της καύσης¹⁰

⁹ Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος, Δημ. Θ. Χουντάλας, "Καύση-Ρύπανση εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.", Εκδόσεις Φούντας.

¹⁰ Pia Kilpinen, "NO_x emission formation in marine diesel engines – towards a quantitative understanding", Marine News, Wärtsilä, 2003

Όσον αφορά τον σχηματισμό του μονοξειδίου του αζώτου (NO) από το ατμοσφαιρικό άζωτο (N₂), υπάρχουν τρεις διαφορετικές οδοί με προϊόντα το θερμικό NO, το NO καυσίμου, το άμεσο (prompt) NO και το υποξείδιο το NO.¹¹

• **Θερμικό NO.** Ο σχηματισμός ενός μορίου NO από ένα μόριο αζώτου(N₂) απαιτεί την διάσπαση του ισχυρού τριπλού δεσμού που συγκρατεί τα δύο άτομα αζώτου στο μόριο του N₂. Ένα μόρια οξυγόνου (O₂) δεν είναι ικανό να διασπάσει αυτόν τον δεσμό στις συνθήκες που επικρατούν κατά την καύση στην μηχανή αλλά ακόμα και σε υψηλότερες θερμοκρασίες μία τέτοια αντίδραση (N₂ + O₂ = 2NO) θα πραγματοποιούνταν με εξαιρετικά αργό ρυθμό. Αντί για την παραπάνω αντίδραση, ακολουθείται ένας άλλος μηχανισμός αλυσιδωτών αντιδράσεων που ξεκινάει με την αντίδραση ενός μορίου αζώτου (N₂) και ενός ατόμου οξυγόνου (O):



Ο μηχανισμός αυτός έκανε την εμφάνιση του την δεκαετία του 1940 και ονομάζεται μηχανισμός Zeldovich προς τιμή του επιστήμονα που τον πρότεινε. Αργότερα παρατηρήθηκε ότι με μικρότερη περισσεια αέρα και σε συνθήκες μικρότερες των στοιχειομετρικών, η επίδραση του οξυγόνου (O₂) ως οξειδωτικό μέσο για το άτομο του αζώτου (N) είναι περιορισμένη (A2) και επομένως τα άτομα αζώτου (N) που απελευθερώνονται με την αντίδραση (A1) οξειδώνονται σε μονοξείδιο του αζώτου (NO) μέσω των ριζών υδροξυλίου (OH):



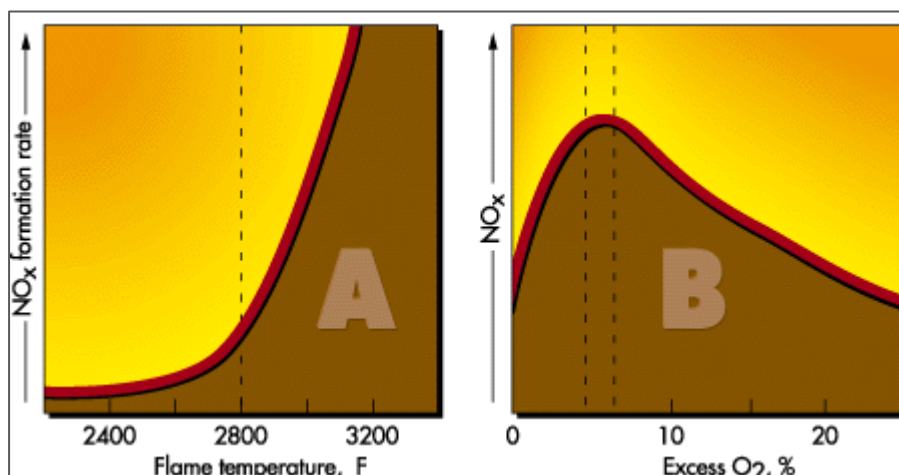
Οι τρεις αντιδράσεις (A1), (A2), (A3) είναι γνωστές ως "extended Zeldovich mechanism". Η αντίδραση (A1) απαιτεί μεγάλη ενέργεια για να ενεργοποιηθεί και αποτελεί τον παράγοντα που περιορίζει τον βαθμό πραγματοποίησης του μηχανισμού Zeldovich. Επίσης, η αντίδραση αυτή, καθιστά τον μηχανισμό ιδιαίτερα ευαίσθητο στην θερμοκρασία και για τον λόγο αυτό το μονοξείδιο του αζώτου (NO) που παράγεται από τις αντιδράσεις αυτές ονομάζεται και θερμικό NO. Σύμφωνα με υπολογισμούς, ο ρυθμός σχηματισμού του θερμικού NO είναι πρακτικά σχεδόν μηδενικός για θερμοκρασίες (T) μικρότερες από 1700 K. Από την άλλη πλευρά, αν η θερμοκρασία (T) είναι μεγαλύτερη από 2000 K, ο σχηματισμός του θερμικού NO επιταχύνεται σημαντικά. Για τον λόγο αυτό, όταν επιθυμείται μείωση των παραγόμενων εκπομπών NO, είναι απαραίτητος ο έλεγχος και η μείωση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στον θάλαμο καύσης καθώς και ο χρόνος που παραμένουν τα καυσαέρια εκεί μετά την ολοκλήρωση της καύσης.

Ο ρυθμός σχηματισμού του θερμικού NO (Kmol m⁻³ sec) δίνεται από την σχέση που ακολουθεί:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{6 \times 10^{16}}{T^{0,5}} \exp\left(\frac{-69090}{T}\right) [O_2]_e^{0,5} [N_2]_e$$

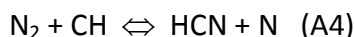
¹¹ Pia Kilpinen, "NO_x emission formation in marine diesel engines – towards a quantitative understanding", Marine News, Wartsila, 2003

Η σχέση αυτή επαληθεύει την μεγάλη εξάρτηση του σχηματισμού NO από την θερμοκρασία και την συγκέντρωση οξυγόνου στον θάλαμο καύσης.

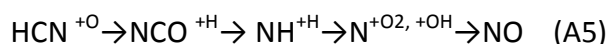


Σχήμα 2.3 α) ρυθμός σχηματισμού NO_x συναρτήσει της θερμοκρασίας (F)
β) ρυθμός σχηματισμού NO_x συναρτήσει της περίσσειας οξυγόνου (O₂)¹²

• **Άμεσο NO.** Στην δεκαετία του 1970, ο Ferimore έδειξε πως μέρος των NO που υπάρχουν στα καυσαέρια δεν μπορούν να δικαιολογήσουν τον σχηματισμό τους μέσω του μηχανισμού Zeldovich. Πρότεινε μάλιστα ότι το άζωτο (N₂) που περιέχεται στον αέρα καύσης αντιδρά με το μονοξείδιο του αζώτου (NO) μέσω ενός διαφορετικού μηχανισμού ο οποίος ξεκινάει με την αντίδραση μεταξύ του N₂ και των ριζών των υδρογονανθράκων (CH_i):



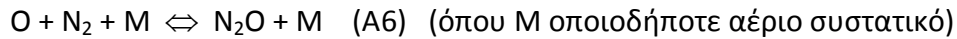
Αν υπάρχουν ουσίες που περιέχουν οξυγόνο, το υδροκυάνιο (HCN) και τα άτομα του αζώτου (N) που σχηματίζονται από την παραπάνω αντίδραση αντιδρούν περαιτέρω προς σχηματισμό NO μέσω μίας σειράς αντιδράσεων:



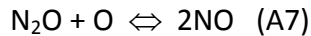
Ο σχηματισμός του NO μέσω του παραπάνω μηχανισμού πραγματοποιείται μόνο στην ζώνη καύσης της φλόγας όπου η καύση είναι ατελής και υπάρχουν ρίζες υδρογονανθράκων ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η αντίδραση (A4). Ο σχηματισμός αυτός του NO είναι συνήθως πολύ ταχύς και για το λόγω αυτό το παραγόμενο NO ονομάζεται άμεσο (prompt). Σε αντίθεση με το θερμικό NO, το άμεσο NO εξαρτάται μόνο σε μικρό βαθμό από την θερμοκρασία και η συνεισφορά του στις συνολικές εκπομπές NO, στις μηχανές Diesel, είναι μικρότερη από 5%.

• **NO υποξείδιο του αζώτου.** Την δεκαετία του 1970 παρουσιάστηκε επίσης ένας τρίτος μηχανισμός σχηματισμού νιτρικού οξέος. Σύμφωνα με τον μηχανισμό αυτό, ένα άτομο οξυγόνου και ένα μόριο αζώτου (N₂) αντιδρούν για τον σχηματισμό του ασταθούς αερίου N₂O σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

¹² Sandum Fernando, Chris Hall and Saroj Jha, "NO_x Reduction from Biodiesel Fuels", American Chemical Society, 2006



Το αέριο N_2O που παράγεται αντιδρά στη συνέχεια με το οξυγόνο και παράγει είτε μόρια αζώτου (N_2) είτε NO ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, συνήθως σχηματίζει μόρια αζώτου. Όταν αυξηθεί η θερμοκρασία ή η περίσσεια αέρα αυξάνεται και ο σχηματισμός του N_2O επίσης. Η κύρια αντίδραση είναι η ακόλουθη:



Η σημασία του μηχανισμού αυτού σχηματισμού NO δεν είναι ακόμα και σήμερα εντελώς σαφής.

• **NO καυσίμου.** Το NO αυτό σχηματίζεται από την οξείδωση χημικά προσαρτημένου αζώτου στο υλικό του καυσίμου μέσω πολύπλοκων μηχανισμών κατά τους οποίους παρεμβάλλονται διάφορες ενώσεις ή ρίζες με μικρή διάρκεια ζωής όπως $-\text{CHN}$, $-\text{CN}$, $-\text{NCO}$. Το NO καυσίμου εξαρτάται σε μικρό βαθμό από την θερμοκρασία και σχηματίζεται στις μικρότερες θερμοκρασίες καύσης.

Όσον αφορά τις μηχανές Diesel, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων, το θερμικό μονοξείδιο του αζώτου είναι αυτό που επικρατεί στις εκπομπές NO_x . Πέρα από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας καθώς και την συγκέντρωση οξυγόνου στον θάλαμο καύσης, υπάρχουν επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν τις εκπομπές NO τις μηχανής. Οι παράγοντες αυτοί είναι παράγοντες λειτουργίας της μηχανής όπως ο λόγος ισοδυναμίας αέρα-καυσίμου, η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής ή το φορτίο στο οποίο λειτουργεί η μηχανή, η προπορεία έγχυσης καυσίμου και το κλάσμα παραμένου καυσαερίου.

Κατά την έγχυση του στον κύλινδρο, το καύσιμο υφίσταται μία σειρά διεργασιών που οδηγούν στην τελική ανάφλεξη του και καύση. Στους κινητήρες Diesel το καύσιμο εγχέεται στον θάλαμο καύσης σε υγρή μορφή και στη συνέχεια ατμοποιείται και αναμειγνύεται με τον απαιτούμενο αέρα για την καύση του. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μη ομοιόμορφη κατανομή της συγκέντρωσης του καυσίμου και της θερμοκρασίας μέσα στον κύλινδρο ώστε ο σχηματισμός του NO να λαμβάνει χώρα σε ορισμένες μόνο περιοχές όπου επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες.¹³

Ο χρόνος ανάμεσα στην έγχυση του καυσίμου και την έναρξη της καύσης είναι γνωστός ως καθυστέρηση της ανάφλεξης και αποτελεί τον απαραίτητο χρόνο που πρέπει να παρέλθει για την φυσική (σταγονοποίηση, εξάτμιση, ανάμειξη) και χημική (διάσπαση καυσίμου) προετοιμασία του καυσίμου για την ανάφλεξη. Το στάδιο αυτό διαρκεί 1-4 ms και είναι ανεξάρτητο από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα μία απότομη, ανεξέλεγκτη καύση η οποία ξεκινάει από το ήδη προετοιμασμένο καύσιμο του πρώτου σταδίου που βρίσκεται περιμετρικά γύρω από την δέσμη έγχυσης. Το στάδιο αυτό συνοδεύεται από μία απότομη αύξηση της πίεσης. Αν το πρώτο στάδιο της καθυστέρησης αναφλέξεως είναι μεγάλο έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου να είναι έτοιμη για ανάφλεξη κατά το δεύτερο στάδιο της ανεξέλεγκτης καύσης. Κάτι τέτοιο είναι

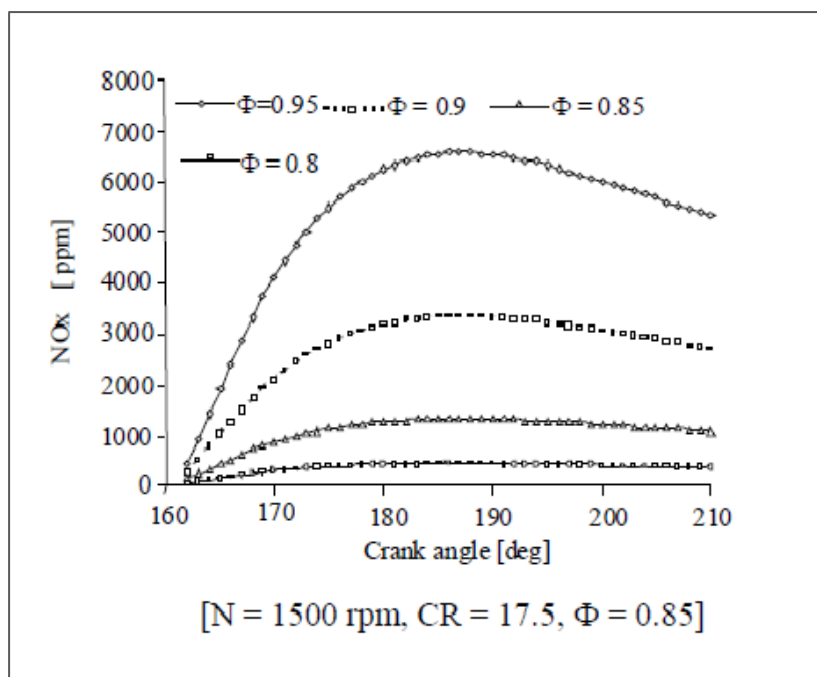
¹³ Δημ. Θ. Χουντάλας, Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος, "Καύση-Ρύπανση εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.", Εκδόσεις Φούντας

πιθανόν να οδηγήσει την πίεση και την θερμοκρασία μέσα στον κύλινδρο σε απαγορευτικές τιμές και για τον λόγο αυτό η καθυστέρηση αναφλέξεως είναι επιθυμητό να ελαττώνεται είτε με την βελτιστοποίηση των συνθηκών καύσης είτε με χρήση καυσίμων με χαμηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης. Μετά το στάδιο της ανεξέλεγκτης καύσης, ακολουθεί το στάδιο της ελεγχόμενης καύσης όπου το εγχεόμενο καύσιμο, σε ιδανικές πλέον συνθήκες, καίγεται χωρίς καθυστέρηση σύμφωνα με τον ελεγχόμενο ρυθμό έγχυσης.¹⁴

Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου είναι άμεσα συνδεδεμένες με τον βαθμό προετοιμασίας του καυσίμου και επομένως από τη διάρκεια του σταδίου καθυστέρησης της ανάφλεξης. Όταν το στάδιο αυτό είναι έχει μεγάλη διάρκεια, μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου θα έχει προετοιμαστεί και θα καεί ανεξέλεγκτα δημιουργώντας υψηλές θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης. Οι μεγαλύτερες αυτές θερμοκρασίες θα επιταχύνουν τον σχηματισμό του θερμικού μονοξειδίου NO όπως έχει ήδη αναφερθεί.

• Επίδραση του φορτίου στον σχηματισμό NO

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 που ακολουθεί, ο σχηματισμός του NO αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου καθώς όταν αυξάνεται η ποσότητα καυσίμου που εγχέεται στον κύλινδρο αυξάνεται τόσο η μέγιστη θερμοκρασία καύσης όσο και ο αριθμός των περιοχών μέσα στον θάλαμο με συγκέντρωση καυσίμου-αέρα κοντά στην στοιχειομετρική τιμή. Καθώς η ρύθμιση του φορτίου στους κινητήρες Diesel πραγματοποιείται μέσω του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου, ο σχηματισμός NO αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου.

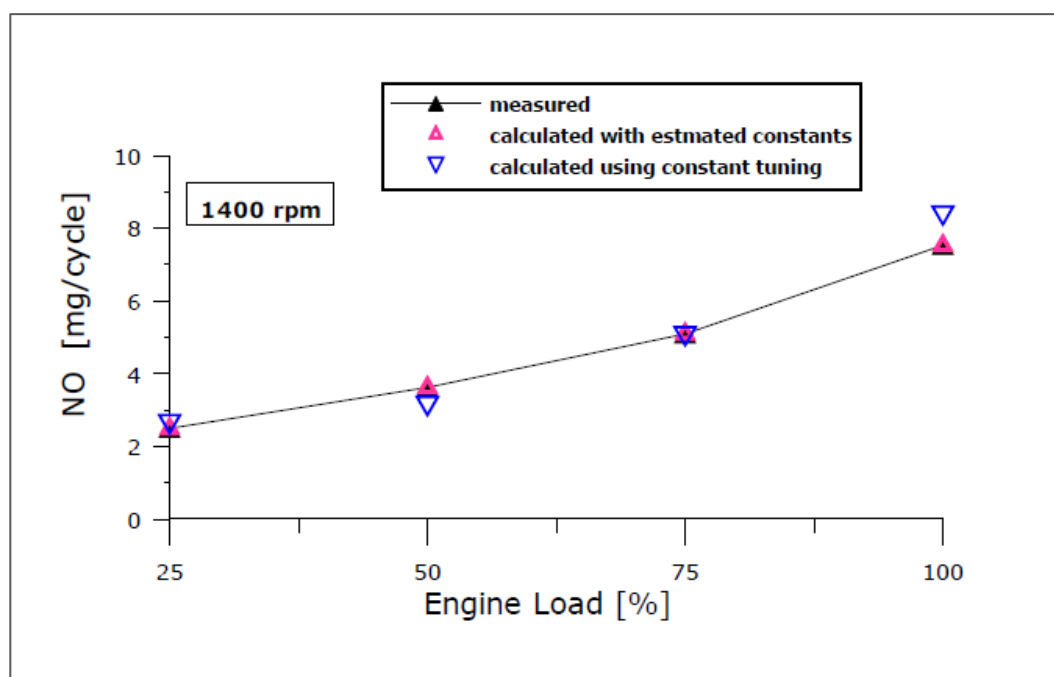


Σχήμα 2.4 Σχηματισμός NO_x συναρτήσει του λόγου αέρα-καυσίμου¹⁵

¹⁴ Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος – "Αρχές Εμβολοφόρων Κινητήρων"

¹⁵ K. Kannan and M. Udayakumar, "Modeling of Nitric Oxide Formation in Single Cylinder Direct Injection Diesel Engine Using Diesel-Water Emulsion", 2009

Στα πολύ χαμηλά φορτία, σχεδόν όλη η ενέργεια του καυσίμου απελευθερώνεται κατά το στάδιο της ανεξέλεγκτης καύσης με αποτέλεσμα οι εκπομπές οξειδίων να είναι σχετικά υψηλές. Καθώς το φορτίο αυξάνεται, η ποσότητα καυσίμου που καίγεται ανεξέλεγκτα παραμένει περίπου σταθερή ενώ η ποσότητα καυσίμου που καίγεται με ελεγχόμενη καύση αυξάνεται γραμμικά. Συνέπεια αυτού, είναι η ποσότητα των παραγόμενων οξειδίων να είναι ανάλογη με την ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται (κατά την ελεγχόμενη καύση επικρατούν στοιχειομετρικές συνθήκες) και οι συνολικές εκπομπές οξειδίων τελικά να αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου. Παρόλα αυτά η αναλογία NO_x και ισχύος παραμένει σταθερή. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η συμπεριφορά των εκπομπών NO_x σε διαφορετικά φορτία λειτουργίας της μηχανής.



Σχήμα 2.5 Μεταβολή εκπομπών NO συναρτήσει του φορτίου της μηχανής¹⁶

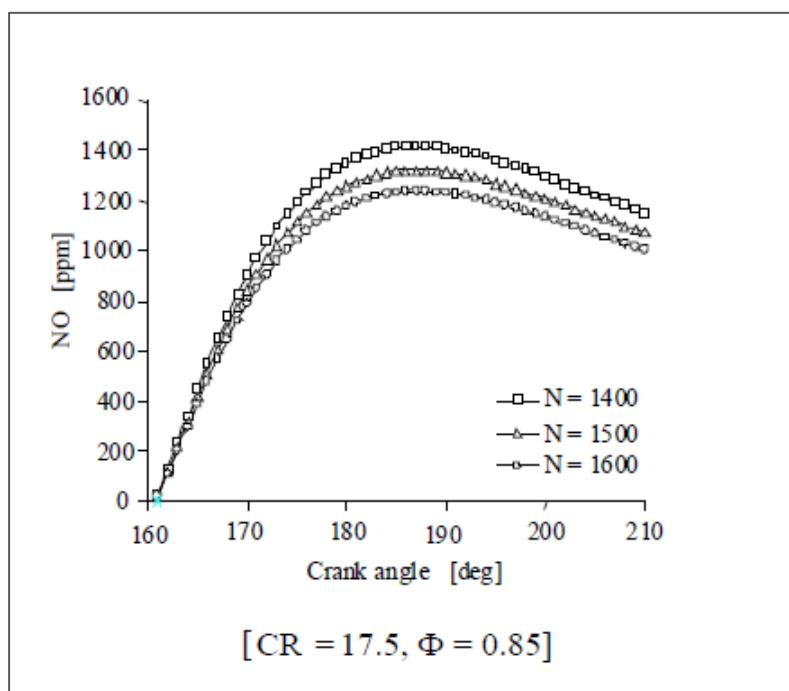
• Επίδραση της ταχύτητας περιστροφής

Γενικά η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής στις εκπομπές NO δεν είναι μονοσήμαντη και δεν μπορεί να προσδιοριστεί με απόλυτο τρόπο καθώς επηρεάζει πολλές επί μέρους διαδικασίες της όλης προετοιμασίας και καύσης του καυσίμου μείγματος στον θάλαμο καύσης.

Το σχήμα 2.6 παρουσιάζει τις εκπομπές NO για διαφορές ταχύτητες περιστροφής σε έναν κινητήρα Diesel. Παρατηρούμε πως καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα, ο σχηματισμός του NO μειώνεται. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι όταν η μηχανή λειτουργεί σε χαμηλές στροφές η διαδικασία της καύσης διαρκεί περισσότερο χρόνο, η θερμοκρασία των αερίων στον κύλινδρο είναι αυξημένη και τα καυσαέρια παραμένουν στον

¹⁶ Γεωργία-Βιργινία Λαμπρούση - "Αξιολόγηση πολυζωνικού μοντέλου καύσης για την πρόβλεψη της επίδρασης διαφόρων λειτουργικών μεγεθών στην συμπεριφορά και την εκπομπή ρύπων κινητήρα Diesel- εφαρμογή στον κύκλο esc των 12 σημείων της Ε.Ε.", Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π.

θάλαμο καύσης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επομένως υπάρχει περισσότερος χρόνος και υψηλότερες θερμοκρασίες που ευνοούν τον σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου. Για τον λόγο αυτό, οι μηχανές χαμηλών στροφών παράγουν γενικά περισσότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου συγκριτικά με τις μηχανές μεσαίων στροφών. Σε γενικές γραμμές πάντως, δεν μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως αύξηση των στροφών μίας μηχανής προκαλεί μείωση των εκπομπών NO.



Σχήμα 2.6 Σχηματισμός NO_x συναρτήσει των στροφών της μηχανής¹⁷

• Επίδραση των παραμενόντων καυσαερίων και της προπορείας έγχυσης

Αρνητική είναι και η συμβολή των καυσαερίων που παραμένουν στον θάλαμο καύσης λόγω της ελλιπής απομάκρυνση τους από τις θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής. Η παρουσία των καυσαερίων μειώνει την θερμοκρασία μέσα στον κύλινδρο χάρη στην αυξημένη θερμοχωρητικότητα τους έναντι του ατμοσφαιρικού αέρα. Η μειωμένη αυτή θερμοκρασία επιδρά αρνητικά περιορίζοντας τον σχηματισμό NO_x. Στο φαινόμενο αυτό στηρίζεται και η τεχνική μείωσης των NO_x μέσω ανακυκλοφορίας των καυσαερίων που θα αναπτυχθεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Όσον αφορά την προπορεία της έγχυσης καυσίμου, όταν αυτή αυξάνεται παρατηρείται μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης στον θάλαμο καύσης γεγονός που συνεπάγεται και την αύξηση των παραγόμενων NO.

¹⁷ K. Kannan and M. Udayakumar, "Modeling of Nitric Oxide Formation in Single Cylinder Direct Injection Diesel Engine Using Diesel-Water Emulsion", 2009

Engine Type	Efficiency [%]	NO _x emissions [g/kWh]
Slow Speed Diesel (60-250 rpm)	48-54	11-21
Medium Speed Diesel (250-1000 rpm)	43-50	8-12
High Speed Diesel (>1000 rpm)	40-43	6-8
Gas turbine 10MW	32-39	0,5-2
Steam turbine*	30-37	-
Gas Diesel Engine, medium speed	43-50	4
Gas Otto engine, medium speed	46-47	1
Gas Otto engine, high speed	37-40	1-2
* not common today		

Σχήμα 2.7 Εκπομπές NO_x ανά τύπο μηχανής¹⁸

• ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ NO₂

Η ποσότητα διοξειδίου του αζώτου που παράγεται από τους εμβολοφόρους κινητήρες είναι πολύ μικρή και αποτελεί μόνο το 1-2% των συνολικών εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) με εξαίρεση τα χαμηλά φορτία λειτουργίας των κινητήρων Diesel όπου η συγκέντρωση του διοξειδίου του αζώτου αυξάνει σημαντικά σε 10-25% και δεν μπορεί να αμεληθεί. Ο σχηματισμός του NO₂ είναι ιδιαίτερα απλός. Το παραγόμενο NO οξειδώνεται λόγω της παρουσίας υδρατμών και σχηματίζει NO₂ σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:



Στη συνέχεια, μέρος του NO₂ μετατρέπεται πάλι σε μονοξείδιο (NO):



Μόνο το NO₂ που δεν ψύχεται λόγω επαφής με τα τοιχώματα του κυλίνδρου συμμετέχει στην αντίδραση [2]. Το υπόλοιπο παραμένει ως έχει και εξέρχεται από τον κύλινδρο με τα υπόλοιπα καυσαέρια. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί γιατί στα χαμηλότερα φορτία λειτουργίας του κινητήρα Diesel το ποσοστό των συγκεντρώσεων NO₂ επί των συνολικών εκπομπών NO_x αυξάνεται. Στα χαμηλά φορτία υπάρχει περισσότερος διαθέσιμος χρόνος ώστε το NO₂ να ψυχθεί και να μην μετατραπεί σε NO. Επιπλέον στα χαμηλά φορτία αυξάνεται ο αριθμός των ψυχρών περιοχών λόγω της έντονα ανομοιόμορφης κατανομής του καυσίμου στον θάλαμο καύσης.

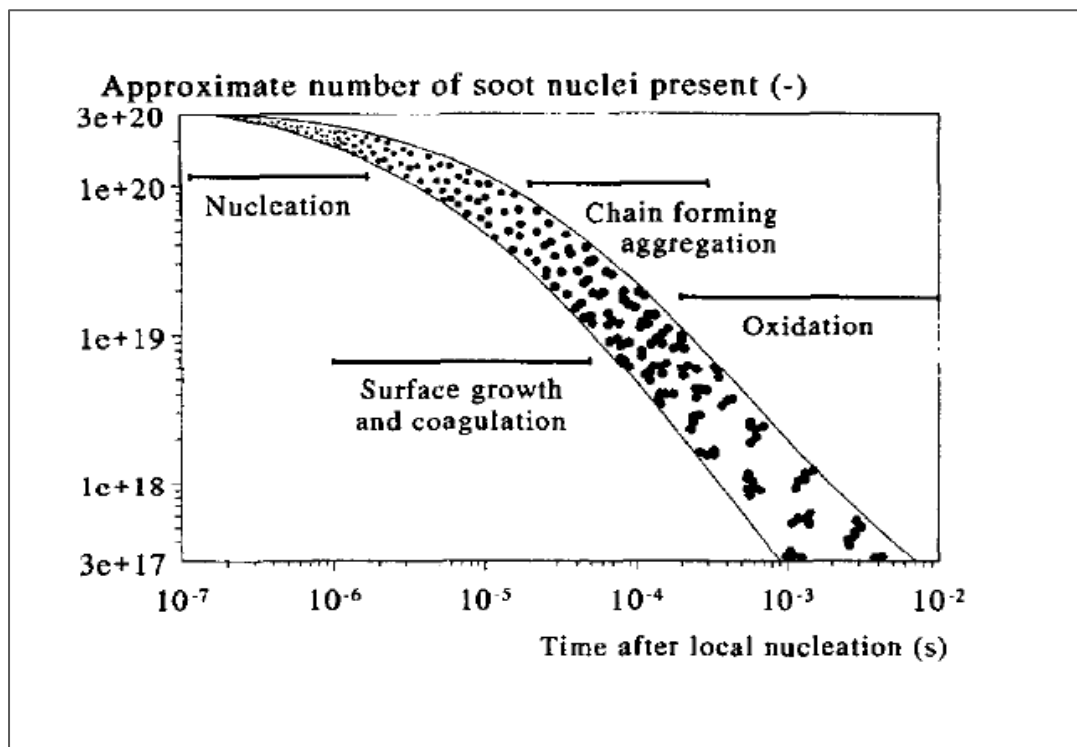
¹⁸ Per Kageson, "Economic Instruments for reducing emissions from sea transport", 1999

2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΚΑΠΝΟΥ (PM)

Οι εκπομπές σωματιδίων καπνού συμπεριλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία σωματιδίων όπως αιθάλη (soot), οξειδία μετάλλων, καθώς και θειικά άλατα όλα προερχόμενα από την ατελή καύση του καυσίμου ή από τις ακαθαρσίες στα καύσιμα και στα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται. Κάθε είδος σωματιδίου ακολουθεί διαφορετικό μηχανισμό σχηματισμού.

Το φαινόμενο σχηματισμού των σωματιδίων αιθάλης δεν έχει ακόμα κατανοηθεί πλήρως παρόλη την σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί ως προς την κατανόηση των βασικών αρχών του τις δύο τελευταίες δεκαετίες. Τα απλοποιημένα μοντέλα προσομοίωσης του σχηματισμού σωματιδίων κατά την διάρκεια της καύσης που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα, είχαν περιορισμένη επιτυχία. Σήμερα, τα μοντέλα που εφαρμόζονται είναι εμπειρικά και έχουν καταφέρει την προσομοίωση του μηχανισμού αυτού μόνο κατά τα πρώιμα στάδια του.

Είναι πλέον καθιερωμένο πως ο σχηματισμός της αιθάλης πραγματοποιείται μέσω μιας σειράς διακεκριμένων σταδίων: την πυρόλυση, το στάδιο δημιουργίας πυρήνων, το στάδιο ανάπτυξης εξωτερικής επιφάνειας, το στάδιο της πήξης (coagulation), το στάδιο της συσσωμάτωσης (aggregation), και τέλος το στάδιο της οξείδωσης. Οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες που ποικίλουν από μερικά microseconds (σχηματισμός πυρήνων) έως μερικά milliseconds (ολοκλήρωση σχηματισμού της αιθάλης και οξείδωση) όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.8 Πυκνότητα σωματιδίων αιθάλης συναρτήσει του χρόνου¹⁹

¹⁹ John P.A. Neeft, Michiel Makkee and Jacob A. Moulijn, " Diesel particulate emission control", 1995

Πυρόλυση είναι το στάδιο κατά την οποία μόρια σε αέρια κατάσταση δημιουργούν πρόδρομα μόρια αιθάλης από ελεύθερες ρίζες. Υπάρχουν δύο τύποι πυρόλυσης: η πυρόλυση που πραγματοποιείται στις ζώνες αντίδρασης χωρίς οξυγόνο και η πυρόλυση που πραγματοποιείται σε ζώνες με οξυγόνο. Έρευνες έχουν δείξει ότι η πυρόλυση πραγματοποιείται με μεγαλύτερο ρυθμό στις ζώνες με μικρές ποσότητες οξυγόνου (O₂, O, ή OH) συγκριτικά με τις ζώνες χωρίς παρουσία οξυγόνου αλλά επιβραδύνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και την μείωση του λόγου αέρα-καυσίμου. Και στους δύο τύπους πυρόλυσης τα αλειφατικά και αρωματικά μόρια του καυσίμου (αρωματικοί υδρογονάνθρακες) διασπώνται πρώτα σε ολεφίνες και στη συνέχεια σχηματίζουν μόρια ασετιλίνης τα οποία είναι πρόδρομοι της αιθάλης.

Στο στάδιο της πυρήνωσης, οι πρόδρομες ενώσεις της αιθάλης που δημιουργήθηκαν κατά την πυρόλυση μετατρέπονται μέσω πολυμερισμού σε πυρήνες σωματιδίων αιθάλης όταν συγκεντρωθεί επαρκής ποσότητα μάζας. Οι πυρήνες αιθάλης αυτοί είναι ουσιαστικά μεγάλα μόρια πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAHs). Αυτό είναι και το στάδιο όπου εμφανίζεται για πρώτη φορά η επιφάνεια των σωματιδίων. Η οξειδωση των μορίων του καυσίμου που έχουν υποστεί πυρόλυση λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες και σε υψηλές συγκεντρώσεις αντιδραστικών ουσιών όπως ιόντα και ρίζες υδρογονανθράκων, O και OH. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο ρυθμός αποσύνθεσης των πυρήνων αιθάλης είναι μικρότερος από τον ρυθμό αντίδρασης τους με τις αντιδραστικές ουσίες με αποτέλεσμα την σταδιακή δημιουργία ενός πλέγματος από πυρήνες αιθάλης. Σύμφωνα με αποτελέσματα ερευνών, ο αρχικός αριθμός πυρήνων αιθάλης σε ένα κύλινδρο μηχανής Diesel είναι $2,5 \times 10^{20}$ πυρήνες ανά m⁻³ δηλαδή 250 πυρήνες ανά κυβικό μικρόμετρο.

Το στάδιο ανάπτυξης της εξωτερικής επιφάνειας είναι αυτό κατά το οποίο τα πρόδρομα μόρια (1-2 nm) αναπτύσσονται σε μέγεθος προσθέτοντας άτομα άνθρακα και φθάνουν τα 10-30 nm. Η πιο σημαντική αντίδραση του σταδίου αυτού είναι η γρήγορη πρόσθεση μορίων ασετιλίνης και πολύ-ασετιλίνης μέσω ενός μηχανισμού παρόμοιου με αυτόν της πυρήνωσης. Κατά την διαδικασία αυτή ο λόγος υδρογόνου/άνθρακα (H/C) της αιθάλης μειώνεται. Αυτό οφείλεται στον μικρότερο λόγο H/C των μορίων ασετιλίνης σε σχέση με αυτό των πυρήνων αιθάλης και στις αντιδράσεις αφυδρογόνωσης που λαμβάνουν χώρα. Ο ρυθμός σχηματισμού αιθάλης κατά το στάδιο ανάπτυξης επιφάνειας εξαρτάται μόνο από τον αριθμό πυρήνων που συμμετέχουν. Η διαδικασία της ανάπτυξης της επιφάνειας πραγματοποιείται αμέσως μετά (μόλις μετά από μερικά μs έως 0,05 ms) τον σχηματισμό των πυρήνων. Παράλληλα πραγματοποιείται και μία επιπλέον διεργασία, αυτή της πήξης (coagulation). Κατά την πήξη, μικρά σωματίδια αιθάλης συγκρούονται και ενώνονται σχηματίζοντας μεγαλύτερα και πιο σφαιρικά σωματίδια. Μολονότι αυτή η διαδικασία συνεισφέρει στην ανάπτυξη του μεγέθους των σωματιδίων, η διαδικασία ανάπτυξης της επιφάνειας θεωρείται η πιο σημαντική διαδικασία για την αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων.

Το στάδιο της συσσωμάτωσης ξεκινάει 0,02-0,07 ms μετά την πυρήνωση και είναι υπεύθυνο για τον σχηματισμό της γνωστής δομής "fractal" της αιθάλης. Η διεργασία αυτή πραγματοποιείται εκτός του κυλίνδρου (δεν έχουν βρεθεί αλυσιδωτές δομές μέσα στον κύλινδρο). Τα σφαιρικά σωματίδια αιθάλης (μεγέθους 20 nm), συγκρούονται, σε βαθμό ανάλογο με τον αριθμό των σωματιδίων στο τετράγωνο, και σχηματίζουν δομές αλυσίδας με τελικές διαστάσεις μερικών εκατοντάδων nm.

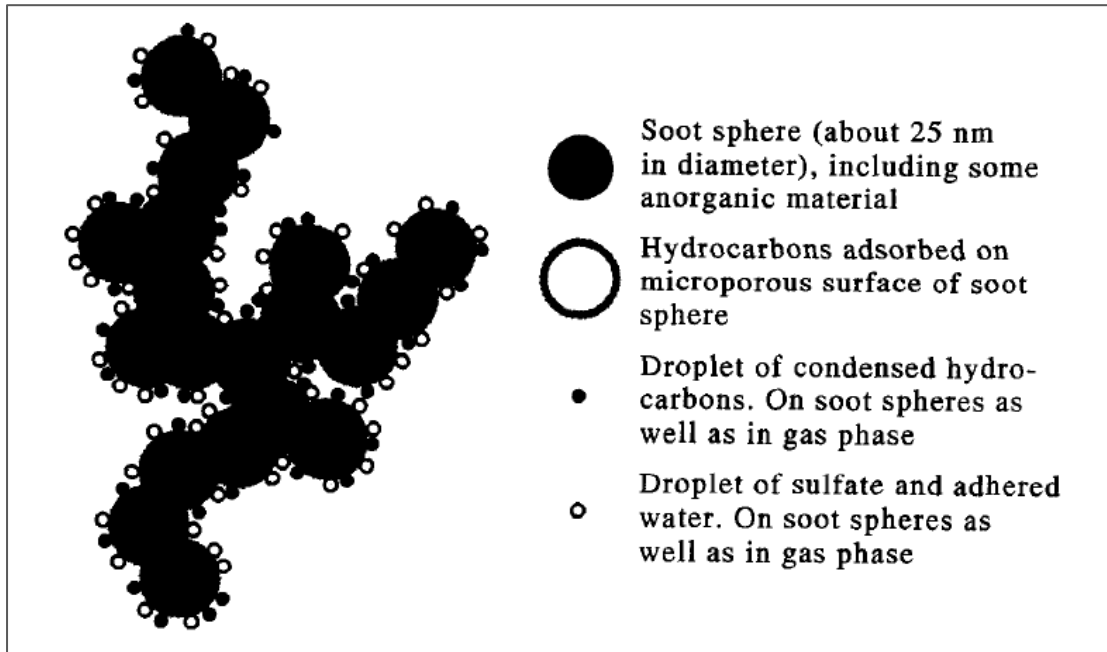
Το στάδιο της οξειδωσης της αιθάλης πραγματοποιείται εντός και εκτός κυλίνδρου στο σύστημα της εξάτμισης. Κατά τις διεργασίες της ανάπτυξης επιφάνειας και της πήξης οι αντιδράσεις οξειδωσης δεν διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Τα σημαντικότερα οξειδωτικά μέσα είναι οι ελεύθερες ρίζες OH, O και O₂ αν και τα μόρια CO₂ και H₂O συμμετέχουν σε μερικό βαθμό επίσης στην οξειδωση της αιθάλης. Η ποσότητα αιθάλης που θα οξειδωθεί εξαρτάται από την θερμοκρασία, τον χρόνο και την συγκέντρωση οξειδωτικών μέσων και υπολογίζεται πως από το σύνολο σωματιδίων της αιθάλης πάνω από το 60% οξειδώνεται.

Το μέγεθος που θα έχουν τελικά τα σωματίδια αλλά και η συγκέντρωσή τους εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την περιοχή μέσα στον κύλινδρο στην οποία θα αναπτυχθούν. Κοντά στα τοιχώματα και την κορυφή του κυλίνδρου η απώλεια θερμότητας που λαμβάνουν χώρα αποτρέπουν την καταστροφή των σωματιδίων αιθάλης με αποτέλεσμα αυτά να εμφανίζονται σε μεγάλα μεγέθη. Η συγκεντρώσεις αιθάλης στην περιοχή αυτή είναι μικρότερες κατά μία τάξη μεγέθους συγκριτικά με αυτές που σχηματίζονται στον πυρήνα της δέσμης καυσίμου. Αντίστοιχα, στο εσωτερικό του κυλίνδρου λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών, προκαλείται μερική καταστροφή των σωματιδίων αιθάλης καθώς συγκρούονται μεταξύ τους και επομένως το μέγεθος τους παραμένει μικρό. Στην περιοχή αυτή οι συγκεντρώσεις αιθάλης αυξάνουν ραγδαία με την έναρξη της καύσης και μειώνονται σημαντικά μετά την ολοκλήρωση της έγχυσης του καυσίμου. Η διαδικασία αυτή είναι σύμφυτη με την καύση στους κινητήρες Diesel και εξαρτάται μόνο μερικώς από την ποιότητα του καυσίμου που καταναλώνεται.

Μετά την έξοδο τους από το κύλινδρο, τα καυσαέρια καταλήγουν στο σύστημα εξάτμισης όπου και ψύχονται. Εκεί τα σωματίδια αιθάλης αναμειγνύονται με επιπλέον ουσίες. Οι ουσίες αυτές αποτελούνται από υδρογονάνθρακες, θειικά άλατα, θειικό οξύ και υδρατμούς και προέρχονται από την συμπύκνωση των αερίων στο σύστημα της εξάτμισης και της ανάμειξης τους με τον πιο ψυχρό αέρα της ατμόσφαιρας. Τα θειικά άλατα εμφανίζονται από τον συνδυασμό των οξειδίων του θείου και του νερού στην εξάτμιση και το επίπεδο των συγκεντρώσεων τους επηρεάζεται άμεσα από το υψηλό περιεχόμενο σε θείο των καυσίμων που χρησιμοποιούνται από τους ναυτικούς κινητήρες. Το σύνολο των σωματιδίων της αιθάλης και των υπολοίπων ουσιών είναι γνωστό με την ονομασία "σωματίδια καπνού" (particulates) και περιέχουν τοξικούς και καρκινογόνους υδρογονάνθρακες.

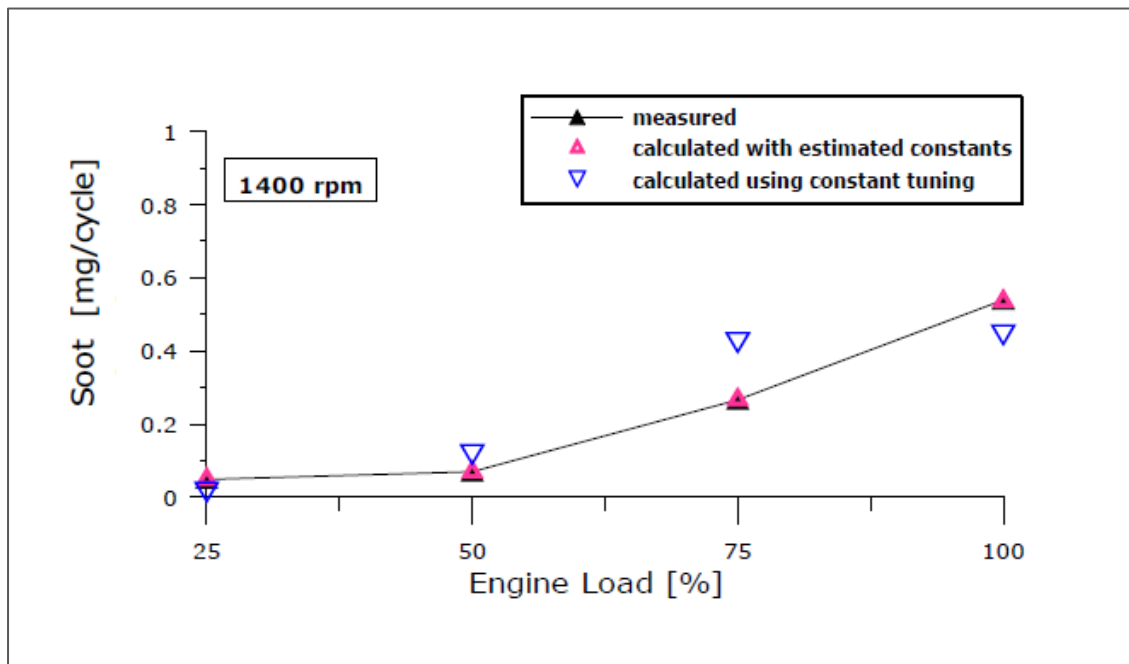
Η πιο σημαντική παράμετρος λειτουργίας της μηχανής που επηρεάζει τον σχηματισμό σωματιδίων είναι το φορτίο. Καθώς το φορτίο αυξάνεται, οι εκπομπές σωματιδίων ακολουθούν επίσης εκθετική αύξηση. Αντίθετα, μείωση των εκπομπών σωματιδίων προκαλείται από την αύξηση της προπορείας της έγχυσης η οποία όμως προκαλεί την αύξηση των εκπομπών NO γεγονός που προβληματίζει τους σχεδιαστές κινητήρων Diesel.²⁰

²⁰ Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος, Δημ. Θ. Χουντάλας, "Καύση-Ρύπανση εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.", Εκδόσεις Φούντας



Σχήμα 2.9 Σύνθεση σωματιδίων καπνού (Diesel Particulates)²¹

Η εκπομπή σωματιδίων του καπνού επηρεάζεται από τη σχεδίαση και τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής. Σύμφωνα με μελέτες, το σύνολο των εκπομπών σωματιδίων του καπνού τείνει να αυξηθεί καθώς αυξάνονται το φορτίο λειτουργίας (Σχήμα 2.10) και η ταχύτητα της μηχανής λόγω της μειωμένης ποιοτικά ανάμειξης αέρα-καυσίμου που λαμβάνει χώρα στα αυξημένα φορτία και στροφές. Αντίθετα, για τον ίδιο λόγο, κάνοντας χρήση ενός προηγμένου συστήματος έγχυσης καυσίμου, οι εκπομπές σωματιδίων μειώνονται.

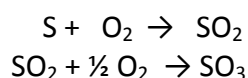


Σχήμα 2.10 Μεταβολή εκπομπών Αιθάλης συναρτήσει του φορτίου της μηχανής²²

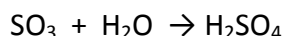
²¹ John P.A. Neeft, Michiel Makkee and Jacob A. Moulijn, " Diesel particulate emission control", 1995

2.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ

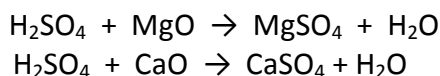
Η μόνη πηγή θείου για τον σχηματισμό των οξειδίων του θείου (SO_x) κατά την διαδικασία της καύσης στους δίχρονους κινητήρες Diesel είναι το ίδιο το καύσιμο που καταναλώνεται. Όλα τα άτομα θείου (S) που συμμετέχουν στην καύση οξειδώνονται και σχηματίζουν τα οξείδια του θείου. Τα οξείδια αυτά αποτελούνται από SO₂ σε ποσοστό 95% και από SO₃ σε ποσοστό μόλις 5% και σχηματίζονται σύμφωνα με τις ακόλουθες αντιδράσεις:



Το τριοξείδιο του θείου SO₃ αντιδρά στη συνέχεια με τους υδρατμούς και σχηματίζει θειικό οξύ το οποίο είναι υπεύθυνο για προβλήματα διάβρωσης του κινητήρα και του συστήματος εξάτμισης:



Η ποσότητα του θειικού οξέος που παράγεται εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία στην επιφάνεια του κυλίνδρου, τις σχετικές συγκεντρώσεις νερού και SO₃. Το θειικό οξύ που σχηματίζεται είναι δυνατόν να περιοριστεί με την παρουσία στο σύστημα των καυσαερίων μονοξειδίου του μαγνησίου (MgO) ή μονοξειδίου του ασβεστίου (CaO) τα οποία θα αντιδράσουν με τα οξέα σχηματίζοντας τα αδρανή θειικά άλατα ασβεστίου και μαγνησίου:



Η ποσότητα SO_x που τελικά θα σχηματιστεί είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί πως τα οξείδια του θείου εμφανίζονται στα καυσαέρια συνήθως των μεγάλων δίχρονων κινητήρων Diesel καθώς σε αυτούς γίνεται χρήση των βαρύτερων ακατέργαστων καυσίμων με μεγάλη συγκέντρωση θείου. Γίνεται επομένως σαφές ότι όταν απαιτείται μείωση των εκπομπών των οξειδίων του θείου από τα καυσαέρια των κινητήρων αυτών, είναι απαραίτητη είτε η αλλαγή του καυσίμου και χρήσης ενός με μικρότερη περιεκτικότητα σε θείο είτε η χρήση τεχνικών που απομακρύνουν τα οξείδια του θείου από το σύστημα της εξάτμισης μετά τον σχηματισμό τους. Αλλαγές στην σχεδίαση και τις παραμέτρους λειτουργίας της μηχανής (στροφές, φορτίο λειτουργίας, χρονισμός έγχυσης κλπ) δεν επιφέρουν σημαντικό αποτέλεσμα στις εκπομπές SO_x. Οι τεχνικές μείωσης των οξειδίων του θείου παρουσιάζονται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 4.

²² Γεωργία-Βιργινία Λαμπρούση- "Αξιολόγηση πολυζωνικού μοντέλου καύσης για την πρόβλεψη της επίδρασης διαφόρων λειτουργικών μεγεθών στην συμπεριφορά και την εκπομπή ρύπων κινητήρα Diesel- εφαρμογή στον κύκλο esc των 12 σημείων της Ε.Ε.", Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π.

2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Όπως είναι γνωστό κατά την αντίδραση των υδρογονανθράκων (HC) με το οξυγόνο κατά την διαδικασία της τέλει καύσης παράγεται διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και νερό (H_2O) και εκλύεται ενέργεια. Η ποσότητα ενέργειας αυτή είναι ανάλογη με την ποσότητα CO_2 που σχηματίζεται και η οποία είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη δομή του μορίου του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, δεδομένης μίας ποσότητας ενέργειας, το φυσικό αέριο παράγει τις μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα λόγω της αναλογίας υδρογόνου-άνθρακα σε αυτό η οποία είναι η μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή των υπόλοιπων καυσίμων υδρογονανθράκων. Τα υγρά παράγωγα του πετρελαίου καύσιμα απελευθερώνουν το περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα μετά τον λιγνίτη.

Η μείωση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα είναι επομένως δυνατή μόνο μέσω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου του κινητήρα και με χρήση πιο ενεργειακά πλούσιων καυσίμων.

Σε πραγματικές συνθήκες καύσης σε κινητήρες, η τέλεια καύση είναι πρακτικώς αδύνατη με αποτέλεσμα την εμφάνιση στα καυσαέρια επιπλέον ουσιών, μεταξύ αυτών, του μονοξειδίου του άνθρακα CO καθώς και των άκαυστων υδρογονανθράκων.

Το CO σχηματίζεται κατά μη ευσταθή τρόπο όπως συμβαίνει και με το NO αλλά τα προτεινόμενα συστήματα χημικών αντιδράσεων για τον σχηματισμό το CO δεν θεωρούνται ακόμα επιτυχή. Θεωρείται ενδιάμεσο προϊόν της καύσης των υδρογονανθράκων και εμφανίζεται στα καυσαέρια όταν η συνθήκες δεν του επιτρέπουν την περαιτέρω αντίδραση του προς σχηματισμό CO_2 . Οι συνθήκες αυτές είναι η έλλειψη οξυγόνου κοντά στα μόρια του καυσίμου στον θάλαμο καύσης ώστε να μην είναι δυνατή η στοιχειομετρική καύση του μείγματος αέρα-καυσίμου, η χαμηλή θερμοκρασία κατά την καύση και η πολύ μικρή παραμονή των καυσαερίων στον κύλινδρο μετά την ολοκλήρωση της καύσης. Βασικότερη από τις συνθήκες αυτές είναι η έλλειψη οξυγόνου. Επομένως, το μονοξείδιο του άνθρακα εμφανίζεται σε μεγάλες ποσότητες όταν το μείγμα είναι πλούσιο, δηλαδή ο λόγος αέρα-καυσίμου είναι μικρότερος του 1 ($\lambda_\alpha < 1$), και σε μικρότερες ποσότητες όταν το μείγμα είναι φτωχό ($\lambda_\alpha > 1$)²³. Στους κινητήρες Otto, όπου η καύση είναι πιο κοντά στην στοιχειομετρική, οι εκπομπές CO είναι έντονες ενώ στους κινητήρες Diesel, όπου η καύση πραγματοποιείται με περίσσεια αέρα η συγκέντρωση CO είναι περιορισμένη.²⁴ Τέλος αρνητική επίδραση στις εκπομπές CO φαίνεται να έχει και το φορτίο λειτουργίας της μηχανής όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.11. Ο ρυθμός οξειδωσης του CO προς σχηματισμό CO_2 περιορίζεται από την κινητική των αντιδράσεων και συνεπώς η βελτιωμένη ανάμειξη αέρα-καυσίμου μπορεί να αυξήσει τον ρυθμό αυτό μέχρι ενός βαθμού.

²³ Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος – "Αρχές Εμβολοφόρων Κινητήρων"

²⁴ Δημ. Θ. Χουντάλας, Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος, "Καύση-Ρύπανση εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.", Εκδόσεις Φούντας



Σχήμα 2.11 Μεταβολή εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου της μηχανής²⁵

Η παρουσία άκαυστων υδρογονανθράκων στα καυσαέρια του κινητήρα συνεπάγεται την ατελή καύση του καυσίμου στον θάλαμο καύσης με αποτέλεσμα άκαυστα ή μερικώς καμένα μόρια υδρογονανθράκων να καταλήγουν μεταξύ των καυσαερίων. Ανάμεσα στα καυσαέρια παρατηρούνται διάφορα είδη υδρογονανθράκων, από τα οποία τα σπουδαιότερα είναι οι παραφίνες, οι ολεφίνες και οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες. Οι υδρογονάνθρακες αυτοί προέρχονται είτε απευθείας από το καύσιμο είτε είναι προϊόντα πολυμερισμού ή πυρόλυσης του. Το φαινόμενο των υδρογονανθράκων στα καυσαέρια οφείλεται κυρίως στην μεταφορά σταγονιδίων καυσίμου εκτός των ζωνών καύσης μέσα στον κύλινδρο του κινητήρα δηλαδή στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης και στις περιοχές κοντά σε αυτά όπου οι θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα μικρές για την συντήρηση καύσης. Η ύπαρξη άκαυστων ή μερικών καμένων μορίων υδρογονανθράκων στους κινητήρες Diesel αποδίδεται στους εξής παράγοντες:

◊ Φτωχό καύσιμο μείγμα που δεν είναι ικανό για αυτανάφλεξη ή να συντηρήσει την καύση. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στο καύσιμο που εγχέεται κατά την διάρκεια της καθυστέρησης ανάφλεξης. Το καύσιμο που εγχέεται μετά το στάδιο αυτό (κατά την ελεγχόμενη καύση) οξειδώνεται ραγδαία κι οδηγεί σε πρακτικά τέλεια καύση.²⁶

◊ Υποαναμειξιμότητα του αέρα και του καυσίμου λόγω της αργοπορημένης έγχυσης καυσίμου κατά το τέλος της καύσης (το καύσιμο αυτό είχε παραμείνει στον σάκο του εγχυτήρα). Το

²⁵ Γεωργία-Βιργινία Λαμπρούση - "Αξιολόγηση πολυζωνικού μοντέλου καύσης για την πρόβλεψη της επίδρασης διαφόρων λειτουργικών μεγεθών στην συμπεριφορά και την εκπομπή ρύπων κινητήρα Diesel- εφαρμογή στον κύκλο esc των 12 σημείων της Ε.Ε."

²⁶ Δημ. Θ. Χουντάλας, Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος, "Καύση-Ρύπανση εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ.", Εκδόσεις Φούντας

φαινόμενο αυτό μπορεί να βελτιστοποιηθεί με μία πιο ποιοτική έγχυση καυσίμου μέσω βελτιστοποιημένων εγχυτήρων (με βελτιστοποιημένο μέγεθος σάκου).

◊ Ύπαρξη μεγάλων διαστάσεων σταγονιδίων κατά την έγχυση του καυσίμου. Το φαινόμενο αυτό βελτιώνεται με χρήση ακροφυσίων πολλών οπών ώστε να επιτυγχάνεται πιο λεπτός διασκορπισμός του καυσίμου.

◊ Χαμηλή θερμοκρασία στα τοιχώματα του κύλινδρου λόγω υπερβολικής ψύξης του που οδηγεί σε σβέση της φλόγας.

Όλες οι παραπάνω συνθήκες μπορεί να είναι αποτέλεσμα ελλιπούς συντήρησης ή λανθασμένης σχεδίασης του κινητήρα. Επίσης όπως γίνεται φανερό, τεχνικές που αποσκοπούν στην μείωση ορισμένων ρύπων είναι πιθανό να προκαλέσουν την αύξηση των άκαυστων υδρογονανθράκων και CO στα καυσαέρια. Για παράδειγμα, τεχνικές μείωσης των εκπομπών NO_x στηρίζονται στην μείωση των θερμοκρασιών μέσα στον θάλαμο καύσης, οι μειωμένες όμως θερμοκρασίες συνεπάγονται την αύξηση των συγκεντρώσεων CO και άκαυστων HC.

3. ΟΡΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ

Ήδη από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα διαφάνηκε η ανάγκη θέσπισης ορίων για τις εκπομπές ρύπων από τις θερμικές μηχανές σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας. Πλέον έχουν θεσπιστεί όρια για τις εκπομπές ρύπων στα μέσα μεταφοράς, στην βιομηχανία, και στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα μία σημαντική μείωση των παραγόμενων ρύπων κατά 60% παρά την αύξηση του πληθυσμού και του αριθμού των οχημάτων που κυκλοφορούν παγκοσμίως. Τα καυσαέρια των οποίων οι εκπομπές υπόκεινται σε νομικούς περιορισμούς είναι τα οξείδια του αζώτου, τα οξείδια του θείου και το διοξείδιο του άνθρακα, τα οποία είναι τα πιο συνηθισμένα αέρια, εκλύονται σε μεγάλες ποσότητες και είναι ιδιαίτερα επιζήμια για τον ανθρώπινο οργανισμό και το περιβάλλον. Κάθε ήπειρος/χώρα έχει θεσπίσει διαφορετικά όρια εκπομπών τα οποία γίνονται όλο και αυστηρότερα με τη πάροδο των ετών.

Μολονότι ο έλεγχος των ρύπων των αυτοκινήτων και των λοιπών πηγών παραγωγής καυσαερίων έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί τα τελευταία σαράντα χρόνια με πολύ θετικά αποτελέσματα, η ανάγκη παρακολούθησης και περιορισμού των ρύπων της παγκόσμιας ναυτιλίας διαφάνηκε μόνο πρόσφατα. Η συμβολή των πλοίων και των λιμανιών στην ατμοσφαιρική μόλυνση είναι σημαντική και αυξάνεται συνεχώς με την ανάπτυξη του θαλάσσιου εμπορίου καθιστώντας, σε ορισμένες πόλεις και λιμάνια, την μόλυνση από τα πλοία ως την πρώτη πηγή μόλυνσης. Ως παράδειγμα αναφέρεται η ακτή του Los Angeles η οποία αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα λιμάνια και μία από τις πιο μολυσμένες περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής. Σύμφωνα με το South Coast AQMD (Air Quality Management District), τα μεγάλα ποντοπόρα πλοία αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες πηγές παραγωγής NO_x της περιοχής εκπέμποντας περισσότερους ρύπους από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, τα πλοία αυτά κατηγορούνται για το 70% των παραγόμενων οξειδίων του θείου της περιοχής αλλά και τις εκπομπές σωματιδίων του καπνού οι οποίες και πρέπει να μειωθούν τουλάχιστον κατά 90% ώστε να συμμορφωθούν με τα εθνικά όρια εκπομπών σωματιδίων μέχρι το 2014.

Όπως γίνεται φανερό, οι εκπομπές ρύπων εξαιτίας της λειτουργίας των πλοίων δεν είναι ισομερώς κατανομημένες αλλά συγκεντρώνονται στις ακτογραμμές και στις θαλάσσιες οδούς. Σύμφωνα με μελέτες, το 70 % των εκπομπών ρύπων από την ναυτιλία εμφανίζεται σε παράκτια περιοχή πλάτους 400 χιλιομέτρων ενώ το 74-83% του συνόλου των σκαφών βρίσκεται ανά πάσα στιγμή σε ακτίνα 200 ναυτικών μιλίων από την ξηρά. Συνεπώς, η επίδραση της παγκόσμιας ναυτιλίας στις συγκεντρώσεις NO_x και SO_x είναι υψηλότερη στο βόρειο ημισφαίριο, ιδιαίτερα κατά μήκος των δυτικών και ανατολικών ακτών των Ηνωμένων Πολιτειών, της Βόρειας Ευρώπης και του Βορείου Ειρηνικού Ωκεανού.²⁷

²⁷ Brigitte Behrends and Gerd Liebezeit, "A theoretical Environmental Impact Assessment of the Use of a Seawater Scrubber to Reduce SO_x and NO_x Emissions from Ships", Research Center Terramane, Wilhelmshaven, Germany

Ο έλεγχος των εκπομπών καυσαερίων των πλοίων και πιο συγκεκριμένα των μεγάλων φορτηγών πλοίων, είναι ιδιαίτερα δυσχερής λόγω της κακής ποιότητας καυσίμου που χρησιμοποιούν αλλά και λόγω του εύρους των περιοχών στις οποίες κινούνται και από τις οποίες εφοδιάζονται με καύσιμα καθώς οι περιοχές αυτές υπόκεινται σε διαφορετική κυρίαρχη δικαιοδοσία και νομοθεσία. Τα περισσότερα μεγάλα φορτηγά πλοία έπλεαν μέχρι πρόσφατα εντελώς ανεξέλεγκτα σε θάλασσες και ωκεανούς χωρίς τη δυνατότητα ελέγχου. Πλέον τα καινούρια πλοία συμμορφώνονται εκ κατασκευής με τους πρόσφατα θεσπισμένους κανονισμούς της IMO και της EPA αλλά ένας μεγάλος αριθμός, παλαιότερης κατασκευής, πλοίων παραμένει με παλαιάς τεχνολογίας μηχανές μη εφοδιασμένες με τις σύγχρονες τεχνικές μείωσης των ρύπων εντείνοντας με αυτό τον τρόπο το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά τα όρια εκπομπών που έχουν θεσπιστεί για τους ρύπους από τις ναυτικές μηχανές Diesel δίνοντας έμφαση στις μηχανές των μεγάλων ποντοπόρων πλοίων όπως τα φορτηγά πλοία, τα κρουαζιερόπλοια και τα τάνκερ. Τα πλοία αυτά, ως γνωστόν χρησιμοποιούν για την κίνηση τους ογκώδεις μηχανές Diesel με ισχύ από 2.500 έως 70.000 kW. Τα πλοία αυτά είναι εφοδιασμένα επίσης με μια ποικιλία βοηθητικών μηχανών Diesel διαφόρων μεγεθών και αποδόσεων για την κάλυψη των εσωτερικών αναγκών τους σε ηλεκτρικό ρεύμα.²⁸

3.1 ΟΡΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ NO_x ΚΑΙ SO_x

3.1.1 MARPOL Annex VI

Η International Marine time Organization (IMO) αποτελεί μία οργάνωση των Ηνωμένων Εθνών για την προώθηση της ασφάλειας στην ναυτιλία και την πρόληψη της μόλυνσης του περιβάλλοντος από την λειτουργία των πλοίων.²⁹ Ιδρύθηκε το 1948 στην Γένοβα και συμμετέχουν σε αυτήν 167 κράτη μέλη. Αποστολή της είναι η αντιμετώπιση των ναυτικών θεμάτων που προκύπτουν μέσω συμβάσεων, κωδίκων και κατευθυντήριων γραμμών ενώ παρακινεί τα μέλη της να συμμορφώνονται και να ενσωματώνουν τα πρότυπα αυτά στην εγχώρια νομοθεσία τους.

Η IMO έχει θεσπίσει νόμους για την μόλυνση από τα πλοία που περιέχονται στο "International Convention on the Prevention of Pollution from Ships" γνωστό ως MARPOL 73/78 και το οποίο αφορά όλα τα πλοία που βρίσκονται κάτω από σημαία κρατών που έχουν υπογράψει το πρωτόκολλο αλλά και τα πλοία άλλων κρατών που πλέον στα ύδατα τους (τα πλοία αυτά αποτελούν πάνω από το 98,7% της παγκόσμιας ναυτιλίας). Το πρωτόκολλο αυτό αποτελείται αρχικά από πέντε παραρτήματα (5 Annexes) καθένα από τα οποία αφορούσε διαφορετικό τύπο μόλυνσης από τα πλοία. Το 1997, έγιναν ορισμένες τροποποιήσεις στο «πρωτόκολλο 1997» που περιλαμβάνουν την πρόσθεση του έκτου παραρτήματος (Annex VI) με τίτλο «Κανονισμοί για την πρόληψη της μόλυνσης του αέρα από τα πλοία» ("Regulations for

²⁸ Brian Shrader, "U.S. Regulation of Large Marine Diesel Engines under MARPOL Annex VI", Sea Grant and Policy Journal, Vol 1, No. 2 (December 2008)

²⁹ International Maritime Organization, Introduction to IMO, <http://www.imo.org/About/Pages/Default.aspx>

the Prevention of Air Pollution from Ships"). Το MARPOL Annex VI, το οποίο αναθεωρήθηκε το Μάιο του 2004, καθορίζει τα όρια εκπομπών NO_x και SO_x³⁰ από τα πλοία και απαγορεύει την εκούσια εκπομπή ουσιών που βλάπτουν την στιβάδα του όζοντος. Ένα πλοίο εξαιρείται από την συμμόρφωση στα όρια αυτά μόνο σε περίπτωση συμμετοχής σε επιχείρηση διάσωσης ή σε περίπτωση βλάβης που δεν οφείλεται σε λάθος του κυβερνήτη του.³¹ Το παράρτημα αυτό τέθηκε σε εφαρμογή στις 19 Μαΐου, 2005.

Στην πρώτη του μορφή το 1997, το MARPOL Annex VI έκανε ένα πρώτο μικρό βήμα για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής μόλυνσης από τα πλοία θεσπίζοντας πρότυπα για τις εκπομπές ρύπων και τη σύσταση των καυσίμων. Παράλληλα θέσπισε τις Περιοχές Ελέγχου Ρύπων (ECA- Emission Control Areas) οι οποίες πρόκειται για μεγάλα λιμάνια και παράκτιες περιοχές με έντονη εμπορική κίνηση. Τέτοιες περιοχές αποτελούν σήμερα η Βαλτική Θάλασσα, η Βόρεια Θάλασσα και το Αγγλικό Κανάλι (Σχήμα 3.1). Πιο συγκεκριμένα το MARPOL Annex VI του 1997:

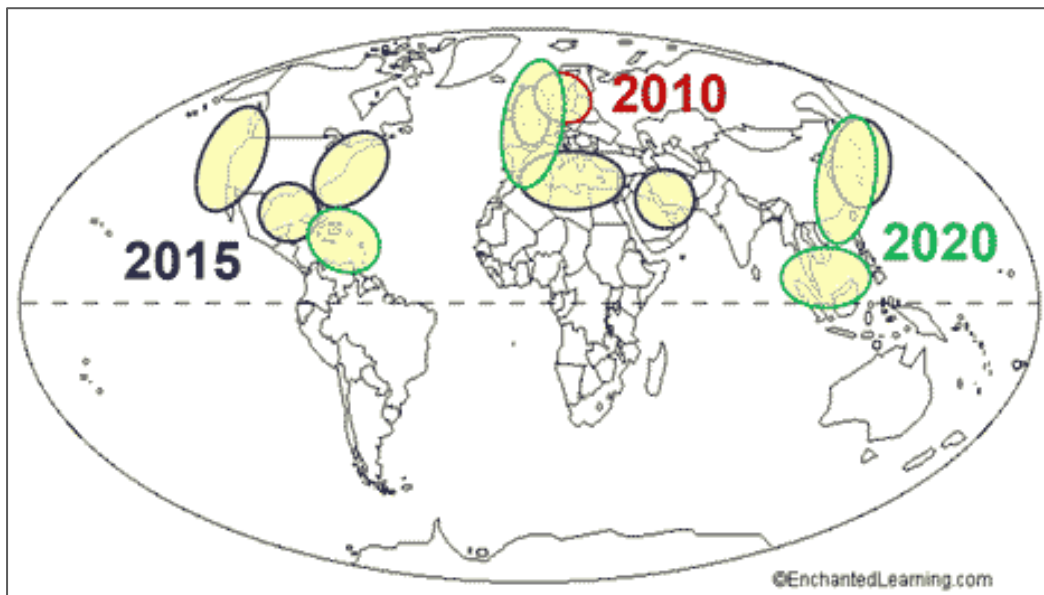
- ◇ Περιορίζει το επιτρεπόμενο ποσοστό των καυσίμων σε θείο σε όλα τα πλοία ανεξαρτήτως του τύπου καυσίμου και μηχανών τους στο 4,5% (45.000 ppm-parts per million).³²
- ◇ Καθιερώνει διαφορετικό ποσοστό θείου στα καύσιμα για τις περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECA- Emission Control Areas) σε 1,5% (15.000 ppm).³³ Πλοία που χρησιμοποιούν καύσιμο με μεγαλύτερο ποσοστό θείου, για να εισέλθουν στις περιοχές ECA, θα πρέπει να είναι εφοδιασμένα με σύστημα καθαρισμού των καυσαερίων ή άλλη τεχνολογία περιστολής των εκπεμπόμενων SO_x.
- ◇ Περιορίζει τις εκπομπές NO_x από τις καινούριες μηχανές και αυτές που έχουν υποστεί μετατροπές σε 9,8 – 17,0 g/kWh ανάλογα με τις στροφές λειτουργίας της μηχανής.
- ◇ Απαγορεύει τις εκπομπές ουσιών που βλάπτουν την στιβάδα του όζοντος.
- ◇ Απαγορεύει την χρήση από τα πλοία πολύ-χλωροδιφαινυλίων (polychlorinated biphenyls- PCBs, τοξικά χημικά που χρησιμοποιούνται ευρέως από ηλεκτρικούς μετατροπείς μέχρι την δεκαετία του 1970)
- ◇ Απαγορεύει την αποτέφρωση απορριμμάτων που περιέχουν βαρέα μέταλλα και προϊόντων πετρελαίου που περιέχουν ενώσεις αλογόνου

³⁰ MARPOL Annex VI, Chapter III, Reg. 13.

³¹ MARPOL Annex VI, Chapter I, Reg. 3.

³² MARPOL Annex VI, Chapter III, Reg. 14, paragraph 1.

³³ MARPOL Annex VI, Chapter III, Reg. 14, paragraph 2.



Σχήμα 3.1 Περιοχές ECA (Emission Control Areas)

Μετά την αναθεώρηση του 2004, θεσπιστήκαν νέα όρια ως προς τις εκπομπές NO_x από τα πλοία καθώς και νέα ποσοστό θείου στα καύσιμα. Πιο συγκεκριμένα συμφωνήθηκε ότι:

◇ Το επιτρεπόμενο ποσοστό θείου στα καύσιμα θα μειωθεί σε 3,5% (35.000 ppm) από την 1^η Ιανουαρίου του 2012 και σε 0,5% από 1^η Ιανουαρίου του 2020. Ήδη όμως το ποσοστό των καυσίμων σε θείο δεν ξεπερνάει τα 27.000 ppm οπότε αυτό το μέτρο θα έχει ουσιαστικό όφελος μετά το 2020.

◇ Για τις περιοχές αυξημένου ελέγχου (ECA) το ποσοστό των καυσίμων σε θείο μειώνεται σε 1,0% (10.000 ppm) από την 1^η Ιουλίου του 2010 και σε 0,10% (1.000 ppm) από την 1^η Ιανουαρίου του 2015.

◇ Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου NO_x για τα πλοία κατασκευασμένα μετά την 1^η Ιανουαρίου του 2011 μειώνονται κατά 20% και φθάνουν τα 7,7 – 14,4 g/kWh ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα. Για τα πλοία που θα κατασκευαστούν μετά την 1^η Ιανουαρίου του 2016, τα επιτρεπόμενα όρια NO_x θα είναι μειωμένα κατά 80% δηλαδή θα ανέρχονται το πολύ σε 2,0 -3,4 g/kWh στις περιοχές ECA. Εκτός των περιοχών αυτών το όριο θα παραμείνει στα προηγούμενα επίπεδα του 2011.

Στους παρακάτω πίνακες 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα όρια που έχουν τεθεί από το MARPOL Annex VI για τις εκπομπές NO_x και SO_x αντίστοιχα ανάλογα με τις μέγιστες στροφές (rpm) των κινητήρων:

Tier	Ημερομηνία	Όρια NO _x (g/kWh)		
		n < 130 (rpm)	130 ≤ n < 2000 (rpm)	n ≥ 2000 (rpm)
I	2000	17,0	45 x n ^{-0,2}	9,8
II	2011	14,4	44 x n ^{-0,23}	7,7
III	2016*	3,4	9 x n ^{-0,2}	1,96

* Ισχύει για τις περιοχές Αυξημένου Ελέγχου Εκπομπών NO_x (ECAs). Εκτός αυτών ισχύει το Tier II.

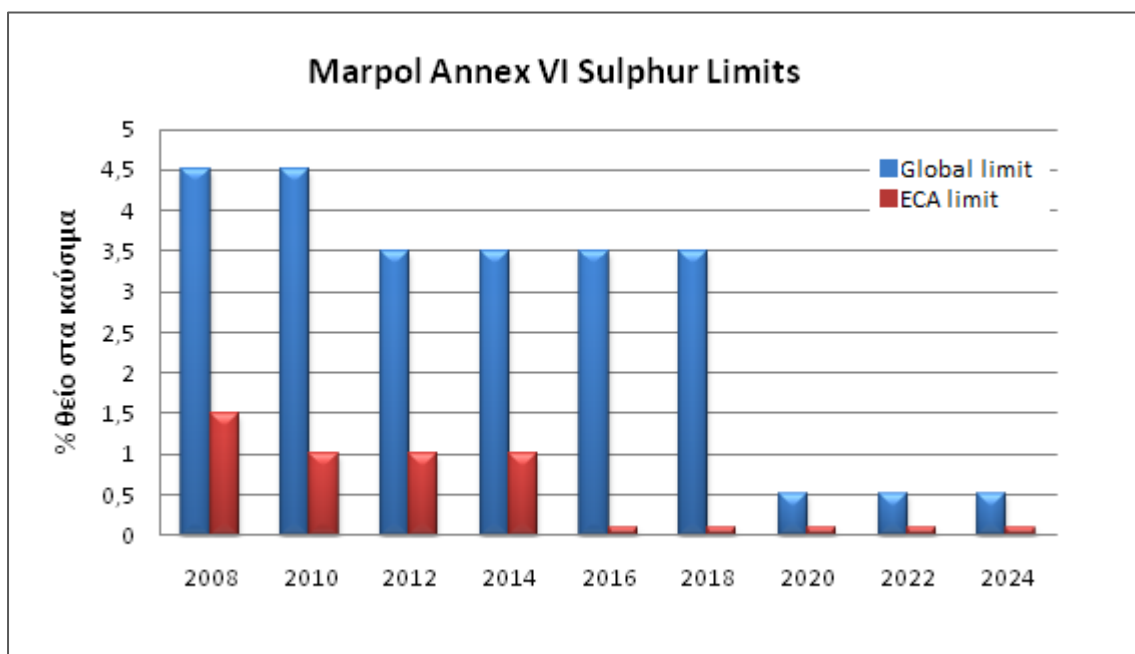
Πίνακας 3.2 Όρια εκπομπών NO_x κατά MARPOL IV

Ημερομηνία	Όρια S στα καύσιμα (% m/m)	
	SO _x στις περιοχές ECA	Παγκοσμίως
2000	1,5 %	4,5 %
07/2010	1,0 %	
2012	0,1 %	3,5 %
2015		
2020*		0,5 %

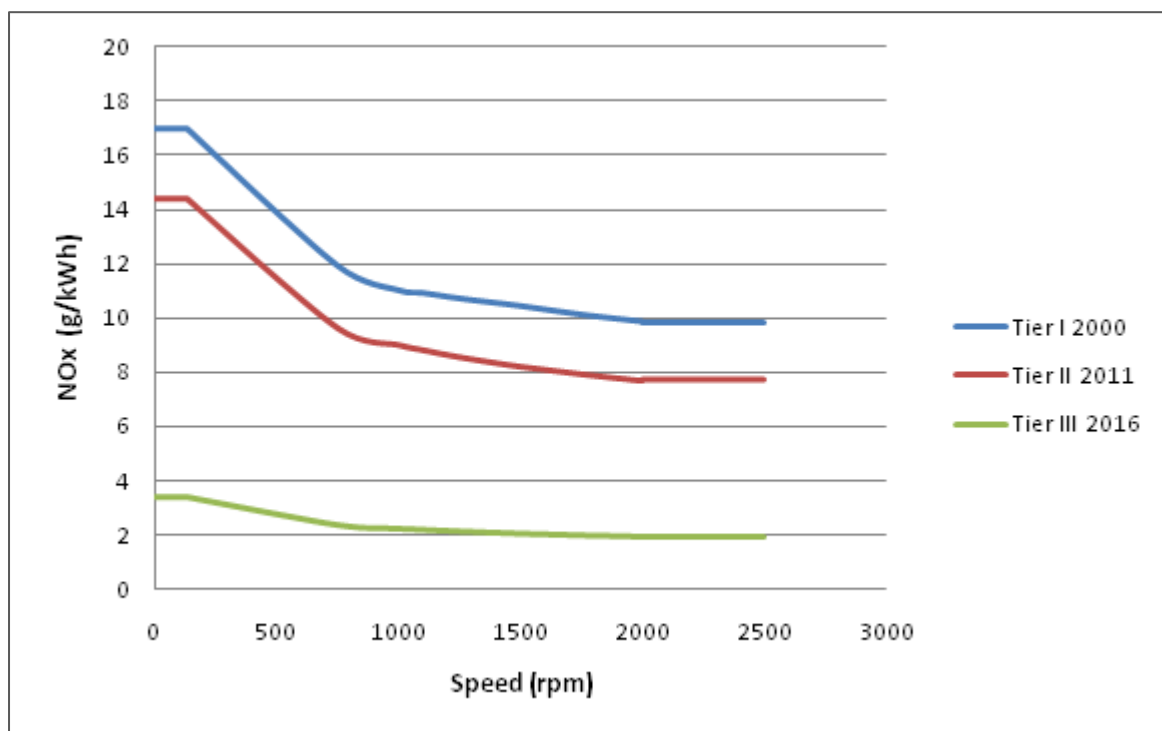
*Με εναλλακτική ημερομηνία το 2025. Θα αποφασιστεί από αναθεώρηση το 2018.

Πίνακας 3.3 Όρια εκπομπών SO_x κατά MARPOL IV

Τα σχήματα 3.4 και 3.5 που ακολουθούν αποτελούν γραφική απεικόνιση των παραπάνω πινάκων.



Σχήμα 3.4 Επιτρεπόμενο ποσοστό θείου στα καύσιμα κατά MARPOL VI



Σχήμα 3.5 Όρια εκπομπών NO_x κατά MARPOL VI

Η συμμόρφωση με τα όρια εκπομπών του MARPOL Annex VI είναι ευθύνη του πλοιοκτήτη και όχι της κατασκευάστριας εταιρίας των μηχανών ενώ η επιβολή του MARPOL είναι ευθύνη των εκάστοτε κρατών τα οποία δρουν σύμφωνα με την ισχύουσα σε αυτά νομοθεσία. Τα κράτη αυτά είναι υπεύθυνα για την διεξαγωγή ελέγχων ώστε να διασφαλίζεται η συμμόρφωση των πλοίων και των μηχανών τους με τις απαιτήσεις του MARPOL. Οι έλεγχοι αυτοί εφαρμόζονται στα πλοία πάνω από 400 τόνους, στις πλωτές εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου και στις λοιπές πλατφόρμες. Αν ένα πλοίο, μετά την διεξαγωγή των ελέγχων αυτών βρεθεί να συμμορφώνεται με τα όρια εκπομπών, το ελεγκτικό κράτος του χορηγεί ένα διεθνές πιστοποιητικό πρόληψης της μόλυνσης του αέρα (International Air Pollution Prevention Certificate- IAPP). Οι έλεγχοι αυτοί διεξάγονται σε όλη την διάρκεια ζωής του πλοίου και περιλαμβάνουν:

- ◊ Τον αρχικό έλεγχο του πλοίου πριν αυτό τεθεί σε υπηρεσία ή πριν την πρώτη έκδοση IAPP και διασφαλίζουν ότι ο εξοπλισμός του πλοίου συμμορφώνεται με τα όρια εκπομπών.
- ◊ Περιοδικούς ελέγχους που λαμβάνουν χώρα τουλάχιστον κάθε πέντε χρόνια μετά τον αρχικό έλεγχο και διασφαλίζουν ότι δεν πραγματοποιήθηκαν τυχόν τροποποιήσεις που οδηγούν στην παρέκκλιση των μηχανών από τα όρια του MARPOL.
- ◊ Ενδιάμεσους ελέγχους που λαμβάνουν χώρα τουλάχιστον μία φορά ανάμεσα στην έκδοση του πιστοποιητικού IAPP και τους περιοδικούς ελέγχους και διασφαλίζουν ότι ο εξοπλισμός του πλοίου συνεχίζει να συμμορφώνεται.
- ◊ Μη προγραμματισμένους ελέγχους που πραγματοποιούνται περιοδικά. Σε περίπτωση ανάγκης ετήσιων περιοδικών ελέγχων, οι μη προγραμματισμένοι έλεγχοι δεν είναι

υποχρεωτικοί.

- ◊ Έλεγχοι προγενέστεροι της έκδοσης πιστοποιητικού, οι οποίοι διενεργούνται σε μηχανή πριν την εγκατάσταση της επί του σκάφους και διασφαλίζουν την συμμόρφωση με τα όρια εκπομπών NO_x. Αν η μηχανή εργάζεται εντός των ορίων εκδίδεται ένα πιστοποιητικό διεθνής πρόληψης της μόλυνσης του αέρα για την μηχανή (Engine International Air Pollution Prevention Certificate – EIAPP)
- ◊ Επανελέγχοι απαιτούνται α) όπου οι έλεγχοι και οι επιθεωρήσεις δεν διεξαχθούν μέσα στα προβλεπόμενα χρονικά όρια, β) σε περίπτωση που πραγματοποιηθούν σημαντικές τροποποιήσεις στον εξοπλισμό του σκάφους, γ) σε περίπτωση αλλαγής σημαίας του σκάφους.
- ◊ Διεξαγωγή προληπτικών επιθεωρήσεων σε περίπτωση ύπαρξης υπονοιών για μη τήρηση των προβλεπόμενων ορίων από τον ιδιοκτήτη ή το πλήρωμα ενός σκάφους.

Κατά την διάρκεια των διεθνών ταξιδιών τους, τα σκάφη πρέπει να φέρουν το πιστοποιητικό IAPP ώστε να επιδεικνύουν σε κάθε έλεγχο την συμμόρφωση τους με τα όρια εκπομπών. Για την συμμόρφωση τους με το IAPP τα σκάφη πρέπει να κατέχουν επίσης το πιστοποιητικό μηχανής EIAPP, τον τεχνικό φάκελο (Technical File) του σκάφους και το μητρώο παραμέτρων της μηχανής (Record Book of Engine Parameters).

3.1.2 Environmental Protection Agency

Η Ε.Ρ.Α. (Environmental Protection Agency) είναι μία υπηρεσία της ομοσπονδιακής κυβέρνησης των Ηνωμένων Πολιτειών υπεύθυνη για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Η Ε.Ρ.Α. οφείλει την δημιουργία της στον αμερικανό πρόεδρο Richard Nixon και ξεκίνησε τις εργασίες της το 1970. Η Ε.Ρ.Α. μπορεί να θεσπίζει περιβαλλοντικούς νόμους και να μεριμνεί για την σωστή εφαρμογή τους. Επιπλέον, διεξάγει σημαντική περιβαλλοντική έρευνα και αξιολόγηση.

Η Ε.Ρ.Α. είχε ήδη, πριν την αναθεώρηση του MAROL Annex VI του 2004, κοινοποιήσει κάποιους κανονισμούς για τους ναυτικούς κινητήρες οι οποίοι περιλαμβάνονταν στο πρόγραμμα "Clean Air Act"³⁴ το οποίο ήταν εξίσου αυστηρό με το 1997 MARPOL Annex VI ως προς τα όρια που έθετε και οι ναυτιλιακές εταιρίες είχαν ήδη αρχίσει να συμμορφώνονται με αυτά. Τα όρια που έθετε το πρόγραμμα "Clean Air Act" μπορούσαν να επιτύχουν την μέγιστη μείωση των εκπομπών μέσω της χρήσης της βέλτιστης τεχνολογίας. Η Ε.Ρ.Α επανεξετάζει και αναθεωρεί τα όρια αυτά ανά τακτά χρονικά διαστήματα υπό το πρίσμα της συνεχούς ανάπτυξης της τεχνολογίας. Τον Οκτώβριο του 1999, η ΕΡΑ θέσπισε ένα εθελοντικό πρόγραμμα πιστοποίησης με το οποίο οι κατασκευάστριες εταιρίες μηχανών έδειχναν ότι οι μηχανές τους συμμορφώνονταν με το πρωτόκολλο Annex VI. Σύμφωνα με την ίδια την υπηρεσία, όλες οι μηχανές Diesel της κατηγορίας 3 που πουλήθηκαν μετά τον Ιανουάριο του 2000 εκπλήρωναν τις προϋποθέσεις του Annex VI.

Σύμφωνα με την Ε.Ρ.Α., οι ναυτικοί κινητήρες διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το εκτόπισμα των κυλίνδρων τους. Οι τρεις κατηγορίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 3.6.

Κατηγορία	Εκτόπισμα ανά κύλινδρο (D)		Είδος μηχανής
	Tier 1-2	Tier 3-4	
1	$D < 5 \text{ dm}^3$ * * και ισχύος $\geq 37 \text{ kW}$	$D < 7 \text{ dm}^3$	Μηχανές ξηράς Non-road Diesel
2	$5 \text{ dm}^3 \leq D < 30 \text{ dm}^3$	$7 \text{ dm}^3 \leq D < 30 \text{ dm}^3$	Κινητήριες Μηχανές
3	$D \geq 30 \text{ dm}^3$		Ναυτικές μηχανές

Πίνακας 3.6 Κατηγορίες ναυτικών κινητήρων σύμφωνα με τη ΕΡΑ

Οι κατηγορίες ναυτικών κινητήρων 1 και 2 έχουν ισχύ 500 - 8.000 KW. Οι μηχανές αυτές χρησιμοποιούνται για την κίνηση μικρών σκαφών και πλοίων καθώς και για την ηλεκτροδότηση τους. Η κατηγορία 3 περιλαμβάνει μηχανές με ισχύ 2.500-30.000 KW. Πρόκειται δηλαδή για τους μεγάλους σε μέγεθος, δίχρονους κινητήρες Diesel χαμηλών στροφών που χρησιμοποιούνται για την κίνηση μεγάλων φορτηγών και πετρελαιοφόρων πλοίων καθώς και κρουαζιερόπλοιων. Στις συγκεκριμένες μηχανές οι τεχνολογίες μείωσης εκπομπών είναι πολύ περιορισμένες λόγω του είδους του καυσίμου που χρησιμοποιούν. Το

³⁴ 42 U.S.C. (United States Code) §7547 (a) (3).

βαρύ πετρέλαιο που χρησιμοποιούν ως καύσιμο οι μηχανές αυτές, αποτελεί ουσιαστικά το κατάλοιπο της διαδικασίας παραγωγής των διαφόρων προϊόντων του πετρελαίου. Έχει μεγάλο ιξώδες και πυκνότητα καθώς και σημαντικά ποσοστά θείου και αζώτου τα οποία δεν είναι συγκεκριμένα αλλά διαφέρουν ανάλογα την παρτίδα . Το καύσιμο αυτό μπορεί να αυξήσει τις εκπομπές σε NO_x 20-50% σε σύγκριση με το αποσταγμένο καύσιμο.

• **Κατηγορία 3.** Τα πρώτα μέτρα καταπολέμησης των ρύπων για την κατηγορία μηχανών 3 λήφθηκαν από την Ε.Ρ.Α. μόνο το 2003, μετά από πιέσεις περιβαλλοντικών οργανώσεων και τέθηκαν σε εφαρμογή το 2004. Τότε θεσπίστηκαν όρια για τις εκπομπές NO_x αλλά μόνο για τις καινούριες μηχανές οι οποίες ουσιαστικά έπρεπε πλέον να συμμορφώνονται με το πρωτόκολλο IMO MARPOL Annex VI. Το 2009 η Ε.Ρ.Α. ενίσχυσε τα μέτρα αυτά τα οποία ισχύουν υποχρεωτικά για όλα τα πλοία με σημαία των ΗΠΑ. Το 2007 μόνο το 6,7% των ποντοπόρων πλοίων άνηκε στις ΗΠΑ και επομένως η κανονισμοί που αφορούν τις μηχανές των πλοίων αυτών δεν έχουν ιδιαίτερα μεγάλη συνεισφορά στην μείωση της ρύπανσης. Η συνεισφορά αυτή γίνεται μεγαλύτερη όταν στους κανονισμούς της Ε.Ρ.Α. προσθέτονται και κανονισμοί για τα καύσιμα τα οποία χρησιμοποιούνται από τις νέες αλλά και τις παλαιότερες μηχανές, από τα αμερικανικά αλλά και τα διεθνή πλοία. Μετά το 2009 έχουν υπάρξει σημαντικές αλλαγές που κατέστησαν τα όρια ρύπων πιο αυστηρά και την χρήση καθαρότερων καυσίμων υποχρεωτική. Τα νέα αυτά μέτρα συμφωνούν με αυτά του MARPOL Annex VI. Επιπλέον η Ε.Ρ.Α πρότεινε τότε την ένταξη των Αμερικανικών υδάτων στις περιοχές αυξημένου ελέγχου εκπομπών (ECA). Πιο συγκεκριμένα:

◊ Στις 27 Μαρτίου του 2009 η Ε.Ρ.Α. πρότεινε την ένταξη όλης της αμερικάνικης ακτογραμμής μαζί με αυτή των νησιών της Χαβάης (εκτός κάποιων τμημάτων στην Αλάσκα), σε απόσταση διακοσίων ναυτικών μιλίων, στις περιοχές ECA που υπόκεινται σε υποχρεωτική χρήση καυσίμων με μειωμένο ποσοστό θείο.

◊ Τον Ιούλιο του 2009, η Ε.Ρ.Α. πρότεινε κάποια καινούρια μέτρα τα οποία ενδυνάμωσαν τα ήδη υπάρχοντα. Τα μέτρα αυτά οριστικοποιήθηκαν τον Δεκέμβριο του 2009 και σύμφωνα με αυτά οι καινούριες μηχανές πλοίων πρέπει από το 2011 να λαμβάνουν μέτρα μείωσης των εκπομπών NO_x όπως έλεγχος του χρονισμού της μηχανής, ψύξη της μηχανής καθώς και χρήση ανωτέρων ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου της μηχανής ώστε να μπορούν να επιτύχουν 15-20% μείωση των παραγόμενων οξειδίων του αζώτου και να συμμορφώνονται με τα όρια του Tier I. Το Tier III, το 2016, θα μειώσει περαιτέρω τις εκπομπές αυτές κατά 80% καθιστώντας αναγκαία την χρήση μεθόδων που επεξεργάζονται τα καυσαέρια στο σύστημα εξάτμισης μετά την απομάκρυνση τους από την μηχανή (όπως το σύστημα καταλυτικής μείωσης SCR).

• **Κατηγορίες 1 και 2.** Ο πρώτος κανονισμός για την κατηγορία μηχανών 1 και 2 θεσπίστηκε το 1999 από την EPA και τις κατέταξε μαζί με τις "εκτός δρόμου" (non road) μηχανές Diesel (Tier II). Ο κανονισμός αυτός, μείωνε τις εκπομπές NO_x των μηχανών αυτών κατά 24% και τις εκπομπές σωματιδίων του καπνού κατά 12% και τέθηκε σε εφαρμογή μεταξύ του 2004 και 2007. Τον Μάιο του 2008 θεσπίστηκαν νέα μέτρα τα οποία θα ενεργοποιηθούν μέχρι το 2014 και τα οποία θα καθιστούν υποχρεωτική την χρήση καυσίμων με πολύ μικρό ποσοστό σε θείο (15 ppm) αλλά και καταλυτικών συστημάτων ικανά να μειώσουν τις εκπομπές σωματιδίων κατά 90% και τις εκπομπές NO_x κατά 80% μαζί με σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές υδρογονανθράκων, μονοξειδίου του άνθρακα και των λοιπών τοξικών εκπομπών.

Τα πλεονεκτήματα των μέτρων αυτών σε συνδυασμό με αυτά της κατηγορίας 3 υπολογίζεται πως θα ξεπεράσουν κατά πολύ το κόστος για την συμμόρφωση σε αυτά. Το κόστος των τεχνικών μείωσης των εκπομπών NO_x αναμένεται, σύμφωνα με την EPA³⁵, στα \$510 ανά τόνο μειωμένου ρύπου, για τα SO_x \$930 ανά τόνο μειωμένου ρύπου και για τα PM \$8.600 ανά τόνο μειωμένου ρύπου. Τα μέτρα αυτά αναμένεται να μειώσουν τις ετήσιες εκπομπές NO_x στις Ηνωμένες Πολιτείες κατά 12 χιλιάδες τόνους και τις εκπομπές PM κατά 140.000 τόνους. Όταν το πακέτο μέτρων εφαρμοστεί πλήρως, οι συνολικές εκπομπές NO_x θα έχουν μειωθεί κατά 80% και οι εκπομπές PM κατά 85% συγκριτικά με τις σημερινές τιμές. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που αναμένονται έως το 2030 είναι : μείωση κατά 13.000-33.000 των πρόωρων θανάτων, κέρδος 1.500.000 εργάσιμων ημερών και κέρδος 10.000.000 ημερών περιορισμένης δραστηριότητας. Η EPA υπολογίζει πως τα πλεονεκτήματα αυτά αντιπροσωπεύουν κέρδος \$100 -\$260 δισεκατομμυρίων το 2030 ξεπερνώντας κατά πολύ το κόστος του σε αναλογία 30:1. Η επίδραση αυτών των μέτρων σε επίπεδο κοινωνίας αναμένεται να είναι ανεκτή με αύξηση του κόστους των θαλάσσιων υπηρεσιών κατά 1,1%.³⁶

Οι αντιδράσεις στα μέτρα της EPA και της IMO ήταν ιδιαίτερα θετικές. Τα μέτρα για την κατηγορία μηχανών 3 επικροτήθηκαν τόσο από τις περιβαλλοντικές οργανώσεις όσο και από τις κατασκευάστριες εταιρίες. Το παγκόσμιο συνέδριο ναυτιλίας (WSC- World Shipping Council) του οποίου τα μέλη κατέχουν πάνω από το 90% των αμερικανικών φορτηγών πλοίων ανέφερε πως τα μέλη του υποστηρίζουν ολοκληρωτικά την θέσπιση ορίων για τις εκπομπές των πλοίων. Οι περιβαλλοντικές οργανώσεις δήλωσαν ευχαριστημένες με την πορεία των μέτρων καθώς επίσης και την επιθυμία τους τα μέτρα αυτά να ενδυναμωθούν και να καλύπτουν όλα τα πλοία που ταξιδεύουν στα αμερικανικά ύδατα ανεξαρτήτως σημαίας και παλαιότητας.

3.1.3 Διαφορές μεταξύ E.P.A. και MARPOL Annex VI

Απαιτήσεις	Πρόγραμμα ελέγχου της E.P.A	MARPOL Annex VI
Ευθύνες για την συμμόρφωση	Η κατασκευάστρια εταιρία είναι υπεύθυνη για τον σχεδιασμό και την παραγωγή μηχανών που συμμορφώνονται με τα όρια εκπομπών για όλη τη διάρκεια ζωής τους. Οι ιδιοκτήτες των μηχανών οφείλουν να συντηρούν τις μηχανές και να τηρούν αρχεία για τις συντηρήσεις στις μηχανές καθώς και για τυχόν τροποποιήσεις σε αυτές.	Οι ιδιοκτήτες των μηχανών και μόνο είναι υπεύθυνοι για την συμμόρφωση αυτών με τα όρια εκπομπών. Επίσης, είναι υπεύθυνοι για την σωστή και συστηματική συντήρηση τους καθώς και για την τήρηση αρχείων των συντηρήσεων αυτών για όλη τη διάρκεια ζωής των μηχανών. Τα αρχεία αυτά στο Annex VI αναφέρονται ως "The Record Book of Engine Parameters".

³⁵ U.S. EPA, " Regulatory Announcement: EPA Proposal for Control of Emissions from New Marine Compression-Ignition Engines at or Above 30 Liters Per Cylinder", June 2009

³⁶ James E. McCarthy, " Air Pollution and Greenhouse Gas Emissions from Ships", December 23, 2009

Επίδειξη ανθεκτικότητας	Η κατασκευάστρια εταιρία οφείλει να αποδεικνύει πριν την παραγωγή της μηχανής ότι με τη σωστή συντήρηση και χρήση της, η μηχανή θα είναι σε θέση να συμμορφώνεται με τα όρια εκπομπών για όλη τη διάρκεια ζωής της.	Η κατασκευάστρια εταιρία οφείλει να επιδεικνύει ότι η μηχανή της λειτουργεί μέσα στα επιτρεπόμενα όρια κατά την εγκατάσταση της χωρίς να απαιτείται επίδειξη της ανθεκτικότητας της μηχανής.
Συνθήκες Δοκιμών	Για την κατηγορία μηχανών 3 χρησιμοποιούνται οι διαδικασίες δοκιμών του Annex VI.	Προσδιορίζεται ένα στενό εύρος τιμών για την θερμοκρασία του αέρα και του νερού.
Παράμετροι Δοκιμών	Προκειμένου να αποφευχθούν μη ρεαλιστικές ρυθμίσεις παραμέτρων, πρέπει να χρησιμοποιείται η λογική κατά την επιλογή των περιμέτρων. Η μέγιστη ταχύτητα μηχανής που θα εφαρμοστεί κατά τη διάρκεια των δοκιμών πρέπει να βασίζεται στις ταχύτητες της μηχανής σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.	Η προσαρμογή των παραμέτρων της μηχανής ανήκει στη διακριτική ευχέρεια της κατασκευάστριας εταιρίας. Επίσης οι κατασκευαστές είναι αυτοί που ορίζουν την μέγιστη ταχύτητα της μηχανής κατά τις δοκιμές ακόμα και αν οι ταχύτητες αυτές δεν ανταποκρίνονται πλήρως στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της μηχανής μετά την εγκατάσταση της.
Προθεσμίες συμμόρφωσης	Εφαρμόζονται μετά την ολοκληρωμένη συναρμολόγηση της μηχανής. (Η διαφορά αυτή ανάμεσα στην E.P.A. και στο MARPOL δεν έχει πλέον αξία καθώς οι προθεσμίες του MARPOL έχουν περάσει.)	Η εφαρμογή των ορίων ξεκινάει μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του πλοίου.
Προσαρμογή παραμέτρων	Επιτρέπει στους κατασκευαστές τον προσδιορισμό των παραμέτρων της μηχανής βάσει των οποίων η μηχανή συμμορφώνεται με τα όρια εκπομπών και οι ιδιοκτήτες των μηχανών δεν επιτρέπεται να τα αλλάξουν.	Απαγορεύει στους ιδιοκτήτες να τροποποιούν την βαθμονόμηση της μηχανής ώστε αυτή να είναι διαφορετική από αυτή που έχει προσδιοριστεί από τους κατασκευαστές.

Πίνακας 3.7 Διαφορές ανάμεσα στο πρόγραμμα της E.P.A. και του πρωτοκόλλου MARPOL Annex VI³⁷

³⁷ Brian Shrader, "U.S. Regulation of Large Marine Diesel Engines under MARPOL Annex VI", Sea Grant and Policy Journal, Vol 1, No. 2 (December 2008)

3.1.4 Ο νόμος "Maritime Pollution Prevention Act" του 2008

Οι Η.Π.Α υλοποίησαν το πρωτόκολλο MARPOL Annex VI ψηφίζοντας τον νόμο "Maritime Pollution Prevention Act of 2008 (the Act)" το οποίο αργότερα τροποποιήθηκε στον νόμο "Act to Prevent Pollution from Ships". Η πράξη αυτή πέρασε από τον Λευκό Οίκο και την Γερουσία τον Μάρτιο του 2007 και τον Ιούνιο του 2008 και υπογράφηκε από τον Πρόεδρο τον Ιούλιο του 2008 ως νόμος του κράτους. Ο νόμος αυτός αφορά τα πλοία υπό την σημαία των χωρών μελών που συμμορφώνονται με το Annex VI και πλέουν στα χωρικά ύδατα των Ηνωμένων Πολιτειών. Η γραμματεία του τμήματος στο οποίο ανήκει η ακτοφυλακή, είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο συμμόρφωσης των πλοίων με δικαίωμα πραγματοποίησης ενεργειών για την επιβολή του νόμου σε περιπτώσεις παραβίασης του.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες κατέθεσαν έγγραφο κύρωσης με την IMO τον Οκτώβριο του 2008 και το παράρτημα Annex VI τέθηκε σε εφαρμογή για τις Η.Π.Α. τον Ιανουάριο του 2009.³⁸

3.1.5 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με το πρωτόκολλο MARPOL ANNEX VI της IMO αλλά και τους κανονισμούς της EPA, σήμερα είναι σε ισχύ το Tier II, δηλαδή, πλέον οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου από τα πλοία δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 14,4-7,7 g/kWh ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής (βλ. πίνακα 3.2). Οι σύγχρονες μηχανές είναι εξοπλισμένες με τα απαραίτητα συστήματα ώστε να είναι σε θέση να συμμορφώνονται στα σημερινά αυτά επιτρεπόμενα όρια χωρίς την ανάγκη εφαρμογής επιπρόσθετων τροποποιήσεων ή την υιοθέτηση δευτερευουσών τεχνικών για την απομάκρυνση των NO_x από τα καυσαέρια τους. Αντίθετα, στις πιο μεγάλες σε ηλικία μηχανές οι εσωτερικές τροποποιήσεις είναι απαραίτητες ώστε να συμμορφώνονται με τους ισχύοντες κανονισμούς. Μελλοντικά (2016) οι δευτερεύουσες και πιο δαπανηρές τεχνικές θα είναι απαραίτητες για την συμμόρφωση με τα όρια εκπομπών. Τακτικοί έλεγχοι διεξάγονται από τα κράτη που έχουν υπογράψει τις συνθήκες ώστε να εξασφαλίζεται η συμμόρφωση των σκαφών στα παραπάνω όρια.

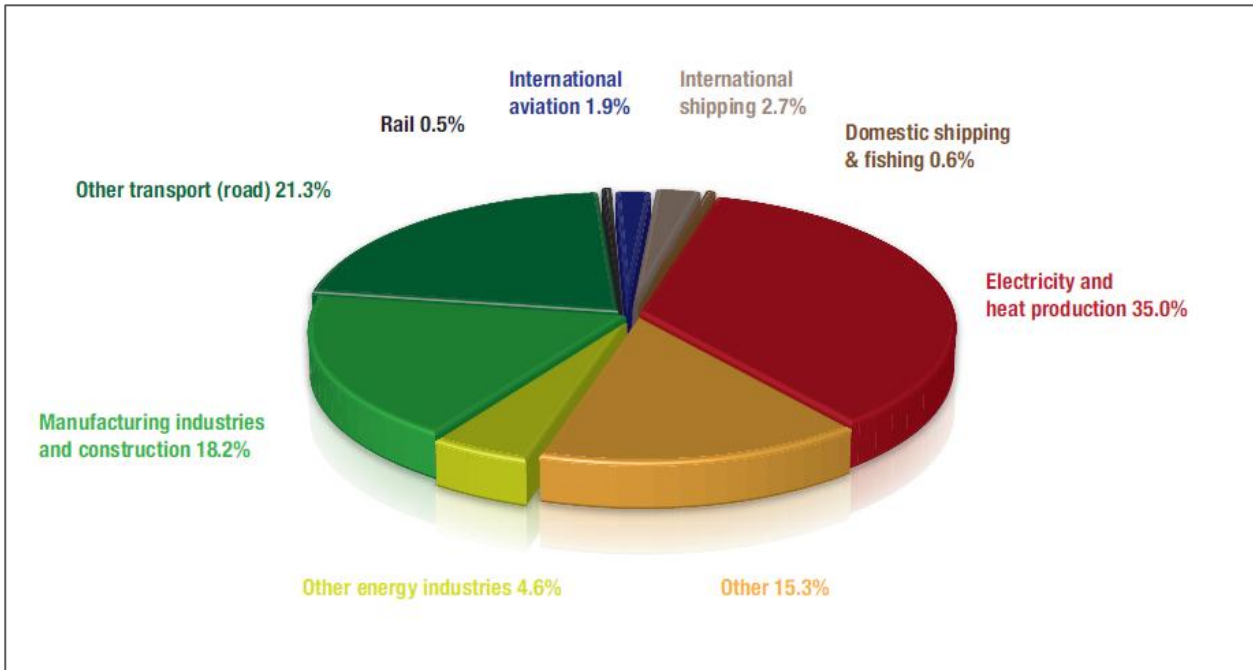
Όσον αφορά τις εκπομπές SO_x, σήμερα το επιτρεπόμενο ποσοστό θείου στα καύσιμα είναι 3,5% παγκοσμίως και 1% για τις περιοχές αυξημένου ελέγχου.

Όλες οι πρωτεύουσες και δευτερεύουσες τεχνικές για την μείωση των εκπομπών SO_x και NO_x και την συμμόρφωση με τους διεθνείς κανονισμούς παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 και 5 αντίστοιχα.

³⁸ Brian Shrader, "U.S. Regulation of Large Marine Diesel Engines under MARPOL Annex VI", Sea Grant and Policy Journal, Vol 1, No. 2 (December 2008)

3.2 Όρια για τα αέρια του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases - GHGs)

Τα πλοία αποτελούν μία σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αν και οι εκτιμήσεις ποικίλουν, σύμφωνα με την IMO η παγκόσμια ναυτιλία παράγει 843.000 τόνους διοξειδίου του άνθρακα το οποίο αποτελεί το 2,7% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂.



Σχήμα 3.8 Πηγές εκπομπής CO₂ παγκοσμίως (Πηγή: *Second IMO GHG Study 2009*)

Εκτός από τις εκπομπές CO₂, η κακή ποιότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται από τα πλοία και η απουσία τεχνικών περιορισμού των παραγόμενων ρύπων έχουν ως αποτέλεσμα τις εκπομπές άκαυστου άνθρακα και οξειδίων του αζώτου τα οποία συνεισφέρουν επίσης στην κλιματική αλλαγή. Συνολικά υπολογίζεται πως η ναυτιλία συνεισφέρει περισσότερο από 3% στην αλλαγή του κλίματος.

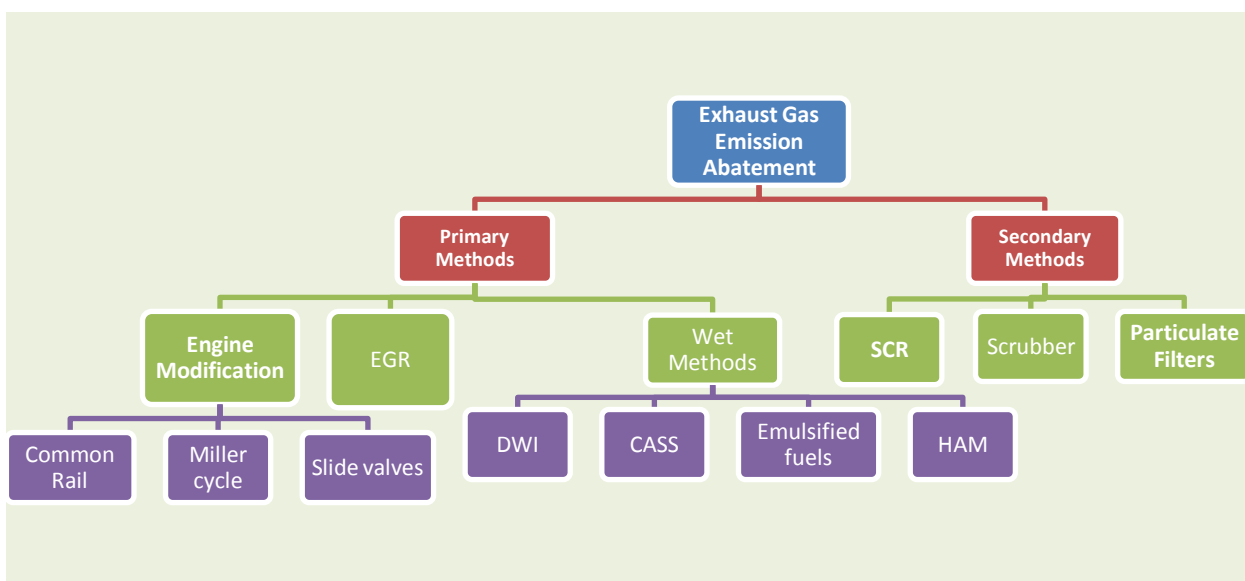
Αυτού του είδους οι εκπομπές λαμβάνουν χώρα συνήθως στα διεθνή ύδατα και για τον λόγο αυτό απαιτείται κάποια διεθνής σύμβαση που μέχρι σήμερα δεν έχει πραγματοποιηθεί καθώς υπάρχει διαφωνία σε διεθνές επίπεδο για το ποιος θα πρέπει να αναλάβει την ευθύνη της καταπολέμησης των αερίων του θερμοκηπίου. Η IMO έχει ξεκινήσει διαπραγματεύσεις για το θέμα αυτό και έχει δηλώσει ότι αποτελεί μία από τις προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τον Δεκέμβριο του 2008, το Ευρωπαϊκό κοινοβούλιο ψήφισε ένα πακέτο κλιματικών μέτρων αλλά δεν συμπεριέλαβε σε αυτά την ναυτιλία. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν διεθνής κανονισμοί που να οριοθετούν τις εκπομπές CO₂ από τα πλοία ανεξαρτήτου μεγέθους και χρήσης.³⁹

³⁹ James E. McCarthy, " Air Pollution and Greenhouse Gas Emissions from Ships", December 23, 2009

4. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΣΤΟΛΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ DIESEL- ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ SO_x

Για την μείωση των συγκεντρώσεων των εκπεμπόμενων ρύπων από τους κινητήρες Diesel χρησιμοποιείται μία μεγάλη ποικιλία τεχνικών. Οι τεχνικές αυτές, ανεξάρτητα από τον ρύπο, διακρίνονται σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες. Οι πρωτεύουσες τεχνικές αποσκοπούν στην μείωση των παραγόμενων ρύπων κατά την διαδικασία της καύσης ενώ οι δευτερεύουσες τεχνικές εστιάζουν στην ελάττωση ή την αφαίρεση από τα καυσαέρια των ήδη παραγμένων ρύπων. Το κάθε είδος ρύπου αντιμετωπίζεται και ελέγχεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα αν και ορισμένοι ρύποι συνδέονται αναγκαστικά μεταξύ τους και η αυξομείωση του ενός επιφέρει και την αυξομείωση του άλλου. Για παράδειγμα, μία μέθοδος που μειώνει τις εκπομπές αιθάλης (PM) επιφέρει συνήθως την αύξηση των παραγόμενων οξειδίων του αζώτου (NO_x). Το γεγονός αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση των διαφόρων τεχνικών.

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου (NO_x) είναι οι συγκεντρώσεις του Οξυγόνου και του Αζώτου καθώς και οι θερμοκρασίες στον θάλαμο καύσης. Επομένως είναι αναμενόμενο όλες οι πρωτεύουσες τεχνικές μείωσης της παραγωγής NO_x να εστιάζουν στις συγκεντρώσεις και τις θερμοκρασίες αυτές. Αντίστοιχα, οι μέθοδοι για την μείωση των παραγόμενων υδρογονανθράκων, μονοξειδίου του άνθρακα και των σωματιδίων καπνού στοχεύουν στην δημιουργία ενός πιο ομοιόμορφου μείγματος καυσίμου-αέρα στον θάλαμο καύσης για την επίτευξη μιας πιο κοντά στην τέλεια καύση. Όλες οι υπάρχουσες τεχνικές μείωσης ρύπων για κινητήρες Diesel παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.



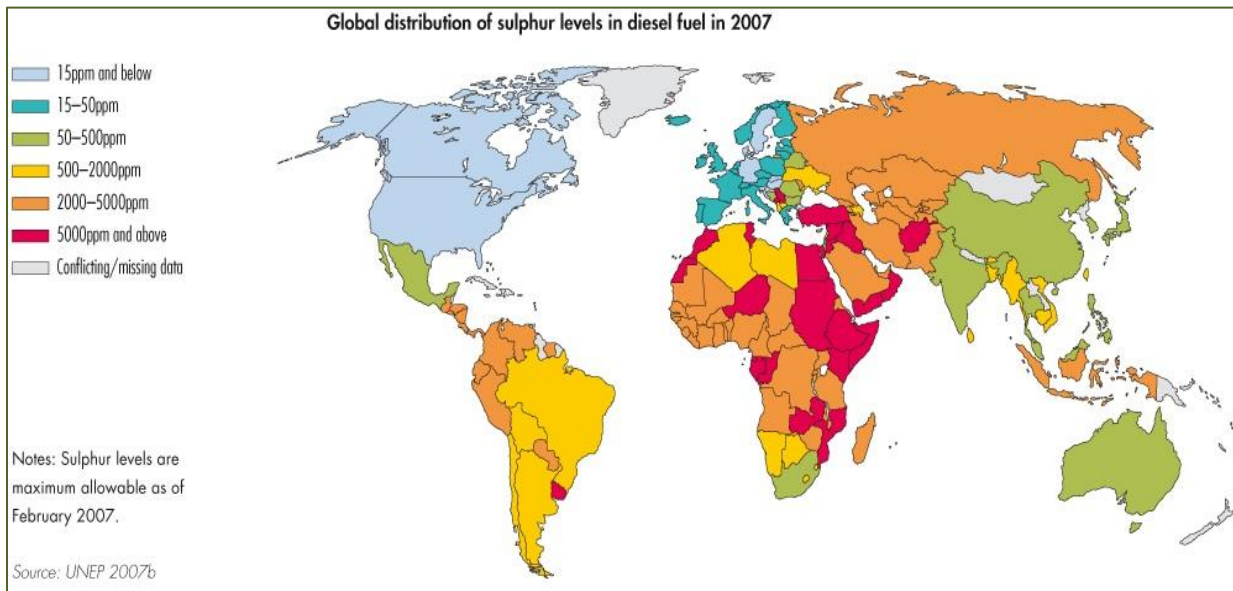
Σχήμα 4.0 Σχηματική απεικόνιση των τεχνικών μείωσης των εκπομπών από ναυτικούς κινητήρες

4.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ SO_x

Οι εκπομπές οξειδίων του θείου είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το ποσοστό του θείου στα καύσιμα και την κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα. Επομένως η μείωση των εκπομπών SO_x είναι δυνατή είτε μέσω αλλαγών στην σύνθεση των καυσίμων που χρησιμοποιούνται είτε με επεξεργασία των καυσαερίων πριν εξέλθουν στην ατμόσφαιρα. Αλλαγές στην διαδικασία της καύσης δεν επιφέρουν σημαντικό αποτέλεσμα στις εκπομπές SO_x.

4.1.1 ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΘΕΙΟΥ (S) ΣΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Η πιο αποτελεσματική τεχνική μείωσης των συγκεντρώσεων SO_x στα καυσαέρια είναι η μείωση του περιεχομένου των καυσίμων σε θείο. Για την επίτευξη της μείωσης του ποσοστού θείου στα καύσιμα, απαιτείται από τις εταιρίες παραγωγής καυσίμων η περαιτέρω επεξεργασία τους σε κατάλληλες μονάδες γεγονός που συνεπάγεται την αυξημένη τιμή των καυσίμων αυτών συγκριτικά με τα κοινά καύσιμα. Τα επίπεδα θείου του αργού πετρελαίου κυμαίνονται από 0.1% έως 4%. Κατά την διύλιση του αργού πετρελαίου, το θείο τείνει να παραμένει στα κατάλοιπα τα οποία είναι και αυτά που αναμειγνύονται με το μαζούτ για την παραγωγή των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στην Ναυτιλία (IFO, MDO κλπ). Το μέσο επίπεδο θείου στα καύσιμα αυτά, λόγω του αργού πετρελαίου που χρησιμοποιείται στην βόρεια Ευρώπη, είναι περίπου 3.5%.



Σχήμα 4.1 Το ποσοστό σε Θείο των καυσίμων το 2007 παγκοσμίως

Τα διυλιστήρια και οι προμηθευτές καυσίμων στην Ευρώπη δηλώνουν έτοιμοι να ανταποκριθούν στην αυξημένη ζήτηση καυσίμων με μικρή συγκέντρωση θείου λόγω των νέων ορίων της IMO. Η ζήτηση όμως αυτή είναι πιθανόν να μην καλυφθεί εγκαίρως καθώς η αναβάθμιση των διυλιστηρίων, από τον σχεδιασμό μέχρι την κατασκευή και την λειτουργία τους, μπορεί να διαρκέσει τέσσερα με πέντε χρόνια. Επιπρόσθετα, η ολική επένδυση για την

αναβάθμιση αυτή των διυλιστηρίων υπολογίζεται περίπου στα \$126 δισεκατομμύρια⁴⁰, κόστος το οποίο θα μεταφερθεί στην τιμή των καυσίμων αυτών .

Υπάρχουν δύο τρόποι για την παραγωγή καυσίμων με χαμηλό ποσοστό θείου:

◇ Η χρήση των καταλοίπων από αργό πετρέλαιο χαμηλό σε θείο

◇ Η αποθείωση του συνηθισμένου αργού πετρελαίου

Από αυτές η πρώτη είναι η ιδανικότερη μέθοδος για την παραγωγή καυσίμων φτωχών σε θείο αλλά δεν θα μπορούσε να καλύψει την παγκόσμια ζήτηση σε τέτοιου τύπου καύσιμα η οποία και αυξάνεται συνεχώς. Η αποθείωση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας ποικιλίας τεχνικών (hydrotreating, hydrodesulphurization) οι οποίες, αν και ανεπτυγμένες τεχνολογικά, δεν χρησιμοποιούνταν ευρέως έως πρόσφατα, λόγω του υψηλού κόστους επένδυσης και του φόβου για το ενεργειακό μέλλον που καθιστά την απόσβεση τους αβέβαιη. Πλέον έχουν ήδη αρχίσει να κατασκευάζονται τέτοιες μονάδες για την κάλυψη των όλο και αυξανόμενων αναγκών. Οι μονάδες που έχουν τεθεί σε λειτουργία ή αναμένονται να κατασκευαστούν βρίσκονται στην Ευρώπη (Ισπανία, Γερμανία, Ελλάδα, Η.Β.), στην Βραζιλία και στις Η.Π.Α. και θα εφοδιάζουν και την αγορά της Ασίας γεγονός που αναμένεται να διαφανεί στις τιμές των καυσίμων αυτών.⁴¹

Οι δυσκολίες αυτές στην παραγωγή καυσίμων με μικρό ποσοστό θείου σε συνδυασμό με την αύξηση στην ζήτηση των καυσίμων τέτοιου τύπου που θα επιφέρουν τα όρια που έχει θεσπίσει η IMO (International Marine time Organization) αναμένεται να αυξήσουν σημαντικά την τιμή των καυσίμων αυτών καθώς και την διαφορά τους με τα συμβατικά καύσιμα.

Από την 1^η Ιουλίου 2010, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η IMO έχει περιορίσει το ποσοστό των καυσίμων σε θείο για τα μεγάλα εμπορικά πλοία σε 3,5% παγκοσμίως και σε 1% στις περιοχές αυξημένης εμπορικής δραστηριότητας όπως η Βόρεια Θάλασσα και η Βαλτική. Δίνεται επομένως στα πλοία η δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν δύο διαφορετικά καύσιμα ανάλογα με την περιοχή στην οποία κινούνται. Η εναλλαγή αυτή των καυσίμων μειώνει σε πρώτο βαθμό το κόστος λειτουργίας τους συγκριτικά με την χρησιμοποίηση ενός μόνο καυσίμου χαμηλής συγκέντρωσης σε θείο αλλά απαιτεί βεβαίως κάποιες τροποποιήσεις στον τρόπο αποθήκευσης των δύο καυσίμων και δημιουργεί την ανάγκη χρήσης δύο ειδών λιπαντικών.

Οι σύγχρονες μηχανές μπορούν πλέον να χρησιμοποιούν καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο χωρίς προβλήματα αρκεί να δίνεται αυξημένη προσοχή στην λίπανση τους. Τα συνήθη λιπαντικά που χρησιμοποιούνται στους δίχρονους κινητήρες περιέχουν αλκαλικά πρόσθετα, συνήθως άλατα ασβεστίου, που εξουδετερώνουν τα παραγόμενα θειικά και νιτρικά οξέα που σχηματίζονται στον κύλινδρο προστατεύοντας τον με αυτόν τον τρόπο από την διάβρωση. Η διάβρωση λόγω των οξέων αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες φθοράς στους κυλίνδρους των μηχανών. Προκαλείται από την παρουσία νερού στον θάλαμο καύσης σε συνδυασμό με τις αυξημένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας εκεί οι οποίες βρίσκονται κάτω από το σημείο δρόσου της καμπύλης σχηματισμού του τριοξειδίου

⁴⁰ Lloyd's List, "IMP Panel Report Sees Big Role for Distillate", January 18, 2008

⁴¹ Tetra Tech, Inc and UltraSystems Environmental Incorporated, " Low-Sulfur Marine Fuel Availability Study", 2008

του θείου. Ο σχηματισμός του τριοξειδίου του θείου δεν είναι, ακόμα και σήμερα, εντελώς κατανοητός και δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια ο χρόνος που απαιτείται για την διάβρωση των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και ο αναγκαίος ρυθμός εισαγωγής νέου λιπαντικού σε αυτόν ώστε να εξουδετερώνονται τα οξέα. Ο αριθμός βάσης (Base Number- BN) χαρακτηρίζει τα λιπαντικά και αποτελεί μέτρο της ικανότητας των λιπαντικών να ουδετεροποιούν τα οξέα. Επιπλέον ο αριθμός αυτός είναι μέτρο των καθαριστικών ιδιοτήτων, της θερμικής σταθερότητας καθώς και της ικανότητας διασποράς του λιπαντικού. Οι ιδιότητες αυτές αποτελούν πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά του λιπαντικού που διασφαλίζουν την ελεύθερη κίνηση των εμβολών. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός BN τόσο μεγαλύτερη ποσότητα οξέος μπορεί να ουδετεροποιηθεί και επομένως ο αριθμός BN των λιπαντικών αποτελεί μία σημαντική παράμετρο για τον έλεγχο της διάβρωσης στις μηχανές και πάντα ο αριθμός αυτός πρέπει να συμβαδίζει με το ποσοστό θείου στα καύσιμα.⁴²

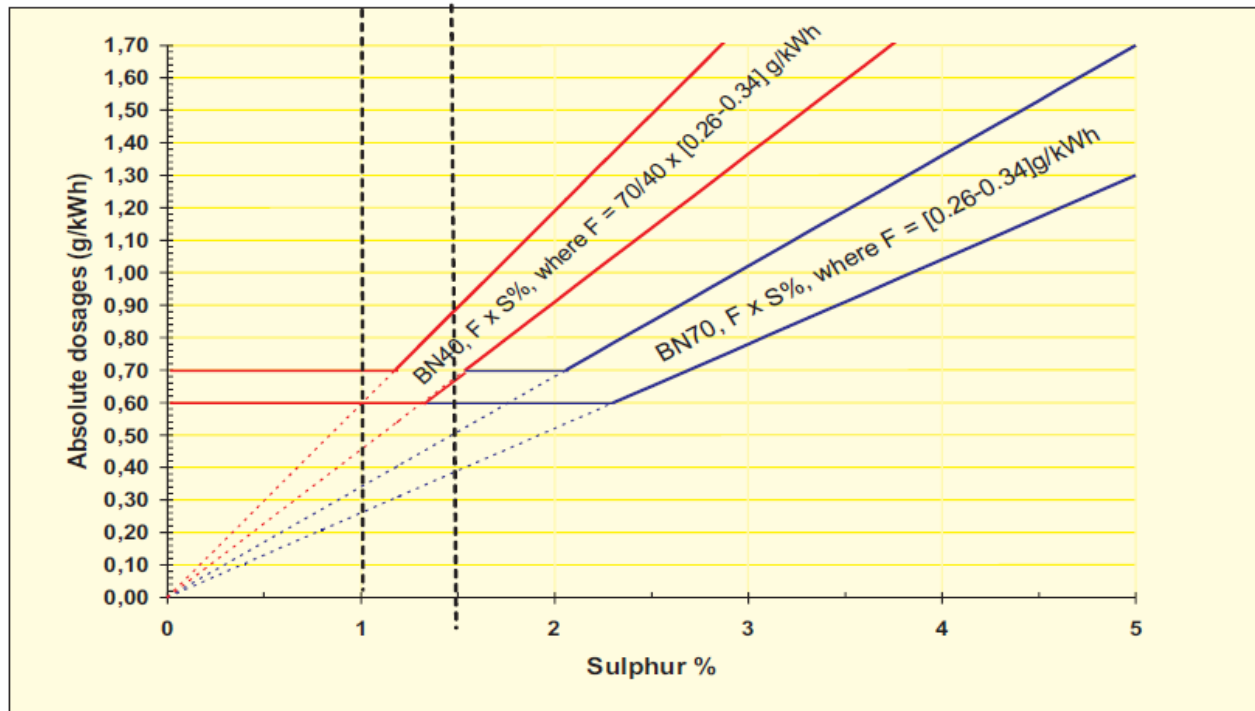
Τα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για χρήση σε συνδυασμό με καύσιμα με υψηλό ποσοστό σε θείο (HFO) έχουν BN70. Αν τα λιπαντικά αυτά χρησιμοποιηθούν μαζί με καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο θα προκαλέσουν προβλήματα φθοράς λόγω της αυξημένης αλκαλικότητας τους σε συνδυασμό με την απουσία οξέων. Για μικρά χρονικά διαστήματα, οι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν με τα λιπαντικά αυτά.⁴³ Για μεγαλύτερες όμως περιόδους λειτουργίας απαιτούνται γενικά λιπαντικά με μικρότερο αριθμό BN όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 (αν και η επιλογή του αριθμού BN αποτελεί πιο σύνθετη διαδικασία που δεν εξαρτάται μόνο από το ποσοστό του θείου στα καύσιμα). Η εναλλαγή αυτή στα καύσιμα και στα λιπαντικά εν πλω είναι ιδιαίτερα δυσχερής και καθόλου πρακτική εκτός κι αν κατασκευαστεί ένα λιπαντικό κατάλληλο και για τα δύο είδη καυσίμων. Επιπλέον η ανάγκη χρήσης δύο λιπαντικών δημιουργεί επιπρόσθετες δαπάνες για την αποθήκευσή τους.

Γίνεται επομένως φανερό ότι οι πλοιοκτήτες καλούνται πλέον να αποφασίσουν, βάσει οικονομικών βεβαίως κριτηρίων, αν θα καθιερώσουν στα πλοία τους την μόνιμη λειτουργία με καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο ή την λειτουργία με δύο είδη καυσίμων και δύο είδη λιπαντικών⁴⁴. Η λύση δευτερευουσών τεχνικών απόπλυσης των καυσαερίων είναι υπαρκτή και ιδιαίτερα ανταγωνιστική και δημοφιλής κερδίζοντας συνεχώς έδαφος και παρουσιάζεται στη συνέχεια.

⁴² Peter Dan Petersen, "Operating on Low Sulfur Fuel", DIESEL FACTS, MAN Diesel & Turbo, 3/2005.

⁴³ Michael Welsh, "Considerations for using low-sulphur fuel", Wartsila Switzerland Ltd, 2002

⁴⁴ Klaus M. Heim, "Engine and SO_x scrubber technologies to meet IMO fuel quality requirements on sulphur and SO_x", CIMAC Circle SMM 2008, Wartsila.



Σχήμα 4.2 Σύγκριση δύο λιπαντικών BN40 και BN70 ως προς την απαιτούμενη δόση χορήγησης και το ποσοστό θείου στα καύσιμα.⁴⁵

⁴⁵ MAN B&W Diesel A/S, " Operation on Low-Sulphur Fuels Two-Stroke Engines", Copenhagen, Denmark

4.1.2 ΑΠΟΠΛΥΣΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΜΕ ΝΕΡΟ - EGS (Exhaust Gas Scrubber)

Η συνηθέστερη, απλούστερη και πιο εύκολη στην εγκατάσταση δευτερεύουσα μέθοδος μείωσης των εκπεμπόμενων οξειδίων του θείου είναι η απόπλυση των καυσαερίων με νερό, θαλασσινό ή γλυκό, επιτυγχάνοντας την απομάκρυνση του διοξειδίου του θείου (SO₂) από αυτά χάρη στην αλκαλικότητα του νερού. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ αποτελεσματική καθώς επιτυγχάνει πάνω από 90% απομάκρυνση των οξειδίων του θείου από τα καυσαέρια. Επιπλέον θετικές παρενέργειες της μεθόδου είναι η μείωση κατά 80% περίπου των εκπομπών σωματιδίων (PM) καθώς και η αισθητή μείωση θορύβου από το σύστημα της εξάτμισης.

Emission reduction efficiencies

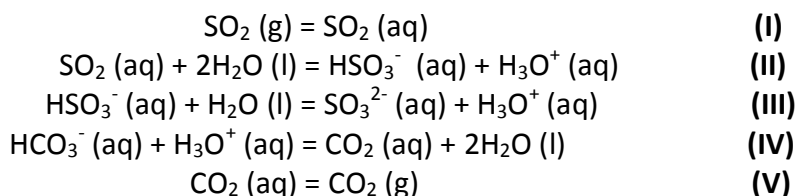
Measure	% Emissions reduction (-) / increase (+) per vessel			
	SO ₂	NO _x	PM	VOC
Sea Water Scrubbing	-90%	0%	-78%	±
Fuel Switching 2,7-> 1,5% S fuel	-44%	±	-18%	±
Fuel Switching 2,7-> 1,5% S fuel	-81%	±	-20%	±

Σχήμα 4.3 Ποσοστό μείωσης των εκπομπών SO_x με την μέθοδο απόπλυσης με νερό και σύγκριση της με την χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε Θείο⁴⁶

• Μηχανισμός δράσης της απόπλυσης με χρήση νερού

Η απόπλυση με χρήση θαλασσινού νερού είναι μια απλή μέθοδος που βασίζεται στην φυσική, αυξημένη αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού και επομένως δεν απαιτεί την χρησιμοποίηση πρόσθετων τεχνητών ουσιών για την αύξηση της αλκαλικότητας.

Το μοντέλο απορρόφησης του διοξειδίου του θείου (SO_x) από το θαλασσινό νερό περιγράφεται από τις ακόλουθες αντιδράσεις σε ισορροπία.



Η αντίδραση **(I)** παρουσιάζει την μετατροπή του αερίου SO₂ σε υγρό.

⁴⁶ Entec UK Limited , "Service Contract on Ship Emissions: Assignment and Market-based Instruments" ,Task 2c-SO₂ Abatement, Final Report. August 2005.

Η αντίδραση (II) παρουσιάζει την αντίδραση του υγρού SO₂ με το νερό παράγοντας όξινο θειώδες (HSO₃⁻ - bisulfite).

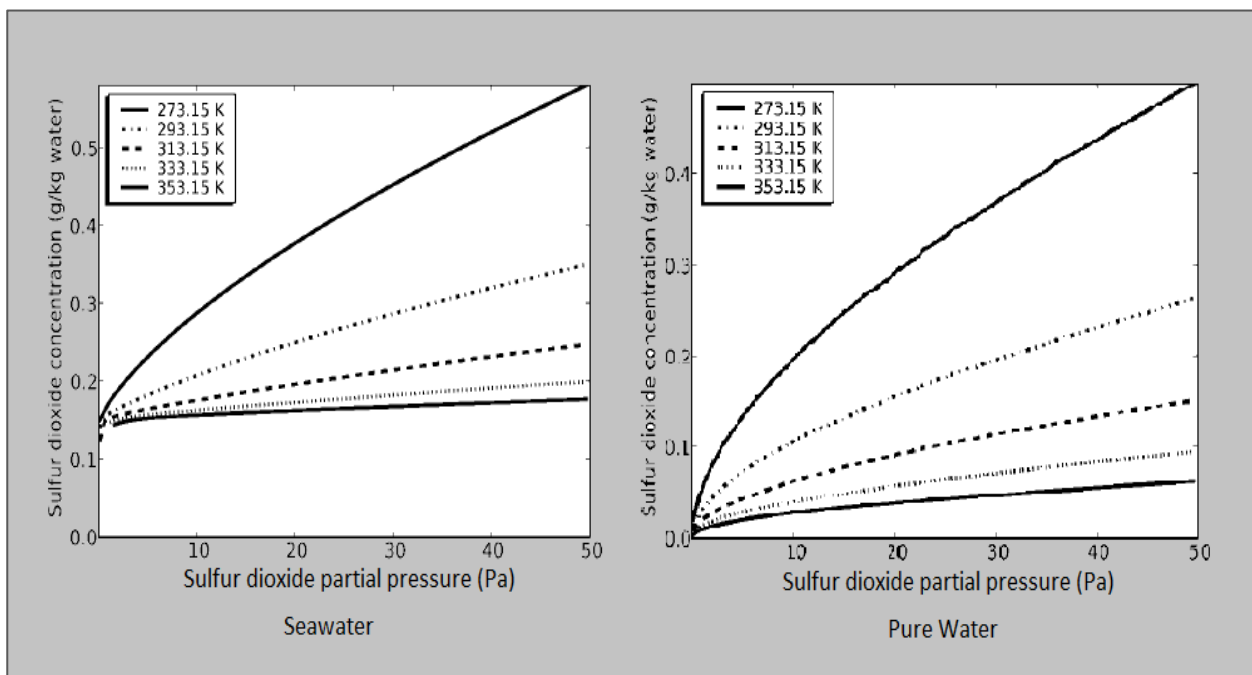
Η αντίδραση (III) παρουσιάζει την διάσταση του όξινου θειώδους σε θειώδες άλας (SO₃²⁻).

Το ποσοστό SO₂ πού δύναται να απορροφηθεί από το νερό επηρεάζεται από την μερική πίεση του στα καυσάερια όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Επιπρόσθετα, η διαλυτότητα του SO₂ στο νερό έχει παρατηρηθεί πως επηρεάζεται αρνητικά από την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η σημαντικότερη συμβολή του θαλασσινού νερού στην αύξηση της απορρόφησης του SO₂ είναι η αυξημένη αλκαλικότητα του αν και υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που συνεισφέρουν όπως η αλμυρότητα. Η αλκαλικότητα δείχνει την ικανότητα του νερού να αντιδρά με τα οξέα και να τα εξουδετερώνει. Η συνολική αλκαλικότητα εκφράζεται από τη παρακάτω σχέση.

$$\text{Total Alkalinity (AT)} = \text{AT} = [\text{HCO}_3^-]_{\text{T}} + 2[\text{CO}_3^{2-}]_{\text{T}} + [\text{OH}^-]_{\text{T}} - [\text{H}^+]_{\text{sws}} - [\text{HSO}_4^-] + [\text{B}(\text{OH})_4^-]_{\text{T}} + 2[\text{PO}_4^{3-}]_{\text{T}} + [\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{T}} + [\text{SiO}(\text{OH})^{3-}]_{\text{T}}$$

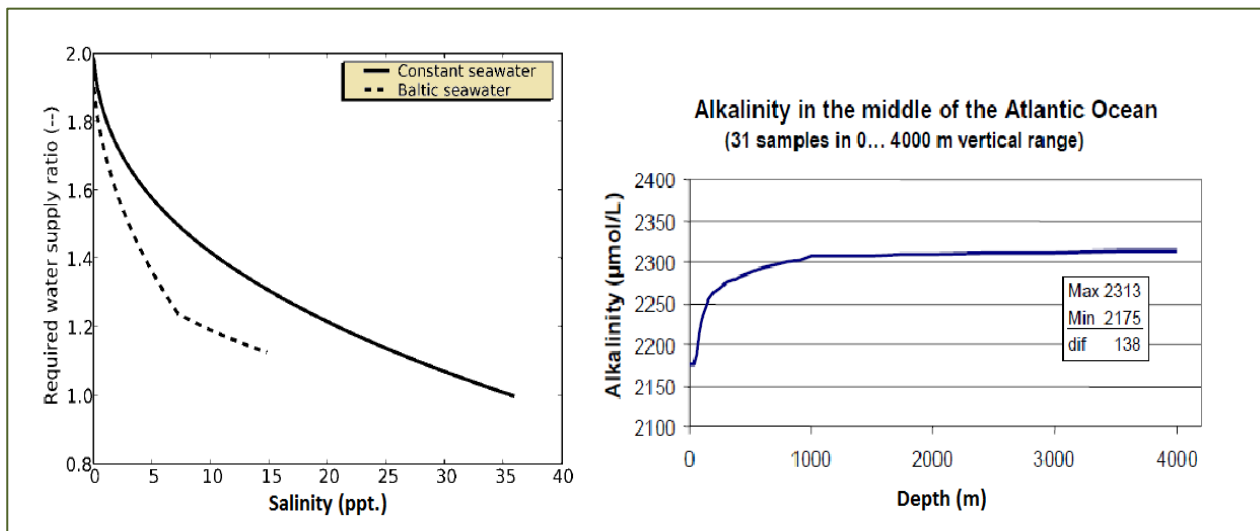
Όπως γίνεται φανερό από τη σχέση αυτή η μέγιστη συνεισφορά της αλκαλικότητας είναι τα ανιόντα HCO₃⁻ και CO₃²⁻ που αυξάνουν την απορρόφηση του SO₂ όπως φαίνεται από την αντίδραση (IV). Την αυξημένη διαλυτότητα του SO₂ στο θαλασσινό νερό παρουσιάζει το σχήμα 4.4.



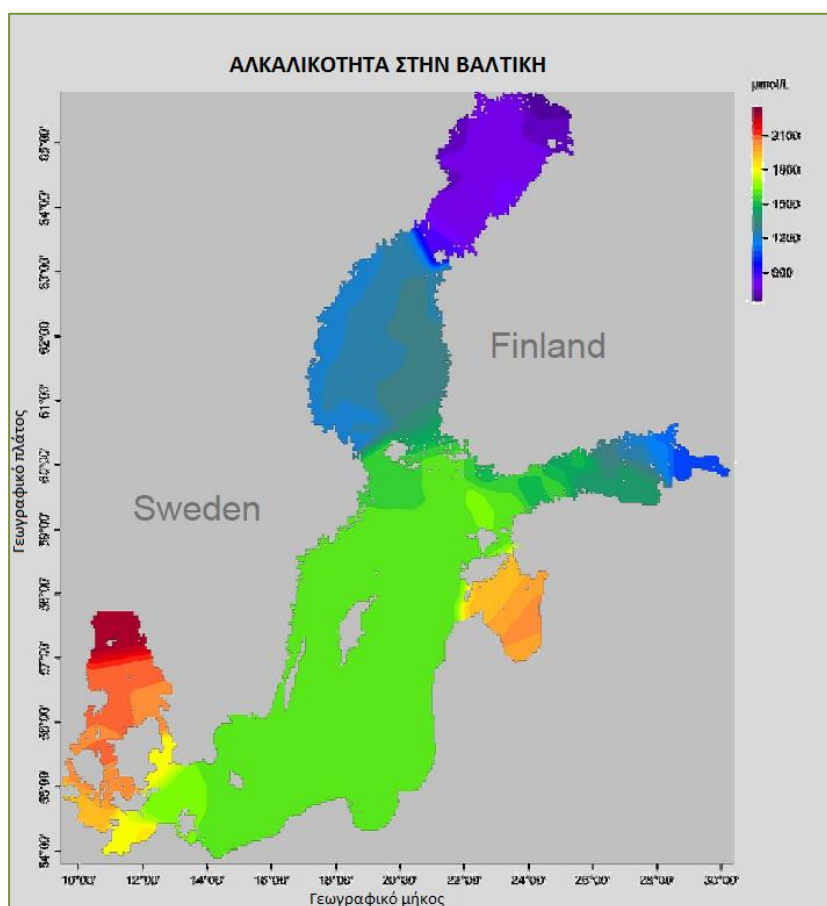
Σχήμα 4.4 Διαλυτότητα του SO₂ στο θαλασσινό και στο φρέσκο νερό⁴⁷

⁴⁷ Anders Andreasen and Stefan Mayer, "Use of Seawater Scrubbing for SO₂ Removal from Marine Engine Exhaust Gas", MAN B&W Diesel A/S, Denmark

Όπως φαίνεται στα σχήματα 4.5 και 4.6 που ακολουθούν, η αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού, όπως και η αλμυρότητα του, διαφοροποιείται ελαφρώς ανά περιοχή και κατά βάθος. Το νερό των ωκεανών έχει ± 5 ppt συγκριτικά με το κοινό θαλασσινό νερό. Η διαφορά στην απαιτούμενη ποσότητα νερού για την απορρόφηση του SO_2 από μια περιοχή με αλμυρότητα 35 ppt σε μία περιοχή με 30 ppt είναι αυξημένη περίπου κατά 10%.



Σχήμα 4.5 Αλμυρότητα και Αλκαλικότητα του θαλασσινού νερού ανάλογα με το βάθος⁴⁸



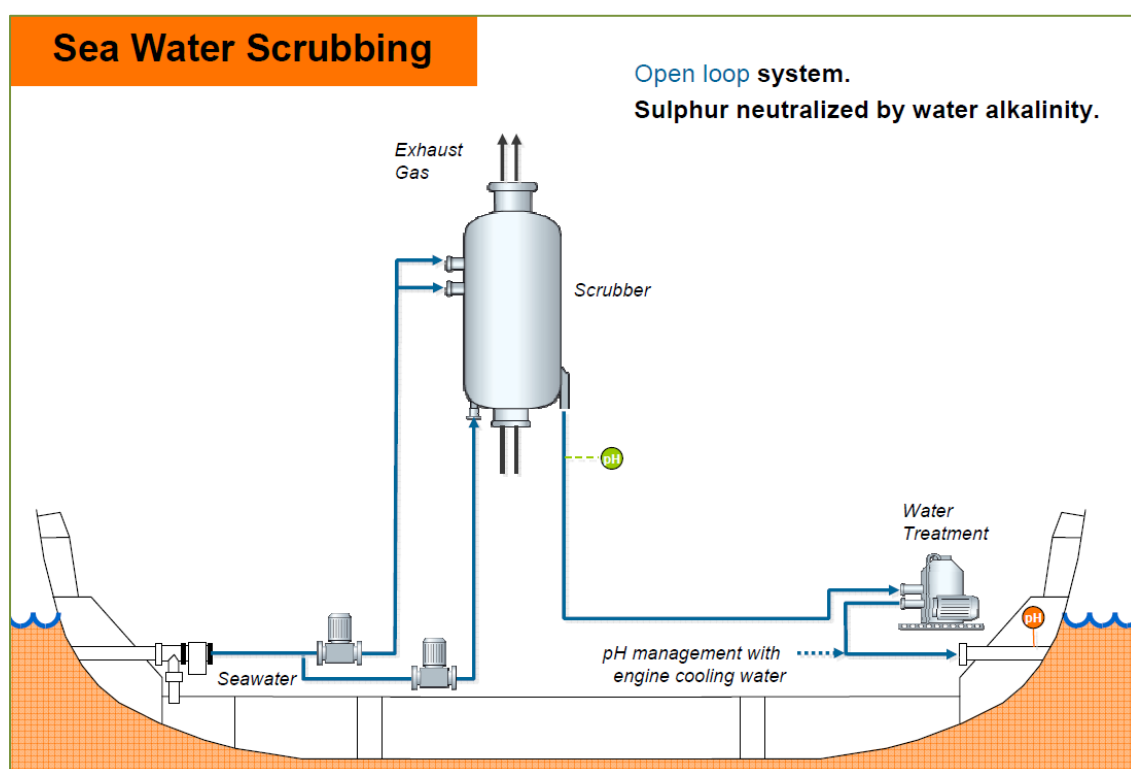
Σχήμα 4.6 Αλκαλικότητα του νερού στην περιοχή της Βαλτικής⁴⁹

⁴⁸ Torbjorn Henriksson, "Sulphur Scrubbers", Wartsila Finland, September 26, 2007

⁴⁹ Torbjorn Henriksson, "Sulphur Scrubbers", Wartsila Finland, September 26, 2007

• Περιγραφή της διάταξης και του τρόπου λειτουργίας

Το κυρίως μέρος του συστήματος απόπλυσης με χρήση νερού αποτελείται από ένα κύλινδρο με διάμετρο που ποικίλει από 1 έως 3 μέτρα ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής, την πίεση εξόδου των καυσαερίων και άλλες παραμέτρους. Ο κύλινδρος αυτός γεμίζει με νερό και στη συνέχεια διοχετεύονται σε αυτόν τα καυσαέρια τα οποία και αναμειγνύονται με το νερό δημιουργώντας ένα γαλάκτωμα. Το γαλάκτωμα αυτό κατευθύνεται στην συνέχεια σε έναν διαχωριστή από τον οποίο εξέρχονται δύο προϊόντα: ένα είδος υγρού που αποτελείται από υδρογονάνθρακες (HC), άνθρακα (C), θείο (S), νερό και άλλους ρύπους και ένα αέριο που αποτελείται από οξυγόνο (O_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και οξείδια του αζώτου (NO_x). Το παραγόμενο αέριο καταλήγει στην ατμόσφαιρα απαλλαγμένο πλέον από τα οξείδια του θείου ενώ το υγρό απορρίπτεται στην θάλασσα.



Σχήμα 4.7 Τυπική διάταξη συστήματος EGS ανοιχτού κυκλώματος⁵⁰

Το σύστημα αυτό έχει δύο τρόπους λειτουργίας ανάλογα με το είδος νερού, θαλασσινό ή γλυκό, που χρησιμοποιείται. Την λειτουργία ανοιχτού κυκλώματος (Open Loop) η οποία έχει περιγράψει παραπάνω και χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό και την λειτουργία κλειστού κυκλώματος (Closed Loop). Η λειτουργία κλειστού κυκλώματος χρησιμοποιείται συνήθως στα λιμάνια και σε παράκτιες περιοχές ώστε να αποφεύγεται η ρύπανση τους. Η λειτουργία ανοιχτού κυκλώματος χρησιμοποιείται συνήθως στην ανοιχτή θάλασσα και αποτελεί τον κύριο τρόπο λειτουργίας του συστήματος.

Κατά την λειτουργία κλειστού κυκλώματος λαμβάνει χώρα επανακυκλοφορία και ανακύκλωση του νερού κατά 99%. Το νερό δηλαδή που χρησιμοποιήθηκε για το ξέπλυμα των

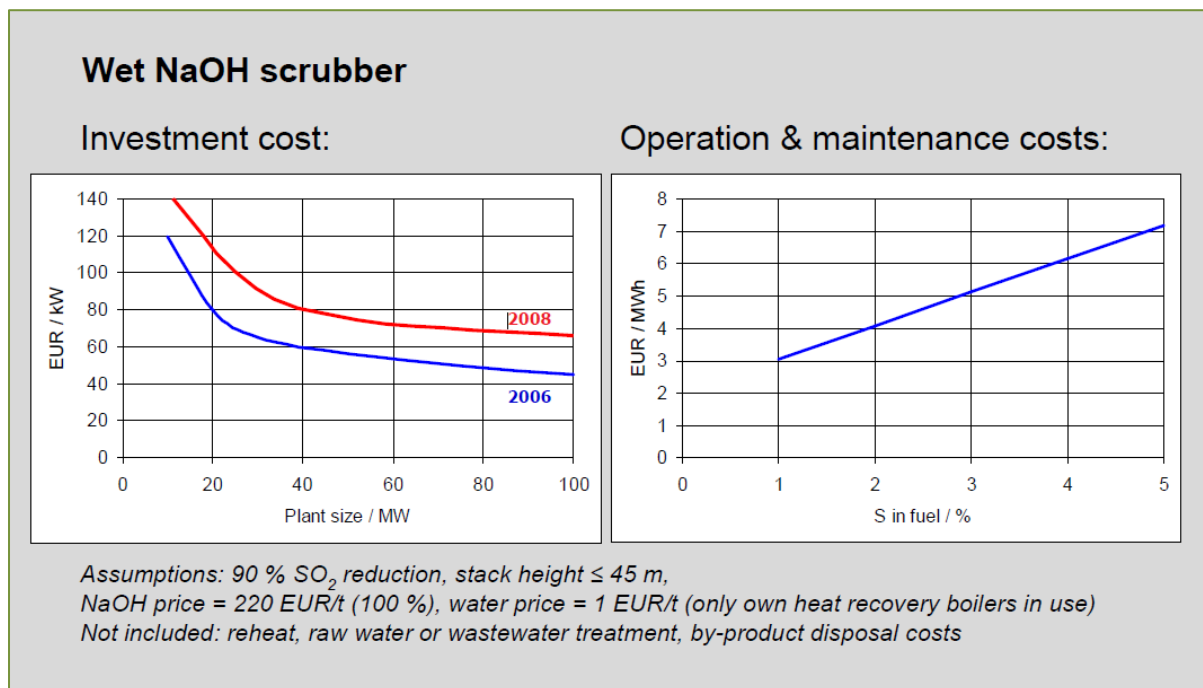
⁵⁰ Torbjorn Henriksson, "Sulphur Scrubbers", Wartsila Finland, September 26, 2007

καυσαερίων δεν καταλήγει στη θάλασσα αλλά εμπλουτίζεται με χημικές ουσίες (caustic soda – 50% NaOH solution ή ασβεστόλιθο – CaCO_3) που εξουδετερώνουν το SO_2 και επαναφέρουν την χαμένη αλκαλικότητα του νερού ώστε να μπορεί αυτό να επαναχρησιμοποιηθεί. Το νερό σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι θαλασσινό αλλά γλυκό νερό που είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενές. Η καυστική σόδα, προκειμένου να αντιδράσει με το διοξείδιο του θείου, χορηγείται μέσω μίας μικρής δοσομετρικής αντλίας σε μία δεξαμενή ανάμειξης. Αν το πλοίο χρησιμοποιεί καύσιμα υψηλά σε θείο (3% S) η απαιτούμενη κατανάλωση καυστικής σόδας υπολογίζεται περίπου στα 10-12 kg/MWh. Δεδομένου ότι η λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται συνήθως στα λιμάνια και υποθέτοντας ότι ένα πλοίο παραμένει εκεί περίπου δύο ώρες και παράγει ισχύ 2-3 MW η κατανάλωση καυστικής σόδας υπολογίζεται περίπου στα 50 kg NaOH. Μετά την έξοδο από το λιμάνι και την επαναφορά του ανοιχτού συστήματος λειτουργίας το γλυκό νερό που έχει χρησιμοποιηθεί καθαρίζεται μέσω ενός, ανεξάρτητου από το σύστημα απόπλυσης, συστήματος φιλτραρίσματος.

Τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας κλειστού κυκλώματος έναντι αυτής ανοιχτού κυκλώματος είναι συνοπτικά τα εξής:

- ◇ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιοχές.
- ◇ Χρησιμοποιεί μικρότερη παροχή νερού. Υπολογίζεται πως απαιτεί $200 \text{ m}^3/\text{hr}$ φρέσκου νερού όταν το σύστημα ανοιχτού κυκλώματος χρειάζεται περίπου $900 \text{ m}^3/\text{hr}$.
- ◇ Απαιτεί λιγότερη ισχύ για την κυκλοφορία του νερού. Καταναλώνει περίπου το 1/5 της ισχύς που θα απαιτούσε το σύστημα ανοιχτού κυκλώματος.
- ◇ Προκαλεί λιγότερα προβλήματα διάβρωσης.
- ◇ Δημιουργεί μικρότερη ποσότητα απορριμμάτων που αποθηκεύονται σε δεξαμενή και καθαρίζονται και δεν καταλήγουν στη θάλασσα.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου κλειστού κυκλώματος είναι η απαίτηση γλυκού νερού και η χρησιμοποίηση της καυστικής σόδας η οποία προσθέτει ένα επιπλέον κόστος λειτουργίας το οποίο όμως είναι σχετικά μικρό. Το κόστος της καυστικής σόδας (NaOH) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.8 Κόστος NaOH κατά την λειτουργία κλειστού κυκλώματος⁵¹

• Πλεονεκτήματα της τεχνικής απόπλυσης των καυσαερίων με νερό

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής απόπλυσης των καυσαερίων με νερό για την απομάκρυνση των οξειδίων του θείου, τα οποία και καθιστούν την μέθοδο αυτή ιδιαίτερα ανταγωνιστική και ελκυστική, είναι συνοπτικά τα ακόλουθα:

- ◇ Επιτυγχάνει μείωση του εκπεμπόμενου SO₂ που καταλήγει στην ατμόσφαιρα μεγαλύτερη από 90%. Μπορεί να φτάσει και το 98%.
- ◇ Μειώνει παράλληλα και την εκπομπή σωματιδίων (PM) κατά 70-80%.
- ◇ Απαλλάσσει τους πλοιοκτήτες από την ανάγκη χρησιμοποίησης καυσίμων χαμηλών σε θείο ή αποσταγμένων καυσίμων των οποίων οι τιμές είναι ιδιαίτερα υψηλές ιδίως μετά τον Ιούλιο του 2010.
- ◇ Συνεισφέρει στην παγκόσμια μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) αποκλείοντας την χρήση αποσταγμένων καυσίμων που απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλη κατανάλωση ισχύος κατά την διαδικασία παραγωγής τους στα διυλιστήρια.

⁵¹ Klaus M. Heim, "Engine and SO_x scrubber technologies to meet IMO fuel quality requirements on sulphur and SO_x", CIMAC Circle SMM 2008, Wartsila.

• Μειονεκτήματα της μεθόδου απόπλυσης των καυσαερίων με νερό

Η τεχνική της μεθόδου απόπλυσης των καυσαερίων από τα οξειδία του θείου με χρήση νερού, θαλασσινού ή γλυκού, παρουσιάζει έναν αριθμό μειονεκτημάτων:

◊ Κατά την διαδικασία απομάκρυνσης των SO_x από τα καυσαέρια δημιουργούνται οξέα που απειλούν με προβλήματα διάβρωσης τα διάφορα μέρη του κινητήρα και το σύστημα εξάτμισης.

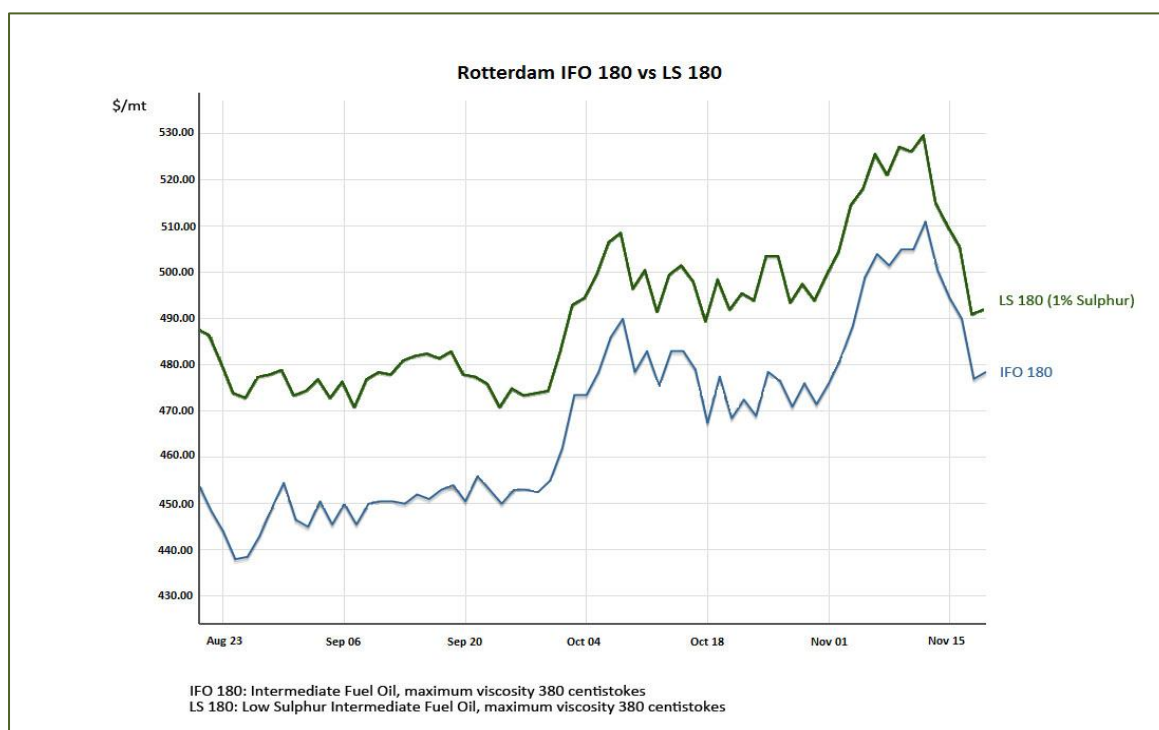
◊ Η μέθοδος της απόπλυσης έχει την συνεχή απαίτηση για νερό γεγονός που αυξάνει τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ και επομένως την κατανάλωση καυσίμου.

◊ Το θείο που απομακρύνεται από τα καυσαέρια καταλήγει στην θάλασσα (κατά την λειτουργία ανοιχτού κυκλώματος) γεγονός που οδηγεί σε επιπλέον περιβαλλοντικά προβλήματα ιδίως στους περιορισμένους χώρους των λιμανιών.

◊ Ένα τέτοιο σύστημα απόπλυσης των καυσαερίων προσθέτει όγκο και κόστος στο σύστημα εξάτμισης του πλοίου ιδιαίτερα εάν συνδυαστεί με κάποιο καταλυτικό σύστημα μείωσης των οξειδίων του αζώτου. Μελέτες έχουν δείξει ότι ένα τέτοιο σύστημα θα ανέβαζε το ισοδύναμο κόστος σε \$25 επιπλέον ανά τόνο καυσίμου που καταναλώνεται αλλά και την ίδια την κατανάλωση καυσίμου περίπου κατά 3% άρα συνολικά το ισοδύναμο κόστος καυσίμου ανεβαίνει στα \$30 ανά τόνο όπως αναφέρεται αναλυτικά ακολούθως.

4.1.3 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ

Οι περιορισμοί στις εκπομπές ρύπων που έχουν ήδη τεθεί σε εφαρμογή, έχουν αυξήσει σημαντικά την ζήτηση για καύσιμα με χαμηλό ποσοστό θείου αλλά και την τιμή τους. Τον Ιούλιο του 2010 τα καύσιμα με 1% θείο στοίχιζαν \$32,25 ανά τόνο περισσότερο από αυτά με περιεκτικότητα 3,5% σε θείο. Η διαφορά αυτή αναμένεται να διευρυνθεί σε \$59 μέχρι τον Ιούλιο του 2011. Αυτή την εποχή, Δεκέμβριος 2010, η διαφορά βρίσκεται περίπου στα \$15. Στο γράφημα 4.9 που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά οι τιμές για τα καύσιμα χαμηλά σε θείο (LS 1%) στο λιμάνι του Ρότερνταμ σε σύγκριση με τα συνηθισμένα καύσιμα παρόμοιου τύπου (IFO).



Σχήμα 4.9 Σύγκριση καυσίμων με 1% Θείο με τα συμβατικά καύσιμα για το λιμάνι του Ρότερνταμ (2010)⁵²

Οι πολύ υψηλές τιμές αυτές των καυσίμων με μειωμένο ποσοστό θείου αναγκάζουν πολλούς πλοιοκτήτες να αποκλείσουν την μόνιμη χρήση τέτοιων καυσίμων και να στραφούν σε εναλλακτικές τεχνικές μείωσης των εκπεμπόμενων οξειδίων του θείου που τους επιτρέπουν να συνεχίσουν να χρησιμοποιούν τα πιο οικονομικά καύσιμα και να συμμορφώνονται ταυτόχρονα με τα όρια της IMO. Οι εναλλακτικές αυτές τεχνικές είναι αρκετά πιο οικονομικές και πιο αποτελεσματικές. Βάσει των σημερινών τιμών των καυσίμων, η απόσβεση της δαπάνης κόστους τους είναι αρκετά βραχυπρόθεσμη ώστε να καθιστά την εγκατάστασή τους την πλέον αποδεκτή επιλογή.

⁵² <http://www.bunkerworld.com/prices/>

Ο πίνακας **4.10** παρουσιάζει το κόστος επένδυσης για ένα πλοίο που χρησιμοποιεί δύο είδη καυσίμων. Το κόστος επένδυσης περιλαμβάνει τις δαπάνες για την αποθήκευση των δύο διαφορετικών τύπων καυσίμου (2,7%S και 1,5%S) και την αποθήκευση των δύο διαφορετικών λιπαντικών που απαιτούνται. Όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα το κόστος επένδυσης για δίχρονες μηχανές μεγάλου μεγέθους είναι κατά 50% μικρότερο συγκριτικά με τις μικρότερες τετράχρονες μηχανές. Όπως ήταν επίσης αναμενόμενο, το κόστος μετασκευής είναι σημαντικά μεγαλύτερο συγκριτικά με το κόστος για τα καινούρια πλοία (+30%). Το κόστος λειτουργίας της χρήσης δύο ειδών καυσίμου δεν είναι σταθερό και μεταβάλλεται με τις διακυμάνσεις των τιμών στα καύσιμα. Τον Δεκέμβριο του 2010 η τιμή των καυσίμων με 3,5% Θείο (IFO 180) ήταν \$502 (376,50 EUR) και αυτών με 1,0% Θείο (LS 180) \$516 (387,00 EUR).

	Vessel		
	Small 30.00kW	Medium 10.000kW	Large 25.000kW
Κόστος επένδυσης (25 χρόνια) (EUR)	16.875,00	39.750,00	58.125,00
Κόστος επένδυσης (25 χρόνια) (EUR/kW)	6,00	4,00	2,00
Κόστος επένδυσης για δίχρονες μηχανές χαμηλών στροφών	-50% από τις τετράχρονες		
Κόστος επένδυσης μετασκευής	+30% συγκριτικά με τις καινούριες κατασκευές		

Πίνακας 4.10 Κόστος επένδυσης για εναλλαγή καυσίμων από 2,7% S σε 1,5% S

Ο Πίνακας **4.11** παρουσιάζει το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης αλλά και το συνολικό κόστος για την εγκατάσταση και λειτουργία ενός συστήματος απόπλυσης καυσαερίων με νερό. Όπως προκύπτει από τον πίνακα, το συνολικό ετήσιο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ενός συστήματος απόπλυσης καυσαερίων με νερό στο σύστημα εξάτμισης ενός υπό κατασκευή πλοίου είναι 338.499,00 € ενώ αν το σύστημα τοποθετηθεί σε ένα εν ενεργεία πλοίο το ετήσιο κόστος ανέρχεται σε 533.309,00 €.

	Vessel		
	Small	Medium	Large
Επένδυση καινούριας κατασκευής (€)	418.656	1.350.048	3.386.880
Διάρκεια ζωής εξοπλισμού	15	15	15
Κόστος ανά έτος (€/έτος)	37.700	121.460	304.630
Επένδυση ανά kW (€/kW)	118	118	118
Επένδυση μετασκευής (€)	598.080	1.928.640	4.838.400
Διάρκεια ζωής εξοπλισμού	12,5	12,5	12,5
Κόστος ανά έτος (€/έτος)	61.750	199.090	499.440
Επένδυση ανά kW (€/kW)	168	168	168
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (€/έτος)	12.560	27.001	33.869
Κόστος ανά MWh (€/MWh)	0,8	0,5	0,3
Συνολικό ετήσιο κόστος καινούριας κατασκευής (€/έτος)	50.260	148.461	338.499
Συνολικό ετήσιο κόστος μετασκευής (€/έτος)	74.310	226.091	533.309

Πίνακας 4.11 Παρουσίαση κόστους επένδυσης και εγκατάστασης συστήματος απόπλυσης καυσαερίων⁵³

Για την μελέτη του συνολικού κόστους ανά ταξίδι θα χρησιμοποιήσουμε το πλοίο "Pride of Kent" το οποίο κινείται με τέσσερις μηχανές Sulzer 8ZA40S Diesel. Οι μηχανές αυτές είναι μεσαίου μεγέθους κινητήρες Diesel τύπου ZA40S με οκτώ κυλίνδρους σε σειρά που αποδίδουν 660 kW ανά κύλινδρο. Δεδομένων των τιμών για το σύστημα απόπλυσης του πίνακα 4.11 και ενός μέσου επιτοκίου 4%, αν θεωρήσουμε την μέση κατανάλωση καυσίμου 272g/PSH και λάβουμε υπόψη τις σημερινές τιμές καυσίμων (<http://www.bunkerworld.com> , Φεβρουάριος 2011) προκύπτει ο παρακάτω Πίνακας 4.12.

⁵³ Entec UK Limited, "Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments", Task 2c – SO₂ Abatement, August 2005

Vessel	Pride of Kent
Engine Type	Sulzer 8ZA40S
No. of cylinder	8
Output/cylinder	660 kW/cyl
Total Output of 4 engines	21.120 kW
Specific fuel consumption	272 g/PSH
Hours per journey	550 hours
Fuel Consumption	3,17 ton/h
Fuel Consumption per journey	2.323 ton/journey
Price of IFO 180 ⁵⁴	585.00 \$/MT (€ 430,10)
Price of LS 180 1%S	598.00 \$/MT (€ 439,70)
Cost per journey - IFO 180	1.000.138,00 €/journey
Cost per journey- LS 180	1.021.511,00 €/journey
Cost per journey - IFO 180 + Water Scrubbing - New	1.028.361,00 €/journey
Cost per journey - IFO 180 + Water Scrubbing - Retrofit	1.040.877,00 €/journey

Πίνακας 4.12 Παρουσίαση του συνολικού κόστους μείωσης των οξειδίων του θείου ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται για το πλοίο "Pride of Kent" σύμφωνα με τις τιμές των καυσίμων για τον **Φεβρουάριο του 2011**.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.12, για το συγκεκριμένο πλοίο και τις σημερινές τιμές των καυσίμων, η χρήση απόπλυσης καυσαερίων με νερό θα ήταν €6.850,00 ανά ταξίδι πιο ακριβή από την μόνιμη χρήση καυσίμων με ποσοστό θείου 1% αν είχε τοποθετηθεί στο πλοίο από την κατασκευή του. Αν το σύστημα απόπλυσης τοποθετηθεί στο υπάρχον πλοίο θα είναι κατά €19.368,00 ακριβότερο από τη μόνιμη χρήση καυσίμων χαμηλών σε θείο. Επομένως, όσον αφορά το συγκεκριμένο πλοίο, η μόνιμη λειτουργία του με καύσιμα με 1%S είναι πιο συμφέρουσα από την εγκατάσταση συστήματος απόπλυσης καυσαερίων. Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι διαφορές αυτές είναι πολύ ασταθείς καθώς είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τις τιμές των καυσίμων οι οποίες αυξομειώνονται συνεχώς διατηρώντας όμως μία ανοδική τάση.

Ο Πίνακας 4.13 παρουσιάζει το ισοδύναμο κόστος καυσίμου για τις δύο εναλλακτικές τεχνικές μείωσης του θείου στα καυσαέρια συνυπολογίζοντας το κόστος λειτουργίας και εγκατάστασης για το 2005.

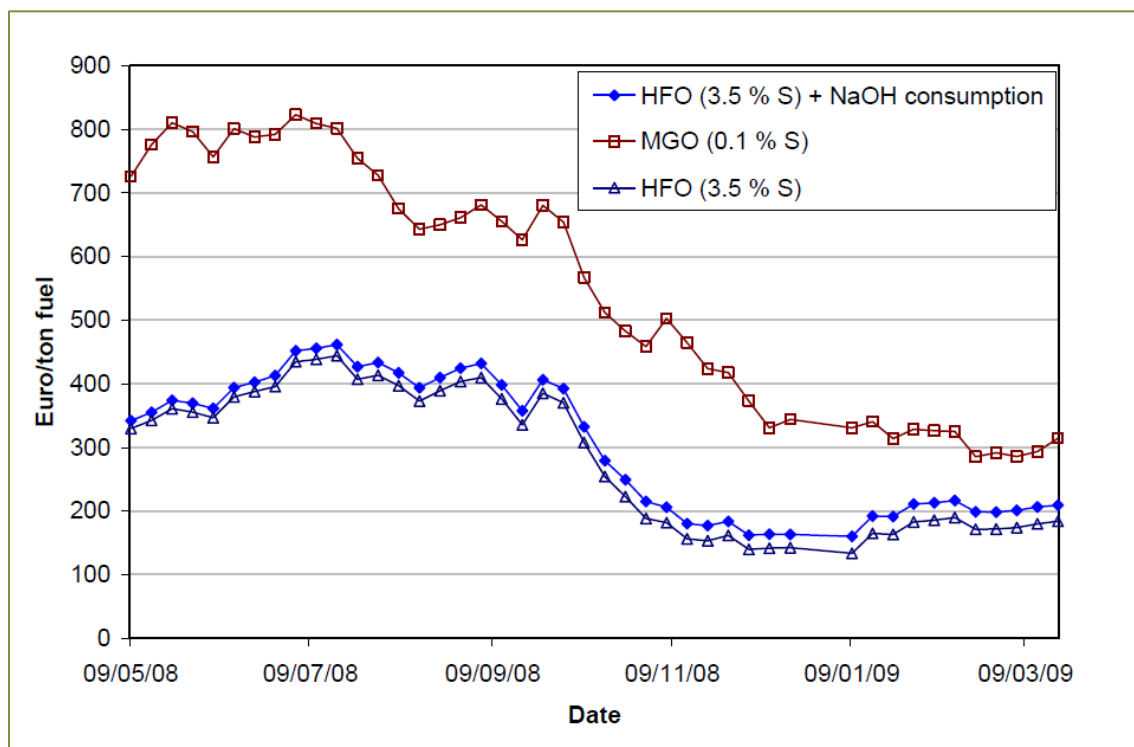
⁵⁴ <http://www.bunkerworld.com/prices/>

Measure	Ship Type	Vessel		
		Small €/tonne fuel	Medium €/tonne fuel	Large €/tonne fuel
Sea water scrubbing	New	16	14	13
Sea water scrubbing	Retrofit	24	22	21
Fuel switching: 2,7% S fuel to 1,5% S fuel	New	50	50	50
Fuel switching: 2.7% S fuel to 0,5% S fuel	New	64	64	64

Πίνακας 4.13 Ισοδύναμο κόστος ανά τόνο καυσίμου βάσει των τιμών των καυσίμων για το 2005⁵⁵

Όπως φαίνεται στον πίνακα 4.13, η απόπλυση των καυσαερίων με νερό είναι πιο συμφέρουσα, όταν πρόκειται για νέα κατασκευή πλοίου, συγκριτικά με την συνεχή χρήση καυσίμων με μικρό ποσοστό θείου ή την εναλλαγή καυσίμων, βάσει βεβαίως των τιμών των καυσίμων για το 2005, και αποτελεί την οικονομικότερη λύση για την συμμόρφωση με τους διεθνείς κανονισμούς εκπομπής οξειδίων του θείου. Στην περίπτωση παλαιών πλοίων, η μόνιμη χρήση καυσίμων με χαμηλό ποσοστό θείου είναι η οικονομικότερη λύση αλλά με μικρή διαφορά από την τεχνική απόπλυσης με νερό.

Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις του ισοδύναμου κόστους καυσίμου κατά την διάρκεια ενός έτους (Μάιος 2008-Μάρτιος 2009) για την λειτουργία με καύσιμα με 3,5%S με και χωρίς σύστημα EGR και καύσιμα με 0,1% S σύμφωνα με την εταιρία AALBORG INDUSTRIES.



Σχήμα 4.14 Σύγκριση του κόστους λειτουργίας ανάμεσα σε λειτουργία με καύσιμα HFO(3,5 % S), με

⁵⁵ Entec UK Limited, "Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments", Task 2c – SO₂ Abatement, August 2005

καύσιμα MGO(0,1% S) και με καύσιμα HFO με παράλληλη χρήση EGR κλειστού κυκλώματος για την περίοδο **Μάιος 2008 –Μάρτιος 2009** .⁵⁶

- **Συμπεράσματα**

Η απόπλυση των καυσαερίων με νερό, θαλασσινό ή φρέσκο, είναι μία πολύ απλή και αποτελεσματική μέθοδος που εκμεταλλεύεται την αλκαλικότητα του νερού, φυσική ή τεχνητή, για την εξουδετέρωση των οξειδίων του θείου σε ποσοστό μεγαλύτερο από 90%. Η συνεχής αύξηση στις τιμές των καυσίμων μικρής περιεκτικότητας σε θείο, η πολυπλοκότητα της χρήσης δύο ειδών καυσίμου από τα πλοία αλλά και η απλότητα της ίδιας της μεθόδου απόπλυσης των καυσαερίων έχουν καταστήσει την δευτερεύουσα αυτή μέθοδο πολύ ανταγωνιστική και έχουν αυξήσει σημαντικά την δημοτικότητα της στους κύκλους της ναυτιλίας. Καθώς οι τιμές των καυσίμων μεταβάλλονται συνεχώς δεν μπορούν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα για το πόσο οικονομική και συμφέρουσα είναι η τεχνική αυτή και κάθε πλοίο, ανάλογα με τον τύπο των μηχανών του, την ηλικία του και τις περιοχές στις οποίες κινείται, πρέπει να μελετάται ως ξεχωριστή περίπτωση.

⁵⁶ AALBORG INDUSTRIES, "Efficient exhaust gas scrubbing", GLI , September 2009.

5. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x

Όσον αφορά στα οξειδία του αζώτου (NO_x), η μείωση της συγκέντρωσης τους στα καυσαέρια είναι δυνατή με ένα μεγάλο εύρος τεχνολογιών το οποίο συνεχώς διευρύνεται με την ανάπτυξη καινούριων τεχνικών. Οι τεχνικές αυτές στοχεύουν στην μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου αλλά επηρεάζουν σημαντικά και τις υπόλοιπες εκπομπές αερίων. Όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο, τα οξειδία του αζώτου στα καυσαέρια των κινητήρων Diesel προέρχονται από δύο πηγές: την οξείδωση του αζώτου (N_2) του ατμοσφαιρικού αέρα λόγω των υψηλών θερμοκρασιών καθώς και τη οξείδωση του αζώτου που περιέχεται στα καύσιμα. Επομένως, η παραγωγή οξειδίων του αζώτου δεν επηρεάζεται από την ποιότητα του καυσίμου αλλά από την λειτουργία, την σχεδίαση και την συντήρηση του κινητήρα.

Η μείωση των οξειδίων του αζώτου επιτυγχάνεται είτε με εσωτερικές τροποποιήσεις στον κινητήρα που επιφέρουν την μείωση της παραγόμενης ποσότητας NO_x (πρωτεύουσες τεχνικές), είτε με χρήση εξωτερικού εξοπλισμού στο σύστημα της εξάτμισης με στόχο τη μείωση των ήδη παραγμένων ρύπων πριν την έξοδο τους στην ατμόσφαιρα (δευτερεύουσες τεχνικές).

5.1 ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΩΝ NO_x – Πρωτεύουσες Τεχνικές

Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τεχνικών που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν στον κινητήρα με στόχο την μείωση των παραγόμενων εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x). Οι μέθοδοι αυτές είναι δυνατόν να ομαδοποιηθούν στις εξής επιμέρους κατηγορίες: εσωτερικές τροποποιήσεις του κινητήρα (Internal Engine Modifications–IEM), εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης και ανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation-EGR). Οι τεχνικές αυτές στοχεύουν στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας της καύσης, τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του αέρα καύσης ή την τροποποίηση του συστήματος έγχυσης του καυσίμου στον κύλινδρο. Ο αριθμός και ο συνδυασμός των μεθόδων που χρειάζεται το κάθε είδος κινητήρα για την επίτευξη της μέγιστης μείωσης των NO_x εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και περιορισμούς και αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω έρευνας και μελέτης.

5.1.1. Εσωτερικές τροποποιήσεις του κινητήρα

Οι πιο σημαντικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές μείωσης των παραγόμενων NO_x μέσω εσωτερικών τροποποιήσεων στον κινητήρα είναι η βελτιστοποίηση στον σχεδιασμό του εγχυτήρα και του ακροφυσίου έγχυσης καυσίμου, η ελεγχόμενη και εναρμονισμένη έγχυση καυσίμου και η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό ανάλογα με τον επιθυμητό βαθμό μείωσης NO_x που είναι αναγκαίος για τον κάθε τύπο κινητήρα. Οι τεχνικές που παρουσιάζονται στην συνέχεια είναι σχετικά απλές και αποτελεσματικές χωρίς επιβλαβείς επιπτώσεις στην αξιοπιστία της μηχανής και με μικρή επιρροή στην κατανάλωση καυσίμου. Γενικά υπάρχει πάντα μία εξισορρόπηση ανάμεσα στην κατανάλωση καυσίμου και στις εκπομπές NO_x χωρίς να είναι δυνατή η μείωση του ενός μεγέθους χωρίς την ταυτόχρονη αύξηση του άλλου.

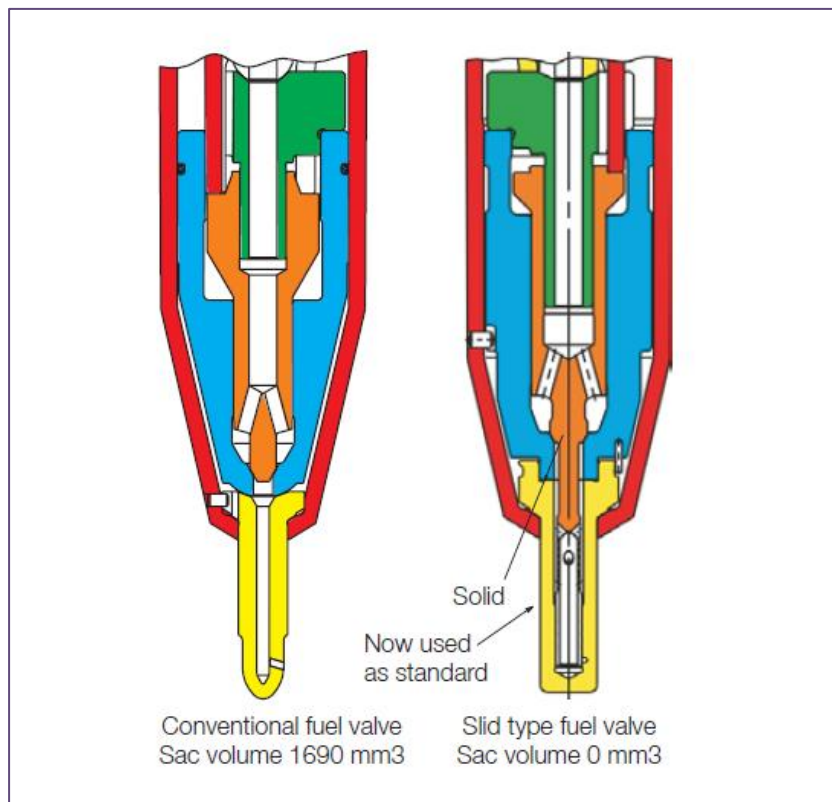
5.1.1.1 Εγχυτήρες "Slide valves" και βελτιστοποίηση του ακροφυσίου έγχυσης καυσίμου

Ο εξοπλισμός του κινητήρα με εγχυτήρες "slide valves" για χαμηλές εκπομπές NO_x είναι μία από της πιο διαδεδομένες πρακτικές μείωσης των εκπομπών οξειδίων του αζώτου για τους τετράχρονους και τους δίχρονους κινητήρες χαμηλών στοφών. Ήδη από το 2000 όλοι οι καινούριοι κινητήρες είναι εξοπλισμένοι με αυτού του τύπου τους εγχυτήρες ώστε να μπορέσουν να ικανοποιήσουν τα όρια εκπομπών που έχει θέσει η IMO .

Οι εγχυτήρες καυσίμου χαμηλών εκπομπών NO_x είναι σχεδιασμένοι ώστε να βελτιστοποιούν την διανομή του καυσίμου στον θάλαμο καύσης χωρίς να επηρεάζεται η θερμοκρασία στον κύλινδρο και άρα η αξιοπιστία της μηχανής. Ο αρχικός σκοπός σχεδιασμού αυτού του είδους βαλβίδων ήταν η μείωση των ακαθαρσιών στην κεφαλή του εμβόλου, στα κανάλια καυσαερίων και στον λέβητα καυσαερίων. Με τους κοινούς εγχυτήρες καυσίμου, οι δίνες του αέρα και η πίεση των σταγόνων καυσίμου διασκορπίζουν μέσα στον κύλινδρο ένα μέρος του καυσίμου που έχει παραμείνει στον σάκο του εγχυτήρα με αποτέλεσμα αυτό να εισέρχεται στην ζώνη καύσης χωρίς η θερμοκρασία να είναι αρκετά υψηλή για μία τέλεια καύση με συνέπεια την αυξημένη παραγωγή ακαθαρσιών, αιθάλης και άλλων άκαυστων οργανικών ενώσεων. Η μείωση των εκπομπών NO_x μέσω της αντικατάστασης των παλαιών εγχυτήρων με καινούριους είναι δυνατόν να αυξηθεί έως και 20% αν συνοδευτεί με την βελτιστοποίηση των οπών του ακροφυσίων.

Οι κινητήρες χαμηλών στροφών χρησιμοποιούν συνήθως δύο ή τρεις εγχυτήρες καυσίμου που βρίσκονται στο εξωτερικό άκρο του θαλάμου καύσης και ο σχεδιασμός και ο προσανατολισμός των οποίων επηρεάζουν σημαντικά την διαδικασία της καύσης. Κάθε ακροφύσιο έγχυσης διαθέτει έναν αριθμό οπών. Ο αριθμός, ο προσανατολισμός και το σχήμα των οπών αυτών καθορίζουν το βάθος στο οποίο το καύσιμο διεισδύει καθώς και την θέση των σταγονιδίων καυσίμου μέσα στον κύλινδρο. Επομένως τα χαρακτηριστικά των οπών επηρεάζουν την διαδικασία της εξάτμισης, την κίνηση του αέρα, την ανάμειξη αέρα-καυσίμου και συνεπώς την όλη διαδικασία της καύσης. Μια καλή ποιότητα έγχυσης συμβάλει στον γρήγορο σχηματισμό του μείγματος αέρα – καυσίμου μέσα στον κύλινδρο με αποτέλεσμα την πιο γρήγορη ανάφλεξη του καυσίμου και την απαίτηση μικρότερης ποσότητας αέρα. Η

αλληλεπίδραση μεταξύ των οπών έχει σημαντική επίδραση στη παραγωγή οξειδίων του αζώτου. Το βέλτιστο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται με ακροφύσιο πολλών οπών υπό υψηλή πίεση έγχυσης ώστε να δημιουργούνται δέσμες καυσίμου που να διασκορπίζουν το καύσιμο ομοιόμορφα σε κάθε σημείο του θαλάμου καύσης. Στους κινητήρες μεγάλων διαστάσεων, το μέγεθος των οπών περιορίζεται προς τα κάτω λόγω κινδύνου αποφράξεως εξαιτίας του είδους καυσίμων που χρησιμοποιούν. Υπάρχει ένας βέλτιστος αριθμός οπών ανά ακροφύσιο με τον οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη μείωση των παραγόμενων NO_x .



Σχήμα 5.1 Σύγκριση εγχυτήρων τύπου "slide valve" με τους κοινούς εγχυτήρες⁵⁷

Σύμφωνα με την εταιρία Wartsila, η θέση των ζωνών καύσης μέσα στον κύλινδρο και η απόσταση τους από τα μεταλλικές επιφάνειες αυτού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή των οξειδίων του αζώτου για τις μηχανές μεσαίων στροφών. Η ζώνες με τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες καύσης βρίσκονται κοντά στο έμβολο και στη κεφαλή του κυλίνδρου. Η μέγιστες αυτές θερμοκρασίες μπορούν να μειωθούν λόγω της εγγύτητας τους με τις μεταλλικές επιφάνειες του θαλάμου καύσης μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την παραγωγή NO_x . Φυσικά η υπερβολική ψύξη των ζωνών αυτών ή η επαφή άκαυστου καυσίμου με τις μεταλλικές επιφάνειες μέσα στον κύλινδρο είναι ανεπιθύμητη καθώς θα προκαλούσε την αύξηση των εκπομπών άκαυστων υδρογονανθράκων. Μελέτες έχουν δείξει ότι το ιδανικό περιβάλλον καύσης για μέγιστη μείωση της παραγωγής NO_x είναι και το ιδανικότερο περιβάλλον για τη μειωμένη συγκέντρωση άκαυστων υδρογονανθράκων στα καυσαέρια.

Μελέτες έχουν γίνει για τον περιορισμό του χώρου γύρω από τις ζώνες που λαμβάνει χώρα η καύση. Η ύπαρξη μεγάλου χώρου γύρω από τις περιοχές αυτές ευνοεί τον σχηματισμό των NO_x . Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει ένα στρώμα γύρω από τις ζώνες καύσης όπου ο

⁵⁷ MAN B&W, Emission Control MAN B&W Two-stroke Diesel Engines, MAN B&W Diesel A/S, 2003

σηματισμός των NO_x είναι μέγιστος. Ο χώρος αυτός είναι δυνατόν να περιοριστεί βελτιστοποιώντας το σχήμα του εμβόλου. Με τη χρήση βελτιστοποιημένου εμβόλου περιορίζεται η απόσταση μεταξύ της δέσμης του καυσίμου από τον άξονα του εμβόλου και παρασύρεται μικρότερος όγκος αέρα κατά τα πρώτα στάδια της έγχυσης μειώνοντας την φάση της προανάμειξης. Το βελτιωμένο σχήμα αυτό, ενισχύει επιπλέον τους στροβιλισμούς και επομένως την ανάμειξη κατά τα επόμενα στάδια της καύσης γεγονός που μειώνει την κατανάλωση καυσίμου και την συνολική εκπομπή ρύπων από τη μηχανή.

Η γωνία έγχυσης του καυσίμου μέσα στον θάλαμο καύσης από τα ακροφύσια είναι επίσης ένας παράγοντας που επηρεάζει τον σχηματισμό NO_x καθώς μπορεί να μειώσει την ποσότητα μείγματος αέρα-καυσίμου που καίγεται πριν την κυρία φάση της καύσης. Για παράδειγμα για έναν κινητήρα μεσαίων στροφών, μεταβάλλοντας την γωνία έγχυσης της δέσμης από 140° σε 130°, επιτυγχάνεται μείωση των NO_x κατά 32% αλλά παρατηρείται μία αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 6%. Η μείωση αυτή της γωνίας ψεκασμού έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη ποσότητα αέρα να παρασύρεται μέσα στις σταγόνες καυσίμου κατά τον ψεκασμό τους με συνέπεια την δημιουργία μικρότερου όγκου μείγματος αέρα-καυσίμου για την φάση της προανάμειξης.

Η εταιρία MAN B&W έχει πλέον καθιερώσει στις χαμηλών στροφών μηχανές της τη χρήση εγχυτήρων καυσίμου τύπου "Slide valve". Ο τύπος αυτός εγχυτήρα, εκτός από τη βελτιωμένη σχεδίαση ακροφυσίου που διαθέτει, δεν έχει ουσιαστικά θάλαμο που να μπορεί να αποθηκευτεί καύσιμο και συνεπώς η εισαγωγή καυσίμου στον θάλαμο μετά το τέλος της έγχυσης ελαχιστοποιείται. Το γεγονός αυτό έχει άμεση συνέπεια την μειωμένη παραγωγή εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογονανθράκων καθώς η ποσότητα καυσίμου που εισάγεται στον θάλαμο μετά το τέλος της κύριας φάσης καύσης δεν καίγεται πλήρως. Δοκιμές έχουν δείξει ότι αυτού του τύπου οι εγχυτήρες, σε μηχανή τύπου 12K90MC που λειτουργεί σε φορτίο 90%, επιτυγχάνουν μείωση των εκπομπών NO_x κατά 23% με αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 1%. Αντίστοιχα, η εταιρία Mitsubishi με χρήση εγχυτήρων για μειωμένες εκπομπές NO_x, πέτυχε μείωση των NO_x από 18,5 g/kWh σε 15 g/kWh με αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 2%.

Εσωτερική τροποποίηση κινητήρα	NO _x	SFC	PM	VOC	CO
Slide Valves	-20%	0%	Έως και -50% ανάλογα με τον τύπο καυσίμου (Ανεπιβεβαίωτο)	Έως και -50% ανάλογα με τον τύπο καυσίμου (Ανεπιβεβαίωτο)	Πιθανή αύξηση

Σχήμα 5.2 Επιπτώσεις χρήσης εγχυτήρων "slide valve" στις εκπομπές ρύπων σύμφωνα με την έρευνα της ENTEC⁵⁸

Σημαντικό πλεονέκτημα όλων των προαναφερόμενων μεθόδων μείωσης των εκπεμπόμενων NO_x είναι η σχετική ευκολία με την οποία μπορούν να εφαρμοστούν και στους

⁵⁸ Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005

παλιότερους κινητήρες, αντικαθιστώντας απλώς τους παλαιούς εγχυτήρες με καινούριους. Η διαδικασία αυτή διαρκεί λίγες ώρες, μία μέρα περίπου ανά μηχανή, και γίνεται από το πλήρωμα του πλοίου χωρίς να απαιτεί ναυπηγείο. Η αντικατάσταση των εγχυτήρων είναι ήδη δυνατή για ορισμένους τύπους δίχρονων κινητήρων και θα είναι σύντομα διαθέσιμη για όλους τους τύπους κινητήρων.

• Κόστος επένδυσης, εγκατάστασης και λειτουργίας

Το κόστος αντικατάστασης των εγχυτήρων καυσίμου με νέου τύπου για λιγότερες εκπομπές NO_x μπορεί να υπολογιστεί εύκολα και με ακρίβεια. Ένας εγχυτήρας τύπου "slide valve" στοιχίζει €2.100-3.000 που είναι περίπου 200€ επιπλέον απ' ότι οι κοινοί εγχυτήρες επομένως το συνολικό κόστος εξαρτάται από τον αριθμό των κυλίνδρων της μηχανής.

Το κόστος εγκατάστασης στην περίπτωση μετασκευής είναι σχετικά χαμηλό συγκριτικά με άλλες τεχνικές και δεν μεταβάλλεται σημαντικά σε σχέση με το κόστος για καινούρια κατασκευή. Στην έρευνα της ENTEC, της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάζονται εδώ, γίνεται η υπόθεση πως οι σχετικά νέες μηχανές (μικρότερες από 15 ετών) μπορούν να εφοδιαστούν άμεσα με νέους εγχυτήρες χωρίς επιπρόσθετο κόστος μελέτης.

Στον παρακάτω πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα κόστη επένδυσης, εγκατάστασης και λειτουργίας για την αντικατάσταση των παλαιών εγχυτήρων με τους εγχυτήρες νέου τύπου "slide valve" για καινούρια πλοία αλλά και μετασκευές. Θεωρείται ότι υπάρχουν δύο εγχυτήρες ανά κύλινδρο και λαμβάνεται υπόψη το επιπρόσθετο κόστος για τα ακροφύσια καθώς και το κόστος εργασίας. Επίσης λαμβάνεται ως δεδομένο ότι σε κάθε μηχανή υπάρχουν 0,7 κύλινδροι για κάθε MW. Τέλος, θεωρείται πως το κόστος αυξάνει κατά 10% για τα παλαιότερα πλοία (μεγαλύτερα από 15 χρόνων) λόγω της απαίτησης διεξαγωγής μελέτης πριν την εγκατάσταση.

		Small Ship (3000 kW)	Medium Ship (10000kW)	Large Ship (25000kW)
Πλοία < 15 ετών (Διάρκεια ζωής 15 έτη)	Συνολικό κόστος (€)	1.160	3.120	7.320
	Ετήσιο κόστος (€/έτος)	497	1.336	3.135
Πλοία > 15 ετών (Διάρκεια ζωής 15 έτη)	Συνολικό κόστος (€)	6.060	8.020	12.220
	Ετήσιο κόστος (€/έτος)	2.595	3.435	5.234
	Operational cost	0		
	Cost penalty for retrofit	0		

Πίνακας 5.3 Κόστη για την αντικατάσταση εγχυτήρων σύμφωνα με την έρευνα της ENTEC⁵⁹

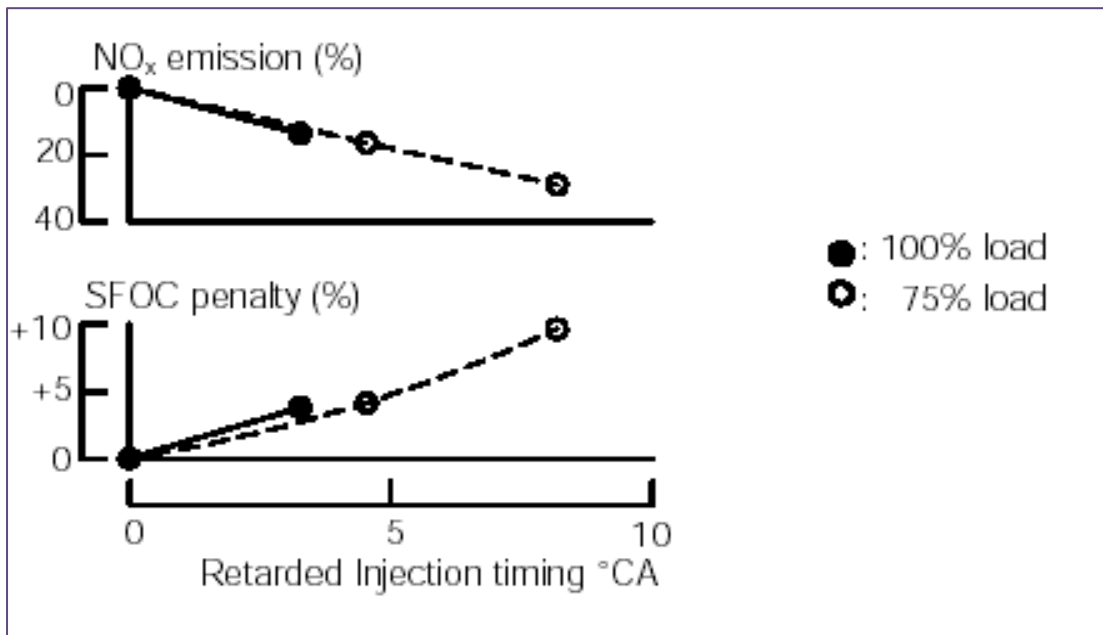
⁵⁹ Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005

5.1.1.2 Ελεγχόμενη έγχυση του καυσίμου

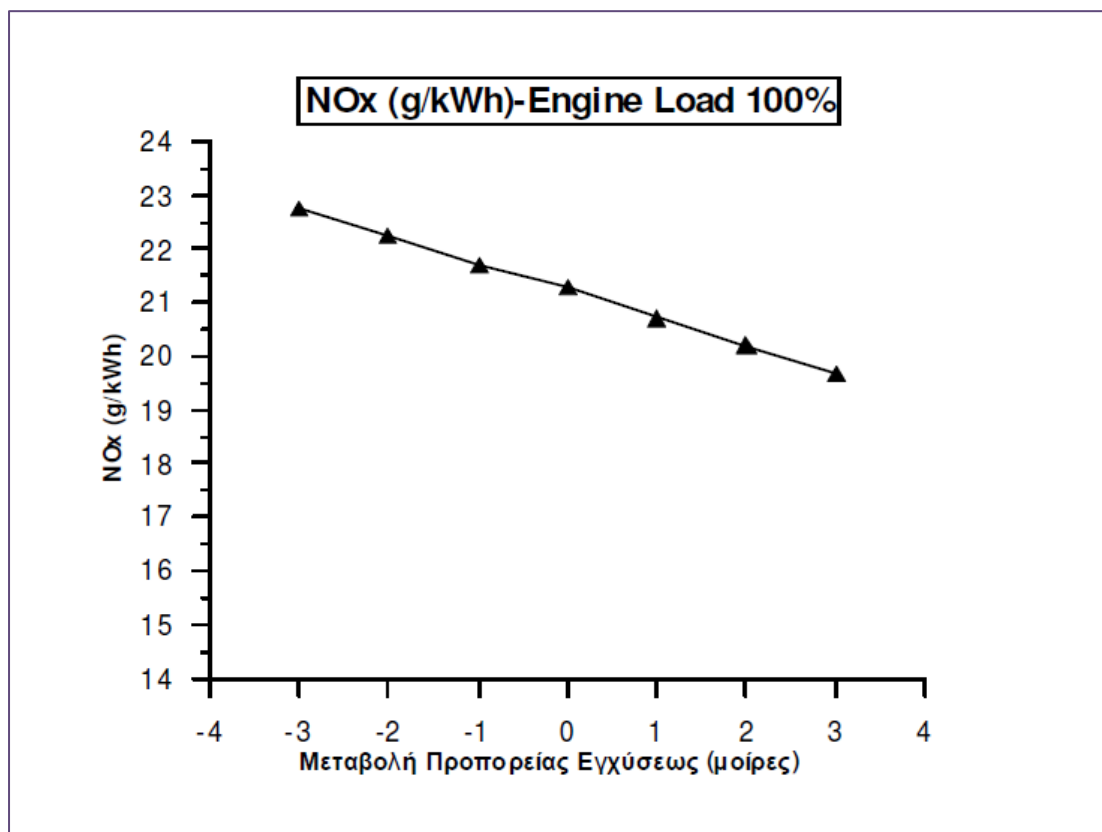
Με τον έλεγχο του χρόνου πραγματοποίησης της έγχυσης του καυσίμου μέσα στον κύλινδρο αλλά και της διάρκειας της έγχυσης είναι δυνατή η επίτευξη μιας σημαντικής μείωσης της παραγωγής οξειδίων του αζώτου (NO_x) από τη μηχανή.

Όπως έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο, η παραγωγή NO_x εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον θάλαμο καύσης αλλά και από τον χρόνο παραμονής των αερίων προϊόντων μέσα στον κύλινδρο μετά την ολοκλήρωση της καύσης. Όταν η καύση ολοκληρωθεί, μέσα στον θάλαμο επικρατούν ιδιαίτερα υψηλές τιμές θερμοκρασίας και πίεσης. Εάν τα καυσαέρια συμπιεστούν επιπλέον, οι τιμές αυτές θα αυξηθούν γεγονός που θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη παραγωγή NO_x . Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί με την καθυστέρηση της έγχυσης μέσα στον κύλινδρο, μέθοδο που αποτελεί ίσως την πιο γνωστή τεχνική μείωσης των NO_x .

Βασικό πλεονέκτημα της βραδυπορίας της έγχυσης καυσίμου είναι η επίτευξη μικρότερης μέγιστης πίεσης και μέγιστης θερμοκρασίας μέσα στον θάλαμο καύσης και συνεπώς μικρότερης συμπίεσης μετά την καύση. Επιπλέον η καθυστέρηση της έγχυσης μειώνει την ποσότητα καυσίμου που καίγεται πριν την μέγιστη πίεση γεγονός που μειώνει τον χρόνο παραμονής των καυσαερίων μέσα στον κύλινδρο μετά την καύση. Η διαδικασία αυτή βέβαια, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και των απωλειών θερμότητας καθώς και την αύξηση της παραγωγής καπνού από τη μηχανή λόγω των μειωμένων θερμοκρασιών καύσης. Μετρήσεις στην μηχανή 4T50MX της εταιρίας MAN B&W έχουν δείξει πως καθυστέρηση της έγχυσης καυσίμου κατά 7 μοίρες επιφέρει μείωση της παραγωγής NO_x κατά 30% περίπου αλλά και αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά 7% (Σχημα 5.4).



Σχήμα 5.4 Επίδραση της βραδυπορίας της έγχυσης στην παραγωγή NO_x και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου⁶⁰

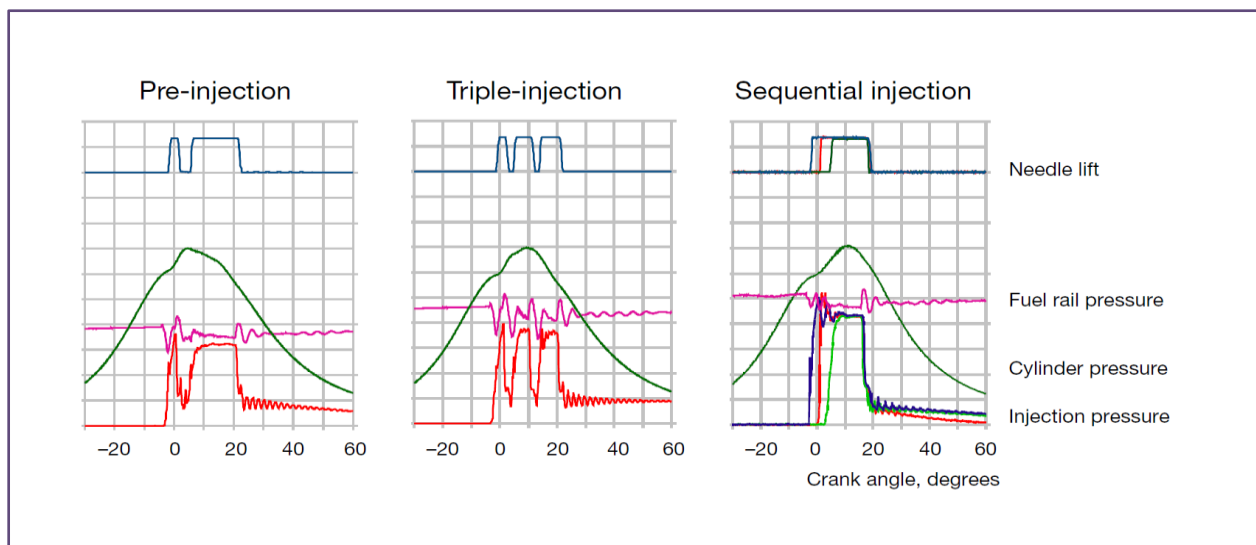


Σχήμα 5.5 Επίδραση της βραδυπορίας της έγχυσης καυσίμου στην παραγωγή NO_x⁶¹

⁶⁰ MAN B&W, Emission Control Two-stroke Low-Speed Diesel Engines, MAN B&W DIESEL A/S, www.manbw.com

⁶¹ Φωτίου Κ. Προκόπιος, Προσομοίωση Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα Diesel Ηλεκτροπαραγωγής και Διερεύνηση Τεχνικών Περιορισμού NO_x με χρήση Πολυζωνικού Μοντέλου Καύσης, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π.

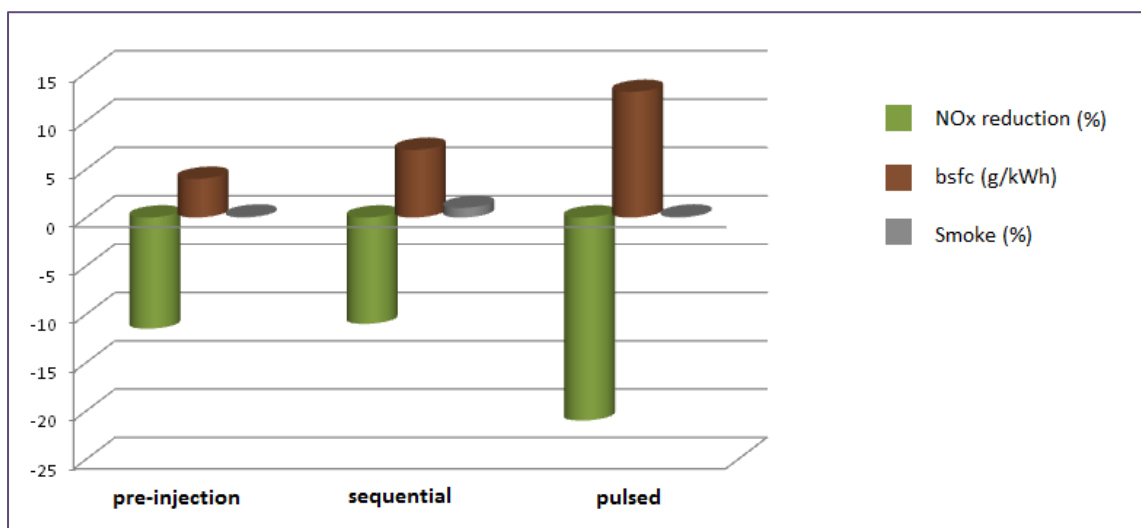
Εάν η βραδυπορία της έγχυσης συνδυαστεί με την βελτίωση των χαρακτηριστικών έγχυσης όπως ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιείται η έγχυση από τους εγχυτήρες, οι εκπομπές NO_x μπορούν να μειωθούν επιπλέον έως και 20%. Για παράδειγμα, στις μηχανές μεσαίων στροφών χρησιμοποιείται προ-έγχυση του καυσίμου για να περιοριστεί ο χρόνος καθυστέρησης και να μειωθεί η πίεση και η θερμοκρασία κατά τα πρώτα στάδια της καύσης με αποτέλεσμα την μειωμένη παραγωγή NO_x. Στο σχήμα 5.6 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά έγχυσης για τρία διαφορετικά προφίλ έγχυσης που μπορούν να επιτευχθούν.



Σχήμα 5.6 Χαρακτηριστικά έγχυσης τριών διαφορετικών προφίλ έγχυσης. Στο πρώτο και στο δεύτερο προφίλ οι τρεις εγχυτήρες κάθε κυλίνδρου λειτουργούν ταυτόχρονα. Στο τρίτο μοτίβο οι εγχυτήρες ενεργοποιούνται εναλλάξ.⁶²

Στο πρώτο προφίλ πραγματοποιείται προ-έγχυση του καυσίμου δηλαδή μια μικρή ποσότητα καυσίμου εγχέεται αρχικά μέσα στον κύλινδρο και ακολουθείται από την υπόλοιπη ποσότητα του καυσίμου. Στο δεύτερο προφίλ πραγματοποιείται τριπλή έγχυση (ή παλμική) κατά την οποία η έγχυση του καυσίμου λαμβάνει χώρα σε τρεις ισόποσες, διαδοχικές δόσεις. Τέλος, στο τρίτο προφίλ η έγχυση πραγματοποιείται διαδοχικά από τα τρία ακροφύσια. Κατά την παλμική έγχυση επιτυγχάνεται μείωση των NO_x κατά 20% αλλά η κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται κατά 7%. Η διαδοχική έγχυση και η προ-έγχυση έχουν μικρότερη επίδραση στην παραγωγή NO_x και συνεπώς και στην κατανάλωση καυσίμου (Σχήμα 5.7).

⁶² Heinrich Schmid, German Weisser, Marine Technologies for Reduced Emissions, Wartsila corporation, www.wartsila.com, April 2005

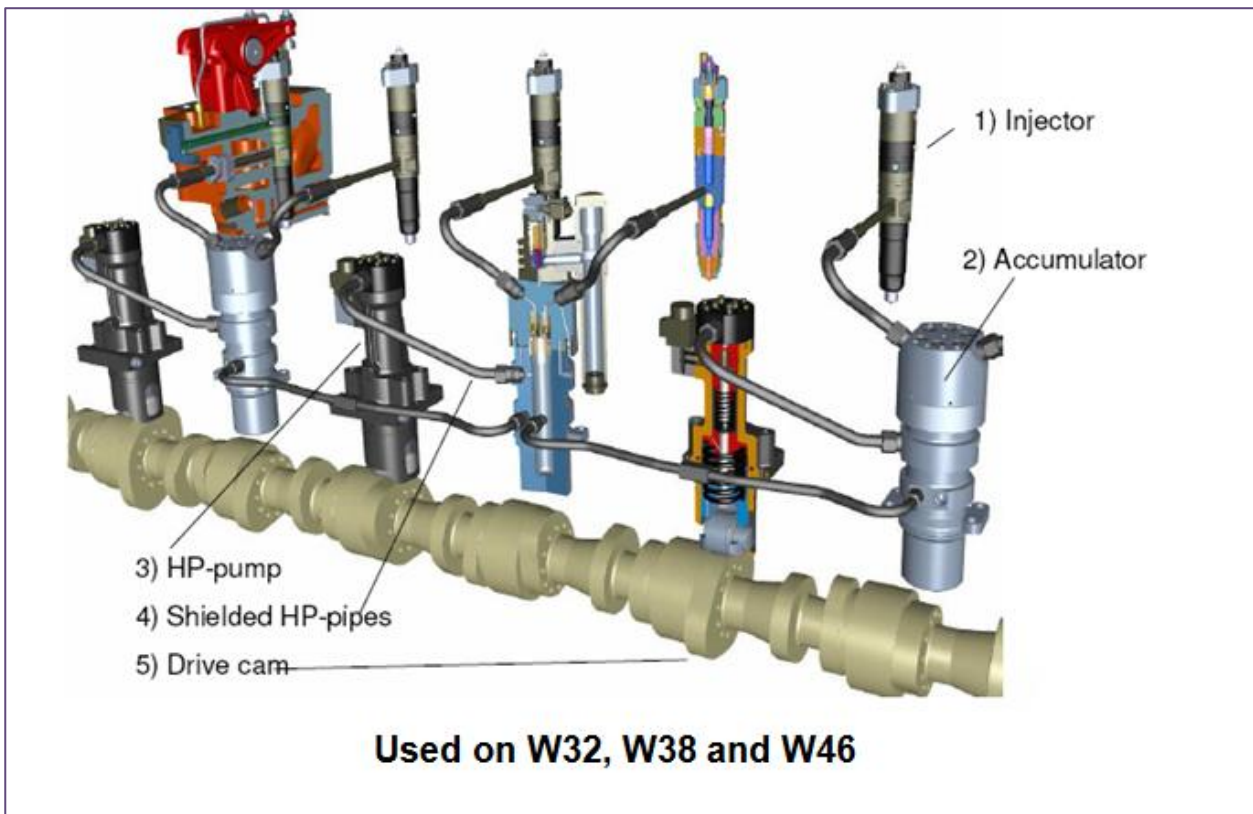


Σχήμα 5.7 Επιπτώσεις της αλλαγής του ρυθμού έγχυσης στην εκπομπή NO_x και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου

• Το σύστημα έγχυσης καυσίμου "Common Rail"

Η σωστή ρύθμιση του χρόνου έναρξης και τερματισμού της έγχυσης του καυσίμου μέσα στον κύλινδρο αλλά και ο έλεγχος του ρυθμού έγχυσης από τις βαλβίδες αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που συμβάλουν στην μειωμένη παραγωγή NO_x από τη μηχανή. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα καινούριο σύστημα έγχυσης καυσίμου που προσφέρει ακριβή, ευέλικτη αλλά προ παντός ελεγχόμενη έγχυση. Το σύστημα "Common rail" χρησιμοποιείται πλέον σε μεγάλο αριθμό πλοίων όλων των τύπων, με ισχύ από 5.800kW μέχρι 80.000 kW, εξαιτίας των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει μεταξύ των οποίων και οι μειωμένες εκπομπές NO_x.

Το σύστημα έγχυσης καυσίμου "Common Rail" αποτελεί μία καινοτόμο μέθοδο η οποία επιτρέπει τον ηλεκτρονικό έλεγχο του χρόνου έγχυσης του καυσίμου, της ποσότητας καυσίμου και την μέγιστη πίεση έγχυσης επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τον βέλτιστο ψεκασμό του καυσίμου στον θάλαμο καύσης. Το σύστημα αυτό αποτελείται από αντλίες υψηλής πίεσης (pressurizing fuel pumps), συσσωρευτές καυσίμου (fuel accumulator) και εγχυτήρες καυσίμου (fuel injectors). Η αντλία, που κινείται από τον εκκεντροφόρο άξονα, διοχετεύει καύσιμο υψηλής πίεσης στον συσσωρευτή καυσίμου υψηλής πίεσης. Από αυτόν τροφοδοτούνται όλοι οι εγχυτήρες καυσίμου των κυλίνδρων εξ ου και η ονομασία του συστήματος. Οι εγχυτήρες αυτοί ενεργοποιούνται ηλεκτρονικά μέσω της μονάδας ελέγχου της μηχανής (ECU-Engine Control Unit). Όταν ενεργοποιηθούν, ανοίγει η υδραυλική βαλβίδα του κάθε κυλίνδρου λόγω της υψηλής πίεσης και το καύσιμο ψεκάζεται μέσα στον κύλινδρο στην επιθυμητή πίεση. Οι εγχυτήρες συνδέονται μεταξύ τους μέσω σωληνώσεων, μικρής διαμέτρου, αποτελούνται από ένα ακροφύσιο και ένα έμβολο και λειτουργούν ανεξάρτητα ώστε να επιτρέπουν την ρύθμιση της πίεσης έγχυσης αναλόγως με τις ανάγκες της μηχανής που προκύπτουν. Στους μεσαίων στροφών κινητήρες 46 της εταιρίας Wartsila, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 5.8, κάθε αντλία και κάθε συσσωρευτής καυσίμου εξυπηρετούν δύο κυλίνδρους.

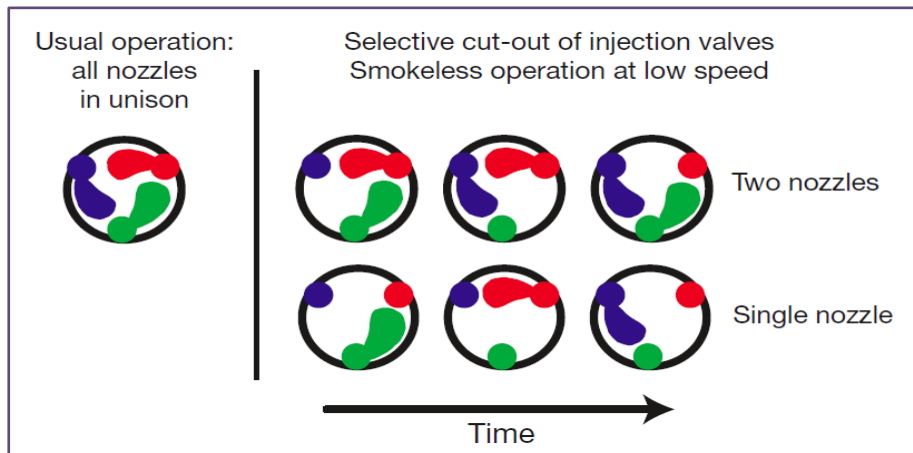


Σχήμα 5.8 Common Rail System στους μεσαίους κινητήρες Wartsila 46⁶³

Ο έλεγχος του χρόνου και της πίεσης έγχυσης μέσω του συστήματος έγχυσης Common Rail, προσφέρει τη δυνατότητα επίτευξης μίας καλύτερης ποιοτικά καύσης. Το ανεξάρτητο σύστημα ελέγχου της έγχυσης σε κάθε κύλινδρο ρυθμίζει τον χρόνο έγχυσης του καυσίμου, ελέγχει τον όγκο καυσίμου που ψεκάζεται και καθορίζει τη μορφή του μοτίβου έγχυσης χωρίς να επηρεάζεται από τις στροφές και το φορτίο της μηχανής. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα "common rail" προσφέρει ελεύθερη επιλογή των παραμέτρων της έγχυσης καθώς και μεγάλη ακρίβεια στην ποσότητα καυσίμου που εγχέεται από τον κάθε κύλινδρο ξεχωριστά. Επιπλέον το σύστημα έχει την δυνατότητα να διατηρεί την πίεση έγχυσης υψηλή και σταθερή σε όλα τα φορτία λειτουργία της μηχανής μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο αισθητά την παραγωγή καπνού από τη μηχανή.

Στις μηχανές Sulzer RT-flex της εταιρίας Wartsila Corporation, ο κάθε κύλινδρος είναι εφοδιασμένος με τρεις εγχυτήρες καυσίμου οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα και μπορούν να προγραμματιστούν να λειτουργούν ξεχωριστά ή και όλοι μαζί ανάλογα με τις ανάγκες της μηχανής. Το σχήμα 5.9 παρουσιάζει στη συνέχεια την λειτουργία των τριών εγχυτήρων σε έναν κύλινδρο και πως αυτή μπορεί να τροποποιηθεί.

⁶³ P. Tremuli, Proposals for exhaust Gas Emissions Abatement, www.wartsila.com, January 2008



Σχήμα 5.9 Λειτουργία 3 εγχυτήρων καυσίμου σε κινητήρα Sulzer RT-flex.⁶⁴

Η ελεγχόμενη έγχυση του καυσίμου και η ελεγχόμενη ενεργοποίηση των βαλβίδων εξαγωγής των καυσαερίων επιτρέπει τη βέλτιστη δυνατή μείωση των εκπομπών NO_x σε κάθε φορτίο του κινητήρα καθώς ελέγχοντας την έναρξη και τον τερματισμό της έγχυσης επιτυγχάνεται και έλεγχος της καύσης. Όταν η καύση πραγματοποιείται κοντά στην έναρξη της εκτόνωσης, οι θερμοκρασίες στον κύλινδρο είναι μειωμένες με αποτέλεσμα και την μείωση των παραγόμενων NO_x κατά 10-20%. Μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι η αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά περίπου 4 g/kWh και η αύξηση του θερμικού φορτίου που δέχεται η μηχανή.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει το σύστημα Common Rail στην λειτουργία της μηχανής συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα έγχυσης καυσίμου είναι συνοπτικά τα εξής:

- Επιτρέπει την έγχυση καυσίμου υψηλής πίεσης σε κάθε φορτίο λειτουργίας της μηχανής καθώς δεν επηρεάζεται από τις στροφές της μηχανής. Στα συμβατικά συστήματα έγχυσης, οι βαλβίδες εξαγωγής κινούνται από τον εκκεντροφόρο άξονα και επομένως μπορούν να επιτύχουν την μέγιστη πίεση έγχυσης μόνο στις υψηλότερες στροφές λειτουργίας. Οι βαλβίδες εξαγωγής στο σύστημα Common Rail κινούνται και αυτές μέσω του εκκεντροφόρου άξονα αλλά η σχεδίαση του συστήματος μέσω των συσσωρευτών καυσίμου επιτρέπει την διατήρηση μίας σταθερά υψηλής πίεσης.

- Επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της έναρξης και λήξης έγχυσης του καυσίμου κατά τη λειτουργία της μηχανής καθώς και την ρύθμιση του ρυθμού έγχυσης επιτρέποντας πολλαπλούς ψεκασμούς. Τα συμβατικά συστήματα έδιναν την δυνατότητα πολλαπλών ψεκασμών επίσης αλλά η λειτουργία αυτή ήταν πολύ πιο δύσκολη και ακριβή.

- Επιτυγχάνει την λειτουργία της μηχανής χωρίς ορατό καπνό σε όλα τα φορτία λειτουργία της μηχανής καθώς και κατά την διάρκεια της εκκίνησης της μηχανής.

- Επιτυγχάνει μείωση των παραγόμενων NO_x και της κατανάλωσης καυσίμου.

- Επιτυγχάνει την μείωση των οξειδίων του θείου και του διοξειδίου του άνθρακα

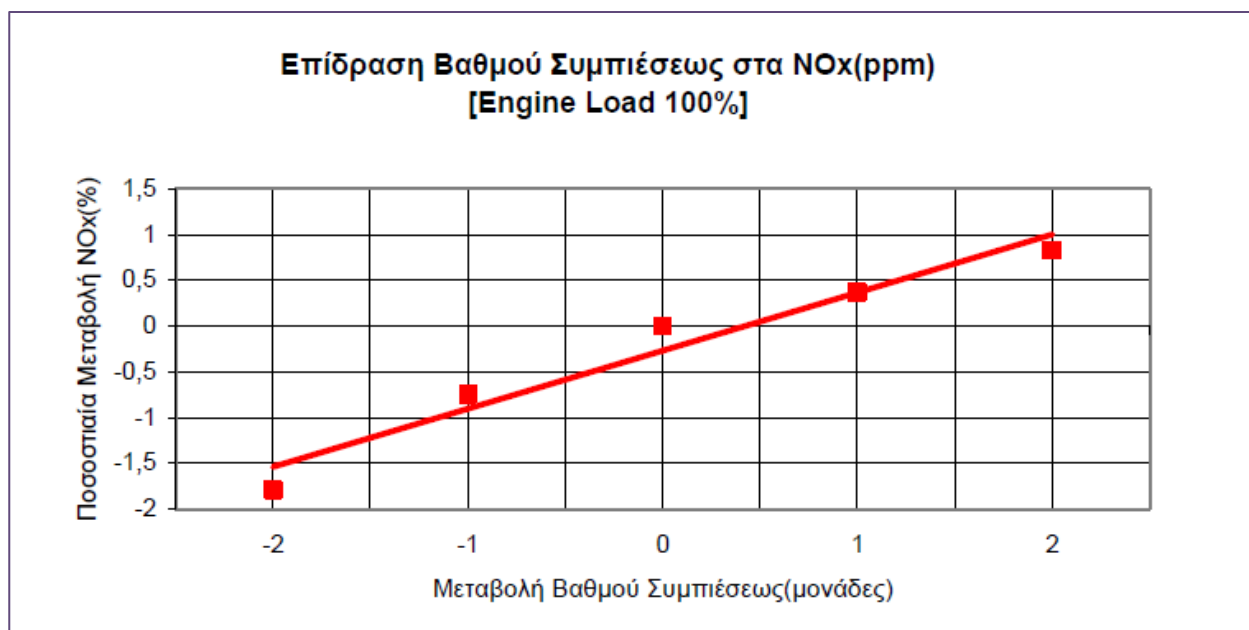
⁶⁴ Heinrich Schmid, German Weisser, Marine Technologies for Reduced Emissions, Wartsila corporation, www.wartsila.com, April 2005

5.1.1.3 Μεταβολή του βαθμού συμπίεσης (Compression ratio)

Γενικά, η αύξηση του βαθμού συμπίεσης συνεπάγεται αύξηση της μέγιστης πίεσης που αναπτύσσεται μέσα στον κύλινδρο και συνεπώς αύξηση της θερμοκρασίας και των εκπομπών NO_x όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 5.10. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση του βαθμού συμπίεσης κατά 1 μονάδα επιφέρει αύξηση των εκπομπών NO_x κατά 0,50% και μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου κατά περίπου 0,90% (Σχήμα 5.11). Επίτευξη σημαντικής μείωσης των εκπομπών NO_x μέσω της μεταβολής του βαθμού συμπίεσης είναι δυνατή μόνο αν συνδυαστεί μαζί με άλλη τεχνική μείωσης όπως η βραδυπορία της έγχυσης. Η βραδυπορία της έγχυσης του καυσίμου μέσα στον θάλαμο καύσης επιφέρει μείωση της απόδοσης του κινητήρα γεγονός που εξισορροπείται με την αύξηση του βαθμού συμπίεσης. Ο συνδυασμός των δύο αυτών τεχνικών είναι δυνατόν να επιφέρει μείωση των εκπομπών NO_x κατά 10-30%.

Η αύξηση του βαθμού συμπίεσης μπορεί να επιτευχθεί είτε αυξάνοντας την γεωμετρική σχέση συμπίεσης είτε προσαρμόζοντας τον χρονισμό των βαλβίδων. Καθώς ο χρονισμός των βαλβίδων θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της απαιτούμενης περίσσειας αέρα, είναι προτιμότερη η πρώτη επιλογή.

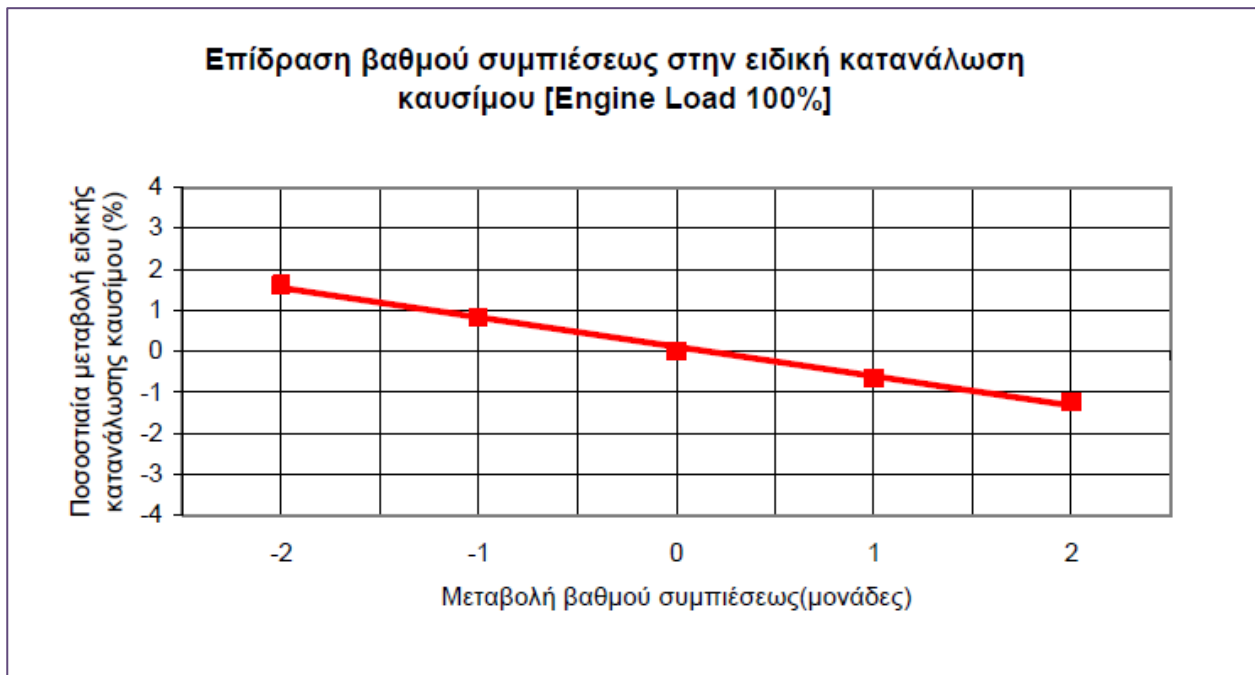
Σύμφωνα με την εταιρία Caterpillar, σε μία μηχανή μεσαίων στροφών, η αύξηση του βαθμού συμπίεσης από 15,5 σε 17 σε συνδυασμό με μέγιστη βραδυπορία της έγχυσης, αυξάνει την μέγιστη πίεση στον κύλινδρο κατά 20 bar (από 180 bar) και μειώνει την παραγωγή NO_x από 12g/kWh σε 8g/kWh χωρίς να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου. Η εταιρία Sulzer υπολογίζει πως σε μία μηχανή χαμηλών στροφών, η μέγιστη μείωση των NO_x που μπορεί να επιτευχθεί από τον συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδων είναι 25% με αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 1%.⁶⁵



Σχήμα 5.10 Επίδραση του βαθμού συμπίεσης στις εκπομπές NO_x⁶⁶

⁶⁵ Corneliu Moroianu, Gheorghe Samoilescu, Marine Engines and Nitrogen Oxides Emissions, University of Resita, 2008

⁶⁶ Γλάρος Στέφανος, Εφαρμογή και Αξιολόγηση πολυζωνικού Μοντέλου Καύσης σε Κινητήρα Diesel Ηλεκτροπαραγωγής για την Εκτίμηση της Λειτουργίας και των Εκπομπών NO_x, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.,



Σχήμα 5.11 Επίδραση βαθμού συμπίεσης στην ειδική κατανάλωση καυσίμου⁶⁷

5.1.1.4 Ψύξη του αέρα σάρωσης και κύκλος του Miller (Miller Cycle)

Τόσο η ψύξη του αέρα σάρωσης όσο και ο κύκλος Miller αποσκοπούν στην μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών που εμφανίζονται στον κύλινδρο μειώνοντας την θερμοκρασία πριν την φάση της συμπίεσης. Η απλή τεχνική για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι η μείωση της θερμοκρασίας του αέρα σάρωσης του κυλίνδρου βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος ψύξης. Μελέτες έχουν δείξει πως για κάθε 3°C βαθμούς μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα παράγονται 1% λιγότερα οξείδια του αζώτου. Φυσικά υπάρχει όριο στην μείωση αυτή καθώς η θερμοκρασία του νερού που εισάγεται στο σύστημα ψύξης μπορεί να είναι το λιγότερο μέχρι 32° C επομένως περαιτέρω ψύξη είναι αδύνατη εκτός και αν καταναλίσκεται ενέργεια. Το σύστημα αυτό μπορεί αν επιτύχει μείωση των παραγόμενων NO_x κατά 20% χωρίς να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου αλλά μπορεί να επιφέρει την αυξημένη παραγωγή καπνού.

Λύση στο πρόβλημα αποτελεί η χρήση στροβιλοσυμπιεστή μετά το κεντρικό σύστημα ψύξης. Η βασική ιδέα είναι η συμπίεση, η ψύξη και η επανα-συμπίεση του αέρα στον στροβιλοσυμπιεστή με αποτέλεσμα την χαμηλότερη θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα γεγονός που συνεπάγεται καλύτερη θερμική απόδοση της μηχανής.

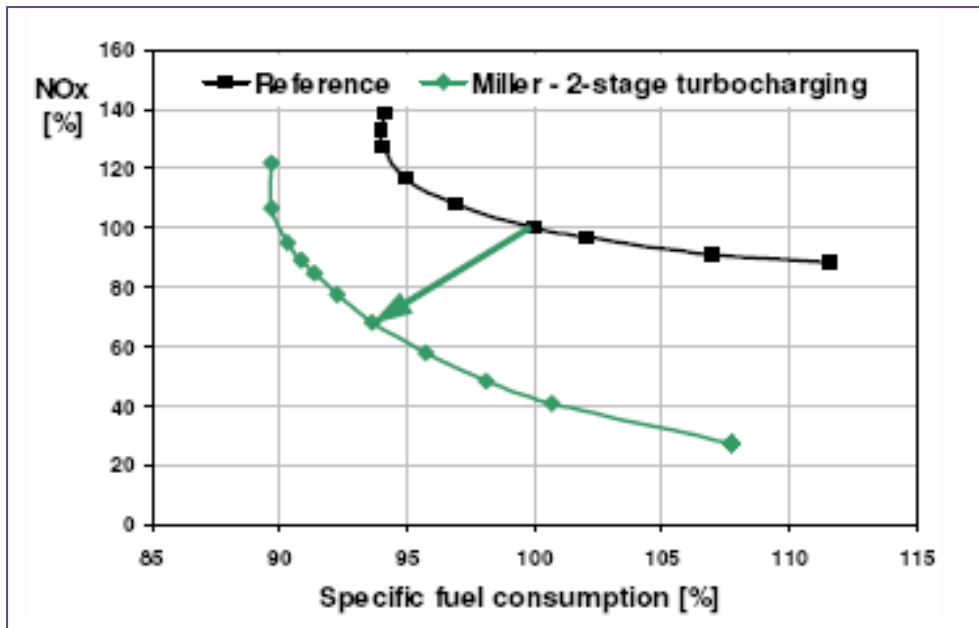
Στους τετράχρονους κινητήρες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύστημα Miller το οποίο μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα. Στο σύστημα αυτό, ο στροβιλοσυμπιεστής επιτυγχάνει μεγαλύτερες πιέσεις και η βαλβίδα εισαγωγής αέρα κλείνει πριν το έμβολο φτάσει στο κάτω νεκρό σημείο κατά την πρώτη φάση όταν λαμβάνει χώρα η

2008

⁶⁷ Γλάρος Στέφανος, Εφαρμογή και Αξιολόγηση πολυζωνικού Μοντέλου Καύσης σε Κινητήρα Diesel Ηλεκτροπαραγωγής για την Εκτίμηση της Λειτουργίας και των Εκπομπών NO_x, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π., 2008

εισαγωγή αέρα στον κύλινδρο . Καθώς το έμβολο κινείται προς το κάτω νεκρό σημείο, ο αέρας που βρίσκεται στον κύλινδρο διαστέλλεται με αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας του. Παρόλο που η πίεση του αέρα λόγω του συμπίεσής είναι μεγαλύτερη από το συνηθισμένο, η ποσότητα του αέρα που εισάγεται και επομένως η περίσσεια αέρα παραμένει ίδια αφού η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει νωρίτερα.

Σύμφωνα με την εταιρία Wartsila, η χρήση του κύκλου του Miller (Miller Cycle) είναι δυνατόν να επιφέρει μείωση των εκπομπών NO_x έως και 50% καθώς και μείωση κατά 10% της κατανάλωσης καυσίμου.



Σχήμα 5.12 Μείωση των εκπομπών NO_x και της ειδικής κατανάλωση καυσίμου με χρήση του Miller Cycle⁶⁸

5.1.1.5 Κόστος επένδυσης, εγκατάστασης και λειτουργίας εσωτερικών τροποποιήσεων του κινητήρα

Όλες οι τεχνικές μείωσης των παραγόμενων εκπομπών NO_x μέσω εσωτερικών τροποποιήσεων της μηχανής (βραδυπορία έγχυσης, μεταβολή του βαθμού συμπίεσης, ψύξη αέρα σάρωσης, κύκλος Miller, σύστημα common rail) εξακολουθούν να βρίσκονται υπό ανάπτυξη γεγονός που καθιστά τον υπολογισμό του κόστους επένδυσης, εγκατάστασης και λειτουργίας τους σε ένα νέο κινητήρα, δύσκολο και αβέβαιο. Όσον αφορά τις μετασκευές, ο υπολογισμός του κόστους είναι ακόμα πιο δυσχερής και περίπλοκος καθώς τα κόστη διαφοροποιούνται για κάθε περίπτωση μηχανής.

Το κόστος μπορεί να διακριθεί σε κόστος αναβάθμισης του συστήματος έγχυσης καυσίμου και σε κόστος τροποποιήσεων στην μηχανή. Ο πίνακας 5.13 παρουσιάζει το

⁶⁸ P. Tremuli, Proposals for exhaust Gas Emissions Abatement, www.wartsila.com, January 2008

συνολικό κόστος για την αναβάθμιση του συστήματος έγχυσης καυσίμου σε καινούρια κατασκευή συμπεριλαμβάνοντας το κόστος εγκατάστασης.

Συνολικό κόστος αναβάθμισης του συστήματος έγχυσης καυσίμου ¹	
Engine Size	€/engine
Small	7.840
Medium	15.920
Large	48.580

¹ Το κόστος που παρουσιάζεται βασίζεται στα δεδομένα της έκθεσης της US EPA 2003.

Πίνακας 5.13 Συνολικό κόστος αναβάθμισης της έγχυσης καυσίμου σύμφωνα με την έρευνα της ENTEC⁶⁹

Το κόστος για τις εσωτερικές τροποποιήσεις της μηχανής είναι δύσκολο να υπολογισθεί καθώς κάθε μηχανή απαιτεί προφανώς διαφορετικό χειρισμό. Λειτουργικό κόστος δεν υφίσταται για αυτές τις τεχνικές μείωσης των NO_x αλλά ενδέχεται να έχουν κάποιες θετικές συνέπειες στην οικονομικότητα της μηχανής όπως μείωση της κατανάλωσης λιπαντικών. Οι επιπτώσεις αυτές δεν είναι δυνατόν να αξιολογηθούν οικονομικά. Συνεπώς, το συνολικό κόστος ταυτίζεται με το κόστος κεφαλαίου το οποίο και παρουσιάζεται στον πίνακα 5.14

	Vessel Size		
	Small	Medium	Large
Καινούρια κατασκευή (€)	107.284	119.764	172.580
Διάρκεια ζωής (έτη)	25	25	25
Ετήσιο κόστος (€/έτος)	6.867	7.666	11.047
Επένδυση ανά kW (€/kW)	30	10	6
Λειτουργικό κόστος (€/έτος)	0	0	0

Πίνακας 5.14 Παρουσίαση του κόστους για τις τεχνικές εσωτερικών τροποποιήσεων στον κινητήρα ανά μέγεθος πλοίου σύμφωνα με την έρευνα της ENTEC⁷⁰

⁶⁹ Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005

⁷⁰ Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005

5.1.2 Ανακυκλοφορία των καυσαερίων (EGR)

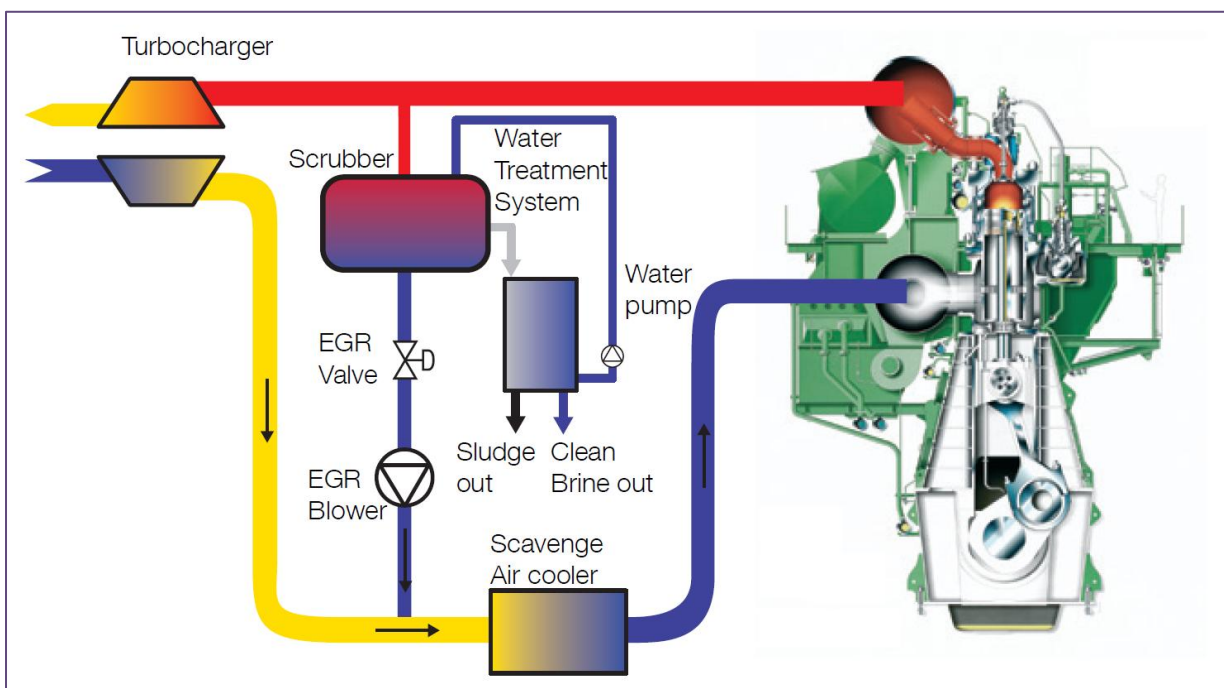
Η μέθοδος ανακυκλοφορίας των καυσαερίων (EGR) είναι μία ήδη καθιερωμένη μέθοδος για την μείωση των εκπομπών NO_x στους τετράχρονους κινητήρες Diesel των αυτοκινήτων. Μετά από έρευνες ετών από μεγάλες κατασκευάστριες εταιρίες ναυτικών κινητήρων, τα αποτελέσματα των δοκιμών έχουν δείξει ότι η μέθοδος αυτή είναι εφαρμόσιμη και στους μεγάλους σε διαστάσεις, δίχρονους κινητήρες Diesel με πολύ θετικά αποτελέσματα. Όπως είναι γνωστό, η παραγωγή οξειδίων του αζώτου λαμβάνει χώρα μόνο σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (2.200°K και άνω) και αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η μείωση των εκπομπών NO_x στην μέθοδο EGR επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής αερίων με υψηλή θερμοχωρητικότητα στον κύλινδρο τα οποία οδηγούν σε μείωση της θερμοκρασίας καύσης καθώς και της συγκέντρωσης οξυγόνου στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό είναι τα ίδια τα καυσαέρια της μηχανής.

Η μέθοδος ανακυκλοφορίας των καυσαερίων EGR βασίζεται στην μείωση της ποσότητας οξυγόνου στο εσωτερικό του κυλίνδρου και στην αύξηση της θερμοχωρητικότητας του. Η μειωμένη συγκέντρωση οξυγόνου έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση μεγαλύτερης ποσότητας αέρα καύσης που πρέπει να θερμανθεί ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η καύση με αποτέλεσμα η μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον κύλινδρο να είναι μειωμένη περιορίζοντας την παραγωγή NO_x . Επιπλέον, η μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου περιορίζει την αντίδραση των μορίων αζώτου με τα μόρια οξυγόνου για την παραγωγή μονοξειδίου του αζώτου (NO) γεγονός που συνεισφέρει επιπλέον στην μείωση της παραγωγής NO_x . Η αύξηση της θερμοχωρητικότητας του αέρα καύσης οφείλεται στην αυξημένη θερμοχωρητικότητα των συστατικών των καυσαερίων. Τα συστατικά αυτά (μεταξύ των οποίων H_2O και CO_2), στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την καύση, έχουν περίπου 25% μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα από τον ατμοσφαιρικό αέρα ο οποίος αποτελείται από στοιχεία δύο ατόμων, κυρίως οξυγόνο (O_2) και άζωτο (N_2). Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία ολική αύξηση της θερμοχωρητικότητας του αέρα μέσα στον κύλινδρο της τάξης του 1-2% που επιφέρει επιπλέον μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας καύσης και συνεπώς επιπρόσθετη μείωση των NO_x . Η μέθοδος ανακυκλοφορίας των καυσαερίων επιτυγχάνει αποδεδειγμένη μείωση των εκπομπών NO_x αλλά δεν χρησιμοποιείται ευρέως σε μεγάλους δίχρονους κινητήρες με αποτέλεσμα να μην είναι πλήρως βελτιστοποιημένη αναφορικά με τις επιπτώσεις τους στην κατανάλωση καυσίμου, στο θερμικό φορτίο και στις υπόλοιπες εκπομπές καυσαερίων στους κινητήρες αυτούς.

Στις ναυτικές μηχανές το σύστημα ανακυκλοφορίας των καυσαερίων EGR τοποθετείται μετά τον συμπιεστή (σχήμα 5.15). Ένα μέρος των καυσαερίων πριν την είσοδο του στον στρόβιλο αλλάζει πορεία ώστε να αναμειχθεί με τον αέρα καύσης και να ανακυκλωθεί. Πριν την είσοδο των καυσαερίων στον κύλινδρο αυτά ψύχονται αφού απαλλαχθούν από τα οξείδια του θείου (SO_x) και τα σωματίδια (PM) που περιέχουν μέσω ενός συστήματος απόπλυσης με νερό. Κατά την απόπλυση τους τα καυσαέρια υφίστανται επίσης ουδετεροποίηση του pH τους με χρήση καυστικής σόδας (NaOH) ώστε να μην προκαλούν αλλοιώσεις και προβλήματα διάβρωσης στα διάφορα μέρη του κινητήρα με τα οποία έρχονται σε επαφή. Η ποσότητα των αδρανών αυτών πλέον καυσαερίων αντικαθιστά ένα μέρος του ατμοσφαιρικού αέρα και εισέρχεται στον κύλινδρο με αποτέλεσμα την μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας που

αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κατά την διαδικασία της καύσης καθώς και την μείωση της ταχύτητας πραγματοποίησης της καύσης. Οι συνθήκες αυτές προκαλούν την επιθυμητή μείωση των παραγόμενων οξειδίων του αζώτου.

Σε αντίθεση με τους τετράχρονους κινητήρες στους οποίους συνήθως πρακτική είναι η κυκλοφορία των καυσαερίων μέσω εξωτερικού συστήματος EGR, στους δίχρονους κινητήρες χαμηλών στροφών πολλές φορές προτιμάται η εισαγωγή των καυσαερίων στον αέρα καύσης να γίνεται στην αρχή της συμπίεσης. Αυτό επιτυγχάνεται μειώνοντας το μέγεθος των θυρίδων σάρωσης, αναγκάζοντας με αυτόν τον τρόπο μία ποσότητα καυσαερίων να παραμείνει στον κύλινδρο και επιτυγχάνοντας ουσιαστικά την εσωτερική ανακύκλωση των καυσαερίων (εσωτερικό σύστημα EGR). Πλεονέκτημα της πρακτικής αυτής είναι η απαίτηση μικρότερων στροβιλοσυμπιεστών για την κυκλοφορία των καυσαερίων.

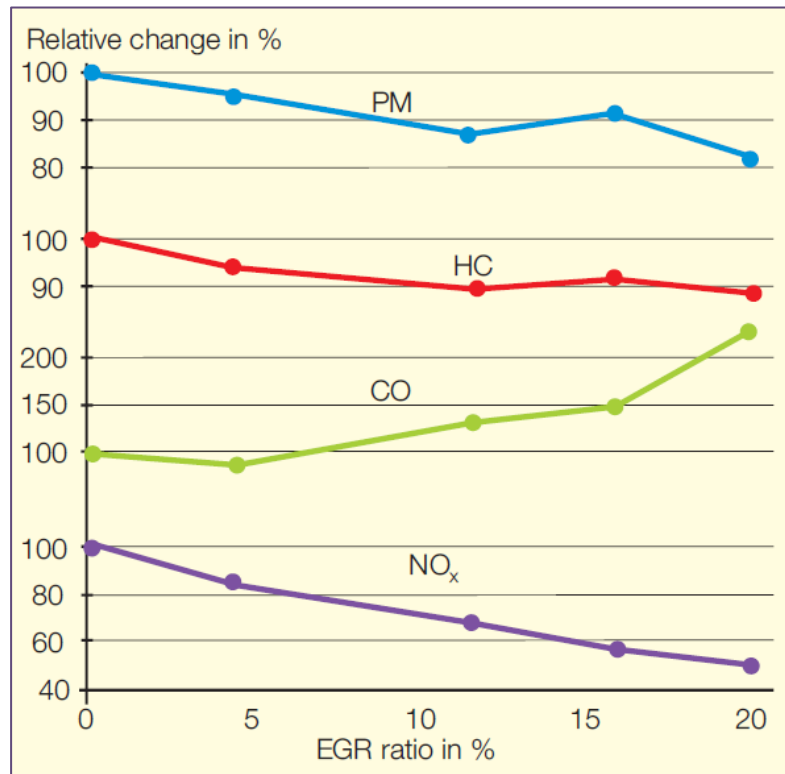


Σχήμα 5.15 EGR στον δοκιμαστικό κινητήρα 4T50ME-X της εταιρίας MAN B&W⁷¹

Δοκιμές έχουν οδηγήσει σε πολύ καλά αποτελέσματα και συνθήκες λειτουργίας κατά την μέθοδο αυτή. Η εταιρία Kawasaki υπολόγισε πως με επανακυκλοφορία 28% επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών NO_x κατά 69% σε μία μηχανή MAN B&W 5S70MC με μικρή αύξηση της παραγωγής καπνού και της κατανάλωσης καυσίμου ενώ σύμφωνα με την εταιρία Wartsila επανακυκλοφορία 6% επιφέρει μείωση των NO_x 22% στην δοκιμαστική μηχανή 4RTX54 χαμηλών στροφών ενώ προκαλεί μικρή αύξηση στο θερμικό φορτίο στα μέρη της μηχανής καθώς και αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.16, εκτός από την σημαντική μείωση των εκπομπών NO_x, η τεχνική EGR επιφέρει και μείωση των εκπομπών υδρογονανθράκων HC κατά την διαδικασία της καύσης. Η μείωση αυτή ανά κύκλο λειτουργίας της μηχανής είναι ανεξάρτητη από το ποσοστό καυσαερίων που επαναχρησιμοποιείται. Αρνητική αλλά αναμενόμενη συνέπεια της μεθόδου αποτελεί η

⁷¹ MAN Diesel & Turbo, Tier III Compliance- Low speed engines, www.mandieselturbo.com, 2010

αύξηση της εκπομπής μονοξειδίου του άνθρακα (CO) λόγω της έλλειψης οξυγόνου στον θάλαμο καύσης.



Σχήμα 5.16 Μεταβολή στις εκπομπές ρύπων λόγω EGR⁷²

Η μέθοδος ανακυκλοφορίας καυσαερίων παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα που σχετίζονται με το σύστημα ψύξης και καθαρισμού των καυσαερίων πριν εισέλθουν ξανά στον κύλινδρο με αποτέλεσμα την μείωση της ισχύος του κινητήρα και την πρόκληση φθορών στα εξαρτήματα του κινητήρα λόγω των διαφόρων σωματιδίων που υπάρχουν στα καυσαέρια. Αν το χρησιμοποιούμενο καύσιμο έχει σημαντική συγκέντρωση θείου τότε προκαλείται επίσης έντονη διάβρωση του κινητήρα λόγω των οξειδίων του θείου που εμπεριέχονται στα καυσαέρια. Επιπρόσθετο μειονέκτημα της μεθόδου είναι οι απαραίτητες τροποποιήσεις στον κινητήρα για την λειτουργία της που ανεβάζουν σημαντικά το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας της. Στους δίχρονους κινητήρες με ζεύγος στρόβιλου-συμπιεστή για την υπερπλήρωση τους, οι πίεση των καυσαερίων πριν τον στρόβιλο είναι πάντα μικρότερη από την πίεση του αέρα καύσης μετά τον συμπιεστή γεγονός που δεν καθιστά δυνατή την επανακυκλοφορία των καυσαερίων στο τμήμα υψηλής πίεσης μέσω απλών σωληνώσεων εξοπλισμένων με βαλβίδα ελέγχου όπως γίνεται στους κινητήρες των αυτοκινήτων. Αντίθετα, οι δίχρονοι κινητήρες απαιτούν την εγκατάσταση ενός επιπλέον συμπιεστή. Κάποιοι κατασκευαστές επιλέγουν να τοποθετήσουν το σύστημα EGR στην πλευρά χαμηλής πίεσης επανακυκλοφορώντας τα καυσαέρια όχι πριν τον στρόβιλο αλλά πριν τον συμπιεστή. Η δεύτερη αυτή όμως πρακτική οδηγεί στην διέλευση των καυσαερίων μέσα από τον συμπιεστή και το σύστημα ψύξης του αέρα που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις ακαθαρσίες και την διάβρωση. Για την αποφυγή των προβλημάτων αυτών, προτιμάται να αποφεύγεται η

⁷² MAN B&W, Emission Control MAN B&W Two-stroke Diesel Engines, MAN B&W Diesel A/S, 2003

εξωτερική επανακυκλοφορία των καυσαερίων και να χρησιμοποιείται εσωτερική κυκλοφορία τροποποιώντας την διαδικασία σάρωσης του κυλίνδρου για την απομάκρυνση των καυσαερίων ώστε η ποιότητα σάρωσης να είναι μικρότερη και μεγαλύτερη ποσότητα καυσαερίων να παραμένει στον κύλινδρο μετά την φάση εναλλαγής των αερίων. Η εταιρία Wartsila αναπτύσσει την τεχνική αυτή για δίχρονους κινητήρες ως μέσω συμπλήρωσης των τεχνικών μείωσης των NO_x με εσωτερικές τροποποιήσεις της μηχανής. Για να ξεπεράσει το πρόβλημα αύξησης του θερμικού φορτίου, η εταιρία, έχει αναπτύξει μία τεχνική ψεκασμού νερού (WTP- water treatment plant) απευθείας στον θάλαμο κατά την συμπίεση ώστε να επαναφέρει την θερμοκρασία στον θάλαμο καύσης στις τιμές χωρίς EGR.

Το σύστημα ανακύκλωσης καυσαερίων EGR είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο όσον αφορά τους μεγάλους δίχρονους κινητήρες. Ο στόχος των κατασκευαστριών εταιριών είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος EGR που να επιτρέπει την συμμόρφωση με τα όρια που έχει θέσει η IMO στο TIER III με την ελάχιστη επιρροή στην ποιότητα καύσης και στην κατανάλωση καυσίμου. Στόχος επίσης είναι ο περιορισμός των υπολοίπων εκπομπών (PM, CO) που επηρεάζονται αρνητικά από το σύστημα EGR. Δοκιμές της εταιρίας MAN B&W στον κινητήρα 4T50ME-X έδειξαν ότι είναι δυνατόν ένας δίχρονος κινητήρας να πετύχει τους παραπάνω στόχους με την χρήση μόνο συστήματος EGR. Συγκεκριμένα, η εκπομπή NO_x περιορίστηκε στα 3,4 g/kWh σε κάθε κύκλο με μικρή αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου, της εκπομπής CO και PM καθώς και του θερμικού φορτίου όπως φαίνεται στον πίνακα 5.17. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί πως στους δίχρονους κινητήρες χαμηλών στροφών οι αυξήσεις αυτές είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με αυτές των κινητήρων υψηλών στροφών. Δοκιμές επίσης έδειξαν πως η τεχνική της ανακυκλοφορίας καυσαερίων EGR μπορεί να συνδυαστεί πολύ αποτελεσματικά με την τεχνική χρήσης γαλακτώματος νερού-καυσίμου (WIF-water in fuel) εξεπηρείζοντας η μία τα μειονεκτήματα της άλλης. Στην τεχνική EGR προκαλείται αύξηση των εκπομπών CO και μείωση των εκπομπών HC ενώ στην τεχνική WIF παρατηρείται το αντίστροφο. Με τον συνδυασμό των δύο μεθόδων επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των εκπομπών NO_x (μέχρι και 0.2g/kWh δηλαδή 90%-98%) ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα. Περισσότερες λεπτομέρειες για την τεχνική εισαγωγής νερού στα καύσιμα παρουσιάζονται σε επόμενη παράγραφο.

Test results from parameter variation test at 75% load						
	NO _x [g/kWh]	dSFOC [g/kWh]	CO [g/kWh]	P _{max} [barabs]	EGR rate [%]	O ₂ Scav.air [vol. %]
No EGR	17.8	0	0.65	152	0	-
Max. EGR	2.3	+4.9	4.17	151	39	16.0
EGR ref	3.7	+3.0	2.57	151	36	16.8
Incr. P _{comp} /P _{scav}	4.0	+2.5	2.18	156	36	16.8
Incr. Phyd	4.2	+2.8	1.83	151	37	16.6
Incr. P _{scav}	3.6	+1.9	2.12	156	37	16.6
Incr. T _{scav}	3.9	+3,6	2.82	156	34	16.8
Tier III setup	3.4	+0.6	1.34	157	41	16.2

Πίνακας 5.17 Αποτελέσματα δοκιμών του κινητήρα 4T50ME-X σε φορτίο 75% ⁷³

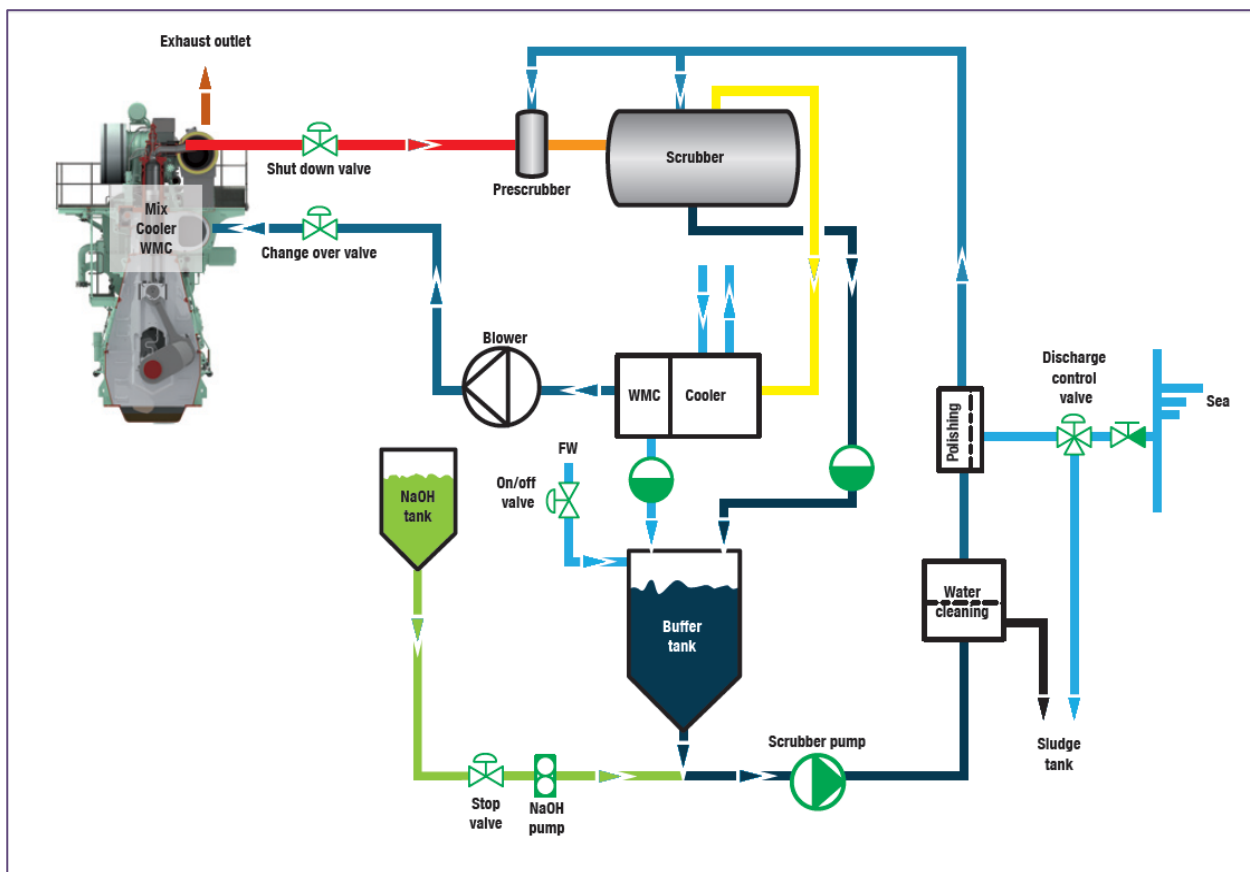
⁷³ MAN Diesel & Turbo, Tier III Compliance- Low speed engines, www.mandieselturbo.com, 2010

Η πρώτη εφαρμογή συστήματος EGR σε δίχρονο κινητήρα χαμηλών στροφών έγινε το Μάρτιο του 2010 από την εταιρία MAN B&W για το φορτηγό πλοίο Alexander Maersk της εταιρίας Maersk Line. Το πλοίο αυτό, χωρητικότητας 1,092 TEU και κατασκευασμένο το 1998, είναι εξοπλισμένο με μηχανή MAN B&W 7S50MC Mk6 με ισχύ 10.126kW στις 127 rpm. Η μελέτη για την εγκατάσταση του συστήματος EGR για το πλοίο αυτό διήρκησε 2 χρόνια και σχεδίασε ένα ικανοποιητικό σύστημα ανακυκλοφορίας των καυσαερίων το οποίο με 20% επανακυκλοφορία επιτυγχάνει μείωση των παραγόμενων NO_x πάνω από 50%.



Σχήμα 5.18 Το φορτηγό πλοίο Alexander Maersk

Το σύστημα EGR του πλοίου Alexander Maersk όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.19 αποτελείται από ένα σύστημα απόπλυσης καυσαερίων (scrubber), ένα σύστημα ψύξης (cooler), έναν συλλέκτη υδρατμών (water mist catcher), βαλβίδες διακοπής λειτουργίας (shut-down valve) και αλλαγής ροής (change-over valve) καθώς και σύστημα καθαρισμού νερού το οποίο καθαρίζει το νερό μετά την απόπλυση των καυσαερίων από τα σωματίδια (PM) ώστε να μπορεί αυτό να απορρίπτεται στη θάλασσα. Οι δύο στροβιλοσυμπιεστές με τους οποίους ήταν αρχικά εφοδιασμένος ο κινητήρας αντικαταστάθηκαν με έναν καινούριο μεγαλύτερης απόδοσης. Για την ευκολότερη χρήση του συστήματος EGR από το πλήρωμα του πλοίου καθώς και για την εξασφάλιση γρήγορων και σωστών αντιδράσεων του συστήματος ανάλογα με τις αλλαγές στο φορτίο της μηχανής, αναπτύχθηκε ένα αυτόματο σύστημα ελέγχου του EGR. Το σύστημα αυτό είναι εφοδιασμένο με ένα MAN Diesel & Turbo MPC controller που καθορίζει τον βαθμό ανακυκλοφορίας των καυσαερίων (μετريέται μέσω της συγκέντρωσης του αέρα καύσης σε οξυγόνο), την πίεση σάρωσης του κυλίνδρου καθώς και άλλες λειτουργίες και ένα σύστημα PLC της εταιρίας Siemens για τον έλεγχο του συστήματος νερού.



Σχήμα 5.19 Το σύστημα EGR στο πλοίο Alexander Maersk⁷⁴

• Κόστος επένδυσης , εγκατάστασης και λειτουργίας

Καθώς η εφαρμογή του συστήματος επανακυκλοφορίας καυσαερίων EGR δεν είναι ακόμα διαδεδομένη για τους δίχροτους ναυτικούς κινητήρες χαμηλών στροφών, τα διαθέσιμα οικονομικά στοιχεία για το κόστος επένδυσης, εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος αφορούν μόνο τους τετράχρονους κινητήρες και επομένως τα κόστη αυτά δεν είναι δυνατόν να αναχθούν με ακρίβεια στους μεγάλους ναυτικούς κινητήρες.

Σύμφωνα με την EPA (2003), το κόστος επένδυσης για μία μικρή μηχανή έως και 735kW υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις ⁷⁵:

Βραχυπρόθεσμα: $Cost = €394 + €13 \times \text{engine displacement (L)}$

Μακροπρόθεσμα: $Cost = €380 + €10 \times \text{engine displacement (L)}$

Συμφώνα με τις παραπάνω σχέσεις το κόστος για το EGR επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα κυβικά της μηχανής και είναι ιδιαίτερα υψηλό για τις μεγάλες μηχανές χαμηλών στροφών (> €35.000). Το μεγάλο κόστος για τις μηχανές αυτού του τύπου δικαιολογείται

⁷⁴ MAN Diesel & Turbo, Tier III Compliance- Low speed engines, www.mandieselturbo.com, 2010

⁷⁵ Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005

καθώς οι σχέσεις αυτές αφορούν μικρότερες σε μέγεθος μηχανές. Επιπλέον, στην περίπτωση των ναυτικών κινητήρων θα πρέπει να προστεθεί ένα επιπλέον κόστος για την αλλαγή καυσίμου καθώς το σύστημα EGR απαιτεί καύσιμα μικρής περιεκτικότητας σε θείο για την αποφυγή προβλημάτων διάβρωσης. Πιο ακριβή αποτελέσματα για το κόστος επένδυσης και εγκατάστασης συστήματος EGR σε ναυτικούς κινητήρες δεν είναι διαθέσιμα λόγω της περιορισμένης χρήσης του μέχρι στιγμής στους κινητήρες αυτού του τύπου.

5.1.3 Εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης

Είναι γνωστό εδώ και αρκετές δεκαετίες ότι η εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης μειώνει σημαντικά την παραγωγή οξειδίων του αζώτου (NO_x). Η μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα των μορίων του νερού συγκριτικά με αυτή των μορίων αέρα επιφέρει την μείωση της θερμοκρασίας καύσης μέσα στον κύλινδρο. Επιπλέον όταν το νερό εξατμίζεται πριν ή μέσα στον θάλαμο καύσης η θερμοκρασία καύσης μειώνεται περεταίρω λόγω της θερμότητας που καταναλώνει η διαδικασία της εξάτμισης.

Το νερό μπορεί να εισαχθεί στον κύλινδρο με μία ποικιλία τεχνικών από τις οποίες οι πιο ευρέως διαδεδομένες είναι η **χρήση γαλακτώματος νερού – καυσίμου (water-in-fuel emulsion)**, η **άμεση έγχυση νερού (DWI)** στον θάλαμο καύσης καθώς και η **ύγρανση του αέρα καύσης (humidification of the combustion air - HAM)**. Η τεχνική HAM και η DIW επιφέρουν αποκλειστικά τη μείωση των NO_x ενώ το γαλάκτωμα νερού- καυσίμου συνεισφέρει σημαντικά και στην μείωση των εκπομπών των σωματιδίων καπνού. Κατά τη οικονομική αξιολόγηση των τεχνικών αυτών πρέπει να συνυπολογίζεται το κόστος αγοράς και αποθήκευσης του νερού καθώς και ο τρόπος προθέρμανσης του που μπορεί να γίνει μέσω του συστήματος ψύξης του κινητήρα.

5.1.3.1 Χρήση γαλακτώματος νερού - καυσίμου

Κατά την τεχνική αυτή το νερό αναμειγνύεται με το καύσιμο, πριν την εισαγωγή του στον κύλινδρο, σχηματίζοντας ένα είδος γαλακτώματος. Όταν το γαλάκτωμα ψεκάζεται στον κύλινδρο προκαλείται άμεση εξάτμιση του νερού λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών στον θάλαμο καύσης. Η εξάτμιση του νερού επιφέρει τη μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κυλίνδρου και επομένως την μείωση των παραγόμενων εκπομπών NO_x . Επιπλέον κατά την εξάτμιση των σταγονιδίων του νερού προκαλούνται “μικροεκρήξεις” οι οποίες οδηγούν στην αποκάλυψη μεγαλύτερης επιφάνειας καυσίμου ενισχύοντας την καύση. Οι “μικροεκρήξεις” αυτές διαχωρίζουν επίσης τα μόρια του νερού απελευθερώνοντας το οξυγόνο το οποίο με την σειρά του αναστέλλει τον σχηματισμό των ενώσεων PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons) ή αλλιώς των σωματιδίων του άνθρακα (PM).

Η τεχνική αυτή αποδεδειγμένα μειώνει την παραγωγή οξειδίων του αζώτου από τις μηχανές Diesel αλλά μέχρι πρόσφατα η χρήση της ήταν πολύ περιορισμένη στην ναυτιλία λόγω κυρίως της απουσία ελέγχου των εκπομπών στα πλοία. Την τελευταία δεκαετία, λόγω

των ορίων εκπομπών που έχει θέσει η IMO, η τεχνική αυτή αναθεωρήθηκε και η χρήση της είναι πλέον ιδιαίτερα δημοφιλής και στους ναυτικούς κινητήρες Diesel.

Η χρήση γαλακτώματος νερού – καυσίμου μπορεί να επιτύχει θεωρητικά έως και μείωση 50% των παραγόμενων NO_x. Έρευνες έχουν δείξει ότι στους δίχρονους κινητήρες, επιτυγχάνεται 10% μείωση των εκπομπών NO_x για κάθε 10% νερού που προστίθεται (συγκριτικά με το καύσιμο). Η αναλογία νερού - καυσίμου του γαλακτώματος περιορίζεται πρωτίστως από τη μέγιστη δυνατή παροχή της αντλίας έγχυσης καυσίμου. Επομένως, στην πράξη η μέγιστη μείωση των NO_x που μπορεί να επιτευχθεί δεν ξεπερνά το 10 με 20%. Η αναλογία νερού–καυσίμου περιορίζεται επίσης από το ιξώδες του πρέπει να έχει το γαλάκτωμα και από τον απαιτούμενο βαθμό θέρμανσης για την μείωση του ιξώδους ώστε να είναι κατάλληλο για την έγχυση.

Ένας επιπλέον παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση της τεχνικής γαλακτώματος νερού – καυσίμου είναι ο σχεδιασμός των ακροφυσίων έγχυσης. Η διάμετρος και ο αριθμός των οπών του ακροφυσίου πρέπει να είναι προσαρμοσμένα στην αυξημένη ποσότητα υγρών προς έγχυση χωρίς όμως να είναι ιδιαίτερα μεγάλα ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία μεγάλων σταγόνων υγρού. Για βέλτιστο αποτέλεσμα συνίσταται οι σταγόνες νερού να μην ξεπερνούν τα 5 μm και το νερό να είναι αποσταγμένο. Η τροποποίηση αυτή όμως των ακροφυσίων έχει βεβαίως ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου από τον κινητήρα ιδιαίτερα κατά την λειτουργία του χωρίς την χρήση νερού.

Το γαλάκτωμα νερού καυσίμου είναι δυνατόν να παράγεται επί τόπου πάνω στο πλοίο ή να αγοράζονται έτοιμα γαλακτοποιημένα καύσιμα (pre- emulsified fuels). Η πρώτη επιλογή είναι πιο οικονομική και δεν απαιτεί την αποθήκευση δύο ειδών καυσίμων πάνω στο πλοίο και την εναλλαγή τους. Η χρήση προ- γαλακτοποιημένων καυσίμων είναι 20-50% πιο αποτελεσματική αλλά αυξάνει το συνολικό κόστος καυσίμων κατά 20-25% (κόστος κοινού καυσίμου + αναγκαία πρόσθετα+ μεγαλύτερη κατανάλωση κατά όγκο).

Η τεχνική αυτή είναι εφαρμόσιμη σε δίχρονους αλλά και τετράχρονους κινητήρες Diesel όλων των μεγεθών αν και δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα για χρήση σε μικρούς κινητήρες υψηλών στροφών. Επιπρόσθετες θετικές παρενέργειες της μεθόδου είναι η μείωση των παραγόμενων σωματιδίων (PM) δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη από το ποσοστό του νερού που χρησιμοποιείται δηλαδή για ποσοστό νερού 20% παρατηρείται μείωση 40-60% στην εκπομπή σωματιδίων. Επιπλέον είναι δυνατή η μείωση των εκπομπών οξειδίων του θείου.

• Κόστος επένδυσης, λειτουργίας και εγκατάστασης

Το λειτουργικό κόστος χρήσης γαλακτώματος νερού δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο και εξαρτάται από το είδος και την παλαιότητα του κινητήρα. Η εξάτμιση του νερού που λαμβάνει χώρα μέσα στον κύλινδρο λόγω της χρήσης του γαλακτώματος καταναλώνει επιπλέον ενέργεια. Παρόλα αυτά, η ενέργεια αυτή που καταναλώνεται αντισταθμίζεται από την θερμική βελτίωση της καύσης λόγω της καλύτερης διασποράς του καυσίμου μέσα στον κύλινδρο με

αποτέλεσμα η τεχνική να μην δημιουργεί επιπλέον κόστος λειτουργίας. Στις μηχανές όμως κατασκευασμένες μετά το 2000, όπου η θερμική απόδοση είναι ήδη πολύ υψηλή, η χρήση γαλακτώματος αναμένεται να αυξήσει σε μικρό βαθμό το κόστος λειτουργίας. Για την λειτουργία του συστήματος αυτού απαιτείται επιπλέον η χρήση δοσομετρικής αντλίας, δεξαμενής αποθήκευσης καθώς και μονάδα καθαρισμού και απόσταξης του νερού. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει αναλυτικά το κόστος επένδυσης και το ετήσιο κόστος λειτουργίας για χρήση και παραγωγή γαλακτώματος επί του πλοίου αλλά και για χρήση έτοιμων γαλακτοποιημένων καυσίμων.

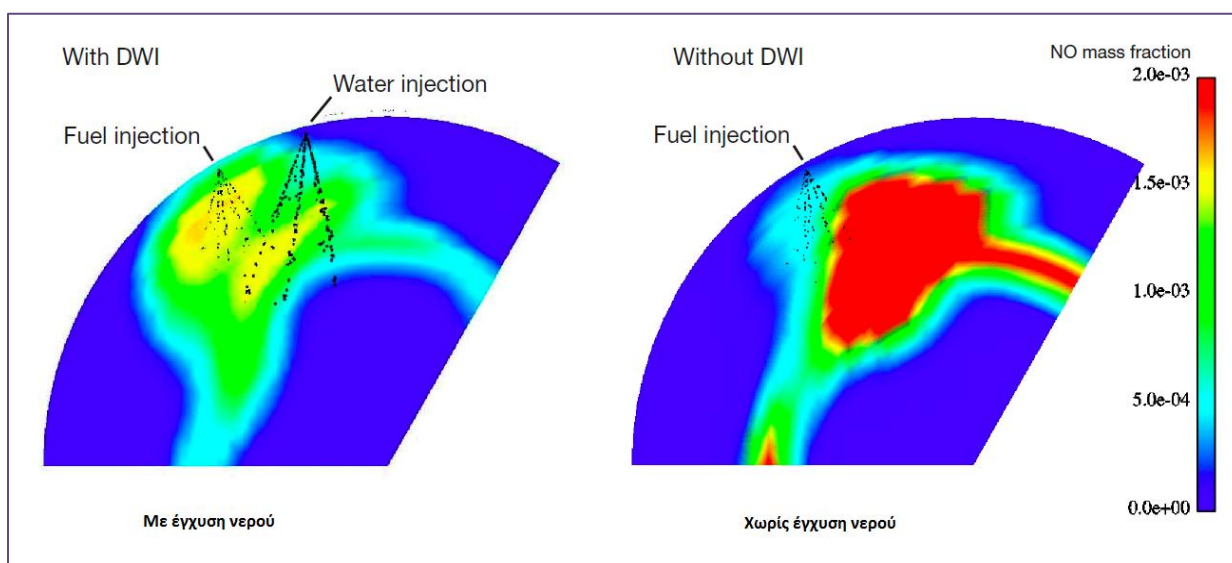
	Small Ship	Medium Ship	Large Ship	Comments
Emulsification on board				
Fixed investment cost (25 years) (EUR)	187.500			-0,75 exchange rate \$/EUR -5% cost increase= 65 EUR/kW
Operating cost	No or marginal operating cost			
Maintenance cost	No or marginal maintenance cost			
Pre-emulsified fuel				
Fixed investment cost (25 years) (EUR)	22.222	66.667	177.778	
Operating cost (premium/liter fuel HFO)	0,15			General remark: risk of bad emulsion that should not be underestimated
Maintenance cost	No or marginal maintenance cost			

Πίνακας 5.20 Κόστος χρήσης γαλακτώματος νερού-καυσίμου για το 2005

5.1.3.2 Απευθείας έγχυση νερού (Direct Water Injection – DWI)

Μία διαφορετική τεχνική εισαγωγής νερού στον κύλινδρο είναι η απευθείας έγχυση του στον θάλαμο καύσης ξεχωριστά από το καύσιμο. Και αυτή η τεχνική επιτυγχάνει την μείωση των παραγόμενων NO_x μέσω της άμεσης ελάττωσης της θερμοκρασίας μέσα στον κύλινδρο. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητα ψεκασμού του νερού ακριβώς την στιγμή και στο κατάλληλο σημείο μέσα στον κύλινδρο, όταν και όπου παρατηρείται μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας. Το αποτέλεσμα είναι η μέγιστη δυνατή μείωση της θερμοκρασίας και επομένως των παραγόμενων NO_x .

Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε από την εταιρία Wartsila Corporation το 1993. Το 2005, η κατασκευάστρια εταιρία ENTEC ανέλαβε την μελέτη και την περαιτέρω ανάπτυξη του συστήματος ώστε αυτό να μπορεί να εφαρμοστεί σε μηχανές πλοίων και το εγκατέστησε σε 23 πλοία μέχρι το τέλος του 2005. Η μέχρι τώρα εμπειρία με το σύστημα απευθείας έγχυσης νερού είναι ιδιαίτερος θετική μολονότι χρησιμοποιείται από ένα μικρό αριθμό εταιριών ακόμα και σήμερα (Wartsila, MaK Global: program investigating water injection as a means for NO_x – control). Το σύστημα αυτό είναι εμπορικά διαθέσιμο για όλους τους τύπους πλοίου και αποτελεί την τεχνική μείωσης των παραγόμενων NO_x με τις περισσότερες ώρες λειτουργίας.

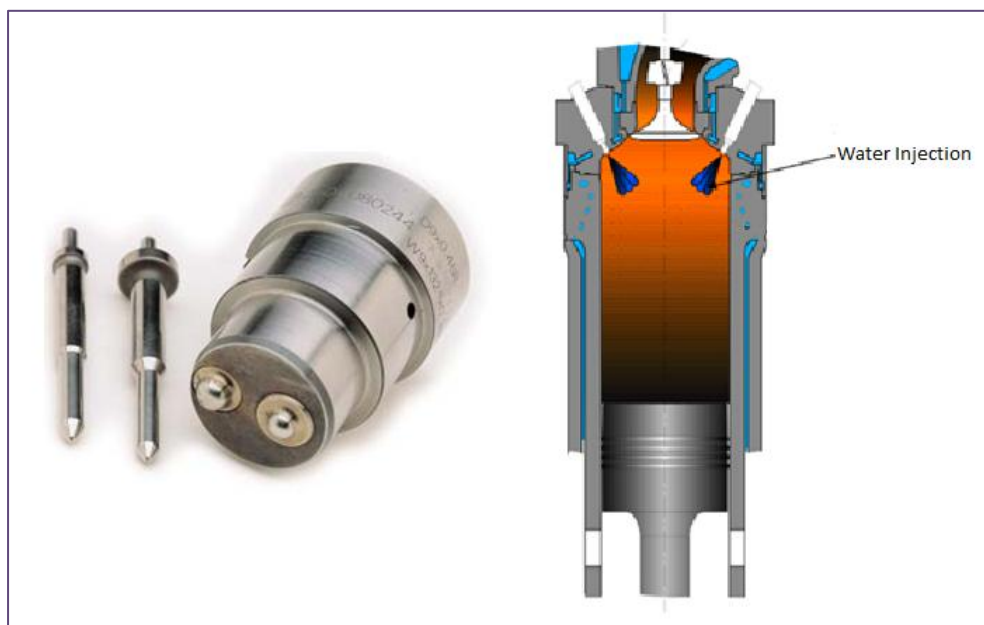


Σχήμα 5.21 Σχηματισμός NO στον θάλαμο καύσης με και χωρίς την χρήση DWI⁷⁶

Η έγχυση του νερού σε αυτή την τεχνική πραγματοποιείται μέσω ενός διπλού συστήματος έγχυσης ανεξάρτητο από αυτό του καυσίμου. Το σύστημα αυτό είναι ηλεκτρονικό με έναν εγχυτήρα και δύο βελόνες και παρέχει την δυνατότητα έγχυσης μεγάλων ποσοτήτων νερού χωρίς να φθείρει τον κινητήρα και σε ανεξάρτητες χρονικές στιγμές από τον ψεκασμό του καυσίμου. Μία ηλεκτρική αντλία μεταφέρει το γλυκό νερό πίεσης 200-400 bar μέχρι τους

⁷⁶David Brown, Rudolf Holtbecker, Next steps in exhaust emissions control for Wartsila low-speed engines, Wartsila technical journal, January 2007

εγχυτήρες οι οποίοι ελέγχονται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η έγχυση του νερού μπορεί να γίνεται ταυτόχρονα με την έγχυση του καυσίμου ή κατά την φάση της συμπίεσης ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη μείωση των παραγόμενων NO_x αλλά και η βέλτιστη κατανάλωση καυσίμου και νερού χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση της μηχανής. Επίσης η έγχυση του νερού είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί πριν την έγχυση του καυσίμου στον θάλαμο καύσης ώστε αυτός να ψυχθεί πριν την εισαγωγή του καυσίμου.



Σχήμα 5.22 Εγχυτήρες νερού στον θάλαμο καύσης⁷⁷

Το σύστημα αυτό καταλαμβάνει πολύ μικρό χώρο αλλά είναι απαραίτητη ύπαρξη δεξαμενής αποθήκευσης του γλυκού νερού που είναι ιδιαίτερα ογκώδης. Η εγκατάσταση του όλου συστήματος είναι σχετικά απλή και είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του πλοίου. Το σύστημα έγχυσης νερού είναι ανεξάρτητο από το σύστημα έγχυσης του καυσίμου και επομένως, σε περίπτωση διακοπής της λειτουργίας του, δεν επηρεάζεται η ομαλή λειτουργία του κινητήρα. Η λειτουργία του συστήματος δεν προτείνεται ταυτόχρονα με την χρήση καυσίμων με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο (>1.5%) λόγω προβλημάτων διάβρωσης που μπορούν να προκληθούν στα έμβολα και τους εγχυτήρες.

Η ποσότητα νερού που μπορεί να εισαχθεί στον κύλινδρο δεν περιορίζεται από κάποιον παράγοντα και μπορεί να φτάσει ακόμα και το 100% δηλαδή αναλογία 1:1 νερού – καυσίμου. Η τυπική αναλογία είναι 40%-70% και επιτυγχάνει μείωση 50%-60% των NO_x . Με αναλογία 70% νερό – καύσιμο, η άμεση έγχυση νερού μπορεί να επιτύχει την μείωση των εκπομπών NO_x σε 8 g/kWh.

Η επίδραση της μεθόδου στην ειδική κατανάλωση του καυσίμου είναι πολύ μικρή, περίπου 1% -2%, και επομένως θεωρείται πως δεν επηρεάζει την απόδοση της μηχανής αλλά προκαλεί μικρή αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και διοξειδίου του θείου

⁷⁷ Heinrich Schmid, German Weisser, Marine Technologies for Reduced Emissions, Wartsila corporation, www.wartsila.com, April 2005

(SO₂). Τέλος, θετική παρενέργεια της τεχνικής αυτής είναι μία πιθανή μείωση της εκπομπής σωματιδίων (PM) έως και 50%

• Κόστος επένδυσης, λειτουργίας και εγκατάστασης

Το κόστος λειτουργίας και εγκατάστασης του συστήματος απευθείας έγχυσης νερού στον θάλαμο καύσης καθορίζεται ως εξής:

- ◇ Μελέτες έχουν δείξει πως η χρήση του συστήματος DWI έχει μικρή επίδραση στην κατανάλωση καυσίμου από την μηχανή. Πιο συγκεκριμένα έχει υπολογιστεί μία μικρή αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου της τάξης του 2%.
- ◇ Εξαιτίας των απαιτήσεων μεγάλων ποσοτήτων νερού αλλά και τροποποιήσεων τμημάτων της μηχανής, η εγκατάσταση ενός συστήματος DWI επιφέρει επιπρόσθετα κόστη που το καθιστούν λιγότερο οικονομική τεχνική συγκριτικά με άλλες τεχνικές έγχυσης νερού.
- ◇ Το κόστος εγκατάστασης ενός συστήματος DWI σε παλαιότερους κινητήρες είναι ιδιαίτερα υψηλό καθώς απαιτεί ειδική μελέτη και σημαντικές τροποποιήσεις στο εσωτερικό της μηχανής όπως για παράδειγμα την αλλαγή των κεφαλών των κυλίνδρων αλλά και αλλαγές στον σχεδιασμό της μηχανής ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση του συστήματος.
- ◇ Το απαιτούμενο νερό είναι περίπου 90 g/kWh και το κόστος του 15EUR /m³(20 \$/m³).
- ◇ Το κόστος επένδυσης υπολογίζεται σε 119,000 US \$ και το ετήσιο λειτουργικό κόστος σε 32,000 US \$ για ένα μεσαίου μεγέθους πλοίου. Το συνολικό ετήσιο κόστος, συμπεριλαμβανομένων των εγχυτήρων, του λοιπού εξοπλισμού και του λειτουργικού κόστους, κυμαίνεται στα 48.134-331.438 EUR ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου.
- ◇ Γενικά, σύμφωνα με την εταιρία Wartsila, το κόστος επένδυσης είναι περίπου 15 US \$ ανά kW και το λειτουργικό κόστος 2US \$ ανά MWh.

	Small Ship	Medium Ship	Large Ship
Κόστος εγχυτήρων (€)	29.581	58.969	119.633
Διάρκεια ζωής (έτη)	4	4	4
Ετήσιο κόστος (€/ έτος)	8.149	16.245	32.958
Κόστους λοιπού εξοπλισμού (€)	106.151	211.609	429.300
Διάρκεια ζωής (έτη)	25	25	25
Ετήσιο κόστος (€/ έτος)	6.795	13.545	27.480
Συνολικό κόστος επένδυσης	135.732	270.578	548.933
Συνολικό κόστος επένδυσης ανά kW	38	24	19
Συνολικό ετήσιο κόστος επένδυσης (€/ έτος)	14.944	29.791	60.438
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης	33.190	108.560	271.000
Συνολικό ετήσιο κόστος (€/ έτος)	48.134	138.351	331.438

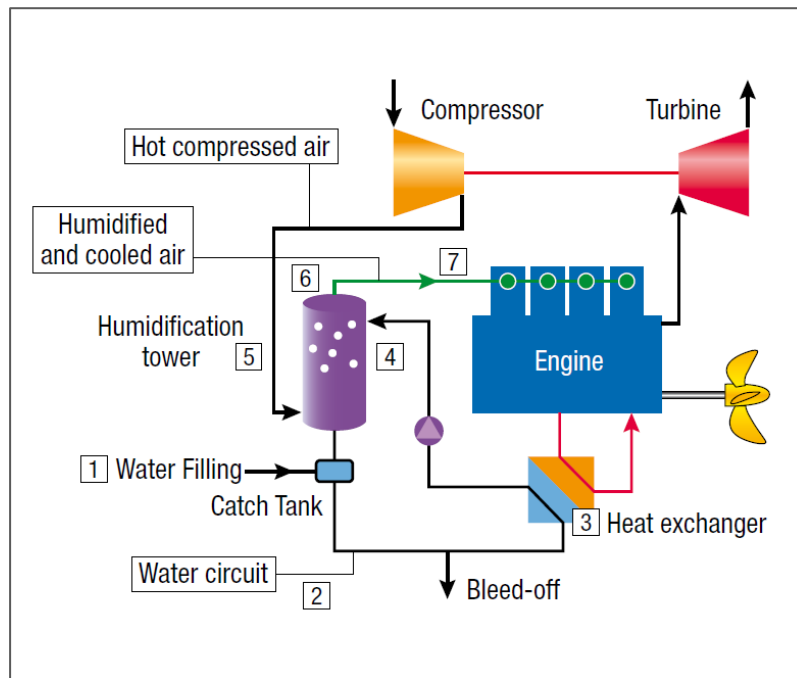
Πίνακας 5.23 Κόστος χρήσης συστήματος DWI σύμφωνα με την έρευνα της ENTEC⁷⁸

5.1.3.3 Υγρανση του αέρα καύσης (HAM)

Η τεχνική αυτή επιτυγχάνει την μείωση της παραγωγής οξειδίων του αζώτου μέσω της χρήσης αέρα καύσης που έχει προηγουμένως θερμανθεί και εμπλουτιστεί με υδρατμούς θαλασσινού νερού. Η αναλογία νερού που χρησιμοποιείται συνήθως είναι 3:1 υδρατμοί - καύσιμο και επιτυγχάνεται 70-80% μείωση των παραγόμενων NO_x χωρίς να επηρεάζεται την απόδοση της μηχανής .

Το σύστημα αυτό ονομάζεται HAM (Humid Air Motor) και μπορεί να θεωρηθεί ενσωματωμένο και αναπόσπαστο τμήμα στη μηχανή καθώς χρησιμοποιείται για την ψύξη της αντικαθιστώντας το ψυγείο με το οποίο είναι εφοδιασμένες οι συμβατικές μηχανές . Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό (περίπου 60 τόνοι για ένα ταξίδι από τη Στοκχόλμη μέχρι το Ελσίνκι) και την απορριπτόμενη θερμότητα της μηχανής. Καθώς συνήθως η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή ζεστού νερού για άλλες ανάγκες του πλοίου, η χρήση του HAM ίσως απαιτήσει τον εφοδιασμό του με κάποιον επιπλέον λέβητα για την κάλυψη των αναγκών αυτών.

⁷⁸ Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005



Σχήμα 5.24 Αρχές λειτουργίας του συστήματος HAM⁷⁹

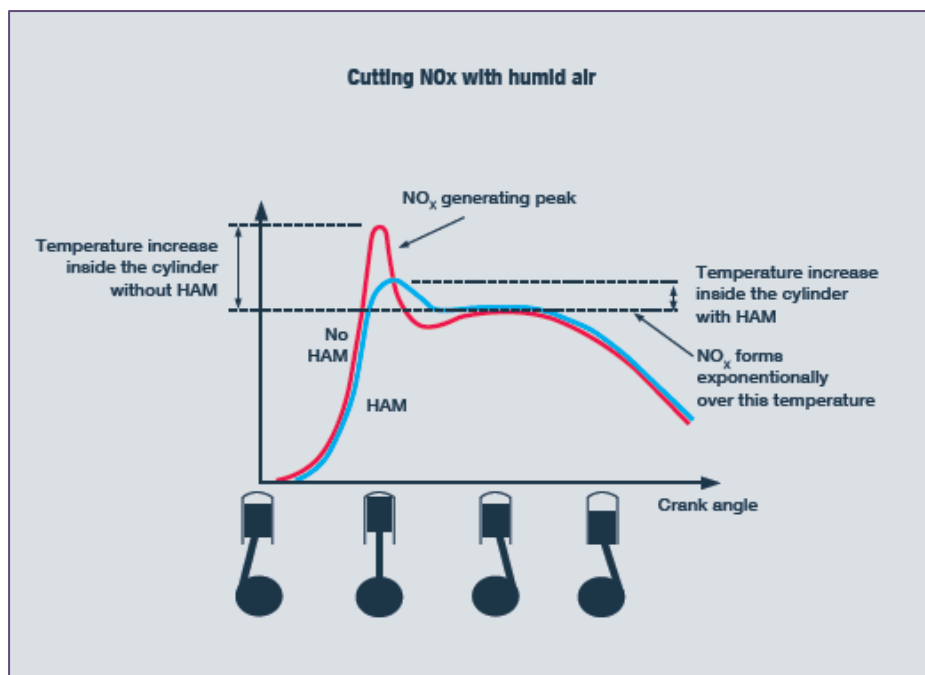
Αρχικά το σύστημα αυτό είχε σχεδιαστεί ώστε να επιτρέπει την εναλλαγή ανάμεσα σε αυτό και το συμβατικό σύστημα ψύξης της μηχανής μέσω ενός μίας βαλβίδας πεταλούδας. Πλέον όμως μία τέτοια λειτουργία θεωρείται περιττή από τους πλοιοκτήτες και δεν χρησιμοποιείται. Σε κατάσταση ανάγκης, αν διακοπεί η λειτουργία του συστήματος HAM και χωρίς την ύπαρξη συμβατικού συστήματος ψύξης, η μηχανή μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία της με διαθέσιμη ισχύ ίση με 50-60% του μέγιστου φορτίου.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα του συστήματος αυτού είναι το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης συγκριτικά με αυτό άλλων τεχνικών καταπολέμησης των NO_x καθώς και η ανάγκη ενσωμάτωσης του με τη μηχανή. Το αρχικό αυτό υψηλό κόστος οφείλεται στην ανάγκη μελέτης και προετοιμασίας για κάθε μηχανή ξεχωριστά πριν την εγκατάσταση σ' αυτή του συστήματος. Οι παράγοντες αυτοί καθιστούν προβληματική την χρήση του παρά τα θετικά αποτελέσματα στην καταπολέμηση της παραγωγής ρύπων. Μέχρι το 2005, μόνο ένα πλοίο, το MS Mariella των Viking Line's, είχε εξοπλιστεί με το σύστημα HAM αλλά τα αποτελέσματα ήταν πολύ θετικά. Η τεχνολογία του συστήματος αυτού έχει κερδίσει ήδη δύο διεθνή σημαντικά βραβεία: the Euromot Award 1999 και the Seatrade Environmental Award (ENTEC, 2005).

Το κυρίως μέρος του συστήματος HAM αποτελείται από έναν κυλινδρικό πύργο ύγρανσης βάρους περίπου τριών τόνων, διαμέτρου 1,3 μέτρων και ύψους τεσσάρων μέτρων που εγκαθίσταται κοντά στην μηχανή. Επιπρόσθετο εξοπλισμό αποτελεί μία αντλία κυκλοφορίας, ένα φίλτρο, ένας εναλλάκτης θερμότητας για την θέρμανση του θαλασσινού νερού, ένα σύστημα καθαρισμού του νερού για τον έλεγχο του αλατιού και των ιχνοστοιχείων του νερού και μία δεξαμενή νερού μέσα στο μηχανοστάσιο (περίπου 0,5m x 1,5m x 1m). Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, το σύστημα HAM δεν χρειάζεται προθέρμανση πριν αρχίσει την κανονική λειτουργία του. Αντιθέτως, η μείωση των παραγόμενων NO_x αρχίζει με την εκκίνηση της μηχανής. Ως προφύλαξη για την αποφυγή εμφάνισης φαινομένων διάβρωσης στον πύργο

⁷⁹ MAN Diesel, Humid Air Motor-Technology for Green profits, www.mandiesl.com

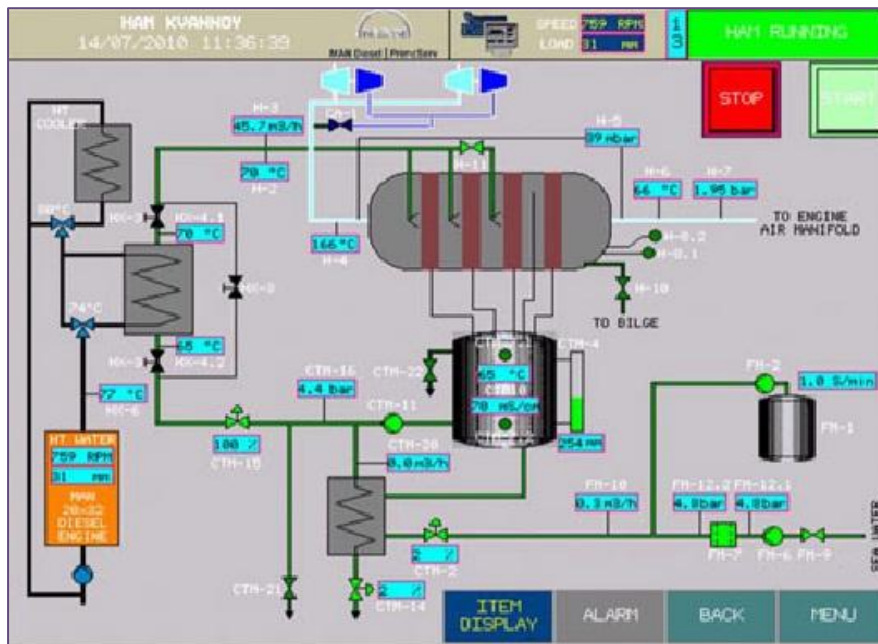
ύγρυνσης του συστήματος, συνίσταται η διακοπή της παροχής νερού δεκαπέντε λεπτά πριν τον τερματισμό λειτουργίας της μηχανής ώστε να μπορεί να στεγνώσει ο πύργος. Το σύστημα HAM είναι ασφαλές για λειτουργία με καύσιμα υψηλής περιεκτικότητας σε θείο αλλά απαιτεί το νερό που χρησιμοποιείται να είναι ιδιαίτερα καθαρό ώστε να αποφεύγεται η συσσώρευση ακαθαρσιών που προκαλούν διάβρωση. Για τον λόγο αυτό, το σύστημα HAM περιλαμβάνει έναν αποστακτήρα νερού ώστε να καθιστά το θαλασσινό νερό άμεσα διαθέσιμο προς χρήση. Η εγκατάσταση του συστήματος δεν είναι ιδιαίτερα επίπονη συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες καταπολέμησης ρύπων και μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μία μέρα σε μία στάση του πλοίου.



Σχήμα 5.25 Μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας καύσης χάρη στο σύστημα HAM⁸⁰

Η τεχνολογία ύγρυνσης του αέρα καύσης HAM εγκαταστάθηκε το 2010 στο Νορβηγικό πλοίο αλιείας KVANNØY (κατασκευής 2002) και αποτελεί το πρώτο σύστημα HAM σε τέτοιου είδους πλοίο παγκοσμίως και το δεύτερο σε όλες τις κατηγορίες πλοίων. Η διαδικασία της μετασκευής πραγματοποιήθηκε από την εταιρία MAN Diesel & Turbo. Όπως έδειξαν οι μετρήσεις του τελευταίου μήνα, χάρη στη χρήση του HAM, οι εκπομπές NO_x μειώθηκαν κατά 61,3%.

⁸⁰ MAN Diesel, Humid Air Motor-Technology for Green profits, www.mandiesl.com



Σχήμα 5.26 Σύστημα HAM όπως φαίνεται στον πίνακα ελέγχου και παρακολούθησης του Νορβηγικού πλοίου ΚΥΑΝΗΟΥ⁸¹

Η κύρια μηχανή του πλοίου ΚΥΑΝΗΟΥ είναι μία 16V28/32A της εταιρίας MAN που αποδίδει 3.920 kW στις 775rpm. Τα αποτελέσματα των ελέγχων που έγιναν εν πλω έδειξαν μείωση των παραγόμενων NO_x κατά 3,6g/kWh μετρούμενα σύμφωνα με τους κανονισμούς του IMO MARPOL, E2 test, ποσότητα που αντιστοιχεί στο 61,3% του συνόλου των NO_x συγκριτικά με τις εκπομπές της μηχανής χωρίς τη χρήση του συστήματος HAM. Το καινούριο επίπεδο εκπομπών NO_x του πλοίου είναι τώρα κατά 1,2g/kWh μεγαλύτερο από το επιτρεπόμενο όριο του IMO Tier III και σε ετήσια βάση το ΚΥΑΝΗΟΥ παράγει συνολικά 50 τόνους NO_x λιγότερο. Τα οικονομικά οφέλη της εγκατάστασης του συστήματος HAM είναι 100.000 EUR ετησίως λόγω της έκπτωσης στη φορολογία για μειωμένη παραγωγή NO_x στα Νορβηγικά ύδατα. Συνεπώς, η απόσβεση της όλης επένδυσης υπολογίζεται περίπου στα τρία χρόνια.

Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα του συστήματος ύγρανσης του αέρα καύσης HAM είναι τα εξής:

- ♦ Σημαντική μείωση των οξειδίων του αζώτου NO_x σε όλα τα φορτία λειτουργίας της μηχανής, περίπου κατά 70%.
- ♦ Πολύ μικρό λειτουργικό κόστος καθώς χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό και δεν απαιτεί επιπρόσθετες ουσίες για την μείωση των NO_x.
- ♦ Δεν απαιτεί την χρήση καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο γεγονός που μειώνει το κόστος λειτουργίας του πλοίου στις περιοχές που δεν διέπονται από τα όρια εκπομπών οξειδίων του θείου της IMO.
- ♦ Συνεισφέρει στην καλή λειτουργία της μηχανής καθώς μειώνει το θερμικό φορτίο και

⁸¹ MAN Diesel & Turbo, First Humid Air Motor Makes Waves in Fishing Industry, DIESEL FACTS 4/2010, www.mandieselturbo.com/dieselfacts

διατηρεί τα εξαρτήματα καθαρά.

- ◊ Έχει μικρές απαιτήσεις συντήρησης.
- ◊ Είναι μια τεχνική μείωσης των παραγόμενων NO_x ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον καθώς χρησιμοποιεί μόνο θαλασσινό νερό.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση του συστήματος HAM επιφέρει μικρή αύξηση στις εκπομπές VOC, CO₂, CO στα μικρότερα φορτία λειτουργίας της μηχανής. Παρόμοιες τεχνικές με το HAM βρίσκονται ήδη υπό ανάπτυξη. Η εταιρία Wartsila Corporation δουλεύει πάνω σε ένα σύστημα ονόματι CASS (Combustion Air Saturation System) το οποίο χρησιμοποιεί νερό υπό πίεση μαζί με τον αέρα καύσης μετά τον στροβιλοσυμπιεστή.

• Κόστος επένδυσης, λειτουργίας και εγκατάστασης

Το κόστος λειτουργίας, εγκατάστασης και επένδυσης του συστήματος HAM καθορίζεται ως εξής:

- ◊ Το αρχικό κόστος επένδυσης και εγκατάστασης είναι σημαντικά υψηλότερα από τα αντίστοιχα για άλλες μεθόδους μείωσης των παραγόμενων NO_x. εξαιτίας του μεγάλου όγκου και της μεγάλης επιφάνειας που καταλαμβάνει ο πύργος ύγρανσης και ο εναλλάκτης θερμότητας .
- ◊ Η περιορισμένη μέχρι σήμερα χρήση του από τα πλοία καθιστά δύσκολη την αξιολόγηση του και την δικαιολόγηση του τόσο υψηλού αρχικού κόστους του συστήματος ώστε να οδηγήσει σε εγκατάσταση του και σε άλλα πλοία.
- ◊ Σύμφωνα με την ENTEC (2005): το κόστος επένδυσης, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 5.27, είναι 90-130 EUR/kW για εγκατάσταση σε καινούριο πλοίο και 110-130 EUR/kW για μετασκευή σε παλαιότερο πλοίο. Το λειτουργικό κόστος του συστήματος ανέρχεται σε 0,15EUR/MWh.
- ◊ Σύμφωνα με την BMT FTL (2005): το κόστος επένδυσης ανέρχεται σε 25-54 US \$ ανά kW (18,75-40,5 EUR/kW) και το λειτουργικό κόστος σε 3US \$ ανά kW (2,25 EUR/kW).
- ◊ Σύμφωνα με την Helsinki commission (2006): το κόστος επένδυσης του συστήματος HAM (μαζί με το κόστος εγκατάστασης) είναι 118 EUR/kW χωρίς να υπάρχει κόστος λειτουργίας.
- ◊ Σύμφωνα με την εταιρία MAN B&W (2002): το κόστος επένδυσης χωρίς την εγκατάσταση είναι 50 EUR/kW ενώ αναμένεται πτώση του κόστους κατά 50% όταν το σύστημα συμπεριληφθεί στον standard εξοπλισμό των πλοίων.

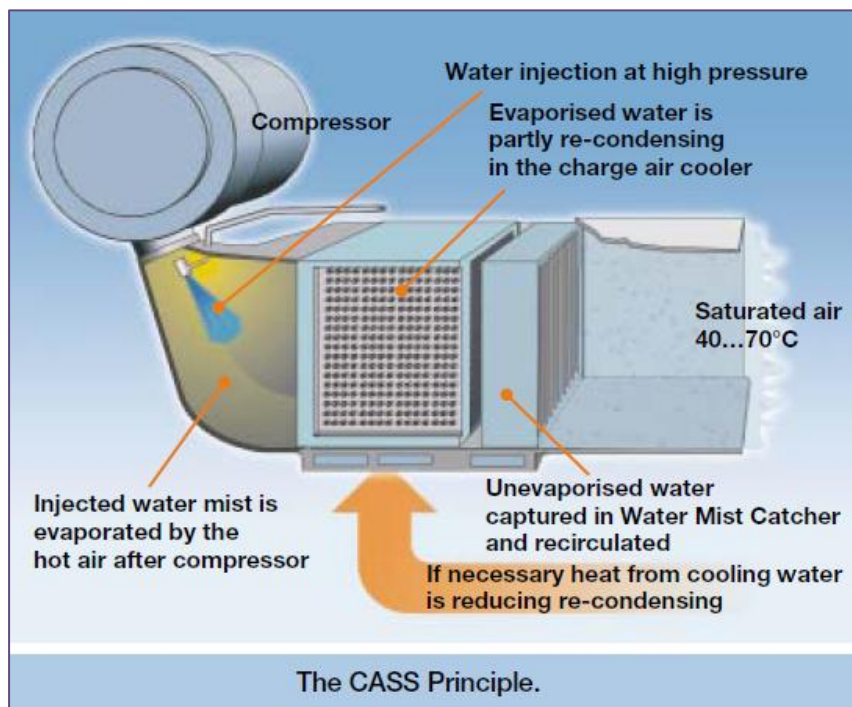
	Small Ship	Medium Ship	Large Ship
Κόστος επένδυσης καινούριας κατασκευής (€)	462.800	1.292.400	2.744.000
Διάρκεια ζωής (έτη)	15	15	15
Ετήσιο κόστος επένδυσης (€/ έτος)	41.625	116.240	246.798
Κόστος επένδυσης ανά kW	131	113	95
Κόστος επένδυσης μετασκευής (€)	462.800	1.392.400	3.244.000
Διάρκεια ζωής (έτη)	12,5	12,5	12,5
Ετήσιο κόστος επένδυσης μετασκευής (€/ έτος)	17.769	143.720	334.837
Κόστος επένδυσης μετασκευής ανά kW	131	121	113
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης (€/ έτος)	2.360	7.660	19.120
Συνολικό ετήσιο κόστος καινούριας κατασκευής (€ /έτος)	43.985	123.900	265.918
Συνολικό ετήσιο κόστος μετασκευής (€/ έτος)	50.129	151.380	353.957

Πίνακας 5.27 Παρουσίαση των επιμέρους κοστών για την χρήση συστήματος HAM σύμφωνα με της έρευνα της ENTEC⁸²

5.1.3.4 CASS - Combustion Air Saturation System

Η τεχνική CASS, όπως και η HAM, εισάγει νερό στον θάλαμο καύσης μέσω του αέρα καύσης. Η ύγρανση του αέρα καύσης σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται μέσω της έγχυσης νερού με μεγάλη πίεση στον αέρα αμέσως μετά τον στροβιλοσυμπιεστή. Το νερό, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του συμπιεσμένου αέρα, εξατμίζεται και εισέρχεται στον κύλινδρο ως ατμός με αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας καύσης όπως και οι υπόλοιπες τεχνικές εισαγωγής νερού στον θάλαμο καύσης. Για την αποφυγή της εισαγωγής νερού σε υγρή κατάσταση στον κύλινδρο, πριν από αυτόν είναι εγκατεστημένος ένας συλλέκτης σταγόνων νερού. Όπως συμβαίνει και με την απευθείας έγχυση νερού (DWI), το ποσοστό της μείωσης των παραγόμενων NO_x εξαρτάται από την ποσότητα νερού που θα εισαχθεί. Το σύστημα CASS επιτρέπει τη εισαγωγή μεγαλύτερης ποσότητας νερού και μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δυνατή η εισαγωγή της διπλάσιας ποσότητας νερού συγκριτικά με την ποσότητα καυσίμου. Το γεγονός αυτό καθιστά το σύστημα CASS ελαφρώς πιο αποδοτικό από το σύστημα DWI.

⁸²Emily de Jonge, Christoph Hugl, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005



Σχήμα 5.28 Αρχές λειτουργίας συστήματος CASS⁸³

Η τεχνική αυτή, αν και είναι ακόμα υπό ανάπτυξη, υπολογίζεται ότι είναι δυνατόν να επιτύχει μείωση των παραγόμενων NO_x κατά 50-60% χωρίς να επηρεάζει την κατανάλωση καυσίμου. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η μείωση του θερμικού φορτίου και η βελτίωση στην καθαριότητα της μηχανής.

Συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνικές εισαγωγής νερού στον κύλινδρο, η τεχνολογία CASS προσφέρει αυξημένη μείωση των NO_x με συνδυασμό με ένα ιδιαίτερα απλό σύστημα με χαμηλά κόστη και χωρίς αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Επιπλέον, όπως και οι υπόλοιπες μέθοδοι, και το σύστημα αυτό μπορεί εύκολα να αποσυνδεθεί χωρίς να επηρεάσει την ομαλή λειτουργία της μηχανής. Μειονέκτημα της μεθόδου που πρέπει να αναφερθεί είναι η σχετικά μεγάλη κατανάλωση φρέσκου νερού. Προβλέπεται ότι στο μέλλον το σύστημα CASS θα αποτελεί μέρος του βασικού εξοπλισμού των μηχανών ώστε να είναι σε θέση να συμμορφώνονται με τα ολοένα και αυστηρότερα όρια εκπομπών.

⁸³ P. Tremuli, Proposals for exhaust Gas Emissions Abatement, www.wartsila.com, January 2008

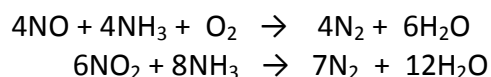
5.2 Μείωση των ήδη παραχθέντων εκπομπών NO_x – Δευτερεύουσες Τεχνικές

Οι δευτερεύουσες τεχνικές στοχεύουν στην μείωση των συγκεντρώσεων οξειδίων του αζώτου στα καυσαέρια της μηχανής μέσω επεξεργασίας των ίδιων των καυσαερίων αφού αυτά εξέλθουν από τον θάλαμο καύσης. Οι τεχνικές αυτές αναπτύσσονται συνεχώς και προτιμούνται για την ιδιαίτερη αποτελεσματικότητά τους στην απομάκρυνση των ρύπων από τα καυσαέρια (πάνω από 90%). Σημαντικό μειονέκτημα των δευτερευουσών τεχνικών είναι το ιδιαίτερα υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας τους. Τα χαρακτηριστικά και το κόστος των πιο συνηθισμένων δευτερευουσών τεχνικών μείωσης των NO_x παρουσιάζονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν.

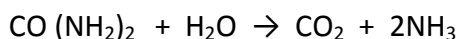
5.2.1 Σύστημα επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης (S.C.R.)

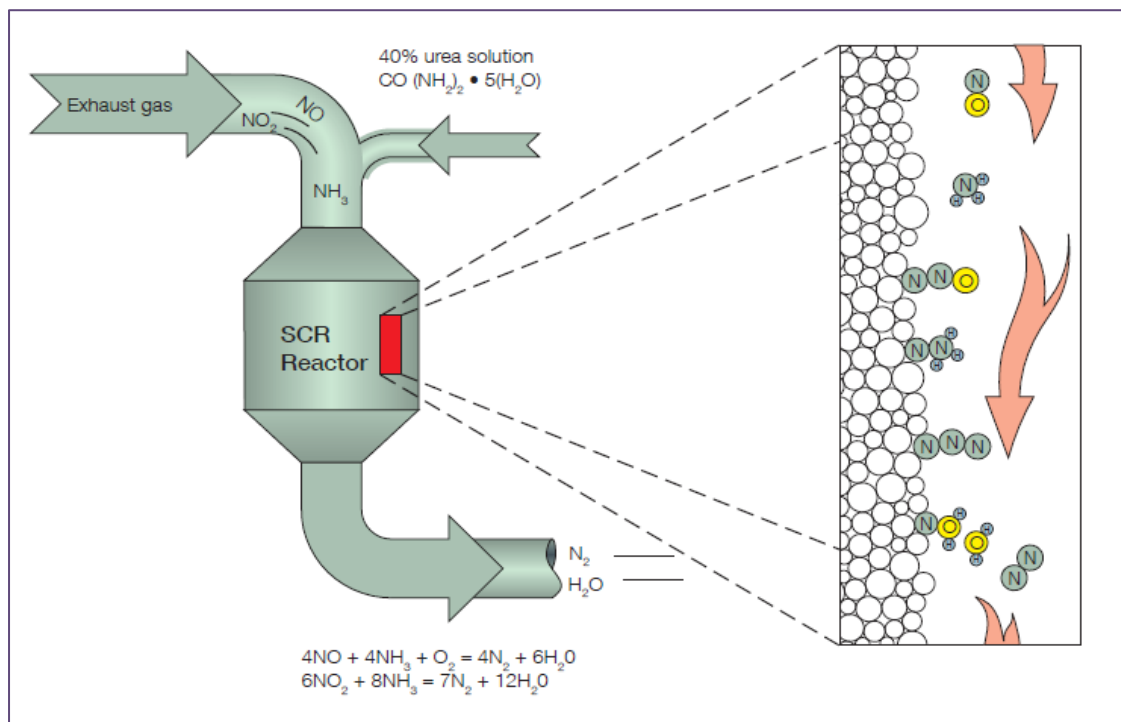
Η πιο συχνά εφαρμόσιμη και πιο αποτελεσματική μέθοδος μείωσης των οξειδίων του αζώτου από τα καυσαέρια είναι το σύστημα καταλύτη SCR (Selective Catalytic Reduction). Η μέθοδος αυτή καθιστά δυνατή την μείωση της συγκέντρωσης των NO_x στα καυσαέρια πάνω από 95% (2g/kWh και λιγότερο) προσθέτοντας στα καυσαέρια, μετά την έξοδο τους από την μηχανή, αμμωνία ή υδατικό διάλυμα ουρίας. Η τεχνική SCR πλεονεκτεί σημαντικά στον τομέα της τεχνογνωσίας έναντι των υπολοίπων τεχνικών μείωσης των NO_x καθώς αποτελεί μία τεχνολογία χρησιμοποιούμενη ήδη αρκετές δεκαετίες από τις κατασκευάστριες εταιρίες. Καταλύτες SCR εφαρμόζονται ήδη από την δεκαετία του 1970 σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενώ έκαναν την εμφάνισή τους στην ναυτιλία στην δεκαετία του 1980. Η εξέλιξη της τεχνικής συνεχίζεται και στις μέρες μας από τις μεγάλες κατασκευάστριες εταιρίες ναυτικών κινητήρων σε συνεργασία με τους κατασκευαστές καταλυτών ώστε η μέθοδος να ανταπεξέρχεται πλήρως στις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας και ανάγκες των μεγάλων δίχρονων μηχανών Diesel .

Ο μηχανισμός λειτουργίας της τεχνικής SCR είναι ιδιαίτερα απλός. Τα καυσαέρια, αφού εξέλθουν από την μηχανή, αναμειγνύονται με αμμωνία (NH₃) ή ουρία και στην συνέχεια το μείγμα διέρχεται από έναν καταλύτη σε θερμοκρασία 300 – 400°C. Με την διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μετατροπή των NO_x σε N₂ και H₂O μέσω των ακόλουθων χημικών αντιδράσεων:



Στην περίπτωση χρήσης ουρίας, αυτή διασπάται σε αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα σε θερμοκρασία άνω των 160°C σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:





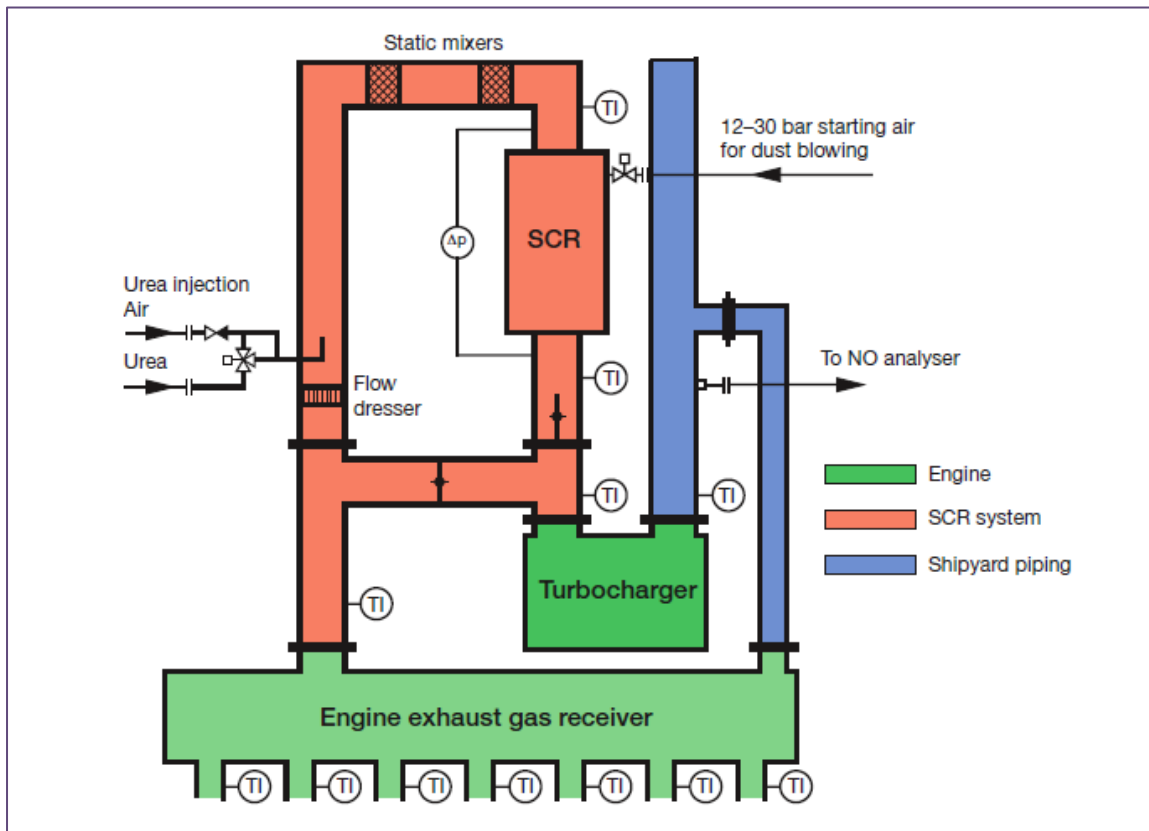
Σχήμα 5.29 Αρχές λειτουργίας συστήματος SCR⁸⁴

Όπως γίνεται φανερό από τις παραπάνω αντιδράσεις είναι απαραίτητη η παρουσία οξυγόνου για την διεξαγωγή της καταλυτικής αντίδρασης. Πολύ σημαντικό παράγοντα αποτελεί και η θερμοκρασία διεξαγωγής της αντίδρασης. Αν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, θα προκληθεί καύση της αμμωνίας/ουρίας ενώ αν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη, ο ρυθμός της αντίδρασης θα είναι πολύ μικρός και η συμπύκνωση των θεικών αλάτων (λόγω αντίδρασης της αμμωνίας με τα οξείδια του θείου) είναι πιθανό να οδηγήσει σε καταστροφή του καταλύτη. Σε αντίθεση με τους τετράχρονους κινητήρες, όπου το σύστημα SCR εγκαθίσταται μετά τον στρόβιλο δηλαδή στο τμήμα χαμηλής πίεσης, στους δίχρονους κινητήρες συνηθίζεται να τοποθετείται στο τμήμα υψηλής πίεσης δηλαδή ανάμεσα στην μηχανή και τον στρόβιλο ώστε να εξασφαλίζονται οι αρκετά αυτές υψηλές θερμοκρασίες για την διεξαγωγή της καταλυτικής αντίδρασης. Στους δίχρονους κινητήρες, λόγω της απόπλυσης, η θερμοκρασία των καυσαερίων μετά τον στρόβιλο είναι μόλις 230-260°C. Τοποθετώντας το σύστημα SCR μεταξύ του στροβίλου και της μηχανής επιτυγχάνονται θερμοκρασίες 50-200°C μεγαλύτερες ανάλογα με το φορτίο λειτουργίας της μηχανής (Σχήμα 5.30).

Ένα τυπικό σύστημα καταλύτη SCR αποτελείται από έναν αντιδραστήρα (ξεχωριστός αντιδραστήρας για κάθε μηχανή), ένα δοσομετρικό και ένα αποθηκευτικό σύστημα για την αμμωνία/ουρία. Ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής χορηγεί την κατάλληλη δόση αμμωνίας/ουρίας ανάλογα με την ποσότητα των παραγόμενων NO_x για το συγκεκριμένο φορτίο λειτουργίας του κινητήρα. Ο αντιδραστήρας του συστήματος αποτελείται από έναν αριθμό καταλυτικών στρωμάτων. Ο όγκος του καταλύτη και επομένως το μέγεθος του αντιδραστήρα εξαρτάται από τον βαθμό αποτελεσματικότητας του καταλύτη, τον επιθυμητό βαθμό μείωσης των συγκεντρώσεων NO_x, την συγκέντρωση NO_x στα καυσαέρια της μηχανής και τον αποδεκτό βαθμό απελευθέρωσης NH₃ στην ατμόσφαιρα. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι πεντοξείδιο του βαναδίου (vanadium pentoxide) ενσωματωμένα σε διοξείδιο του τιτανίου (titanium dioxide) και συχνά ενισχύονται με

⁸⁴ MAN Diesel & Turbo, Tier III Compliance- Low speed engines, www.mandieselturbo.com, 2010

τριοξείδιο του βολφραμίου και τριοξείδιο του μολυβδαινίου ώστε να βελτιστοποιούνται οι ιδιότητες του καταλύτη.



Σχήμα 5.30 Διάταξη συστήματος SCR σε δίχρονο κινητήρα χαμηλών στροφών της εταιρίας Sulzer⁸⁵

Το ποσοστό μείωσης των συγκεντρώσεων NO_x που επιτυγχάνεται εξαρτάται από την ποσότητα αμμωνίας/ουρίας που θα χρησιμοποιηθεί. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα ουρίας που θα αναμιχθεί με τα καυσαέρια τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μείωση των NO_x στα καυσαέρια μέχρι ενός ορισμένου ορίου. Πέρα από αυτό το όριο, η περίσσεια ποσότητα αμμωνίας θα διαφεύγει με τα καυσαέρια από την εξάτμιση χωρίς να έχει υποστεί αντίδραση.

Τα συστήματα εξοπλισμένα με SCR καταλύτες έχουν σταθερή απόδοση μέσα στα χρόνια χωρίς αυτή να επηρεάζεται από την χρήση ή την γήρανση.

Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής SCR είναι σημαντικά, γεγονός που την έχει καταστήσει την πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνική μείωσης των εκπομπών NO_x σε ναυτικούς και μη κινητήρες, τετράχρονους ή δίχρονους. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι συνοπτικά τα εξής:

◊ Μεγάλη αποτελεσματικότητα. Επιτυγχάνεται μείωση των συγκεντρώσεων NO_x στα καυσαέρια του κινητήρα πάνω από 95% (2g/kWh).

⁸⁵ Heinrich Schmid, German Weisser, Marine Technologies for Reduced Emissions, Wartsila corporation, www.wartsila.com, April 2005

◇ Δεν επηρεάζει την καύση και την θερμική απόδοση της μηχανής.

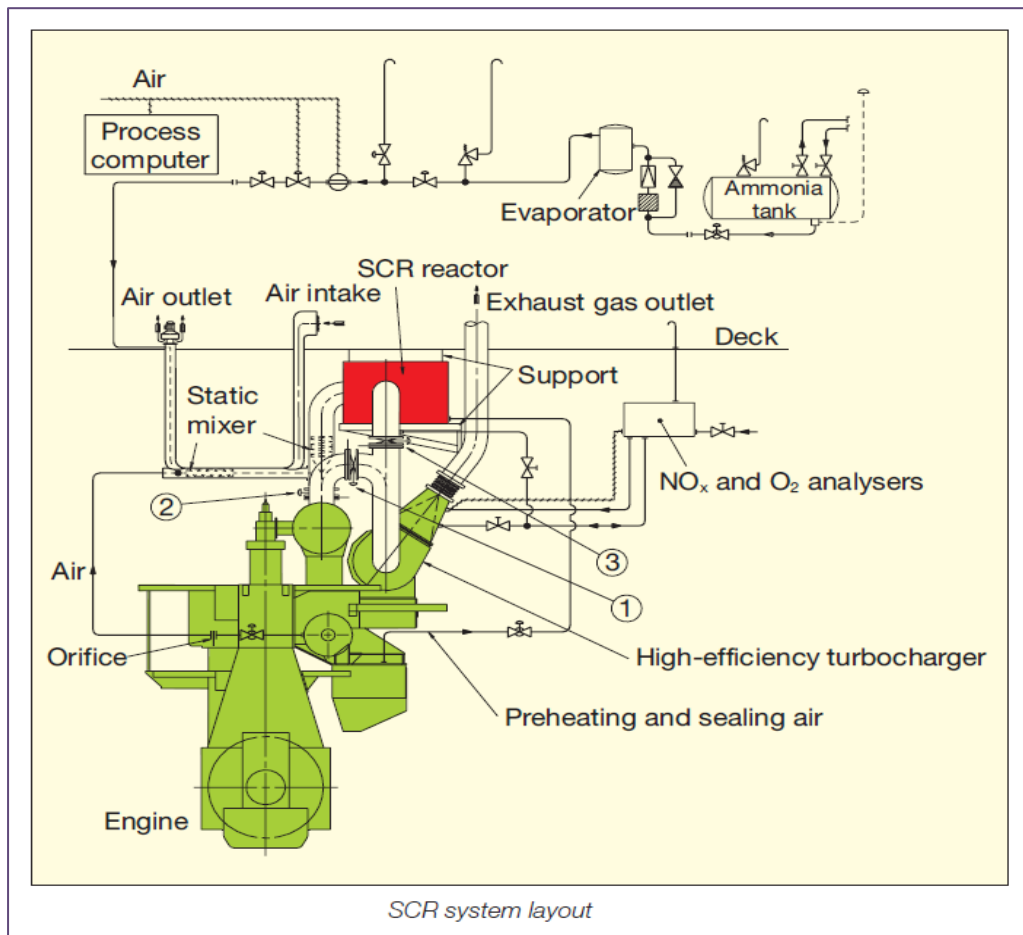
◇ Υπάρχει μεγάλη τεχνογνωσία καθώς η τεχνική αυτή εφαρμόζεται πολλές δεκαετίες.

◇ Το σύστημα παρέχει την δυνατότητα αποσύνδεσης του και λειτουργίας χωρίς αυτό εκτός των παράκτιων περιοχών όπου οι νομοθεσίες για τις εκπομπές είναι αυστηρότερη, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό το κόστος λειτουργίας του.

Αρκετά είναι και τα μειονεκτήματα της μεθόδου. Το κόστος λειτουργίας του συστήματος είναι ιδιαίτερα υψηλό λόγω της ανάγκης εφοδιασμού του πλοίου με αμμωνία/ουρία. Το κόστος επένδυσης είναι εξίσου μεγάλο καθώς κάθε περίπτωση πλοίου απαιτεί ξεχωριστή μελέτη. Το κόστος επένδυσης, εγκατάστασης και λειτουργίας του συστήματος θα αναλυθεί εκτενέστερα στην συνέχεια.

Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι επίσης η ανάγκη ειδικής διαρρύθμισης του χώρου και του εξοπλισμού του μηχανοστασίου ώστε να γίνει η εγκατάσταση του όλου συστήματος. Ένα σύστημα καταλύτη SCR καταλαμβάνει σημαντικό χώρο καθώς εκτός από τον όγκο που απαιτούν τα εξαρτήματα του είναι αναγκαίο να εξασφαλιστεί και η επισκεψιμότητα του ώστε να είναι δυνατή η συντήρηση του. Για την λειτουργία του συστήματος SCR απαιτείται η εγκατάσταση στροβιλο-αντιδραστήρα υψηλής απόδοσης. Επιπρόσθετο χώρο καταλαμβάνει και η δεξαμενή αποθήκευσης της αμμωνίας ή της ουρίας. Εάν χρησιμοποιείται αμμωνία, πρέπει η δεξαμενή να είναι εγκατεστημένη πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου σε ανοιχτό χώρο ενώ στην περίπτωση της ουρίας μπορεί να βρίσκεται στο εσωτερικό της όλης κατασκευής του συστήματος SCR. Επίσης, οι διαστάσεις και το σχέδιο ενός τέτοιου συστήματος επηρεάζονται από την ροή και την θερμοκρασία των καυσαερίων και την επιθυμητή μείωση των NO_x . Η βέλτιστη και πιο κοινή λύση είναι η κατασκευή του συστήματος SCR ειδικά για τον κινητήρα στον οποίο θα εγκατασταθεί και η εγκατάσταση να γίνει κατά την διάρκεια κατασκευής του πλοίου αν και είναι δυνατή και η μετέπειτα τοποθέτηση του.

Επιπρόσθετα προβλήματα προκύπτουν αν το σύστημα SCR συνοδεύεται από χρήση καυσίμων με υψηλή συγκέντρωση θείου. Το οξείδιο του θείου αντιδρούν με την αμμωνία και παράγουν θειικά άλατα τα οποία απειλούν να καταστρέψουν τον καταλύτη. Λύση στο πρόβλημα μπορεί να δώσει ένα σύστημα απόπλυσης καυσαερίων από τα οξείδια του θείου πριν από το σύστημα SCR κάτι που θα καθιστούσε όμως την όλη κατασκευή ιδιαίτερα ογκώδη και δαπανηρή. Τα οξείδια του θείου αντιδρούν επιπλέον και με το οξυγόνο του νερού παράγοντας θειώδες και θειικό οξύ (H_2SO_3 και H_2SO_4) τα οποία προκαλούν έντονα προβλήματα διάβρωσης στο σύστημα SCR. Η διαδικασία της οξειδωσης των οξειδίων του θείου είναι αναπόφευκτη ακόμα και στην περίπτωση χρήσης καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο. Για το λόγο αυτό, όταν είναι επιθυμητός μεγάλος βαθμός μείωσης των NO_x , είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται μεγαλύτερη ποσότητα ουρίας απ' ότι είναι αναγκαίο ώστε να γίνεται εξουδετέρωση των οξέων.



5.31 Διάταξη συστήματος SCR⁸⁶

• Κόστος επένδυσης, λειτουργίας και εγκατάστασης

Η ευρεία χρήση του συστήματος καταλύτη SCR τις τελευταίες δεκαετίες από πολυάριθμες μηχανές, οι πολλές ώρες λειτουργίας καθώς και ο μεγάλος αριθμός κατασκευαστριών εταιριών, επιτρέπουν τον υπολογισμό του κόστους επένδυσης, λειτουργίας και εγκατάστασης του συστήματος με μεγάλη βεβαιότητα και ακρίβεια.

◊ Η διάρκεια ζωής του συστήματος είναι 15 έτη αν και αναμένεται ο αντιδραστήρας να απαιτεί επισκευή νωρίτερα. Το κόστος αυτός συμπεριλαμβάνεται στον λειτουργικό κόστος. Τα υπόλοιπα μέρη τους συστήματος, όπως οι σωληνώσεις, οι δεξαμενές κλπ θεωρείται ότι έχουν δεκαπέντε χρόνια ζωής.

◊ Η ποσότητα ουρίας/αμμωνίας που απαιτείται εξαρτάται, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, από την επιθυμητή μείωση στις συγκεντρώσεις NO_x. Για την επίτευξη μείωσης περίπου 90% των NO_x υπολογίζεται πως απαιτείται περίπου 15g/kWh ουρία. Το υδατικό διάλυμα ουρίας, 40% συγκέντρωσης, στοιχίζει €170/tonne το οποίο συνεπάγεται €2,55/ MWh.

⁸⁶ MAN B&W, Emission Control MAN B&W Two-stroke Diesel Engines, MAN B&W Diesel A/S www.manbw.com

◊ Το κόστος συντήρησης του συστήματος περιλαμβάνει καθαρισμό ρουτίνας για την βέλτιστη λειτουργία και ανακατασκευή του αντιδραστήρα. Θεωρώντας ότι απαιτούνται 6 καθαρισμοί ανά 1000 ώρες λειτουργίας του συστήματος και ότι καθαρισμός στοιχίζει €150, το συνολικό κόστος ανά έτος για τον καθαρισμό ανέρχεται σε €8000 ανά πλοίο.

◊ Όσον αφορά τους αντιδραστήρες, αυτοί πρέπει να επισκευάζονται καθώς υφίστανται φθορές και διαβρώσεις λόγω των οξειδίων του θείου και άλλων ουσιών που καταστέλλουν την καταλυτική δράση τους. Σύμφωνα με υπολογισμούς, επισκευή του αντιδραστήρα απαιτείται κάθε 35000 ώρες λειτουργίας τους συστήματος (περίπου 5 χρόνια) για μηχανές που χρησιμοποιούν καύσιμα με 1-1,5% θείο. Για τα πλοία που χρησιμοποιούν καύσιμα περιεκτικότητας 2,7% ο χρόνος επισκευής μειώνεται στα 2,5 χρόνια. Η επισκευή του αντιδραστήρα υπολογίζεται ότι ανέρχεται στο 60% του αρχικού κόστους του αντιδραστήρα.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά το κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης για το σύστημα SCR για τρεις περιπτώσεις πλοίων. Ο πίνακας 5.32 αναφέρεται σε πλοία που χρησιμοποιούν καύσιμα περιεκτικότητας σε θείο 2,7% ενώ ο πίνακας 5.33 σε πλοία με καύσιμα 1-1,5% θείο.

	Vessel Type		
	Small (3000kW)	Medium (10000kW)	Large (25000kW)
Επένδυση καινούριας κατασκευής (€)	225.950	525.410	1.207.403
Διάρκεια ζωής εξοπλισμού (έτη)	15	15	15
Ετήσιο Κόστος (€/έτος)	20.322	47.256	108.595
Κόστος ανά kW(€/kW)	64	46	42
Επένδυση μετασκευής (€)	338.925	788.115	1.811.104
Διάρκεια ζωής εξοπλισμού (έτη)	12,5	12,5	12,5
Ετήσιο Κόστος (€/έτος)	34.983	81.347	186.937
Κόστος ανά kW(€/kW)	96	69	63
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανά έτος (€/έτος)	135.520	342.061	801.200
Κόστος λειτουργίας ανά MWh (€/MWh)	8,6	6,7	6,2
Συνολικό ετήσιο κόστος καινούριας κατασκευής (€/έτος)	155.842	389.316	909.795
Συνολικό ετήσιο κόστος μετασκευής(€/έτος)	170.503	423.408	988.137

Πίνακας 5.32 Επιμέρους κόστη χρήσης συστήματος SCR και καύσιμα με 2,7% S σύμφωνα με την έρευνα της ENTEC⁸⁷

⁸⁷Emily de Jonge, Christoph Hugl, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005

	Vessel Type		
	Small (30.00kW)	Medium (10.000kW)	Large (25.000kW)
Επένδυση καινούριας κατασκευής (€)	222.950	525.410	1.207.403
Διάρκεια ζωής εξοπλισμού (έτη)	15	15	15
Ετήσιο Κόστος (€/έτος)	20.322	47.256	108.595
Επένδυση μετασκευής (€)	338.925	788.115	1.811.1047
Διάρκεια ζωής εξοπλισμού (έτη)	12,5	12,5	12,5
Ετήσιο Κόστος (€/έτος)	34.983	81.347	186.937
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανά έτος (€/έτος)	94.107	245.762	579.904
Κόστος λειτουργίας ανά MWh (€/MWh)	6,0	4,8	4,5
Συνολικό ετήσιο κόστος καινούριας κατασκευής (€/έτος)	114.429	293.018	688.499
Συνολικό ετήσιο κόστος μετασκευής(€/έτος)	129.090	327.109	766.841

Πίνακας 5.33 Επιμέρους κόστη χρήσης συστήματος SCR και καύσιμα με 1-1,5% S σύμφωνα με την έρευνα της ENTEC⁸⁸

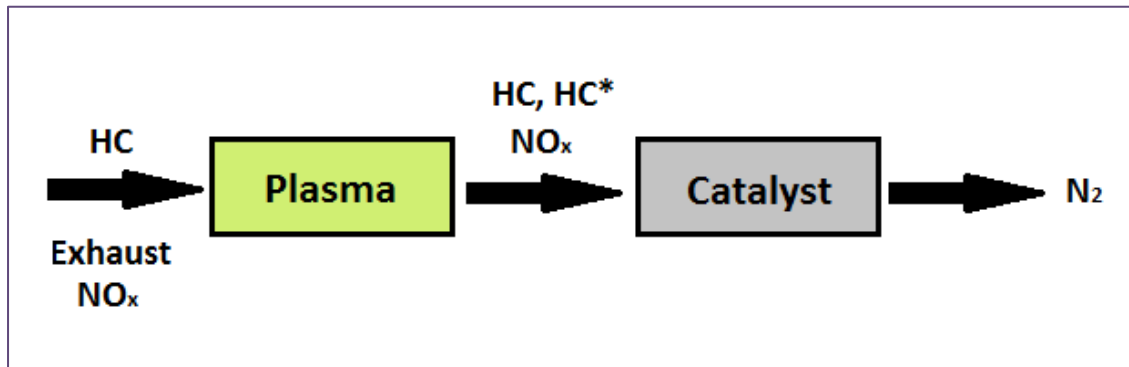
5.2.2 Non-thermal Plasma Catalytic Reduction (PACR)

Το "plasma" είναι ένα μερικά ιοντισμένο αέριο αποτελούμενο από ένα φυσικό μείγμα ατόμων και μορίων, ελευθέρων ριζών, ιόντων και ηλεκτρονίων. Καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που χορηγείται στο πλάσμα μετατρέπεται σε ενέργεια ηλεκτρονίων, τα ηλεκτρόνια αυτά δημιουργούν ελεύθερες ρίζες οι οποίες αφαιρούν τους ρύπους από τα καυσαέρια. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμα υπό μελέτη. Τις τελευταίες δεκαετίες οι κατασκευάστριες εταιρίες κάνουν προσπάθεια για την ανάπτυξη μίας βιώσιμης τεχνολογίας για την δημιουργία μη θερμικού πλάσματος σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί συστήματα για τον καθαρισμό αποτεφρωτήρων καυσαερίων, καθαρισμό αποβλήτων και φιλτράρισμα αέρα.

Η τεχνολογία μη θερμικού πλάσματος για καθαρισμό των καυσαερίων από Diesel κινητήρες είναι ακόμα υπό ανάπτυξη. Η γενική ιδέα του PACR παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.34. Το πλάσμα δημιουργεί ελεύθερες ρίζες οι οποίες αντιδρούν με του υδρογονάνθρακες (HC) που

⁸⁸ Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005

βρίσκονται στα καυσαέρια και παράγουν ενεργούς υδρογονάνθρακες (HC*) οι οποίοι και προωθούν την κατάλυση των οξειδίων του αζώτου (NO_x). Τα καυσαέρια εξερχόμενα από την μηχανή δεν περιέχουν αρκετούς υδρογονάνθρακες ώστε να πραγματοποιηθεί η κατάλυση γεγονός που απαιτεί την προσθήκη επιπλέον υδρογονανθράκων σε αυτά. Ως φορέας των απαιτούμενων υδρογονανθράκων μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο το καύσιμο diesel.



Σχήμα 5.34 Αρχή λειτουργίας PACR

Τα πλεονεκτήματα του συστήματος PACR είναι σημαντικά:

◊ Η μείωση των συγκεντρώσεων των NO_x στα καυσαέρια που επιτυγχάνεται με το σύστημα PACR είναι ανάλογη με αυτή του συστήματος SCR δηλαδή άνω του 95%.

◊ Όπως και το σύστημα SCR, αντικαθιστά τον σιγαστήρα στην εξάτμιση του πλοίου επιτυγχάνοντας μείωση του ήχου μεγαλύτερη από 25 dB ενώ το βάρος του συστήματος δεν ξεπερνά το 20-50% του σιγαστήρα καταλαμβάνοντας σχεδόν τον ίδιο χώρο.

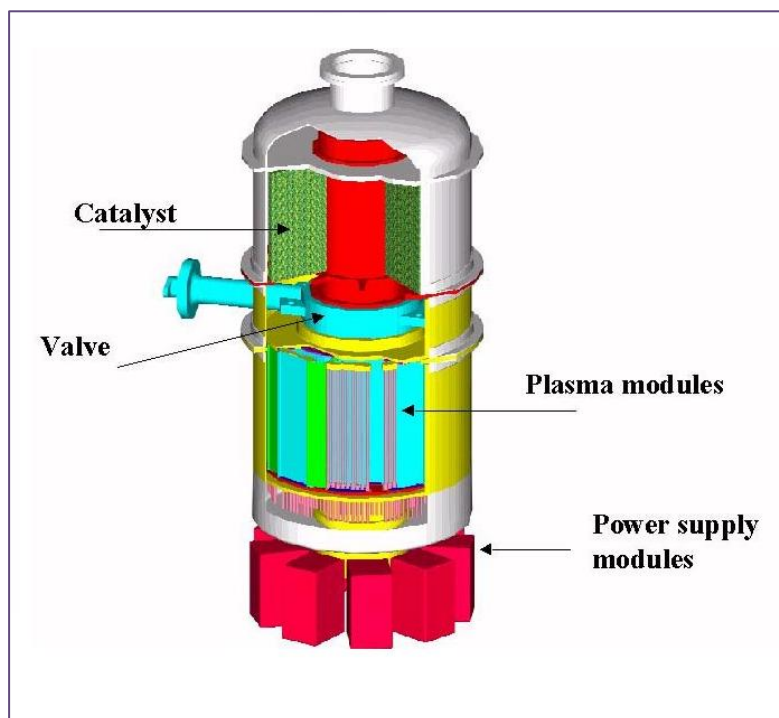
◊ Η ολική ισχύς που καταναλώνει το σύστημα δεν ξεπερνά το 5% της ολικής ισχύος της μηχανής αν και οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 2-5% καθώς χρησιμοποιεί επιπλέον καύσιμο για τον εμπλουτισμό των καυσαερίων με υδρογονάνθρακες.

◊ Το σύστημα PACR έχει μεγάλη διάρκεια ζωής όση και η μηχανή.

◊ Καταργεί την ανάγκη εφοδιασμού του πλοίου με επιπλέον ουσίες όπως η ουρία στην περίπτωση του συστήματος SCR οι οποίες για την αποθήκευση τους καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο στο μηχανοστάσιο.

◊ Έχει καλύτερες επιδόσεις στα χαμηλά φορτία λειτουργίας του κινητήρα σε αντίθεση με το σύστημα SCR.

Αν και το σύστημα αυτό είναι ακόμα σε δοκιμαστικό στάδιο όσον αφορά τους ναυτικούς κινητήρες, το κόστος για την παραγωγή του αναμένεται να είναι σχετικά μικρό. Το σύστημα αυτό είναι συμπαγές και ιδιαίτερα ελαστικό ως προς τις διαστάσεις και το σχήμα του. Το κόστος επένδυσης και εγκατάστασης ενός συστήματος PACR υπολογίζεται χονδρικά στα 200.000-500.000 U.S \$ καθιστώντας το σύστημα αυτό πιο συμφέρον οικονομικά για τα μεγάλα εμπορικά πλοία. Πιο λεπτομερή οικονομικά στοιχεία δεν υπάρχουν καθώς το σύστημα βρίσκεται ακόμα υπό μελέτη και δεν υπάρχει ευρεία χρήση του στον τομέα της ναυτιλίας.

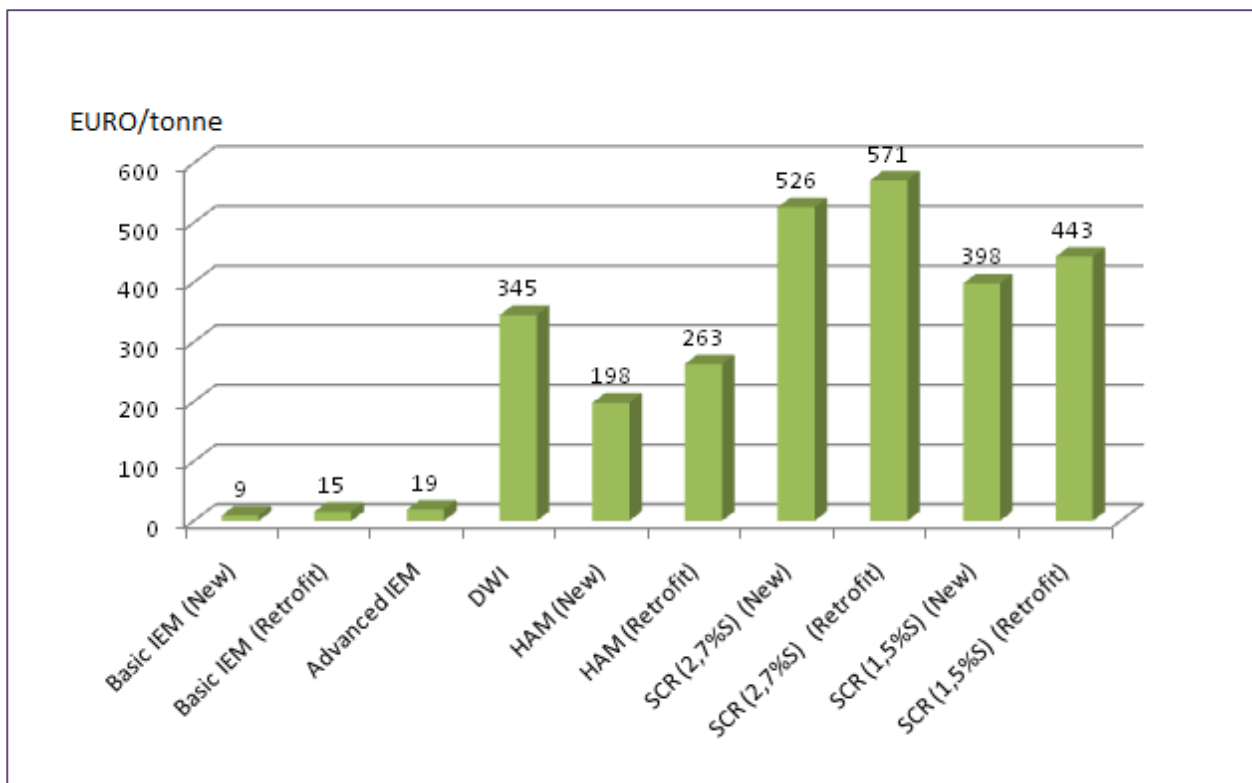


Σχήμα 5.35 PACR design concept

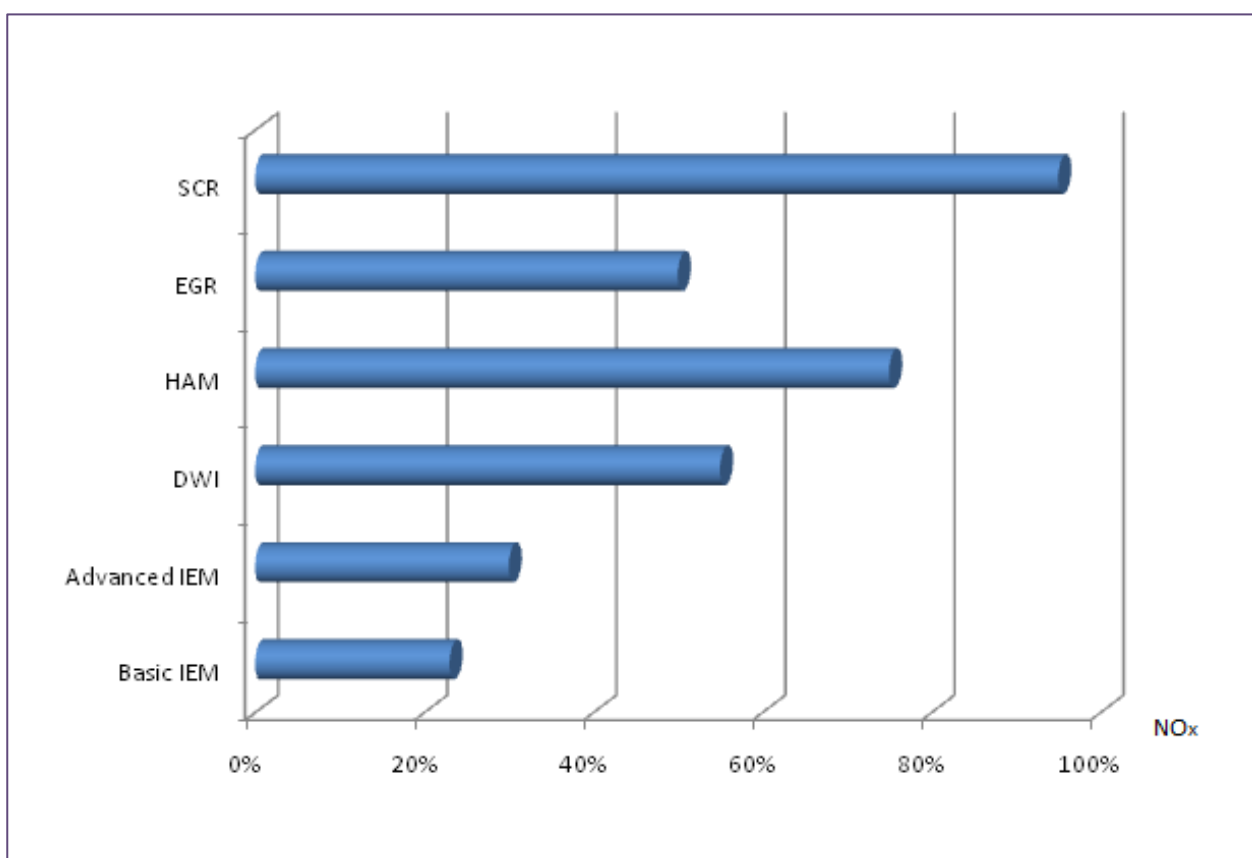
5.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x

Όπως κατέστη φανερό στις προηγούμενες ενότητες, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός τεχνικών για την μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x). Κάθε τεχνική έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της και η επιλογή της καταλληλότερης είναι διαφορετική για κάθε περίπτωση μηχανής και πλοίου ανάλογα με τις ανάγκες που εξυπηρετούν και τους θαλάσσιους δρόμους στους οποίους κινούνται. Τα σημερινά όρια εκπομπών που έχουν τεθεί από την IMO μπορούν εύκολα να ικανοποιηθούν με χρήση αποκλειστικά πρωτεύουσών τεχνικών οι οποίες εμφανίζονται να είναι πιο οικονομικές από τις δευτερεύουσες. Μελλοντικά ίσως καταστεί η ανάγκη συνδυασμού πρωτεύουσών και δευτερευουσών τεχνικών ώστε να είναι δυνατή η συμμόρφωση με τα νέα όρια της IMO.

Στο σχήμα 5.36 παρουσιάζεται το κόστος των τεχνικών μείωσης των NO_x ανά τόνο NO_x που υποχώρησε. Όπως γίνεται φανερό, η δευτερεύουσα τεχνική καταλυτικής μείωσης SCR είναι σημαντικά πιο δαπανηρή συγκριτικά με τις υπόλοιπες ενώ η απευθείας έγχυση νερού (DWI) είναι η πιο δαπανηρή ανάμεσα στις πρωτεύουσες τεχνικές. Το σχήμα 5.37 παρουσιάζει τον βαθμό μείωσης των NO_x που επιτυγχάνει κάθε τεχνική ενώ ο πίνακας 5.38 ανάγει το κόστος κάθε τεχνικής σε ισοδύναμο κόστος καυσίμου.



Σχήμα 5.36 €/τόννο NO_x⁸⁹



Σχήμα 5.37 Ποσοστό μείωσης εκπομπών NO_x ανά τεχνική

⁸⁹ Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005

Τεχνική	Τύπος πλοίου	Ρύποι	Small Vessel (€/τόνο καυσίμου)	Medium Vessel (€/τόνο καυσίμου)	Large Vessel (€/τόνο καυσίμου)
Basic IEM	Καινούρια κατασκευή	NO _x	0,17	0,13	0,12
Basic IEM (<15years)	Μετασκευή	NO _x	0,17	0,13	0,12
Basic IEM (>15 years)	Μετασκευή	NO _x	0,90	0,34	0,20
Advanced IEM	Καινούρια Κατασκευή	NO _x	2	0,7	0,4
Direct Water Injection	Καινούρια Κατασκευή	NO _x	15	14	13
HAM	Καινούρια Κατασκευή	NO _x	14	12	10
HAM	Μετασκευή	NO _x	16	15	14
SCR (2,7%S)	Καινούρια Κατασκευή	NO _x	50	38	35
SCR (2,7%S)	Μετασκευή	NO _x	55	41	39
SCR (1-1,5%S)	Καινούρια Κατασκευή	NO _x	37	29	27
SCR (1-1,5%S)	Μετασκευή	NO _x	41	32	30

Πίνακας 5.38 Κόστος τεχνικών μείωσης των NO_x εκφρασμένο σε ισοδύναμο κόστος καυσίμου⁹⁰

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα και πίνακες εξάγεται το συμπέρασμα πως ένα παλαιότερο πλοίο που επιθυμεί να συμμορφωθεί με τα σημερινά όρια της IMO πρέπει να στοχεύσει πρωτίστως στις τεχνικές που περιλαμβάνουν εσωτερικές τροποποιήσεις των μηχανών όπως αλλαγή των εγχυτήρων και των ακροφυσίων έγχυσης του καυσίμου ώστε να βελτιστοποιηθεί η καύση και στη συνέχεια, αν οι εκπομπές του σε NO_x ξεπερνούν τα νόμιμα όρια, να ανατρέξει σε επιπρόσθετες και ακριβότερες τεχνικές. Φυσικά, η επιλογή των τεχνικών θα γίνει με διαφορετικά κριτήρια για κάθε πλοίο, τεχνικά και οικονομικά, και η τελική επιλογή εξαρτάται από τον πλοιοκτήτη, τις ανάγκες και τις προθέσεις του. Όσον αφορά τα καινούρια πλοία, οι ναυτικοί κινητήρες που κατασκευάζονται πλέον είναι όλοι εφοδιασμένοι με τις κατάλληλες πρωτεύουσες τεχνικές ώστε οι εκπομπές τους να συμμορφώνονται με την ισχύουσα νομοθεσία. Σημαντικό ρόλο για την διατήρηση της αποτελεσματικότητας αλλά και της οικονομικότητας των τεχνικών αυτών είναι η σωστή και τακτική συντήρηση της μηχανής και των λοιπών εξαρτημάτων.

⁹⁰ Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005

6.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΚΑΠΝΟΥ

Οι εκπομπές σωματιδίων καπνού συμπεριλαμβάνουν αιθάλη (soot), οξειδία μετάλλων, καθώς και θειικά άλατα όλα προερχόμενα από την ατελή καύση του καυσίμου ή από τις ακαθαρσίες στα καύσιμα και στα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται. Επομένως, υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ της ποσότητας σωματιδίων καπνού που μία μηχανή παράγει με την ποιότητα καυσίμου που αυτή χρησιμοποιεί. Τα βαρύτερα καύσιμα του πετρελαίου παράγουν σημαντικά μεγαλύτερους όγκο σωματιδίων συγκριτικά με τα καθαρότερα καύσιμα.

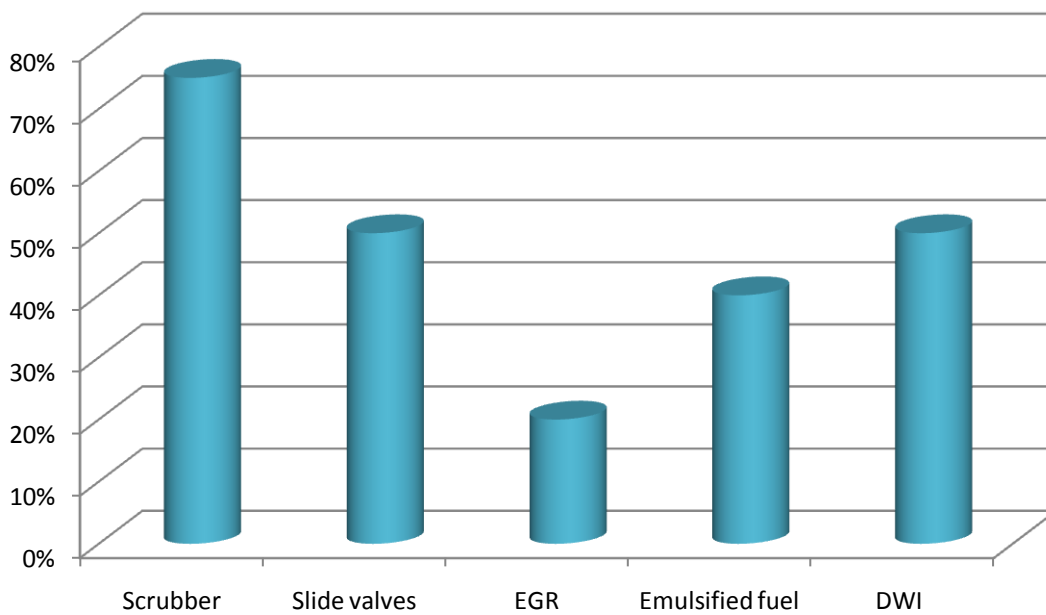
Η μείωση των εκπομπών σωματιδίων καπνού είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις περιοχές όπου παρατηρείται πυκνή κίνηση εμπορικών πλοίων όπως εμπορικά και επιβατηγά λιμάνια και παράκτιες περιοχές κοντά σε αυτά. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η νομοθεσία για τα όρια εκπομπών ρύπων στις περιοχές αυτές είναι πιο αυστηρή και το ίδιο συμβαίνει και για τις εκπομπές σωματιδίων καπνού. Οι δίχρονες μηχανές αν και έχουν σχετικά μικρές εκπομπές σωματιδίων καπνού λόγω της καλής ποιότητας καύσης τους, υπόκεινται και αυτές σε ορισμένους νομικούς περιορισμούς με τους οποίους καλούνται να συμμορφώνονται. Συνήθως τα πλοία δεν λαμβάνουν κάποια επιπλέον μέτρα για την μείωση των εκπομπών σωματιδίων καθώς πολλές από τις τεχνικές χρησιμοποιούνται ήδη για την κάλυψη των αναγκών σε μειωμένη παραγωγή άλλων ρύπων, όπως οξειδίων του αζώτου (NO_x) και οξειδίων του θείου (SO_x), για τους οποίους η νομοθεσία είναι πολύ αυστηρότερη. Έτσι, με την βελτίωση των συνθηκών καύσης μέσω του ελέγχου του χρόνου της έγχυσης (common rail system), της χρήσης βελτιωμένων εγχυτήρων (slide valves) και ακροφυσίων έγχυσης, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση των εκπομπών σωματιδίων καπνού. Μείωση των εκπομπών σωματιδίων παρατηρείται και με την τεχνική χρήσης γαλακτώματος νερού-καυσίμου και πιο συγκεκριμένα η μείωση αυτή είναι δύο με τρεις φορές μεγαλύτερη από το ποσοστό του νερού που χρησιμοποιείται δηλαδή για ποσοστό νερού 20% παρατηρείται μείωση 40-60% στην εκπομπή σωματιδίων.

Πέρα από τις τεχνικές αυτές υπάρχει η δυνατότητα χρήσης δευτερευουσών τεχνικών για την μείωση των εκπομπών σωματιδίων. Οι τεχνικές αυτές μειώνουν τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων καπνού στα καυσαέρια μετά την έξοδο τους από την μηχανή. Στις τεχνικές αυτές ανήκει η χρήση κεραμικών φίλτρων (Compact ceramic filters) τα οποία έχουν θετικά αποτελέσματα στις μικρότερες σε μέγεθος μηχανές αλλά δεν λειτουργούν επιτυχώς στις μεγαλύτερες οι οποίες κάνουν χρήση βαρύτερων καυσίμων τα οποία περιέχουν ουσίες που φράζουν τα φίλτρα. Υπάρχουν επιπλέον τα ηλεκτροστατικά φίλτρα για απομάκρυνση των σωματιδίων από τα καυσαέρια αλλά είναι ιδιαίτερα ογκώδη και ακριβά και δεν προτιμούνται.

Η απόπλυση των καυσαερίων με νερό είναι μία αποδεδειγμένα αποτελεσματική μέθοδος για την απομάκρυνση των σωματιδίων. Όπως έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 4 η απόπλυση των καυσαερίων είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται πρωτίστως για την απομάκρυνση των οξειδίων του θείου (SO_x) από τα καυσαέρια. Κατά την τεχνική αυτή τα

καυσαέρια, πριν την έξοδο τους στην ατμόσφαιρα, αναμειγνύονται με νερό το οποίο χάρη στην φυσική αλκαλικότητα του εξουδετερώνει τα οξείδια σε βαθμό μεγαλύτερο από 90%. Θετική συνέπεια της τεχνικής αυτής είναι και η απομάκρυνση τελικά από τα καυσαέρια των σωματιδίων καπνού σε βαθμό 70-80%.

Η χρήση καυσίμων με χαμηλή συγκέντρωση θείου είναι επίσης πολύ σημαντική για την μείωση των εκπομπών σωματιδίων καπνού καθώς μπορεί να επιτευχθεί μείωση έως και 40%. Τα εναλλακτικά καύσιμα όπως το bio-diesel αποτελούν μία ακόμα λύση αλλά το κόστος τους είναι ακόμα ιδιαίτερα υψηλό και η διαθεσιμότητα τους μικρή.



Σχήμα 6.1 Ποσοστό μείωσης των σωματιδίων (PM) μέσω των διαφόρων τεχνικών μείωσης των εκπομπών NO_x και SO_x

6.2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ (HC), ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO) ΚΑΙ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO₂)

6.2.1 Παρουσίαση τεχνικών μείωσης των εκπομπών HC, CO και CO₂

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι υδρογονάνθρακες και το μονοξείδιο του άνθρακα είναι προϊόντα της ατελής καύσης του καυσίμου. Καθώς η ποιότητα καύσης των μεγάλων δίχρονων κινητήρων χαμηλών στροφών είναι ιδιαίτερα καλή, οι εκπομπές των ουσιών αυτών είναι ιδιαίτερα περιορισμένες στους κινητήρες αυτούς. Αύξηση των εκπομπών HC και CO παρατηρείται συνήθως κατά την διάρκεια των στάσεων του πλοίου στα λιμάνια αλλά μπορεί εύκολα να αντιμετωπιστεί μέσω τεχνικών ήδη εγκαταστημένων στο πλοίο για την καταπολέμηση άλλων ρύπων.

Όσον αφορά το διοξείδιο του άνθρακα, η εκπομπές του είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το είδος αλλά και την ποσότητα καυσίμου που καταναλίσκεται. Μικρή μείωση των συγκεντρώσεων του είναι πρακτικά δυνατή μέσω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου της μηχανής και της χρήσης πιο πλούσιων ενεργειακά καυσίμων.

Όπως είναι γνωστό, ορισμένα καύσιμα έχουν μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη ανά αριθμό ατόμων άνθρακα συγκριτικά με άλλα καύσιμα με αποτέλεσμα κατά την καύση τους να απελευθερώνουν την ίδια ποσότητα ενέργειας αλλά μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (η ενεργειακή αξία ενός καυσίμου εκφράζεται σε BTU/lb ή Joule/kg) . Τέτοια καύσιμα αποτελούν για παράδειγμα, το φυσικό αέριο και τα βιοκαύσιμα (biofuels). Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (liquefied natural gas) προβλέπεται να είναι το προσεχές πιο δημοφιλές καύσιμο για τα σκάφη καθώς παράγει χαμηλές εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x), οξειδίων του θείου (SO₂), σωματιδίων (PM) και διοξειδίου του άνθρακα λόγω της σύστασης του μορίου του που περιέχει περισσότερα άτομα υδρογόνου και λιγότερα άτομα άνθρακα συγκριτικά με τα καύσιμα Diesel ενώ η τιμή του είναι χαμηλότερη από αυτή των αποσταγμένων καυσίμων (distillate fuels). Μειονέκτημα του υγροποιημένου φυσικού αερίου είναι η απαίτηση μεγάλου χώρου για την αποθήκευσή του και η μικρή έως τώρα διαθεσιμότητα του στα λιμάνια. Φυσικά ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιείται σε ένα σκάφος περιορίζεται από πολλούς παράγοντες (τιμή, διαθεσιμότητα, ικανότητα χρήσης εν πλω, τύπο μηχανών κλπ) και δεν είναι δυνατόν να επιλεγεί μόνο βάσει των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που παράγει.⁹¹

Η κατανάλωση καυσίμου μίας μηχανής είναι ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος καθώς το καύσιμο αποτελεί το μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος ενός πλοίου (40-60%). Η κατανάλωση καυσίμου (FC) υπολογίζεται μετρώντας τον όγκο καυσίμου που καταναλώνεται προς τον χρόνο. Μία επίσης χρήσιμη παράμετρος είναι η ειδική κατανάλωση καυσίμου (sfc ή m_b) που ορίζεται από την κατανάλωση καυσίμου προς την ισχύ της μηχανής. Το μέγεθος αυτό δείχνει πόσο αποτελεσματική είναι η μηχανή στο να χρησιμοποιεί το καύσιμο που της παρέχεται και να παράγει έργο και επομένως είναι χαρακτηριστικό της οικονομικότητας της μηχανής. Οι βέλτιστες τιμές της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου για κινητήρες Diesel είναι μικρότερες από αυτές των κινητήρων Otto και μπορούν να φτάσουν κάτω από 200g/KWh. Η κατανάλωση καυσίμου ενός κινητήρα, και μέσω αυτής οι εκπεμπόμενες ποσότητες ρύπων, είναι δυνατόν να

⁹¹ IMO, "Prevention of air pollution from ships", Second IMO GHG Study 2009

περιοριστεί με ποικίλους τρόπους όπως βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της μηχανής, χρήση πιο ποιοτικών καυσίμων καθώς και καταλυτών που καθιστούν την καύση πιο αποδοτική.

Σύμφωνα με την IMO, οι εκπομπές CO₂ είναι δυνατόν να μειωθούν από 25% έως 75% με την χρήση των υφιστάμενων τεχνολογιών και μιας σειράς επιχειρησιακών πρακτικών, μεταξύ των οποίων είναι η μείωση της ταχύτητας κίνησης του σκάφους κατά τμήματα του ταξιδιού του, η βελτίωση του σχεδιασμού των δρομολογίων, η αναβάθμιση και σωστή συντήρηση των ελίκων του σκάφους, η χρήση βελτιωμένης επίστρωσης του σκάφους και η συντήρηση της και η μετασκευή των μηχανών. Οι τεχνικές αυτές φαίνονται να είναι οικονομικά αποδοτικές. Ιδιαίτερα η μείωση της ταχύτητας κίνησης του πλοίου (ταχύτητα μειωμένη κατά 50% συγκριτικά με την ταχύτητα σχεδίασης με φορτίο λειτουργίας μόλις 10%) αποτελεί το πιο σημαντικό από τα μέτρα αυτά επιφέροντας μεγάλη μείωση στις εκπομπές CO₂ του πλοίου. Η μείωση όμως της ταχύτητας έρχεται αντιμέτωπη με τις απαιτήσεις για γρήγορη μεταφορά και παράδοση των εμπορευμάτων καθιστώντας τις εταιρίες που την χρησιμοποιούν λιγότερο ανταγωνιστικές εφόσον δεν υπάρχει νομοθεσία που να καθιστά τα μέτρα αυτά υποχρεωτικά για όλα τα σκάφη.

Προέλευση	Ρύπος	Σήμερα (2007)	Μέλλον (2050)	Προοπτικές Μείωσης	Ελάχιστο κόστος ανά τόνο CO ₂
Διεθνής Ναυτιλία	CO ₂	1046 MMT (2,7% του συνόλου)	1900-2670 MMT (5,5-12,7% του συνόλου)	25-75% (με την υπάρχουσα τεχνολογία)	\$100-\$200 Ανά τόνο CO ₂

Σχήμα 6.2 Καταγραφή, προοπτικές μείωσης και κόστος των εκπομπών CO₂ στην παγκόσμια ναυτιλία⁹²

Στην έρευνα της IMO για την ρύπανση του αέρα από τα αέρια του θερμοκηπίου από την παγκόσμια ναυτιλία με τίτλο "Second IMO GHG Study 2009"⁹³, παρουσιάζονται αναλυτικά τα μέτρα για την καταπολέμηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και γίνεται πρόβλεψη του οριακού κόστους των μέτρων αυτών για το 2020⁹⁴. Τα μέτρα αυτά διαχωρίζονται σε 10 κατηγορίες ώστε τα μέτρα της μίας κατηγορίας να μην αντικρούουν ή αποκλείουν τις άλλες κατηγορίες ενώ τα μέτρα της ίδιας κατηγορίας να μην είναι πιθανόν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα. Για κάθε κατηγορία παρουσιάζεται το κόστος αποδοτικότητας (cost efficiency) και η μέγιστη δυνατότητα μείωσης των ρύπων (maximum abatement potential).

Το κόστος αποδοτικότητας ενός μέτρου αποτελεί ουσιαστικά το καθαρό κόστος για την μείωση ενός τόνου εκπομπών CO₂ κατά την διάρκεια ενός έτους. Το καθαρό κόστος είναι το κόστος επένδυσης και εγκατάστασης του μέτρου μείον το κέρδος από την εξοικονόμηση καυσίμου χάρη στην εφαρμογή του ίδιου του μέτρου. Εφόσον δεν υπάρχουν μέχρι και σήμερα

⁹² Bruce A. Russell, Haifeng Wang and Mazyar Zeinali, " Marginal Abatement Costs of CO₂ Emissions Reduction and Market-Based Mechanisms and the Pricing of Credits", International Council for Clean Transportation, 2009.

⁹³ IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 2 – "Emission reduction Technology options".

⁹⁴ IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 4 - "Estimation of CO₂ Abatement costs for shipping".

κανονισμοί για τις εκπομπές CO₂ από τα πλοία, ένα μέτρο, σύμφωνα με τον ορισμό του, είναι αποδοτικό μόνο όταν το κόστος αποδοτικότητας του είναι αρνητικό. Για τον υπολογισμό του κόστους αποδοτικότητας ενός μέτρου, δεδομένης της μεγάλης αβεβαιότητας τόσο για την αποτελεσματικότητα των διαφόρων τεχνικών μείωσης του CO₂ όσο και για το κόστος τους, λαμβάνονται υπόψη δύο εν δυνάμει μειώσεις εκπομπών για κάθε μέτρο, μία μικρή και μία υψηλή καθώς και δύο εν δυνάμει κόστη, ένα μικρό και ένα μεγάλο.

Όσον αφορά την μέγιστη δυνατότητα μείωσης των ρύπων των διαφόρων μέτρων, αποτελεί το μέγιστο επίπεδο καταπολέμησης ρύπων που είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω ενός μέτρου κατά την διάρκεια ενός έτους (πλήρης χρήσης του μέτρου κατά το χρονικό διάστημα αυτό). Για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού απαιτείται η γνώση των τύπων των πλοίων που μπορούν να κάνουν χρήση των μέτρων καθώς και τον αριθμό των πλοίων που μπορούν να εφαρμόσουν το κάθε μέτρο για την διάρκεια ενός έτους. Ορισμένα επίσης μέτρα μπορούν να εφαρμοστούν μόνο στις καινούριες κατασκευές πλοίων και για τον λόγο αυτό απαιτείται η γνώση του αριθμού καινούριων πλοίων που εισέρχονται στην αγορά για το χρονικό διάστημα ανάμεσα στο έτος εμφάνισης στην αγορά του μέτρου και την υπό εξέταση χρονιά. Λόγω έλλειψης ακριβών στοιχείων για το έτος 2020 που μελετάται, η έρευνα της IMO κάνει ορισμένες υποθέσεις. Για όλα τα αποτελέσματα έχει θεωρηθεί κοινή τιμή καυσίμων US\$500/tonne και επιτόκιο 4%. Οι τύποι των πλοίων που λαμβάνονται υπόψη απαριθμούνται στο πίνακα A1-8 του παραρτήματος 1 της έρευνας (Appendix 1, "Estimate of 2007 fuel consumption by international shipping"). Για περισσότερες λεπτομέρειες πάνω στις υποθέσεις και τα αποτελέσματα της προαναφερόμενης έρευνας, ο αναγνώστης θα μπορούσε να ανατρέξει στο παράρτημα 4 (Appendix 4) με τίτλο "Estimation of CO₂ marginal abatement costs for shipping" της έρευνας.⁹⁵

Οι κατηγορίες των τεχνικών για την εξοικονόμηση ενέργειας και καταπολέμησης των εκπομπών CO₂ και το οριακό κόστος των τεχνικών αυτών, όπως παρουσιάζονται από την έρευνα της IMO για τα αέρια του θερμοκηπίου, είναι οι ακόλουθες (πίνακας 6.3):

Κατηγορία	Μέτρο	Εφαρμοσιμότητα
Propeller maintenance (Συντήρηση έλικας)	Propeller performance monitoring	All ship types
	Propeller brushing (increased frequency)	All ship types
	Propeller brushing	All ship types
Propeller/propulsion system upgrades (Αναβάθμιση ελίκων/ συστήματος πρόωσης)	Propeller/rubber upgrade	All ship types other than ferries and cruise ships
	Propeller upgrade (winglet, nozzle)	Tankers only (crude oil, product, chemical, LPG, LNG and other)
	Propeller boss cap fins	All ship types

⁹⁵ http://www5.imo.org/SharePoint/blastDataHelper.asp/data_id%3D27795/GHGStudyFINAL.pdf

Hull coating and maintenance (Επίστρωση σώματος πλοίου και συντήρηση της)	Hull performance monitoring	All ship types
	Hull coating (two types)	All ship types
	Hull brushing	All ship types
	Hull hydroblasting (underwater)	All ship types
	Dry-dock full blast (as opposed to spot blast)	All ship types, assumed to be applied to old ships only
Voyage and operations options (Επιλογές που αφορούν το ταξίδι και της συνθήκες λειτουργίας)	Shaft power meter (performance monitoring)	All ship types
	Fuel consumption meter (performance monitoring)	All ship types
	Weather routing	
	Autopilot upgrade/adjustment	All ship types
Main engine retrofit (μετασκευή της μηχανής)	Main engine tuning	All ship types other than ferries and cruise ships
	Common rail upgrade	All ship types
Retrofit hull improvements	Transverse thruster opening (flow optimization, grids)	All ship types
Auxiliary systems (Βοηθητικά συστήματα)	Low-energy/low heat lighting	Ferries and cruise ships only
	Speed control pumps and fans	All ship types
	Power management	Newly built ships only, all ship types
Other retrofit options	Towing kite	Bulk carriers, tankers
Speed reduction (μείωση ταχύτητας)	Speed reduction	All ship types
Air lubrication	Air lubrication	Newly built ships only, crude oil tankers and bulk carriers >60.000dwt, LPG tankers >50.000m ³ , all LNG tankers, full container vessels >2000 TEU

Πίνακας 6.3 Μέτρα για τη μείωση των εκπομπών CO₂⁹⁶

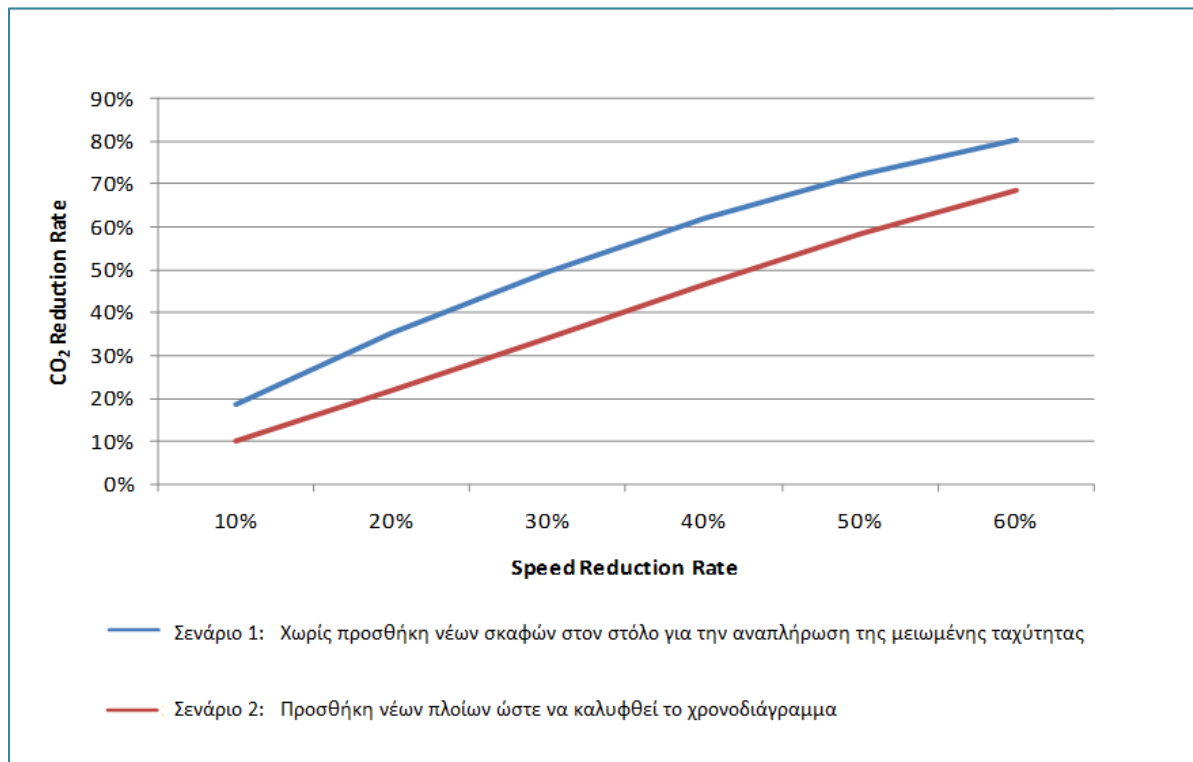
Πιο αναλυτικά τα μέτρα αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια:

◊ **Μείωση ταχύτητας κίνησης πλοίου.** Οι εκπομπές ρύπων από ένα σκάφος είναι περίπου ανάλογες προς το τετράγωνο της ταχύτητας του οπότε υπολογίζεται πως για μείωση της ταχύτητας κατά 10%, το ενεργειακό κέρδος είναι 19%.⁹⁷ Το σχήμα 6.4 παρουσιάζει την

⁹⁶ IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 4 - "Estimation of CO₂ Abatement costs for shipping".

⁹⁷ IMO, "Prevention of air pollution from ships", Second IMO GHG Study 2009

σχέση μεταξύ των παραγόμενων εκπομπών CO₂ και της μείωσης της ταχύτητας κίνησης για το σύνολο του στόλου μιας ναυτιλιακής εταιρίας.



Σχήμα 6.4 Μείωση εκπομπών CO₂ συναρτήσει της μείωσης της ταχύτητας του σκάφους για δύο σενάρια δράσης της ναυτιλιακής εταιρίας⁹⁸

Η μείωση της ταχύτητας είναι μια ακριβή τεχνική για τις πλοιοκτήτριες εταιρίες καθώς επηρεάζει άμεσα τον όγκο των εμπορευμάτων που η εταιρίες μπορούν να διαχειριστούν μέσα σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και συνεπώς την ανταγωνιστικότητα τους ως προς την παροχή υπηρεσιών που προσφέρουν, έχοντας επιπτώσεις στο εισόδημα τους. Το κέρδος από την εξοικονόμηση καυσίμου προσδοκείται βεβαίως να εξισορροπήσει τις οικονομικές αυτές επιπτώσεις. Όταν μια εταιρία εφαρμόσει την στρατηγική αυτή αυτομάτως χρειάζεται περισσότερα πλοία για να καλύψει τις ανάγκες της και ως εκ τούτου, ενώ η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου είναι μειωμένη κατά το 1/3 για ένα μεμονωμένο πλοίο της εταιρίας, η συνολική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου του στόλου είναι σημαντικά μικρότερη. Επομένως, το ουσιαστικό κόστος της μείωσης της ταχύτητας είναι το κόστος για την αγορά νέων σκαφών που θα αναπληρώσουν την μειωμένη χωρητικότητα και η κατανάλωση καυσίμου και το κόστος λειτουργίας αυτών. Ο αριθμός των νέων πλοίων που απαιτούνται σύμφωνα με την έρευνα αυτή της IMO είναι ίσος με $[1/(1-\text{speed reduction in } \%)]-1$. Οι τιμές για τα καινούρια πλοία είναι ιδιαίτερα ευμετάβλητες. Επιπλέον, το λειτουργικό κόστος χωρίς να υπολογίζεται το κόστος για τα καύσιμα, υπολογίζεται για όλους τους τύπους πλοίων μεταξύ των US \$ 6.000- US \$ 8.000 την μέρα. Με βάση τα ανωτέρω στοιχεία προκύπτει ο Πίνακας 6.5 που παρουσιάζει το κόστος αποδοτικότητας και τη μέγιστη δυνατότητα μείωσης ρύπων για μείωση της ταχύτητας πλοίου κατά 10%. Θα πρέπει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα συντηρητικά καθώς γίνεται η υπόθεση πως η μείωση της

⁹⁸ Bruce A. Russel, Haifeng Wang, Mazyar Zeinali, Marginal Abatement Costs of CO₂ Emissions Reduction and Market-Based Mechanisms and the Pricing of Credits

ταχύτητας εξισορροπείται από την αύξηση του στόλου. Σε περίπτωση ύπαρξης πλεονάζουσας χωρητικότητας δηλαδή ύπαρξη άλλων εταιριών που θα επωφεληθούν από την μείωση του φορτίου που μπορεί να μεταφέρει η πρώτη εταιρία, τότε το κόστος αποδοτικότητας θα ήταν μεγαλύτερο για την εταιρία αυτή. Τέλος θα πρέπει να δοθεί έμφαση στο γεγονός πως τα αποτελέσματα του πίνακα 6.5 αφορούν το σύνολο του στόλου και όχι μεμονωμένα πλοία καθώς η απόδοση κόστους διαφέρει για τους διάφορους τύπους πλοίων. Γενικά, τα πιο γρήγορα και μεγάλα σε μέγεθος πλοία παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση κέρδους συγκριτικά με τα μικρότερα σε μέγεθος και μικρότερης ταχύτητας πλοία.

2020	10% μείωση ταχύτητας για το σύνολο του στόλου	Cost efficiency (US\$/tone of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	%of total emissions
		80	135	98,7	7,9%

Πίνακας 6.5 Κόστος αποδοτικότητας και μέγιστη δυνατότητα μείωσης ρύπων για μείωση ταχύτητας κατά 10% του στόλου μιας ναυτιλιακής εταιρίας⁹⁹

Δ Αντικατάσταση και συντήρηση των ελίκων του πλοίου. Όπως είναι γνωστό η ώθηση του πλοίου είναι δυνατή χάρη στις έλικες του. Υψηλή απόδοση πρόωσης επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης μίας μεγάλης σε διάμετρο έλικας η οποία εκτελεί μικρό αριθμό περιστροφών ανά λεπτό (rpm). Ιδανικά, ο αριθμός των πτερυγίων της έλικας πρέπει να είναι ο ελάχιστος ώστε να μειώνεται η επιφάνειας επαφής και επομένως η αντίσταση τριβής σε αυτά. Το μέγεθος βεβαίως της έλικας περιορίζεται από την σχεδίαση του πλοίου αλλά και τους κανονισμούς των περιοχών στις οποίες λειτουργεί το πλοίο. Υπολογίζεται πως αντικατάσταση μιας έλικας μικρότερης διαμέτρου που λειτουργεί σε σχετικά υψηλές στροφές με μία μεγαλύτερης διαμέτρου που λειτουργεί σε χαμηλότερες στροφές επιφέρει μείωση της κατανάλωσης καυσίμου της τάξης του 5-10%. Τέλος, ανανεώνοντας την βαφή στην επιφάνεια μιας έλικας που έχει εκτραχυνθεί με την πάροδο του χρόνου είναι δυνατή η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου έως και 3%. Ο πίνακας 6.6 παρουσιάζει το κόστος αποδοτικότητας και την μέγιστη δυνατότητα μείωσης των εκπομπών CO₂ που επιτυγχάνεται μέσω της αναβάθμισης της έλικας ενός πλοίου ενώ ο Πίνακας 6.7 παρουσιάζει τα αντίστοιχα στοιχεία όταν η έλικες του πλοίου συντηρούνται μέσω συχνού βουρτσίσματος της επιφάνειας τους (Increased frequency of propeller brushing).

2020		Cost efficiency (US\$/tone of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	%of total emissions
	Low reduction potential	530	600	1,3	0,10%
	High reduction potential	-90	-80	11,2	0,90%

Πίνακας 6.6 Κόστος αποδοτικότητας και μέγιστη δυνατότητα μείωσης CO₂, μέσω της αναβάθμισης της

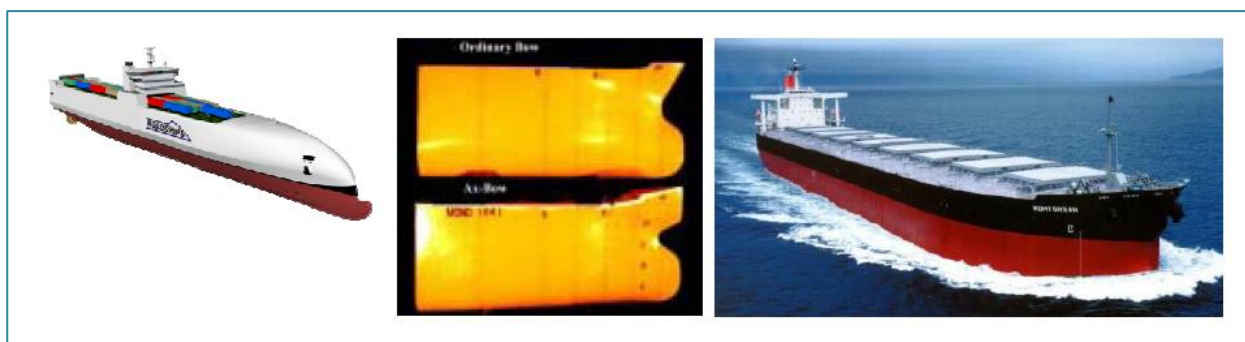
⁹⁹IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 4 - "Estimation of CO₂ Abatement costs for shipping".

έλικας (τιμή καυσίμου US\$ 500/tonne και επιτόκιο 4%)¹⁰⁰

		Cost efficiency (US\$/tone of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	%of total emissions
2020	Low reduction potential	-160	-130	6.2	0,50%
	High reduction potential	-160	-160	36.7	2,90%

Πίνακας 6.7 Το κόστος αποδοτικότητας και η μέγιστη δυνατότητα μείωσης CO₂, μέσω συχνού βουρτσίσματος της επιφάνειας της έλικας του πλοίου¹⁰¹

◊ **Βελτιστοποίηση της σχεδίασης του πλοίου.** Η βελτιστοποίηση αυτή στοχεύει στην μέγιστη μείωση της αντίστασης (οπισθέλκουσας), λόγω αέρα και νερού, και την αποδοτικότερη πρόωση μέσω ενός πιο αεροδυναμικού σχήματος. Η σχεδίαση των πλοίων περιορίζεται βεβαίως από πρακτικούς παράγοντες όπως το ωφέλιμο φορτίο του σκάφους και οι διαστάσεις των λιμανιών και των τερματικών σταθμών περιορίζοντας τις δυνατότητες μείωσης της αντίστασης και επομένως της κατανάλωσης καυσίμου. Σε μεμονωμένα πλοία, μελέτες έχουν δείξει πως η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του βρεχόμενου τμήματος τους είχε ως αποτέλεσμα την μείωση των ενεργειακών τους αναγκών έως και 30% αν και σε γενικές γραμμές η αναμενόμενη μείωση χάρη στην βελτιωμένη σχεδίαση αναμένεται να είναι αρκετά μικρότερη καθώς, συνήθως τα πλοία βελτιστοποιούνται σε συνθήκες πλεύσης χωρίς κυματισμούς και συνεπώς η κατανάλωση καυσίμου τους σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης είναι μεγαλύτερη. Η βελτιστοποίηση του ανώτερων τμημάτων των πλοίων, χρησιμοποιώντας στρογγυλεμένες άκρες και αεροτομές, είναι δυνατόν να αποφέρει μείωση της κατανάλωσης ισχύος 1-2%.



Σχήμα 6.8 Παραδείγματα βελτιστοποιημένης σχεδίασης σκαφών¹⁰²

¹⁰⁰ IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 4 - "Estimation of CO₂ Abatement costs for shipping".

¹⁰¹ IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 4 - "Estimation of CO₂ Abatement costs for shipping".

¹⁰² IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 2 – "Emission reduction Technology options".

◊ **Χρήση κατάλληλης επίστρωσης και συντήρησή της.** Η αντίσταση λόγω τριβής αποτελεί σημαντικό μέρος της συνολικής αντίστασης ιδιαίτερα στα πλοία που κινούνται με μικτότερες ταχύτητες και η μείωση της θα ελάττωνε την κατανάλωση καυσίμου και συνεπώς της εκπομπές CO₂. Η αντίσταση αυτή μπορεί να μειωθεί σημαντικά μέσω της χρήσης του κατάλληλου επιστρώματος στο σώμα του πλοίου που θα μειώσει την τραχύτητα του. Η αποτελεσματικότητα της επίστρωσης εξαρτάται όχι μόνο από την ποιότητα της αλλά και από την σωστή συντήρησή της. Κατά την λειτουργία του πλοίου η επίστρωση είναι δυνατόν να εμφανίσει ρωγμές ή σκουριά γεγονός που θα αυξήσει την τραχύτητα του πλοίου. Επιπρόσθετα στο σώμα του πλοίου αναπτύσσεται θαλάσσια χλωρίδα που είναι ιδιαίτερα επιβλαβής. Γίνεται επομένως φανερή η ανάγκη σωστής και τακτικής συντήρησης της επίστρωσης του σκάφους ώστε να διατηρείται η μειωμένη κατανάλωση ισχύος. Υπολογίζεται πως κάθε 3-5 έτη η επίστρωση του πλοίου είναι απαραίτητο να ανανεώνεται. Στην έρευνα της IMO συγκρίνονται δύο διαφορετικά είδη βελτιωμένης επίστρωσης με τις κοινές επιστρώσεις TBT-free. Η απόδοση κόστους και η μέγιστη δυνατότητα μείωσης των εκπομπών CO₂ (πίνακας 6.9) για τις επιστρώσεις αυτές δεν είναι ακριβής αλλά αντιθέτως πολύ προσεγγιστικές λόγω της έλλειψης στοιχείων.

		Cost efficiency (US\$/tone of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	%of total emissions
Coating 1	Low reduction potential	-115	-105	6.6	0,50%
	High reduction potential	-150	-150	26.1	2,10%
Coating 2	Low reduction potential	-40	-15	13.2	1.10%
	High reduction potential	-140	-130	65.3	5.20%

Πίνακας 6.9 Η απόδοση κόστους και η μέγιστη δυνατότητα μείωσης CO₂ για δύο διαφορετικές επιστρώσεις πλοίου¹⁰³

◊ **Αναβάθμιση των μηχανών.** Η αναβάθμιση των μηχανών πραγματοποιείται συνήθως λόγω της ανάγκης μείωσης των εκπομπών NO_x, αύξησης της ισχύος της μηχανής και μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου. Επομένως συνεπάγεται και την μείωση των εκπομπών CO₂. Μία τυπική αναβάθμιση της μηχανής, με σκοπό τη μείωση των εκπομπών NO_x, περιλαμβάνει καινούριο υπερσυμπιεστή ώστε να αυξάνεται η πίεση εισαγωγής του αέρα στον θάλαμο καύσης, νέα βελτιωμένα έμβολα που να αυξάνουν τον βαθμό συμπίεσης, καινούριοι εγχυτήρες και ακροφύσια ώστε να βελτιστοποιείται η έγχυση του καυσίμου κλπ. Μία αναβαθμισμένη μηχανή έχει μειωμένες εκπομπές NO_x (20-30%), CO και καπνού καθώς και μειωμένη κατανάλωση καυσίμου κατά 0-3%. Η μέγιστη δυνατότητα μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου μέσω του "engine tuning" είναι κατά 3 g/kW ενώ η μέση μείωση της είναι 1 g/kW γεγονός που συνεπάγεται μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 2%.¹⁰⁴

¹⁰³ IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 4 - "Estimation of CO₂ Abatement costs for shipping".

¹⁰⁴ MAN Diesel, "Green Technology for Two Stroke Marine Diesels", 2009

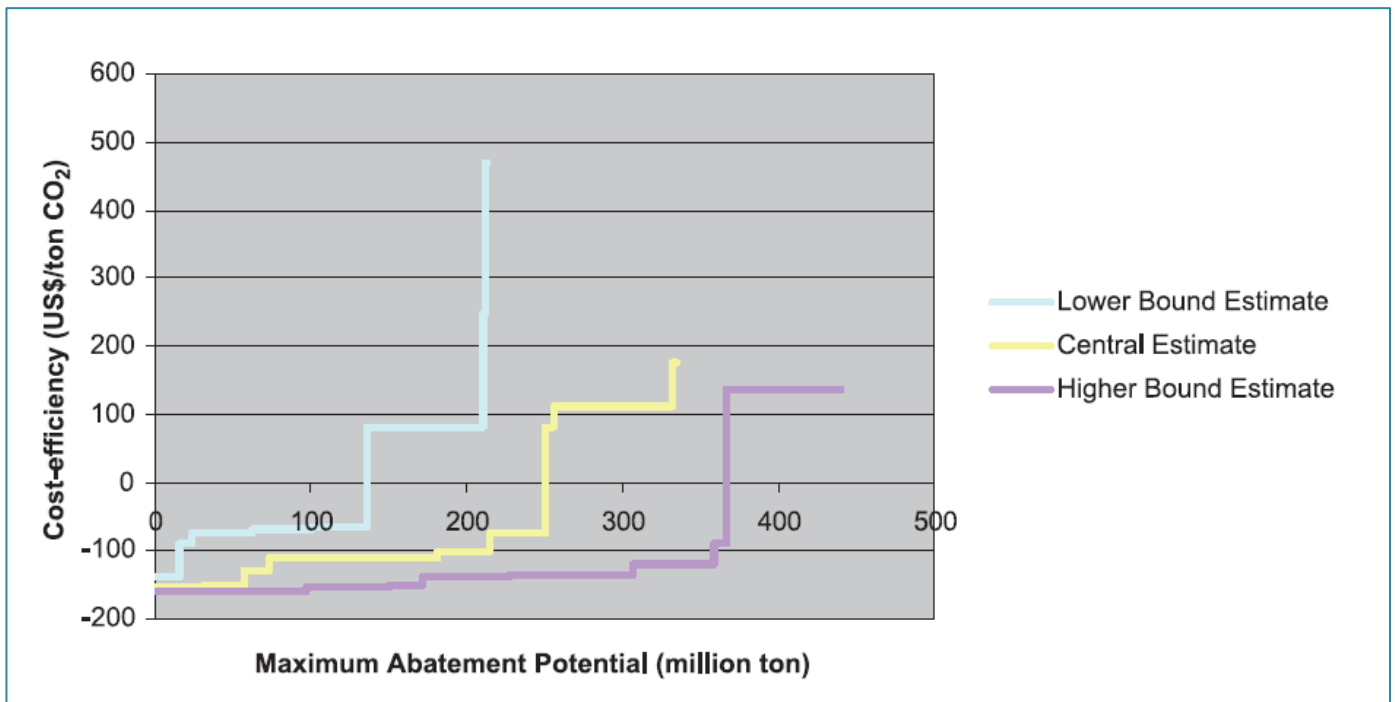
		Cost efficiency (US\$/tone of CO ₂)		Maximum abatement potential	
		Low cost estimate	High cost estimate	in Mt	%of total emissions
Common Rail Upgrade	Low reduction potential	25	45	1,1	0,10%
	High reduction potential	-125	-120	5,3	0,40%
Main engine Tuning	Low reduction potential	405	470	1,0	0,10%
	High reduction potential	-90	-85	7,8	0,60%

Πίνακας 6.10 Κόστος αποδοτικότητας και η μέγιστη δυνατότητα μείωσης CO₂ για εγκατάσταση συστήματος Common rail και πραγματοποίηση βελτιώσεων στην μηχανή.¹⁰⁵

¹⁰⁵ IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 4 - "Estimation of CO₂ Abatement costs for shipping".

6.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση τεχνικών μείωσης των εκπομπών CO₂

Το οριακό κόστος μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα παρουσιάζεται στο σχήμα 6.11 και απεικονίζει την μέγιστη δυνατότητα μείωσης των εκπομπών συναρτήσει του κόστους αποδοτικότητας για όλα τα προαναφερθέντα μέτρα καταπολέμησης των εκπομπών CO₂ για το έτος 2020.



Σχήμα 6.11 Οριακό κόστος μείωσης των εκπομπών CO₂¹⁰⁶

Όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 6.12 το μέτρο μείωσης τις ταχύτητας, οι μετασκευές και η αναβάθμιση των ελίκων έχουν τις μεγαλύτερες δυνατότητες μείωσης των εκπομπών CO₂ ενώ η μετασκευή του σώματος του πλοίου (retrofit hull measures), οι βελτιώσεις στην σχεδίαση των δρομολογίων και η λίπανση παρουσιάζουν τις καλύτερες αποδόσεις κόστους.

¹⁰⁶ IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 4 - "Estimation of CO₂ Abatement costs for shipping".

	Cost Efficiency (US\$/tone of CO ₂)	Maximum abatement potential (Mt)
	Central Estimate	
Retrofit hull measures	-155	30
Voyage and operational options	-150	25
Air lubrication	-130	20
Propeller/propulsion upgrades	-115	50
Other retrofit options	-110	70
Hull coating and maintenance	-105	40
Propeller maintenance	-75	45
Auxiliary systems	80	5
Speed reductions	110	100
Main engine improvements	175	5

Πίνακας 6.12 Απόδοση κόστους και μέγιστη δυνατότητα μείωσης των εκπομπών CO₂ για το έτος 2020¹⁰⁷

¹⁰⁷ IMO, "Prevention of air pollution from ships, Second IMO GHG Study 2009", Appendix 4 - "Estimation of CO₂ Abatement costs for shipping".

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όρια για τον περιορισμό και έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις εμβολοφόρους μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν θεσπιστεί ήδη εδώ και αρκετές δεκαετίες με αποτέλεσμα την δραστική μείωση των συγκεντρώσεων των εκπεμπόμενων ρύπων κυρίως στα μέσα μεταφοράς. Η ανάγκη περιορισμού των αερίων ρύπων από τους ναυτικούς κινητήρες έχει διαφανεί μόλις τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης του θαλάσσιου εμπορίου και των θαλάσσιων μεταφορών. Τα μεγάλα εμπορικά και επιβατηγά πλοία, πλέον θεωρούνται υπεύθυνα για την αύξηση των επιπέδων ρύπανσης στα λιμάνια και τις παράκτιες περιοχές γεγονός που ανάγκασε τις αρμόδιες αρχές να λάβουν μέτρα για τον έλεγχο των ρύπων αυτών.

Σήμερα, όλα τα πλοία, ανεξαρτήτου μεγέθους, υπόκεινται σε περιορισμούς ως προς τις συγκεντρώσεις οξειδίων του αζώτου και οξειδίων του θείου που μπορούν να παράγουν τόσο από τις κύριες όσο και από τις βοηθητικές μηχανές που φέρουν. Αναμένεται δε σύντομα να θεσπιστούν όρια και για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Σύμφωνα με την διεθνή οργάνωση International Maritime Organization (πρωτόκολλο MARPOL Annex VI) αλλά και τους κανονισμούς της αμερικανικής υπηρεσίας Environmental Protection Agency, σήμερα είναι σε ισχύ το όριο εκπομπών Tier II, σύμφωνα με το οποίο οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου από τα πλοία δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 14,4-7,7 g/kWh ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής και το οποίο επιβάλλει περαιτέρω μείωση των εκπομπών ρύπων κατά περίπου 15,3% σε σχέση με το Tier I. Αντίστοιχα, το επιτρεπόμενο ποσοστό θείου στα καύσιμα είναι 3,5% παγκοσμίως και 1% για τις περιοχές αυξημένου ελέγχου (ECA).

Η συμμόρφωση των πλοίων με τα παραπάνω όρια είναι δυνατή μέσω της εφαρμογής μιας ευρείας ποικιλίας τεχνικών, πρωτευουσών και δευτερευουσών. Κάθε τεχνική φέρει ένα αριθμό πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων καθώς και διαφορετικό κόστος και βαθμό αποτελεσματικότητας.

Όσον αφορά στα οξείδια του θείου, οι διαθέσιμοι τρόποι μείωσης των συγκεντρώσεων αυτών στα καυσαέρια είναι δύο. Είτε η χρήση καυσίμων με μικρό ποσοστό θείου και η εναλλαγή τους με κοινά καύσιμα στις περιοχές περιορισμένου ελέγχου, είτε η χρήση της μεθόδου απόπλυσης των καυσαερίων με νερό, θαλασσινό ή γλυκό (Exhaust Gas Scrubber). Η χρήση καυσίμων με χαμηλό ποσοστό θείου προσθέτει επιπλέον λειτουργικό κόστος στο πλοίο καθώς η τιμή των καυσίμων αυτών είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή των κοινών καυσίμων. Επιπρόσθετα, η χρήση καυσίμων χαμηλού θείου επιφέρει λειτουργικά προβλήματα στον κινητήρα, κυρίως στο σύστημα προσαγωγής καυσίμου (λόγω χαμηλού ιξώδους) και στο σύστημα λίπανσης. Η χρήση της μεθόδου EGS περιλαμβάνει το κόστος επένδυσης και εγκατάστασης του όλου συστήματος καθώς και των επιπλέον δεξαμενών για την αποθήκευση του φρέσκου νερού και της καυστικής σόδας που απαιτείται. Για το έτος 2005 η χρήση της μεθόδου EGS ήταν αδιαμφισβήτητα πιο συμφέρουσα ενώ σήμερα, λόγω της υποχώρησης της διαφοράς των τιμών μεταξύ των καυσίμων, φαίνεται ως πιο συμφέρουσα η τεχνική της εναλλαγής καυσίμων. Κατά συνέπεια, δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα ως

προς την πιο συμφέρουσα από αυτές τις τεχνικές και η επιλογή μεταξύ των δύο πρέπει να πραγματοποιείται σύμφωνα με τις εκάστοτε οικονομικές συνθήκες και το πλοίο για το οποίο προορίζονται.

Στην περίπτωση των οξειδίων του αζώτου, οι διαθέσιμες τεχνικές περιστολής είναι περισσότερες και διακρίνονται στις πρωτεύουσες τεχνικές εσωτερικών μέτρων που αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών εντός του θαλάμου καύσης της μηχανής και τις δευτερεύουσες τεχνικές που αποσκοπούν στην μείωση των συγκεντρώσεων των εκπομπών στα καυσαέρια που εξέρχονται στην ατμόσφαιρα. Η πιο σημαντική δευτερεύουσα τεχνική είναι το σύστημα καταλυτικής μείωσης (SCR) ενώ οι πρωτεύουσες τεχνικές είναι οι εξής:

- slide valves
- βραδυπορεία έγχυσης
- κύκλος Miller
- μεταβολή του βαθμού συμπίεσης
- ρυθμός έγχυσης καυσίμου
- χρήση common rail
- ανακυκλοφορία των καυσαερίων (EGR)
- εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης (άμεση έγχυση νερού, χρήση γαλακτώματος νερού-καυσίμου, CASS, HAM)

Όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5, από αυτές, η πλέον αποτελεσματική ως προς τον βαθμό μείωσης των οξειδίων του αζώτου στα καυσαέρια είναι η δευτερεύουσα τεχνική SCR (μείωση των NO_x μεγαλύτερη από 90%) με αμέσως επόμενη την πρωτεύουσα τεχνική HAM (70-80%). Όσον αφορά στο κόστος των τεχνικών, η πλέον δαπανηρή είναι η τεχνική SCR (398-571 €/τόνο NO_x), η οποία ακολουθείται από την τεχνική απευθείας έγχυσης νερού (345 €/τόνο NO_x). Πιο συμφέρουσες τεχνικές αποδεικνύονται αυτές που περιλαμβάνουν χρήση εσωτερικών μέτρων, οι οποίες αν και είναι λιγότερο αποτελεσματικές (επιτυγχάνουν μείωση των NO_x 20-30%), αρκούν στις περισσότερες περιπτώσεις για την συμμόρφωση με τα σημερινά όρια εκπομπών του IMO. Ήδη οι περισσότεροι ναυτικοί κινητήρες είναι εφοδιασμένοι με αυτού του είδους τις τεχνικές και δεν απαιτούν προς το παρόν επιπλέον μέτρα. Μελλοντικά, η χρήση επιπρόσθετων, πιο δαπανηρών τεχνικών, όπως του συστήματος SCR, θα καταστεί αναγκαία για την συμμόρφωση με τα νέα αυστηρότερα μέτρα που θα τεθούν σε εφαρμογή από το 2015 και μετά.

Όσον αφορά στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η κατάσταση είναι ακόμη αόριστη, καθώς δεν υφίστανται έως σήμερα όρια περιορισμού τους. Η μείωση των εκπομπών αυτών, επιχειρείται μέσω τεχνικών περιορισμού της κατανάλωσης καυσίμου. Στις τεχνικές αυτές ανήκουν η μείωση της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου, η αντικατάσταση των ελίκων του με νέες μεγαλύτερης διαμέτρου, η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του και η χρήση κατάλληλων επιστρώσεων στο σώμα του. Παράλληλα εφαρμόζονται και τεχνικές περιορισμού της κατανάλωσης καυσίμου των κινητήρων. Η αποτελεσματικότητα και το κόστος των τεχνικών αυτών δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με ακρίβεια, καθώς διαφέρουν σημαντικά για τους διάφορους τύπους πλοίων αλλά και για κάθε πλοιοκτήτρια εταιρία και επηρεάζονται από τις συνθήκες στην αγορά. Σύμφωνα με την μελέτη που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6 και η οποία εκτιμά το οριακό κόστος των τεχνικών αυτών για το έτος 2020, η τεχνική με τη μεγαλύτερη

αποτελεσματικότητα είναι η μείωση της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου ενώ η πιο οικονομική τεχνική είναι η μετασκευή του σώματος του πλοίου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Alan C. Lloyd , Thomas A. Cackette, Diesel Engines: Environmental Impact and Control, California Air Resources Board, Sacramento, California
2. Anders Andreasen, Stefan Mayer, Use of Seawater Scrubbing for SO₂ Removal from Marine Engine Exhaust Gas, Basic research, Process development, MAN Diesel A/S
3. B.M. Penetrante, R.M. Brusasco, B.T. Merritt, W.J. Pitz, G.E. Voytlin, Plasma Aftertreatment for simultaneous control of NO_x and Particulates, 1999 Diesel Engine Emissions Reduction Workshop, Castine, ME, July 5-8, 1999
4. Behrends Brigitte, Gerd Liebezeit, Atheoretical Environmental Impact Assessment of the Use of a Seawater Scrubber to Reduce SO_x and NO_x Emissions from ships, Research Centre Terramate, Germany
5. Brian Shrader, U.S Regulation of Large Marine Diesel Engines under MARPOL Annex VI, Sea Grant Law and Policy Journal, Vol.1, December 2008
6. Bruce A. Russel, Haifeng Wang, Mazyar Zeinali, Marginal Abatement Costs of CO₂ Emissions Reduction and Market-Based Mechanisms and the Pricing of Credits
7. Buhaug, Ø., Corbett, J.J., Endresen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D.S., Lee, D., Lindstad, H., Markowska, A.Z., Mjelde, A., Nelissen, D., Nilsen, J., Pålsson, C., Winebrake, J.J., Wu, W., Yoshida, K. , *Second IMO GHG Study 2009*, International Maritime Organization (IMO), London, UK, April 2009
8. Cherng-Yuan Lin, Reduction of particulate matter and gaseous emission from marine diesel engines using a catalyzed particulate filter, Ocean Engineering 29 ,2002
9. D. Paro, Technical improvements for ships, Warstila corporation, the Haagen- Smit Symposium, April 2005
10. David Brown, Rudolf Holtbecker, Next steps in exhaust emissions control for Wartsila low-speed engines, Wartsila technical journal, January 2007
11. Derek Johnson, Design and Testing of an independently controlled Urea-SCR System for Marine Diesel Applications, College of Engineering and Mineral resources of West Virginia University,2008
12. Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Alistair Ritchie, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2c- SO₂ Abatement, Entec UK Limited, August 2005
13. Emily de Jonge, Christoph Hugi, David Looper, Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 2b- NO_x Abatement, Entec UK Limited, August 2005
14. Environmental Protection Agency (EPA), Final regulatory Impact Analysis: Control of Emissions from Marine Diesel Engines, November 1999
15. Environmental Protection Agency (EPA), In-use Marine Diesel Fuel, August 1999, United States
16. Ernst Radloff, NO_x Emissions Reduction Through Water injection, Naval engineers journal, No. 3 ,2006
17. Frank, Dames, SO_x and NO_x abatement -Today's Technologies, Wartsila www.warstila.com , March 2008
18. G van der Linde, Efficient exhasut gas scrubbing, AALBORG INDUSTRIES, September 2009
19. Gary L. Borman, Kenneth W. Ragland, Combustion Engineering, Mc Graw - Hill INTERNATIONAL EDITIONS

20. Hamid Hefazi, Hamid R. Rahai, Emission Control technologies for Ocean Going Vessels (OGVs), Final report submitted to State of California Air Resources Board Research Division, 2008
21. Heinrich Schmid, German Weisser, Marine Technologies for Reduced Emissions, Wartsila corporation, www.wartsila.com, April 2005
22. International Maritime Organization (IMO), Guidelines for on-board exhaust Gas-Sox Cleaning Systems, MARPOL Annex VI, Regulation 14(4)(b)
23. International Maritime Organization (IMO), Regulations for the prevention of air pollution from Ships, MARPOL ANNEX VI
24. International Maritime Organization (IMO), Technical Code on control of emission of nitrogen oxides from Marine Diesel Engines, MARPOL Annex VI
25. International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (IPIECA), Maritime air emissions and MARPOL Annex VI, June 2007
26. James E. McCarthy, Air pollution and Greenhouse Gas Emissions from ships, December 2009
27. James J. Corbett, Paul S. Fischbeck, Commercial Marine Emissions and Life-Cycle Analysis of Retrofit Controls in a Changing Science and Policy Environment, Naval Engineers Journal, Winter 2002
28. John B. Heywood, Internal Combustion Engines Fundamentals, Mc Graw- Hill INTERNATIONAL EDITIONS, 1988
29. John P.A. Neeft, Micheil makkee, Jacob A. Moulijn, Diesel particulate emission Control, Fuel Processing Technology 47, 1996
30. K. Kannan, M. Udayakumar, Modeling of Nitric Oxide Formation in Single Cylinder Direct Injection Diesel Engine Using Diesel-Water Emulsion, American Journal of Applied Sciences 6(7): 1313-1320, 2009
31. Kalus M. Heim, Engine and SO_x scrubber technologies to meet IMO fuel quality requirements on sulphur and SO_x, Wartsila CIMAC Circle SMM 2008, September 25, 2008, Hamburg
32. Kjeld Aabo, Large Marine Diesels in Challenging Times, MAN Diesel, CIMAC Circle, Marintec 2009
33. Lars Bryndum, Green Technology for Two Stroke Marine Diesels, MAN B&W, 2010
34. Laurie Goldsworthy, Design of ship engines for reduced emissions of oxide of nitrogen, www.flamemarine.com
35. M. Matti Marica, Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review, Journal of Aerosol Science, 2007
36. MAN B&W, Emission Control MAN B&W Two-stroke Diesel Engines, MAN B&W Diesel A/S www.manbw.com
37. MAN B&W, Emission Control Two-stroke Diesel Engines, Technical Report
38. MAN B&W, Emission Control Two-Stroke Low-Speed Diesel Engines, Technical Report
39. MAN B&W, Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow Application on MAN B&W Two- stroke Marine Diesel Engines, MAN B&W Diesel A/S, www.manbw.com
40. MAN B&W, Improved Efficiency and Reduced CO₂, Technical report MAN Diesel, May 2009, Denmark
41. MAN Diesel & Turbo, Exhaust Gas Recirculation on Alexander Maersk, DIESEL FACTS 3/2010, www.mandieselturbo.com
42. MAN Diesel & Turbo, Tier III Compliance- Low speed engines, www.mandieselturbo.com, 2010

43. MAN Diesel & Turbo, First Humid Air Motor Makes Waves in Fishing Industry, DIESEL FACTS 4/2010, www.mandieselturbo.com/dieselfacts
44. MAN Diesel, Humid Air Motor-Technology for Green profits, www.mandiesl.com
45. MAN B&W, Low Speed Engines in Stationary Diesel Power Plants, Technical Report
46. Maoqi Feng, Reggie Zhan, Possible Solutions for Reducing NO_x and SO_x Emissions from Large Cargo Ships
47. Michael Welsh, Consideration for using low-sulphur fuel, Wartsila Corporation, March 2002
48. Mikael Castanius, Consequences of the IMO's new Marine Fuel Sulphur Regulations, BPO Seminar, Copenhagen, January 19, 2010
49. Ming Zheng, Graham T. Reader, J. Gary Hawley, Diesel engine exhaust gas recirculation- a review on advanced and novel concepts, Energy Conversion and Management 45, 2004
50. Nader Larbi, Jamel Bessrouer, Measurement and simulation of pollutant emissions from marine diesel combustion engine and their reduction by exhaust gas recirculation, Journal of Mechanical Sciences and technology 22, 2008
51. Niklan Nordin, Introduction to Combustion in Diesel Engines, Advanced Combustion, Scania
52. Operation on Low-Sulphur Fuels Two-stroke Engines, MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark
53. Oyvind Endresen, Magnus Eide, Stig Dalsoren, Ivan S. Isaksen, Eirik Sorgard, The Environmental Impacts of Increases international Maritime Shipping, Global Forum on Transport and Environment in a Globalizing World, 10-12 November 2008, Guadalajara, Mexico
54. P. Tremuli, Proposals for exhaust Gas Emissions Abatement, www.wartsila.com, January 2008
55. Per Kageson, Economic Instruments for reducing emissions from sea transport, Air Pollution and climate series T&E 99/7
56. Peter D. Petersen, Operating on Low Sulphur Fuel, MAN B&W Diesel Facts 3/2005
57. Pia Kilpinen, NO_x emission formation in marine diesel engines-towards a quantitative understanding, Wartsila, Marine News, 2-2003
58. Pre and after treatment techniques for diesel engines in inland navigation, technical report in the framework of EU project Creating
59. Sandum Fernando, Chris Hall, Saroj Jha, NO_x Reduction from Biodiesel Fuels, Energy & Fuels 2006, 20, 376-382
60. Sanghoon Kook, Choongsik Bae, Paul C. Miles, Dae Choi, Lyle M. Pickett, The influence of Charge Dilution and Injection Timing on Low-Temperature Diesel Combustion and Emissions, www.sae.org, 2005
61. T. Crupta, A. Batra, Marine Engine Emissions and Their Control: Present and the Future, ID(I) Journal-MB, 2008
62. Tapani Stipa, Jukka-Pekka, Jalkanen, Juhu Kalli, Anders Brink, Emissions of NO_x from Baltic shipping and first estimates of their effects on air quality and eutrophication of the Baltic Sea, ShipNODeff programme, 2007
63. Tateo Nagai, Masayoshi Kawakawi, reduction of NO_x Emission from Medium Speed Diesel Engines, Bulletin of the M.E.S.J. Vol.19, No. 1
64. Tetra Tech, UltraSystems, Final report, Low-sulfur marine fuel availability study, April 14, 2008

65. Timothy Jacobs, Dennis Assanis, Zorar Filipi, The Impact of Exhaust Gas recirculation on Performance and Emissions of a Heavy-Duty Diesel Engine, Society of Automotive engineers, 2003
66. Tireli Enco, Orovic Josip, Exhaust emission reduction technology for marine Diesel engines and gas turbines, ICTS 2003, November 2003
67. Toh Ai Pei Jannell, Diesel Technology & Emissions-Assignment 2: Direct Water injection, Singapore Polytechnic
68. Torbjorn Henriksson, SO_x scrubbing of marine exhaust gases, Wartsila technical Journal, February 2007
69. Torbjorn Henriksson, Sulphur Scrubbers, Wartsila Green Solutions Seminar, September 26, 2007
70. Urs Mathis, Martin Mohr, Ralf Kargi, Andrea Bertola, Konstantinos Boulouchos, Influence of Diesel Engine Combustion Parameters on Primary Soot Particle Diameter, Environmental Science & Technology, Vol. 39, No.6, 2005
71. Walter R. May, Marine Emissions Abatement, SFA International, Inc
72. Wartsila Corporation, Wartsila RT-flex96C and Wartsila RTA96C Technology Review, Wartsila Engines, 2008
73. Wartsila, Benefits by Common Rail Injection, www.wartsila.com
74. Wartsila, Less Emissions Through Waste Heat Recovery, Wartsila corporation www.wartsila.com , April 2004
75. Wartsila, Low sulphur guidelines, January 2006
76. Γλαρος Στέφανος, Εφαρμογή και Αξιολόγηση πολυζωνικού Μοντέλου Καύσης σε Κινητήρα Diesel Ηλεκτροπαραγωγής για την Εκτίμηση της Λειτουργίας και των Εκπομπών NO_x, Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
77. Κυρτάτος Νικόλαος, Ναυτικοί κινητήρες και Τεχνολογίες περιορισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
78. Λαμπρούση Γεωργία-Βιργινία, Αξιολόγηση πολυζωνικού μοντέλου καύσης για την πρόβλεψη της επίδρασης διαφόρων λειτουργικών μεγεθών στην συμπεριφορά και την εκπομπή ρύπων κινητήρα Diesel- εφαρμογή στον κύκλο esc των 12 σημείων της Ε.Ε. , Διπλωματική Εργασία Ε.Μ.Π.
79. Μπεργελές Γεώργιος, Πηγές διασπορά και έλεγχος ατμοσφαιρικής ρύπανσης, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π. , 2006
80. Ρακόπουλος Κωνστ. , Αρχές εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. , Εκδόσεις Φούντας
81. Ρακόπουλος Κωνστ., Δημ. Θ. Χουντάλας, Καύση-Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. , Εκδόσεις Φούντας, 1998
82. Φωτίου Κ. Προκόπιος, Προσομοίωση Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα Diesel Ηλεκτροπαραγωγής και Διερεύνηση Τεχνικών Περιορισμού NO_x με χρήση Πολυζωνικού Μοντέλου Καύσης, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π.
83. International Maritime Organization, Introduction to IMO, <http://www.imo.org/About/Pages/Default.aspx>
84. Rachel Graham, Low-Sulfur Fuel Oil Premium to gain in Europe: Energy Markets, <http://www.businessweek.com/news/2010-06-11/low-sulfur-fuel-oil-premium-to-gain-in-europe-energy-markets.html>
85. <http://www.dieselnet.com/tginfo/abstracts.html>
86. http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_internal_combustion_engine
87. <http://www.bunkerworld.com/prices/>