



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΚΠΟΜΠΗ NO_x ΑΠΟ 2-Χ
ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΝΤΙΖΕΛ. ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΣ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗΝ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ, Καθηγητής ΕΜΠ**

**ΔΕΤΣΗΣ ΜΙΧΑΗΛ, 02102690
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ 2009 – 10**

Πρόλογος

Η Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Σχηματισμός και Εκπομπή NO_x από 2-X Κινητήρες Ντίζελ – Συσχετισμός τους με την Λειτουργική Κατάσταση του Κινητήρα», μου ανατέθηκε από τον Καθηγητή του ΕΜΠ του τμήματος Μηχανολόγων – Μηχανικών κ. Δημήτριο Χουντάλα τον Ιανουάριο του 2008. Κύρια αντικείμενα της εργασίας αυτής είναι να διερευνηθεί ο μηχανισμός σχηματισμού των εκπομπών NO_x από 2-X κινητήρες Ντίζελ, των διαθέσιμων τεχνικών για τον έλεγχο τους και ο συσχετισμός αυτών με την λειτουργική κατάσταση του κινητήρα. Παράλληλα γίνεται αναφορά στα ισχύοντα όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου με ιδιαίτερη έμφαση στην Ναυτιλία.

Στην εργασία είχα την ευκαιρία να διευρύνω τις γνώσεις μου στην διαδικασία καύσης Ντίζελ και τον τρόπο που οι παράμετροι της καύσης επιδρούν στον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου. Μέσω της διερεύνησης για τις διαθέσιμες μεθόδους ελέγχου των εκπομπών οξειδίων του αζώτου, είχα την ευκαιρία να εμβαθύνω σε σχετικές έρευνες και μελέτες. Ακόμη στην διάρκεια προσδιορισμού της λειτουργικής κατάστασης του 2-X κινητήρα με την χρήση του διαγνωστικού λογισμικού που έχει αναπτυχθεί από το ΕΜΠ, είχα την ευκαιρία να εργαστώ στην αξιολόγηση των δεδομένων που προκύπτουν, την εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς και την διατύπωση προτάσεων για την βελτίωση της λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Δημήτριο Χουντάλα, που χωρίς την ανεκτίμητη βοήθεια και επισημάνσεις του δεν θα ήταν δυνατή η περάτωση της παρούσης εργασίας.

Αθήνα, Μάρτιος 2010

Μ. Ν. Δέτσης

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	1
1.1.	Το Πρόβλημα των Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου	1
1.2.	Εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου από Ναυτικούς Κινητήρες Ντίζελ	2
2.	Κανονισμοί για τις εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου από Ναυτικούς Κινητήρες Ντίζελ	5
2.1.	Όρια Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου σύμφωνα με την συνθήκη MARPOL 73/78, Annex VI, του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού	5
2.1.1.	<u>Αναθεώρηση της MARPOL Annex VI</u>	9
2.2.	Όρια Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής	10
2.3.	Όρια Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου στην Ευρωπαϊκή Ένωση	11
2.4.	Σουηδία: Πρόγραμμα Σύνδεσης Εκπομπών NO _x με τα Δικαιώματα Ενλιμενισμού και Διάπλου	12
3.	Περιγραφή του Μηχανισμού Καύσης Ντίζελ – Σχηματισμός Οξειδίων του Αζώτου	14
3.1.	Μηχανισμός των σταδίων καύσεως σε κινητήρες Ντίζελ	14
3.1.1.	<u>Στάδιο Καθυστέρησης Αναφλέξεως</u>	15
3.1.2.	<u>Στάδιο της Ανεξέλεγκτης Καύσεως</u>	18
3.1.3.	<u>Στάδιο Ελεγχόμενης Καύσης</u>	19
3.2.	Σύνθεση Εκπομπών NO _x	19
3.3.	Μηχανισμοί σχηματισμού NO _x	20
3.3.1.	<u>Θερμικός μηχανισμός σχηματισμού NO</u>	20
3.3.2.	<u>Άμεσος μηχανισμός σχηματισμού NO</u>	24
3.3.3.	<u>Ενδιάμεσος μηχανισμός N₂O</u>	25
3.3.4.	<u>NO που παράγεται από το N₂ που περιέχεται στο καύσιμο</u>	25
3.4.	Μηχανισμός σχηματισμού Διοξειδίου του Αζώτου	26
3.5.	Απλουστευτικές Θεωρητικές Προσεγγίσεις για την εξήγηση του Μηχανισμού Σχηματισμού NO	27
3.6.	Παράμετροι που Επιδρούν στον Σχηματισμό Οξειδίου του Αζώτου	28
3.6.1.	<u>Ιστορικό Σχηματισμού του NO</u>	28
3.6.2.	<u>Επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας στην τιμή του NO</u>	29
4.	Μέθοδοι Περιορισμού Εκπομπών NO _x	31
4.1.	Επιβράδυνση του Χρονισμού Έγχυσης Καυσίμου με ταυτόχρονη Αύξηση Πίεσης Έγχυσης Καυσίμου	31
4.2.	Μείωση της θερμοκρασίας εισαγωγής του αέρα	33
4.3.	Χρήση Νερού	35
4.3.1.	<u>Χρήση Γαλακτώματος Νερού - Καυσίμου</u>	36
4.3.2.	<u>Απευθείας έγχυση νερού στον θάλαμο καύσεως</u>	39
4.3.3.	<u>Ύγρανση του Αναροφώμενου Αέρα</u>	45
4.4.	Ανακυκλοφορία καυσαερίων	51
4.4.1.	<u>Η ανακυκλοφορία των καυσαερίων στους κινητήρες Ντίζελ</u>	51

4.5.	Καταλυτική μείωση εκπομπών	53
4.5.1.	<u>Η αντίδραση</u>	53
4.5.2.	<u>Οι καταλύτες</u>	55
4.5.3.	<u>Αναγωγικά μέσα</u>	57
5.	Προσδιορισμός Κατάστασης Κινητήρα Ντίζελ – Συσχετισμός Αποτελεσμάτων με τις Εκπομπές NOx	58
5.1.	Περιγραφή της Διαδικασίας	58
5.2.	Αποτελέσματα διαγνώσεως - Λειτουργική κατάσταση Μονάδας	59
5.2.1.	<u>Διαγράμματα Πίεσεως</u>	59
5.2.2.	<u>Δυναμοδεικτικά Διαγράμματα Πίεσης - Γωνίας Στροφάλου</u>	61
5.2.3.	<u>Μέγιστες Τιμές Πίεσης Καύσεως</u>	63
5.2.4.	<u>Ποιότητα Συμπίεσης των Κυλίνδρων</u>	64
5.2.5.	<u>Παραγόμενη Ισχύς των Μονάδων</u>	64
5.3.	Αποτελέσματα Διαγνώσεως Συστήματος Εγχύσεως	67
5.3.1.	<u>Σημείο Εναύσεως</u>	67
5.3.2.	<u>Δυναμική Προπορεία Εγχύσεως</u>	68
5.3.3.	<u>Έλεγχος κατάστασης Εγχυτήρων</u>	69
5.3.4.	<u>Κατάσταση Αντλιών Καυσίμου</u>	70
5.4.	Αποτελέσματα Διαγνώσεως Σύστημα Εξαγωγής Καυσαερίου	72
5.4.1.	<u>Θερμοκρασία Καυσαερίου στην έξοδο των Κυλίνδρων</u>	72
5.4.2.	<u>Κατάσταση των Ψυγείων Σαρώσεως του κινητήρα</u>	73
5.4.3.	<u>Κατάσταση Συμπιεστών κινητήρα</u>	76
5.4.4.	<u>Κατάσταση Στροβίλων Υπερπληρωτών</u>	77
5.5.	Προτεινόμενες Ρυθμίσεις – Επεμβάσεις στον κινητήρα	78
6.	Αξιολόγηση Εκπομπών NOx του Κινητήρα	81
6.1.	Ιστορικό Εκπομπών NOx του Κινητήρα	80
6.2.	Καταγραφή των Εκπομπών NOx στην διάρκεια των Μετρήσεων για τον Προσδιορισμό της Λειτουργικής Κατάστασης του Κινητήρα	82
6.3.	Αξιολόγηση των εκπομπών NOx	83
6.3.1.	<u>Επίδραση της διαθεσιμότητας O₂</u>	83
6.3.2.	<u>Επίδραση της Θερμοκρασίας Καύσης</u>	84
7.	Συμπεράσματα	85

Σχήματα

1.1.	Διασπορά των προερχόμενων από τα πλοία εκπομπών οξειδίων του	3
2.1.	Όρια εκπομπών NOx της MARPOL Annex VI	8
2.2.	Αναθεωρημένα όρια εκπομπών NOx της MARPOL 73/78 Annex	9
2.3.	Επιβάρυνση κόστους διάπλου ανάλογα με τις εκπομπές Nox	13
3.1.	Στάδια καύσεως σε δυναμοδεικτικό διάγραμμα κινητήρα Ντιζελ.....	14
3.2.	Διάγραμμα ρυθμού εκλύσεως θερμότητας καύσεως	15
3.3.	Μεταβολή του χρόνου καθυστερήσεως αναφλέξεως με την θερμοκρασία του αέρα, για καύση καυσίμου σε όλμο	16
4.1.	Ανάλυση καύσης για τις δύο διαφορετικές προπορείες έγχυσης	32
4.2.	Απελευθέρωση θερμότητας και απώλειες θερμότητας για τις δύο περιπτώσεις θερμοκρασιών αέρα εισαγωγής	34
4.3.	Μέση θερμοκρασία κυλίνδρου στις δύο περιπτώσεις θερμοκρασίας αέρα εισαγωγής	35
4.4.	Επιδόσεις μηχανής που χρησιμοποιεί γαλακτοποιημένο καύσιμο	36
4.5.	Πίεση κυλίνδρου και ανύψωση ακίδας εκχυτήρα μηχανής που κάνει χρήση γαλακτώματος νερού – καυσίμου	37
4.6.	Σύγκριση λειτουργίας μηχανής για διαφορετικές αναλογίες νερού- καυσίμου	38
4.7.	Δίκτυο Πετρελαίου με ομογενοποιητή	39
4.8.	Μεταβολή εκπομπών NOx και ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε διάφορες αναλογίες Νερού / Καυσίμου	42
4.9.	Επίδραση της προπορείας έγχυσης στις εκπομπές NOx και την ειδική κατανάλωση καυσίμου στα φορτία 44% (4.9α.) και 86% (4.9β.) σε αναλογία νερού / καύσιμου 45%	43
4.10.	Σύγκριση σχετικής μείωσης εκπομπών NOx μεταξύ της μεθόδου Απευθείας Έγχυσης Καυσίμου και Ύγρανσης του Αναρροφώμενου Αέρα	45
4.11.	Απόλυτη υγρασία υγρού αέρα σε κορεσμό	47
4.12.	Επίδραση της διαμέτρου σταγονιδίου στον χρόνο εξάτμισης του	48
4.13.	Επίδραση της πίεσης περιβάλλοντος στον χρόνο εξάτμισης σταγονιδίου (σταγονίδιο 50μm στους 50°C)	49
4.14.	Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ύγρανσης του αναρροφώμενου αέρα	50
4.15.	Σχέση μεταξύ μείωσης εκπομπών NOx και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με την χρήση EGR	51
4.16.	Σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων σε κινητήρα MAN B&W	52
4.17.	Σχηματική διάταξη εγκατάστασης καταλυτικής μείωσης εκπομπών	54
4.18.	Θερμοκρασία αντίδρασης ως συνάρτηση της περιεκτικότητας σε S	55
5.1.	Δυναμοδεικτικά διαγράμματα Κινητήρα – Μέτρηση 1	60
5.2.	Δυναμοδεικτικά διαγράμματα Κινητήρα – Μέτρηση 2	60
5.3.	Δυναμοδεικτικά διαγράμματα Κινητήρα – Μέτρηση 3	61
5.4.	Διάγραμμα πίεσης-γωνίας στροφάλου Κινητήρα – Μέτρηση 1	62

5.5.	Διάγραμμα πίεσης-γωνίας στροφάλου Κινητήρα – Μέτρηση 2	63
5.6.	Διάγραμμα πίεσης-γωνίας στροφάλου Κινητήρα – Μέτρηση 3	63
5.7.	Μέγιστες τιμές πίεσης καύσεως Κινητήρα	63
5.8.	Ποιότητα Συμπίεσης Κυλίνδρων Κινητήρα	64
5.9.	Ισχύς Κυλίνδρων του Κινητήρα	65
5.10.	Ποσοστό Παραγόμενης Ισχύος σε σχέση με την Μέση ανά κύλινδρο Παραγόμενη Ισχύ	66
5.11.	Γωνία Έναυσης Κυλίνδρων Κινητήρα	68
5.12.	Δυναμική προπορεία έκχυσης κυλίνδρων κινητήρα	69
5.13.	Κατάσταση εγχυτήρων κινητήρα	70
5.14.	Κατάσταση Αντλιών Καυσίμου Υψηλής Πίεσης του κινητήρα	71
5.15.	Θερμοκρασία Καυσαερίων στην Έξοδο των Κυλίνδρων και σύγκριση τους με τις δοκιμές παραλαβής	73
5.16.	Θερμοκρασία Εξόδου Αέρα από τα Ψυγεία Σαρώσεως Νο1 & Νο2	74
5.17.	Μείωση της θερμοκρασίας του αέρα στα Ψυγεία Σαρώσεως	74
5.18.	Πτώση πίεσης στα ψυγεία σαρώσεως του κινητήρα	75
5.19.	Μεταβολή της πίεσης σαρώσεως σε σχέση με τις στροφές λειτουργίας των υπερπληρωτών	76
5.20.	Μεταβολή της πίεσης σαρώσεως σε σχέση με το φορτίο	77
5.21.	Ανηγμένη θερμοκρασιακή πτώση στους στροβίλους των υπερπληρωτών	78
5.22.	Προτεινόμενη ρύθμιση κατανάλωσης καυσίμου στους κυλίνδρους της Μονάδας Νο1	79
5.23.	Προτεινόμενη Ρύθμιση Προπορείας Εγχύσεως στους κυλίνδρους του κινητήρα	79
6.1.	Εκπομπές NOx από την Μονάδα Νο1 σε διάφορα φορτία	81
6.2.	Ρυθμός καύσης κυλίνδρων στο φορτίο των 9.5 MW	84

Πίνακες

2.1	Παραρτήματα (Annexes) της MARPOL 73/78	6
2.2	Όρια εκπομπών NOx της MARPOL 73/78, Annex V	7
2.2.	Πρότυπα εκπομπών αερίων ρύπων από ναυτικούς κινητήρες κατά το ΕΡΑ Tier 2	11
3.1.	Σταθερές Ταχύτητας αντιδράσεως μηχανισμού σχηματισμού NO	22
4.1.	Αποτελέσματα δοκιμών με διαφορετικούς χρονισμούς έγχυσης	31
4.2.	Κατάσταση και αποτελέσματα δοκιμών με διαφορετικές θερμοκρασίες αέρα εισαγωγής	33
5.1.	Μετρήσεις για τον προσδιορισμό της λειτουργικής συμπεριφοράς	58
6.1.	Μετρήσεις εκπομπών NOx της Μονάδας Νο1	82

1. Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία διερευνάται το θέμα του σχηματισμού οξειδίων του αζώτου από κινητήρες Ντίζελ που χρησιμοποιούνται στη Ναυτιλία και στην Ηλεκτροπαραγωγή. Βασικός σκοπός είναι η διερεύνηση του μηχανισμού σχηματισμού τους, των διαθέσιμων τεχνικών για τον περιορισμό τους και ο συσχετισμός τους με την λειτουργική κατάσταση του κινητήρα. Παράλληλα γίνεται και μία αναφορά στα ισχύοντα όρια εκπομπών ρύπων με ιδιαίτερη έμφαση στην Ναυτιλία.

Επειδή η διερεύνηση σε Ναυτικούς κινητήρες παρουσιάζει δυσκολίες, στην παρούσα εργασία γίνεται αξιοποίηση διαθέσιμων μετρήσεων από 2-Χ κινητήρα Ντίζελ που χρησιμοποιείται στην Ηλεκτροπαραγωγή για να διερευνηθεί η συσχέτιση της λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα με τις εκπομπές ρύπων. Επειδή οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται και στην Ναυτιλία με μεταβλητό αριθμό στροφών, τα όποια συμπεράσματα μπορούν να επεκταθούν και σε αυτή την κατηγορία κινητήρων.

1.1. Το Πρόβλημα των Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου

Το πρόβλημα των εκπομπών οξειδίων του αζώτου άρχισε να γίνεται ιδιαίτερα αισθητό κατά την δεκαετία του 1980. Το θέμα που απασχόλησε ιδιαίτερα την κοινή γνώμη, ήδη από την δεκαετία του 1960, ήταν το φωτοχημικό νέφος της πόλεως του Los Angeles των Η.Π.Α., που οφειλόταν κυρίως στους κινητήρες Otto των αυτοκινήτων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, το οποίο εμφανίστηκε και σε άλλες μεγαλουπόλεις, επιστρατεύτηκαν διάφορες τεχνικές, οι οποίες είτε βασίστηκαν στη βελτίωση του μηχανισμού καύσης, είτε στην χρήση μέσων περιστολής (π.χ. καταλύτες).

Το άζωτο αποτελεί το 78% του όγκου του ατμοσφαιρικού αέρα, ενώ σχηματίζει οξείδια του αζώτου κατά την καύση σε μηχανές εσωτερικής καύσης και σε λέβητες όπου καίγονται ορυκτά καύσιμα. Περισσότερο από το 60% του συνόλου των εκπομπών οξειδίων του αζώτου λαμβάνουν χώρα στις αστικές περιοχές. Η κύρια ένωση του αζώτου η

οποία περιέχεται στα καυσαέρια είναι το μονοξείδιο του αζώτου. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία της καύσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα μονοξειδίου του αζώτου που παράγεται. Μείωση επιβλαβών εκπομπών των πτητικών υδρογονανθράκων και του μονοξειδίου του άνθρακα από τις μηχανές εσωτερικής καύσης, μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας καύσης, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εκπομπής οξειδίων του αζώτου.

Από τις δυνατές χημικές μορφές των οξειδίων του αζώτου, μόνο το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), το οξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), βρίσκονται σε αξιόλογες συγκεντρώσεις στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, ενώ από τις τρεις αυτές ενώσεις μόνο το NO και NO_2 δημιουργούν προβλήματα ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα. Από τα δύο αυτά οξείδια μόνο το διοξείδιο του αζώτου θεωρείται τοξικό στις συνήθεις συγκεντρώσεις. Τα οξείδια του αζώτου έχουν σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό της φωτοχημικής ρύπανσης. Τα οξείδια του αζώτου μαζί με τις ενώσεις του Θείου, ευθύνονται για την όξινη βροχή.

Το διοξείδιο του αζώτου έχει έντονη μυρωδιά και κόκκινο-καφέ χρώμα, που συμβάλει στην όψη 'σκουριάς' που έχει η φωτοχημική αιθαλομίχλη. Το NO_2 ερεθίζει τα μάτια, την μύτη το βρογχικό σύστημα και τους πνεύμονες. Όταν έλθει σε επαφή με υγρασία, είτε στον αέρα είτε στο ανθρώπινο σώμα, τότε σχηματίζεται το εξαιρετικά διαβρωτικό νιτρικό οξύ.

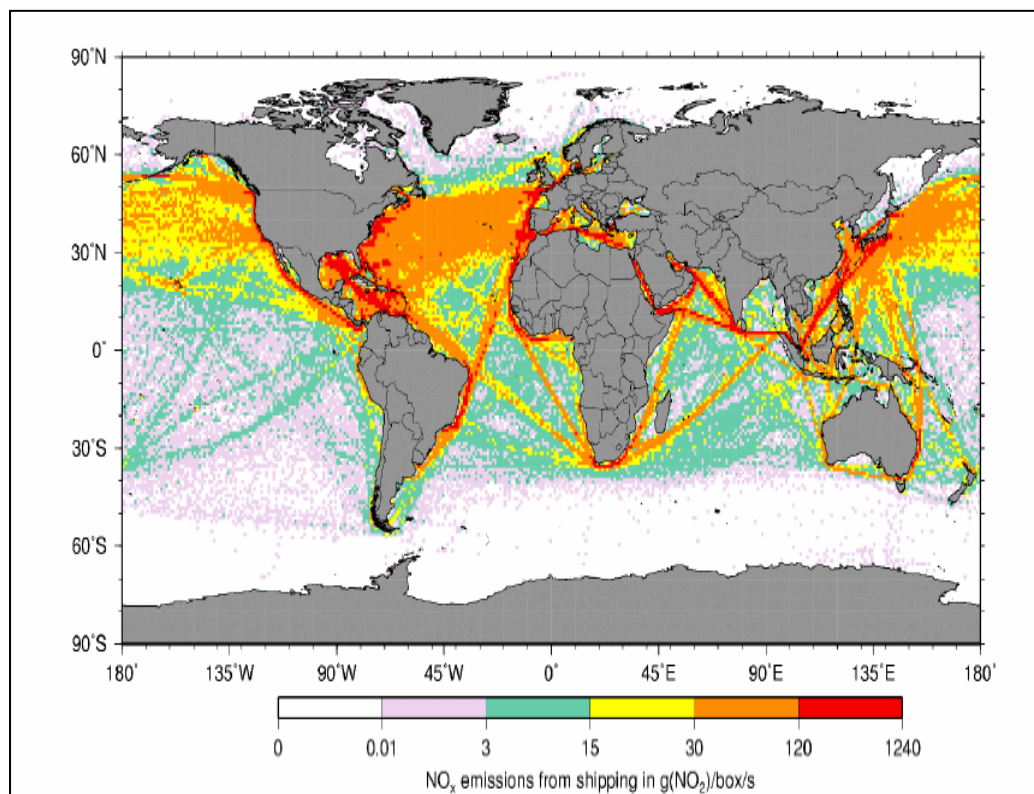
1.2. Εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου από Ναυτικούς Κινητήρες Ντίζελ

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, το ζήτημα των εκπομπών άρχισε να ασκεί αυξανόμενη πίεση και στην βιομηχανία της ναυτιλίας γενικότερα και ειδικότερα στους κατασκευαστές μηχανών εσωτερικής καύσης Ντίζελ που προορίζονται για χρήση σε πλοία.

Σε παγκόσμια κλίμακα, οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου που προέρχονται από τα πλοία, αγγίζουν τα 10 εκατομμύρια τόνους ετησίως,

ποσοστό περίπου ίσο με το 50% των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου που προέρχονται από εγκαταστάσεις στεριάς στις ΗΠΑ ή το 14% των συνολικά παραγόμενων εκπομπών οξειδίων του αζώτου που προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων.

Οι παραγόμενες από τα πλοία εκπομπές οξειδίων του αζώτου, έχουν σημαντική επίπτωση στην ποιότητα του αέρα στην στεριά και κυρίως στις παράκτιες περιοχές όπου αποτελούν πολυσύχναστο πέρασμα για πλοία, αφού έχουν την ικανότητα να μεταφέρονται σε αποστάσεις από 400 έως 1200 χιλιόμετρα. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η διασπορά των εκπομπών οξειδίων του αζώτου που προέρχονται από τα πλοία.



Σχήμα 1.1.: Διασπορά των προερχόμενων από τα πλοία εκπομπών οξειδίων του αζώτου

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) έχει καταλήξει σε μία συνθήκη για τον έλεγχο της προερχόμενης από τα πλοία ατμοσφαιρικής ρύπανσης (MARPOL 73/78, Annex VI). Στον Κανονισμό 13 αυτής, αναφέρονται τα όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου. Τα όρια αυτά

έχουν σχεδιαστεί ώστε να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου κατά 30% σε σχέση με τα επίπεδα εκπομπών του 1992.

Η πρόκληση είναι ο έλεγχος των εκπομπών οξειδίων του αζώτου χωρίς αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου και της αύξησης των σωματιδιακών εκπομπών και αιθάλης. Οι περισσότεροι κατασκευαστές Ναυτικών Κινητήρων επιτυγχάνουν τα όρια που έχουν τεθεί από τον IMO με την ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα (εσωτερικά μέτρα). Μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των εκπομπών NOx μέσω του ελέγχου του μηχανισμού της καύσης είναι, η αύξηση της πίεσης συμπίεσης σε συνδυασμό με την μείωση της προπορείας έγχυσης καυσίμου και την αύξηση της πίεσης έγχυσης του, εξελιγμένες τεχνικές έγχυσης καυσίμου, μείωση της θερμοκρασίας του αέρα πληρώσεως, βελτίωση της γεωμετρίας του θαλάμου καύσης, ηλεκτρονικά ελεγχόμενη έγχυση καυσίμου και μεταβλητός χρονισμός εγχύσεως. Περαιτέρω μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (πέραν των ορίων που έχουν τεθεί από τον IMO), απαιτούν πρόσθετα μέτρα όπως η έγχυση νερού, η ανακυκλοφορία καυσαερίου ή η χρήση συστημάτων επεξεργασίας του καυσαερίου.

2. Κανονισμοί για τις εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου από Ναυτικούς Κινητήρες Ντίζελ

Υπάρχει ένας αριθμός από εθνικούς και διεθνείς νομοθετικούς οργανισμούς που προτείνουν περιορισμούς στις εκπομπές NOx καθώς και στις υπόλοιπες επιβλαβείς εκπομπές. Οι οργανισμοί αυτοί έχουν αναπτύξει μία προσέγγιση για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπου περιλαμβάνονται και τα NOx.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization, IMO), μέσω της Διεθνούς Συνθήκης για την Προστασία της Ρύπανσης από τα Πλοία (MARPOL 73/78, Annex VI), ορίζει τα επιτρεπτά επίπεδα επιβλαβών εκπομπών σε διεθνές επίπεδο. Παρόλα αυτά, ορισμένοι οργανισμοί έχουν θεσπίσει κανονισμούς που είναι πολύ πιο αυστηροί. Η Environmental Protection Agency (EPA) των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής καθώς και η Ευρωπαϊκή Ένωση (EU), αποτελούν δύο παραδείγματα τέτοιων οργανισμών. Οι οργανισμοί αυτοί έχουν χρησιμοποιήσει τα κριτήρια του IMO σαν σημείο εκκίνησης για την μείωση των εκπομπών αερίων, αλλά έχουν αναπτύξει συγκεκριμένες απόψεις πάνω στην πολιτική αυτή, οι οποίες είναι πιο αυστηρές από αυτές του IMO.

2.1. Όρια Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου σύμφωνα με την Συνθήκη MARPOL 73/78, Annex VI, του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization, IMO) είναι ένας εξειδικευμένος οργανισμός του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (United Nations, UN), υπεύθυνος για την λήψη μέτρων για την εξασφάλιση της ασφάλειας στην διεθνή ναυτιλία και την προστασία της θαλάσσιας ρύπανσης από τα πλοία. Μία από τις κύριες συνθήκες του IMO, είναι η Διεθνής Συνθήκη για την Προστασία της Ρύπανσης από τα Πλοία (MARPOL) που ψηφίστηκε στις 2 Νοεμβρίου 1973. Το πρωτόκολλο του 1978, που σχετίζεται με την MARPOL 1973, ψηφίστηκε σε μία συνδιάσκεψη για την ασφάλεια

των δεξαμενόπλοιων και της προστασίας από την μόλυνση, τον Φεβρουάριο του 1978. Καθώς η MARPOL 1973 δεν είχε τεθεί σε ισχύ, το πρωτόκολλο της MARPOL του 1978 ήρθε να συμπληρώσει την προηγούμενη συνθήκη. Η σύνθεση των δύο αυτών συνθηκών αναφέρεται ως Διεθνής Συνθήκη για την Προστασία από την Ρύπανση της Θάλασσας από τα πλοία του 1973, όπως αυτή τροποποιήθηκε από το πρωτόκολλο του 1978 (MARPOL 73/78) και τέθηκε σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου 1983 (Annexes I & II). Από την στιγμή που τέθηκε σε ισχύ έχει υποστεί αρκετές τροποποιήσεις. Πλέον η συνθήκη MARPOL περιλαμβάνει 6 παραρτήματα (Annexes).

Πίνακας 2.1. : Παραρτήματα (Annexes) της MARPOL 73/78

Annex I	Κανονισμοί για την αποφυγή της ρύπανσης της θάλασσας από το πετρέλαιο
Annex II	Κανονισμοί για τον έλεγχο της ρύπανσης από επιβλαβή χύδην υγρά
Annex III	Αποφυγή της ρύπανσης από επιβλαβή υλικά που διακινούνται μέσω θαλάσσης σε δέματα
Annex IV	Αποφυγή της ρύπανσης από τα αποχετευτικά ύδατα των πλοίων
Annex V	Αποφυγή της ρύπανσης από τα απορρίμματα των πλοίων
Annex VI	Αποφυγή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία

Η MARPOL Annex VI, για την αποφυγή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία υιοθετήθηκε τον Σεπτέμβριο του 1997 και τέθηκε σε εφαρμογή στις 19 Μαΐου του 2005. Η συνθήκη αυτή είχε άμεση εφαρμογή στα πλοία που κατασκευάστηκαν μετά την ημερομηνία επικύρωσης. Για τα πλοία που κατασκευάστηκαν πριν την ημερομηνία εφαρμογής της συνθήκης και μέχρι την 1^η Ιανουαρίου του 2000, υπήρχε η απαίτηση να συμμορφωθούν με την παραπάνω συνθήκη, κατά τον πρώτο προγραμματισμένο δεξαμενισμό μετά την ημερομηνία αυτή, αλλά όχι αργότερα από τις 19 Μαΐου του 2008.

Στην συνθήκη MARPOL 73/78 Annex VI, περιέχονται κανονισμοί για τον έλεγχο επιβλαβών εκπομπών αερίων από τα πλοία και έχει εφαρμογή σε όλα τα πλοία καθώς και τις πλατφόρμες άντλησης

πετρελαίου που εμπλέκονται σε ταξίδια, άνω των 400 μικτών τόνων (gross tonnage). Οι κανονισμοί αυτοί θέτουν όρια στην περιεκτικότητα του καυσίμου σε Θείο (Κανονισμός 14), εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου (Κανονισμός 13) από κινητήρες Ντίζελ, εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων (Κανονισμός 15) και υλικών που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος στην ατμόσφαιρα (Κανονισμός 12).

Ο Κανονισμός 13 της MARPOL Annex VI, καθορίζει τα όρια εκπομπών NO_x από κινητήρες Ντίζελ. Τα όρια αυτά (όρια Tier I) ορίζονται από μία καμπύλη που μας δίνει τις εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (σε στροφές ανά λεπτό, rpm), όπως αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1 και το σχήμα 2.1.

Πίνακας 2.2.: Όρια εκπομπών NO_x της MARPOL 73/78, Annex VI

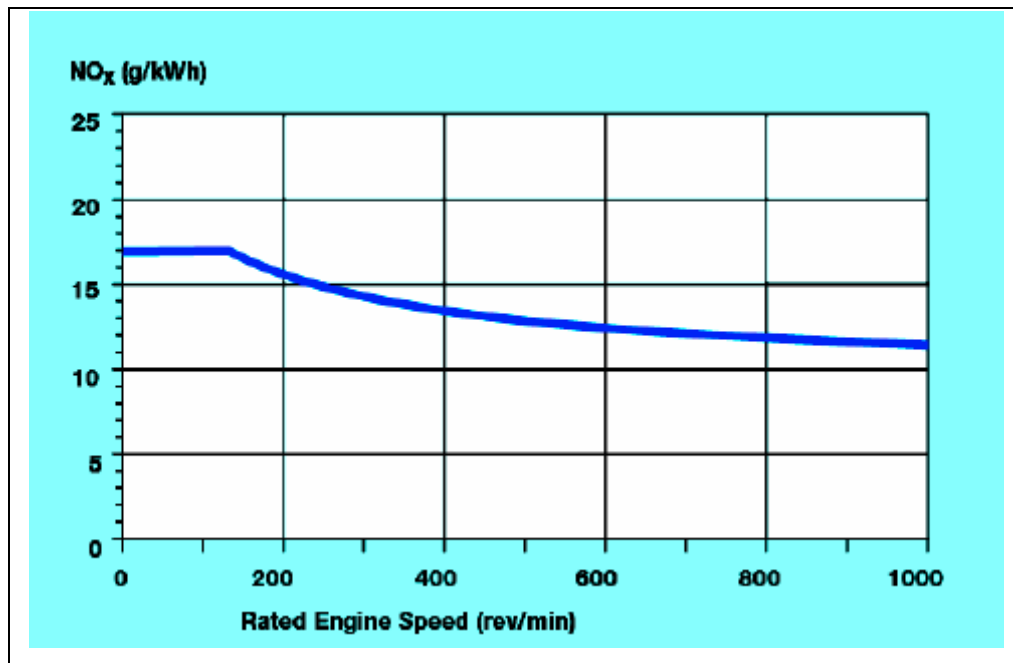
Ταχύτητα Περιστροφής Κινητήρα (n)	NO _x (gr/kWh)
n < 130 rpm	17.0
130 rpm ≤ n < 2000 rpm	$\frac{45}{n^{0.2}}$
n ≥ 2000 rpm	9.8

Οι απαιτήσεις για έλεγχο, επιθεώρηση και πιστοποίηση της συμμόρφωσης με τον Κανονισμό 13 της MARPOL 73/78 Annex VI, έχουν τεθεί μέσα στον NO_x Technical Code. Ο NO_x Technical Code εφαρμόζεται σε όλους κινητήρες Ντίζελ με ισχύ μεγαλύτερη των 130 kW, εξαιρουμένων των κινητήρων αυτών που είναι εγκατεστημένοι σε σωστικές λέμβους και οποιοδήποτε εξοπλισμό που έχει εγκατασταθεί για χρήση σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

Σύμφωνα με τον NO_x Technical Code, για ένα κινητήρα που υπόκειται στις διατάξεις της συνθήκης αυτής, προβλέπονται οι ακόλουθες επιθεωρήσεις:

- Μία επιθεώρηση που διεξάγεται στην κλίνη δοκιμών, για να αποδειχθεί ότι συμφωνεί με τα απαιτούμενα όρια εκπομπών NO_x. Εφόσον ο κινητήρας βρεθεί σύμφωνος με τα παραπάνω όρια, εκδίδεται

το Engine International Air Pollution Prevention Certificate. Σε περίπτωση εγκατάστασης νέου κινητήρα σε πλοίο που έχει κατασκευαστεί πριν το 2000, απαιτείται ο ίδιος έλεγχος.



Σχήμα 2.1.: Όρια εκπομπών NO_x της MARPOL Annex VI

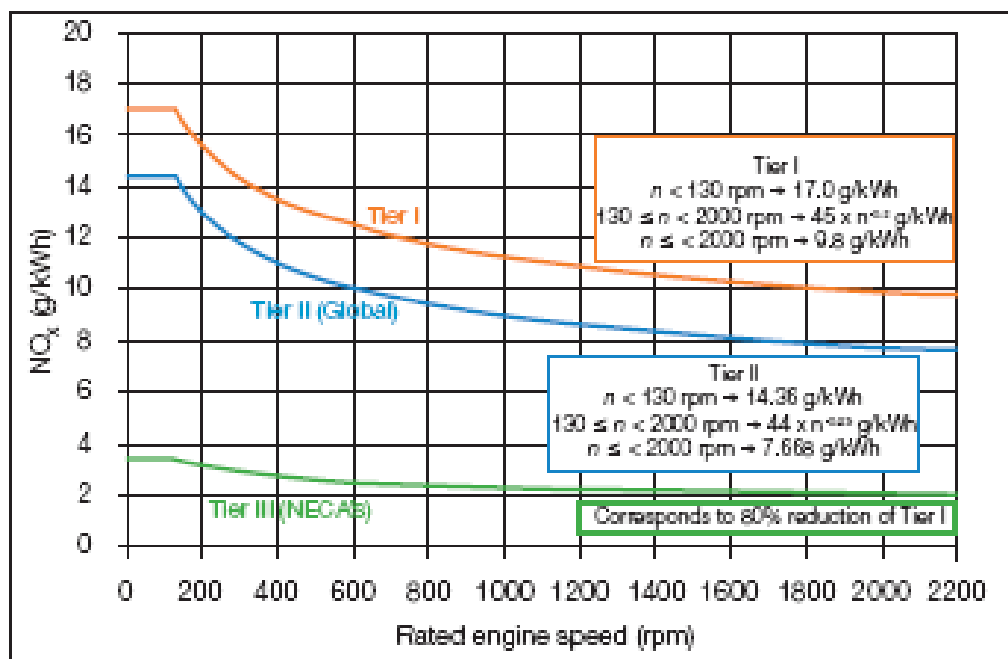
- Μία επιθεώρηση επί του πλοίου αφού εγκατασταθεί ο κινητήρας, αλλά πριν το πλοίο τεθεί σε υπηρεσία. Αυτό γίνεται για να επιβεβαιωθεί ότι ο κινητήρας είναι ακόμη σύμφωνος με τις απαιτούμενες από τον κανονισμό εκπομπές NO_x.
- Περιοδικές και ενδιάμεσες επιθεωρήσεις (Annual & Intermediate Surveys): Μία ή περισσότερες επιθεωρήσεις θα απαιτηθούν κατά την διάρκεια της ζωής του κινητήρα, για να επαληθευτεί ότι παραμένει σύμφωνος με τις απαιτήσεις της του κανονισμού όσον αφορά τις εκπομπές NO_x. Αυτό είναι εφικτό με τον έλεγχο της τήρησης του ενός αρχείου (NO_x Technical File), όπου αναφέρονται όλες οι επιθεωρήσεις-επισκευές που έχει υποστεί ο υπό έλεγχο κινητήρας, αναφέρονται όλα τα ανταλλακτικά μέρη που χρησιμοποιήθηκαν και ότι αυτά είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Στο αρχείο αυτό καταγράφονται ανταλλακτικά που έχουν σχέση με το γενικότερο σύστημα καύσης της μηχανής (κεφαλές εμβόλων, χιτώνια, ακροφύσια

εκχυτήρων πετρελαίου, αντλίες υψηλής πίεσης πετρελαίου, ακροφύσια στροβιλοφυσητήρων και οι ρότορες αυτών κ.α.).

2.1.1. Αναθεώρηση της MARPOL Annex VI

Κατά την τελευταία αναθεώρηση της συνθήκης MARPOL 73/78 τέθηκαν ακόμη πιο αυστηρά όρια όσον αφορά της εκπομπές των NOx από ναυτικούς κινητήρες Ντίζελ:

- Το όριο Tier II που θα έχει εφαρμογή σε όλες τις μηχανές που θα εγκατασταθούν στα πλοία μετά τη 01/01/2011
- Το όριο Tier III που θα έχει εφαρμογή σε όλες τις μηχανές που θα εγκατασταθούν στα πλοία μετά τη 01/01/2016



Σχήμα 2.2.: Αναθεωρημένα όρια εκπομπών NOx της MARPOL 73/78 Annex VI

Κατά την αναθεώρηση της συνθήκης MARPOL Annex VI, στον τροποποιημένο κανονισμό Technical Code 2008 περιλαμβάνονται πλέον και οι κινητήρες που έχουν εγκατασταθεί στα πλοία από την 1^η Ιανουαρίου 1990 έως την 31^η Δεκεμβρίου 1999. Ο κανονισμός έχει εφαρμογή στους κινητήρες με όγκο εμβολισμού ίσο ή μεγαλύτερο από 90 lt και MCR πάνω από 5000 kW και μόνο στην περίπτωση που

υπάρχει διαθέσιμη για εφαρμογή μία Πιστοποιημένη Μέθοδος (Approved Method).

Πιστοποιημένη Μέθοδος είναι η μέθοδος η οποία εφαρμόστηκε στον κινητήρα έτσι ώστε αυτός να συμμορφωθεί με τα όρια των εκπομπών NO_x, όπως αυτά ορίζονται στο Tier I. Η μέθοδος αυτή θα πρέπει να μην μειώνει την αποδιδόμενη ισχύ του κινητήρα περισσότερο από 1%, να μην αυξάνει την ειδική κατανάλωση καυσίμου περισσότερο από 2% και κατά την εφαρμογή της να μην επηρεάζεται η ασφαλής λειτουργία και διαθεσιμότητα του κινητήρα. Επίσης θα πρέπει το κόστος της Πιστοποιημένης Μεθόδου να μην ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο όριο¹. Εφόσον μια Πιστοποιημένη Μέθοδος είναι διαθέσιμη, θα πρέπει να εφαρμοστεί κατά την πρώτη επιθεώρηση ανανέωσης των πιστοποιητικών του πλοίου (πενταετής Επιθεώρηση) που θα πραγματοποιηθεί και αφού η Πιστοποιημένη Μέθοδος είναι διαθέσιμη για τουλάχιστον 12 μήνες.

2.2. Όρια Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής

Η Οργάνωση Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, έχει υιοθετήσει τους κανονισμούς που έχουν προταθεί από τον IMO, και τους έχει χρησιμοποιήσει ως βάση για μία πιο αυστηρή πολιτική για τις εκπομπές που προέρχονται από τους ναυτικούς κινητήρες.

Το σύστημα κανονισμών της EPA χωρίζεται σε τρία επίπεδα. Τα πρότυπα του πρώτου επιπέδου (Tier 1) είναι σε εναρμόνιση με τα όρια της MARPOL Annex VI και ήταν εθελοντικά μέχρι το 2004, αλλά υποχρεωτικά από το 2004. Τα πρότυπα του Tier 2 είναι πιο απαιτητικά

¹ Το κόστος της Πιστοποιημένης Μεθόδου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τις 375 Ειδικές Μονάδες Σχεδίασης ανά μετρικό τόνο παραγόμενων οξειδίων του αζώτου, όπως υπολογίζονται από την σχέση:

$$C_e = \frac{\text{Cost of Approved Method} \cdot 10^6}{P(kW) \cdot 0.768 \cdot 6000(\text{hours/year}) \cdot 5(\text{years}) \cdot \Delta NO_x (g/kWh)}$$

από το Tier 1 και τέθηκαν σε ισχύ από το 2007. Τα πρότυπα του Tier 3, αφορούν τους κινητήρες Ντίζελ με απόδοση άνω των 37 kW (50 hp) και τέθηκαν σε εφαρμογή από το 2008. Τα πρότυπα του Tier 4, δεν έχουν τεθεί σε ισχύ σε ναυτικούς κινητήρες Ντίζελ αλλά εκδόθηκαν μαζί με την Advanced Notice of Proposed Rulemaking, που αναφέρει τα μελλοντικά πρότυπα εκπομπών για τους ναυτικούς κινητήρες Ντίζελ, οπότε αναμένεται η ημερομηνία που και αυτά θα τεθούν σε ισχύ.

Οι κανονισμοί της EPA είναι πιο περιοριστικοί από τους κανονισμούς της MARPOL Annex VI. Ακόμη το σύστημα της EPA, έχουν ειδικούς περιορισμούς για έναν αριθμό από ρυπαντές, που δεν υπάρχουν στην MARPOL Annex VI.

Πίνακας 2.3.: Πρότυπα εκπομπών αερίων ρύπων από ναυτικούς κινητήρες κατά το EPA Tier 2.

Category	Displacement [D] (dm ³ per cylinder)	CO (g/kWh)	NO _x + THC (g/kWh)	PM (g/kWh)	Date
1	Power ≥ 37 kW	5	7.5	0.4	2005
	D < 0.9				
	0.9 ≤ D < 1.2	5	7.2	0.3	2004
	1.2 ≤ D < 2.5	5	7.2	0.2	2004
	2.5 ≤ D < 5.0	5	7.2	0.2	2007 ^a
2	5.0 ≤ D < 15	5	7.8	0.27	2007 ^a
	15 ≤ D < 20	5	8.7	0.5	2007 ^a
	Power ≤ 3300 kW				
	15 ≤ D < 20	5	9.8	0.5	2007 ^a
	Power ≥ 3300 kW				
	20 ≤ D < 25	5	9.8	0.5	2007 ^a
25 ≤ D < 30	5	11	0.5	2007 ^a	

^a Η πιστοποίηση όσον αφορά τα όρια Tier 1, τέθηκε σε εφαρμογή το 2004. Τα πρότυπα του Tier 1 είναι ισοδύναμα με τα όρια του Tier I της MARPOL Annex VI όσον αφορά τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου

2.3. Όρια Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ακολουθεί μία πολιτική για το περιβάλλον που στηρίζεται στην άποψη ότι τα υψηλά περιβαλλοντικά πρότυπα εγείρουν καινοτομίες και θέσεις εργασίας. Με βάση αυτή την πολιτική, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναπτύξει μία στρατηγική για την μείωση των

επιβλαβών αερίων εκπομπών από τα πλοία. Ο αντικειμενικός σκοπός αυτής της στρατηγικής, είναι ο περιορισμός εκπομπών NO_x που προέρχονται από τα πλοία, σε περιπτώσεις όπου αυτές υπερβαίνουν τα αποδεκτά επίπεδα και είναι βλαβερά για την υγεία και το περιβάλλον. Επιπλέον της επικύρωσης της συνθήκης MARPOL 73/78, το ευρωπαϊκό κοινοβούλιο έχει υιοθετήσει πιο αυστηρά πρότυπα για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Τα πρότυπα αυτά είναι γνωστά ως Stage III/IV, και υιοθετήθηκαν τον Απρίλιο του 2004.

Τα όρια των Stage III/IV, ταυτίζονται με τα πρότυπα της Οργάνωσης Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) των Ηνωμένων Πολιτειών Tier 3/4 όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναπτύσσει και ένα σύστημα που θα επιβραβεύει τα πλοία που ήδη έχουν δραστηριοποιηθεί όσον αφορά τον περιορισμό των εκπομπών NO_x, με μειωμένες εισφορές ενλιμενισμού και θα παρέχει κίνητρα για την μείωση των εκπομπών NO_x πέρα από τις απαιτήσεις των κανονισμών.

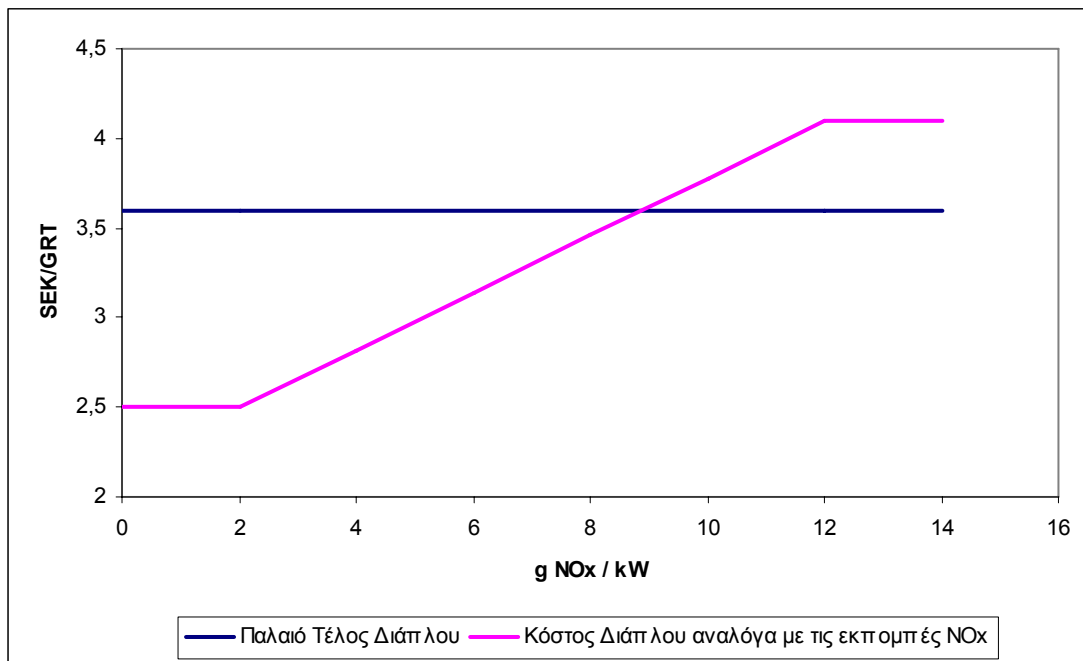
2.4. Σουηδία: Πρόγραμμα Σύνδεσης Εκπομπών NO_x με τα Δικαιώματα Ενλιμενισμού και Διάπλου

Η Σουηδία θεωρείται από τους πρωτοπόρους στην θέσπιση προτύπων που αφορούν την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και ως προέκταση και τον έλεγχο των εκπομπών αερίων ρύπων από ναυτικούς κινητήρες, όπως SO_x και NO_x. Επίσης ήταν μία από τις πρώτες χώρες που επικύρωσαν την συνθήκη MARPOL 73/78.

Από την 1^η Ιανουαρίου 1998 η Σουηδία έχει θεσπίσει ένα πρόγραμμα, που αφορά στα δικαιώματα ενλιμενισμού και διάπλου, βασισμένο στις εκπομπές NO_x και την περιεκτικότητα το καυσίμου σε S. Πριν την κλιμακωτή δομή τελών, υπήρχε ένα καθορισμένο τέλος διάπλου και ενλιμενισμού για όλα τα πλοία, που ήταν 3,6 SEK/GTR (Swedish Kroner per gross rated tonnage). Στο ισχύον σύστημα, τα δικαιώματα για μη ελεγχόμενες εκπομπές NO_x είναι υψηλότερα από τα

προηγούμενα τέλη, αλλά τα τέλη αυτά μειώνονται από το μέγιστο, όσο πιο χαμηλές είναι οι εκπομπές των δύο προαναφερθέντων ρυπαντών.

Τα τέλη διάπλου ξεκινούν από τις 4,1 SEK/GRT για κάθε πλοίο που εκπέμπει NO_x πάνω από 12,0 gr/kWh και μειώνεται γραμμικά σε ένα ελάχιστο 2,5 SEK/GRT για εκπομπές NO_x κάτω από τα 2,0 gr/kWh.



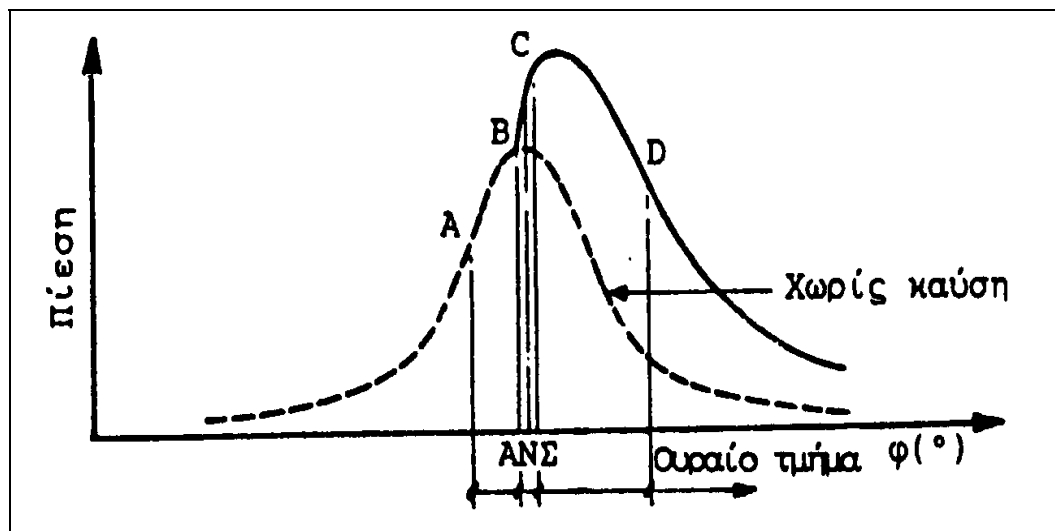
Σχήμα 2.3.: Επιβάρυνση κόστους διάπλου ανάλογα με τις εκπομπές NO_x

3. Περιγραφή του Μηχανισμού Καύσης Ντίζελ – Σχηματισμός Οξειδίων του Αζώτου

3.1. Μηχανισμός των Σταδίων Καύσεως σε Κινητήρες Ντίζελ

Στον θάλαμο καύσεως ενός κινητήρα Ντίζελ μπορούμε να διακρίνουμε (σύμφωνα με τον θεμελιωτή της έρευνας Sir Harry Ricardo), τα ακόλουθα τρία διαδοχικά στάδια καύσεως:

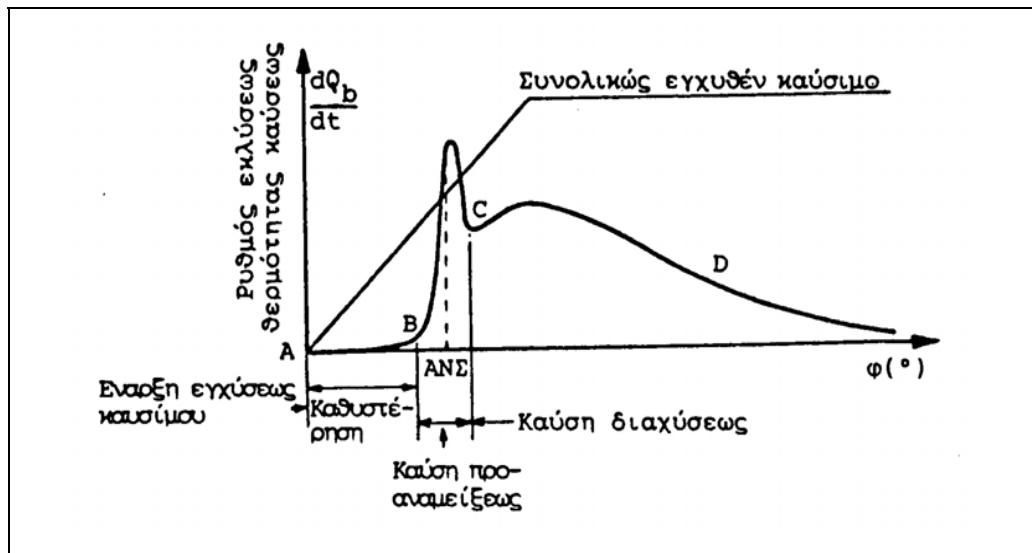
- Το πρώτο στάδιο (AB) αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα για της Καθυστέρησης Αναφλέξεως (Delay Period, Ignition Lag), κατά την οποία εγχύεται καύσιμο, αποτελώντας ένα μέρος της συνολικά εγχυόμενης ποσότητας, χωρίς να λαμβάνει χώρα (τουλάχιστον εξωτερικώς εμφανής) ανάφλεξη.
- Το δεύτερο στάδιο (BC) αντιστοιχεί στην Ανεξέλεγκτη Καύση, δηλαδή την αιφνίδια ανάφλεξη και ταχύτατη καύση μεγάλου μέρους του μέχρι της στιγμής εκείνης εγχυθέντος καυσίμου.
- Το τρίτο στάδιο (CD) που αντιστοιχεί στην Κανονική Καύση ή Ελεγχόμενη Καύση.



Σχήμα 3.1.: Στάδια καύσεως σε δυναμοδεικτικό διάγραμμα κινητήρα Ντίζελ

Τα τρία αυτά στάδια διακρίνονται και στο δυναμοδεικτικό διάγραμμα του κυλίνδρου το οποίο έχει την τυπική μορφή του σχήματος 3.1, ενώ στο σχήμα 3.2 φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα του Ρυθμού Εκλύσεως

Θερμότητας. Ενώ κατά κανόνα υπάρχει ευχερής διάκριση μεταξύ των δύο πρώτων σταδίων (AB) και (BC), δεν υφίσταται σαφής διαχωρισμός μεταξύ των δύο τελευταίων σταδίων (BC) και (CD).



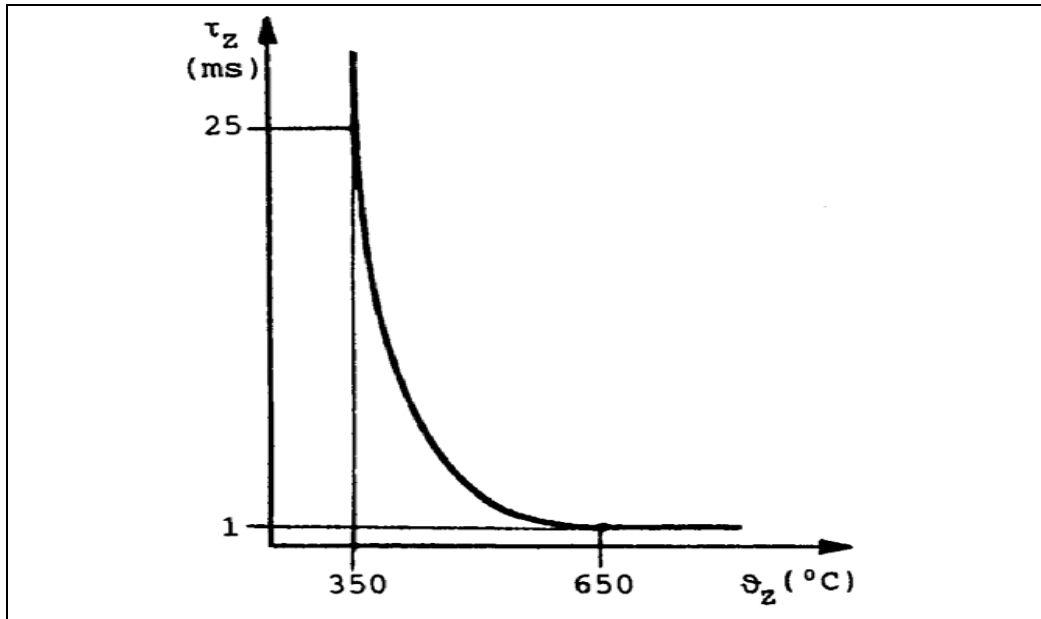
Σχήμα 3.2.: Διάγραμμα ρυθμού εκλύσεως θερμότητας καύσεως

3.1.1. Στάδιο Καθυστέρησης Αναφλέξεως

Το πρώτο στάδιο (AB), έχοντας αποφασιστική σημασία για ολόκληρη την καύση στον κινητήρα, οφείλεται στο γεγονός ότι γενικώς κάθε καύσιμο για να αναφλεγεί έχει την ανάγκη Φυσικής και Χημικής Προετοιμασίας, η οποία απαιτεί ένα μικρό αλλά πάντως πεπερασμένο Χρόνο Καθυστερήσεως τ_c , ο οποίος πρέπει απαραίτητως να παρέλθει από της εγχύσεως του καυσίμου σε αέρα θερμοκρασίας $>\theta_c$ μέχρι της αυτανάφλεξεως του. Η θ_c είναι ετερόσημη συνάρτηση του τ_c , με τυπική μορφή για καύσιμο Ντίζελ όπως αυτή που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.3.

Ειδικότερα ως Χρόνο Καθυστέρησης Αναφλέξεως τ_c εννοούμε την διάρκεια του σταδίου (AB), την οποία ορίζουμε ως το χρονικό διάστημα μεταξύ της εισόδου στον κύλινδρο των πρώτων σταγόνων του καυσίμου και της πρώτης εμφανίσεως χαρακτηριστικών φαινομένων καύσεως, τα οποία συνήθως διαπιστώνονται μέσω της αυξήσεως του ρυθμού μεταβολής της πίεσεως υπεράνω της κανονικής γραμμής συμπίεσεως.

Συνήθως η τιμή του τ_z κυμαίνεται μεταξύ 0.3 και 2 ms, κατά την διάρκεια αυτού λαμβάνει χώρα στον θάλαμο καύσης αφενός μεν ο σχηματισμός του μείγματος δια της λεπτής διασκορπίσεως του καυσίμου εντός της μάζας του αέρα τον κύλινδρο, αφετέρου δε μία προεργασία για την ανάφλεξη δηλαδή η Φυσική και η Χημική Προετοιμασία του καυσίμου.



Σχήμα 3.3.: Μεταβολή του χρόνου καθυστέρησης αναφλέξεως με την θερμοκρασία του αέρα, για καύση καυσίμου σε όλμο

Εκ τούτων η Φυσική Προετοιμασία συνιστάται στην, μερική τουλάχιστον, εξάτμιση των σταγονιδίων του καυσίμου λόγω της μεταδόσεως θερμότητας σε αυτά από τον περιβάλλοντα θερμό αέρα. Η εξάτμιση αυτή είναι τόσο εντονότερη όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των σταγονιδίων, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του αέρα και όσο η μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα της δέσμης. Ο διασκορπισμός του καυσίμου, δηλαδή η δημιουργία πολύ μικρών σταγονιδίων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την καλή προετοιμασία της αναφλέξεως.

Ταυτόχρονα λαμβάνει χώρα και η Χημική Προετοιμασία, η οποία συγκεντρώνεται στο εξατμισθέν τμήμα των σταγονιδίων και η οποία συνιστάται σε διάσπαση των βαρύτερων και κατά κανόνα αδρανέστερων υδρογονανθράκων προς ελαφρύτερους και

δραστικότερους, στους οποίους και εντοπίζονται οι πρώτες εστίες αναφλέξεως, δεδομένου μάλιστα ότι εκεί ακριβώς το καύσιμο έχει την υψηλότερη δυνατή θερμοκρασία και βρίσκει τοπικά αυξημένη περίσσεια αέρα. Κατά κανόνα εμφανίζονται περισσότερες τέτοιες εστίες αναφλέξεως εντός της χαλαρωμένης πλέον δέσμης καυσίμου.

Προφανώς δεν αναφλέγεται το καύσιμο στην υγρή μορφή του, αλλά καταρχήν τα δραστικότερα προϊόντα εξατμίσεως και στην συνέχεια τα προϊόντα της χημικής διασπάσεως αυτού. Έτσι λοιπόν μπορούμε να φανταστούμε ότι, κατά την καύση του, κάθε σταγονίδιο καυσίμου παρουσιάζει κατά κανόνα τρεις ζώνες, δηλαδή μια εξώτατη σε μορφή φλόγας, μία ενδιάμεση ατμώδη και μία εσωτερική υγρή.

Ο χρόνος καθυστέρησης της αναφλέξεως τ_z , ο οποίος πρέπει πάντοτε (όπως είναι ευνόητο) να είναι κατά τον δυνατόν βραχύς, επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες σύμφωνα με τους παρακάτω αναφερόμενους, εμπειρικά διαπιστωμένους, κανόνες:

- Κάθε αίτιο αύξησης της πίεσεως ή/και της θερμοκρασίας της γομώσεως του κυλίνδρου δρα ευνοϊκά, μειώνοντας το τ_z . Τέτοια αίτια αποτελούν η αύξηση του βαθμού συμπίεσεως, η υπερπλήρωση, η αύξηση της πίεσεως του περιβάλλοντος ή/και της θερμοκρασίας αυτού.
- Όμοια επίδραση έχει η αύξηση της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων, η οποία μπορεί να οφείλεται είτε σε αύξηση του φορτίου, είτε σε ηπιότερη ψύξη, είτε τέλος σε αύξηση του μεγέθους του κυλίνδρου. Για το σκοπό αυτό, μερικές φορές, σε ορισμένες ιδιαίζουσες θέσεις των τοιχωμάτων του θαλάμου καύσεως τηρούνται επίτηδες σε υψηλή θερμοκρασία (δηλαδή αφήνονται χωρίς ψύξη).
- Ο πληρέστερος και λεπτότερος διασκορπισμός, καθόσον δίνει καλύτερη διανομή του καυσίμου εντός της μάζας του αέρα και μικρότερη διάμετρο των σταγονιδίων του καυσίμου, επιφέρει κάποια μικρή μείωση του τ_z .
- Δεν επιδρά ιδιαίτερα ο λόγος αέρα λ_a .

- Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής προκαλεί μείωση του τ_c , εξασφαλίζοντας έτσι την δυνατότητα λειτουργίας σε ένα σχετικά ευρύ πεδίο μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής n . Όμως απαιτείται ταυτόχρονη μικρή μεταβολή της προπορείας εγχύσεως (κατάλληλη δράση στην έναρξη καταθλίψεως της αντλίας καυσίμου). Η επίδραση αυτή της ταχύτητας περιστροφής, η οποία οφείλεται κυρίως στην επιτάχυνση της κινήσεως του αέρα στον κύλινδρο και την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας από τα τοιχώματα, υπολείπεται αρκετά της αντίστροφης αναλογίας και ως εκ τούτου υπάρχει πάντοτε προς τα άνω ένα όριο περιστροφής, πέραν του οποίου δεν είναι πλέον δυνατή η ομαλή λειτουργία του κινητήρα με ορισμένο καύσιμο. Για τον λόγο αυτό, ακόμη και για το καλύτερο καύσιμο (Light Gas Oil), δεν μπορούμε να έχουμε κινητήρες Ντίζελ με ταχύτητα περιστροφής μεγαλύτερο των 5000 rpm.

- Η προπορεία εγχύσεως επηρεάζει το τ_c , γιατί από αυτή εξαρτώνται οι επικρατούσες συνθήκες στον κύλινδρο κατά την έναρξη της έγχυσης. Έτσι, σε κάθε κινητήρα, για κάθε ταχύτητα περιστροφής (η οποία όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως επηρεάζει σημαντικά το τ_c) υπάρχει μία βέλτιστη προπορεία εγχύσεως, η οποία δίνει το ελάχιστο τ_c .

3.1.2. Στάδιο της Ανεξέλεγκτης Καύσεως

Το δεύτερο στάδιο (BC) αρχίζει με την ανάφλεξη, όπου έχουν δημιουργηθεί οι ευνοϊκότερες προϋποθέσεις (πληρέστερη φυσική και χημική προετοιμασία), στις παρυφές της δέσμης του καυσίμου. Χαρακτηριστική για τον κινητήρα Ντίζελ είναι η εμφάνιση περισσότερων εστιών αναφλέξεως, ταυτόχρονα ή και με κάποια πολύ μικρή φασική απόκλιση μεταξύ τους, οι οποίες ενώνονται ταχύτατα επεκτεινόμενες πρακτικά σε όλη την μέχρι εκείνη την στιγμή εγχυθείσα ποσότητα καυσίμου. Αυτή η εγχυθείσα ποσότητα καυσίμου, έχει ήδη προετοιμαστεί φυσικά και χημικά κατά την διάρκεια του πρώτου σταδίου (AB), και έχει ανάγκη για να αναφλεγεί μικρή μόνο πρόσθετη

παροχή θερμότητας, η οποία παρέχεται από τις πρώτες εστίες αναφλέξεως. Έτσι η αιφνίδια καύση, τύπου προαναμείξεως, σημαντικής ποσότητας του ήδη συσσωρευμένου καυσίμου επιφέρει την απότομη και ανεξέλεγκτη αύξηση της πίεσεως, η οποία συνοδεύεται και με ανάλογη αύξηση της θερμοκρασίας και έτσι την περαιτέρω ενεργοποίηση των κινήσεων του αέρα στον θάλαμο καύσεως.

3.1.3. Στάδιο Ελεγχόμενης Καύσης

Στην συνέχεια, το εγχυόμενο καύσιμο κατά το τρίτο στάδιο (CD) βρίσκει ιδανικές συνθήκες στον θάλαμο καύσεως (υψηλή πίεση και θερμοκρασία καθώς και πολύ έντονη κίνηση της γομώσεως του κυλίνδρου), οπότε καίγεται πλέον με την ελάχιστη δυνατή, πρακτικώς σταθερή, καθυστέρηση αναφλέξεως. Αυτό ισχύει εφόσον οι συνολικές συνθήκες στον θάλαμο καύσεως επιτρέπουν την ταχεία ανάμειξη με τον αέρα, ώστε για κάθε ποσότητα καυσίμου να διατίθεται εγκαίρως η απαιτούμενη ποσότητα αέρα. Όπως φαίνεται στα σχήματα 3.1 και 3.2, η καύση (κατά ένα πολύ μικρό ποσοστό) συνεχίζεται μέχρι και το τέλος της φάσης της εκτονώσεως, στο λεγόμενο ουραίο τμήμα της όλης διάρκειας της καύσεως.

3.2. Σύνθεση Εκπομπών NO_x.

Εξαρχής σημειώνεται ότι ο όρος οξειδία του αζώτου, που σχηματίζονται στον θάλαμο καύσης των εμβολοφόρων κινητήρων, περιλαμβάνει μονοξείδιο του αζώτου και διοξείδιο του αζώτου, ενδεχομένως με ίχνη άλλων οξειδίων του αζώτου (όπως το N₂O₅). Όμως στις συνθήκες που επικρατούν στον θάλαμο καύσης των κινητήρων Ντίζελ, στα μέσα και μεγάλα φορτία, το NO₂ αποτελεί ελάχιστο ποσοστό (π.χ. 1 έως 2%), ενώ κυμαίνεται στο 10 έως 25 % στα χαμηλά φορτία των κινητήρων Ντίζελ. Έτσι όσον αφορά τον σχηματισμό τους στον κινητήρα, τα NO_x σχεδόν ταυτίζονται με το NO, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν συνώνυμα.

Το NO σχηματίζεται τις περιοχές υψηλής θερμοκρασίας εντός της καμένης ή καιγόμενης ζώνης, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει και η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου. Στην συνέχεια, στην φάση της εκτονώσεως, ορισμένες αντιδράσεις που συμμετέχουν στον σχηματισμό του NO «παγώνουν», με αποτέλεσμα στο καυσαέριο κατά την εξαγωγή να υπάρχουν συγκεντρώσεις NO αρκετά μεγαλύτερες από τις αντιστοιχούσες τιμές της χημικής ισορροπίας στην ίδια θερμοκρασία (εξαγωγής). Για τον λόγο αυτό αναφέρεται ότι ο σχηματισμός του NO καθορίζεται από την χημική κινητική των αντιδράσεων παρά την χημική ισορροπία.

Παρόλο που το μεγαλύτερο ποσοστό των οξειδίων του αζώτου που παράγονται κατά την καύση, αποτελούνται από NO, όταν οι εκπομπές υπολογίζονται βάση της παραγόμενης ισχύος (specific basis g/MJ, g/kWh), τότε υποθέτουμε ότι όλο το μονοξείδιο του αζώτου οξειδώνεται σε διοξείδιο του αζώτου.

3.3. Μηχανισμοί Σχηματισμού NO_x.

Στην θεωρία της καύσης υπάρχουν τρεις μηχανισμοί όσον αφορά τον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου.

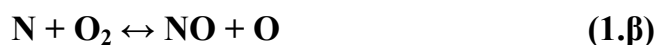
- Θερμικός μηχανισμός σχηματισμού NO
- Άμεσος μηχανισμός σχηματισμού NO
- Ενδιάμεσος μηχανισμός N₂O
- NO που παράγεται από το N₂ που περιέχεται στο καύσιμο

3.3.1. Θερμικός Μηχανισμός Σχηματισμού NO

Ο θερμικός σχηματισμός του NO βασίζεται στον μηχανισμό, που είναι γνωστός ως μηχανισμός του Zeldovich². Η τιμή των σταθερών ταχύτητας του θερμικού μηχανισμού, είναι πολύ αργοί αν συγκριθούν με την τιμή των σταθερών ταχύτητας της καύσης. Ο ρυθμός

² Οι δύο πρώτες εξισώσεις ορίστηκαν από τον Zeldovich το 1946, ενώ η τρίτη προστέθηκε από τον Lavoie το 1970 – καθώς συνεισφέρει σημαντικά στον σχηματισμό μονοξειδίου του αζώτου – και ανακαλύφθηκε με την βοήθεια φασματογραφικών μεθόδων.

σχηματισμού μονοξειδίου του αζώτου είναι υψηλός σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 1800 K) και εφόσον υπάρχει ικανός χρόνος για τον σχηματισμό. Ο εκτεταμένος μηχανισμός του Zeldovich αποτελείται από 2 αλυσιδωτές αντιδράσεις:



στις οποίες μπορεί να προστεθεί και η αντίδραση:



Η υψηλή θερμοκρασία καύσης προκαλεί την διάσπαση των μορίων του οξυγόνου σε άτομα., τα οποία αντιδρούν με τα μόρια του αζώτου που περιέχεται στον αέρα, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό NO. Η μετατροπή αυτή ξεκινάει περίπου στους 1000°C και αυξάνεται αισθητά με την αύξηση της θερμοκρασίας καύσης πάνω από τους 1300°C. Από το σημείο αυτό και πάνω για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 100°C, προκαλείται υπερδιπλασιασμός του ρυθμού σχηματισμού οξειδίων του αζώτου. Ο χρόνος κατά τον οποίο παρατηρούνται αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες είναι εξίσου σημαντικός.

Οι σταθερές ταχύτητας των αντιδράσεων αυτών δίνονται στην συνέχεια, για τις περιοχές θερμοκρασιών που ενδιαφέρουν τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, το σφάλμα προσδιορισμού της σταθεράς ταχύτητας αντιδράσεως αυξάνει σημαντικά, προσεγγίζοντας μερικές φορές και το 80%. Σημειώνεται ότι οι θερμοκρασίες που παρατίθενται είναι σε K και πρόκειται για απόλυτες τιμές.

Η σταθερά της ταχύτητας αντιδράσεως της προς τα δεξιά αντιδράσεως συμβολίζεται με το k_f , ενώ αυτής της προς τα αριστερά με το k_b , οπότε η σταθερά χημικής ισορροπίας της αντιδράσεως θα είναι ίση με:

$$K_c = \frac{k_f}{k_b} \quad (2)$$

Πίνακας 3.1.: Σταθερές Ταχύτητας αντιδράσεως μηχανισμού σχηματισμού NO

α/α	Αντίδραση	Σταθερά Ταχύτητας Αντιδράσεως (cm ³ /mol.s)	Θερμοκρασιακή Περιοχή (K)
(1)	O+N ₂ → NO+N	7,6x10 ¹³ exp[-38000/T]	2000 – 5000
(-1)	N+NO → N ₂ +O	1,6x10 ¹³	300 – 5000
(2)	N+O ₂ → NO+O	6,4x10 ⁹ T exp[-3150/T]	300 – 3000
(-2)	O+NO → O ₂ +N	1,5x10 ⁹ T exp[-19500/T]	1000 – 3000
(3)	N+OH → NO+H	4,1x10 ¹³	300 – 2500
(-3)	H+NO → OH+N	2,0x10 ¹⁴ exp[-23650/T]	2200 - 4500

Από τις εξισώσεις (1.α) έως (1.γ), προκύπτει ότι ο ρυθμός μεταβολής της συγκεντρώσεως των NO και N και είναι ίσος αντίστοιχα προς (οι όροι στις καμπύλες δηλώνουν συγκεντρώσεις σε mole/cm³):

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{1f}[O][N] + k_{2f}[N][O_2] + k_{3f}[N][OH] - k_{1b}[NO][N] - k_{2b}[NO][O] - k_{3b}[NO][H] \quad (3.α)$$

$$\frac{d[N]}{dt} = k_{1f}[O][N_2] - k_{2f}[N][O_2] - k_{3f}[N][OH] - k_{1b}[NO][N] + k_{2b}[NO][O] + k_{3b}[NO][H] \quad (3.β)$$

Εφόσον όμως το μοριακό κλάσμα του N είναι μόνο περίπου 10⁻⁸, ενώ των άλλων συστατικών περίπου 10⁻¹ έως 10⁻², σχετικά πάρα πολύ μικρό, μπορεί να εφαρμοστεί η λεγόμενη προσέγγιση σταθερής καταστάσεως και να τεθεί d[N]/dt=0, οπότε η εξίσωση (3.β) επιλύεται ως προς [N]. Η τιμή αυτή του [N] θα αντικατασταθεί στην (3.α), οπότε ο ρυθμός σχηματισμού NO προκύπτει ως:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{1f}[O][N_2] \frac{\left\{ 1 - \frac{[NO_2]}{K_{c1}K_{c2}[O_2][N_2]} \right\}}{\left\{ 1 + \frac{k_{1b}[NO]}{k_{2f}[O_2] + k_{3f}[OH]} \right\}} \quad (4)$$

Όσον αφορά στην συγκέντρωση των συστατικών [O], [N₂], [O₂], [OH] και [H] που συμμετέχουν στις αντιδράσεις σχηματισμού (1.α) και (1.γ), μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι είναι ίσες με τις αντίστοιχες της χημικής

ισορροπίας στην συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία. Μπορούμε συνεπώς να θεωρήσουμε τους ακόλουθους ρυθμούς μεταβολής της συγκεντρώσεως των αντιδρώντων ή προϊόντων των ανωτέρω τριών αντιδράσεων,

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= k_{1f}[O]_e[N_2]_e = k_{1b}[NO]_e[N]_e \\ R_2 &= k_{2f}[N]_e[O_2]_e = k_{2b}[NO]_e[O]_e \\ R_3 &= k_{3f}[N]_e[OH]_e = k_{3b}[NO]_e[H]_e \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

όπου ο δείκτης e δηλώνει χημική ισορροπία. Αντικαθιστώντας λοιπόν τις συγκεντρώσεις ισορροπίας των $[O_2]$, $[N_2]$, $[OH]$, $[H]$ και $[O]$ στην εξίσωση (4), μέσω τις εξίσωσης (5), προκύπτει η παρακάτω διαφορική εξίσωση για την στιγμιαία συγκέντρωση του NO στα προϊόντα της καύσεως,

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2R_1 \left\{ 1 - \frac{[NO]^2}{[NO]_e^2} \right\}}{1 + \left\{ \frac{[NO]}{[NO]_e} \left(\frac{R_1}{R_2 + R_3} \right) \right\}} \quad (6)$$

Είναι εμφανής η εξάρτηση του ρυθμού σχηματισμού από την θερμοκρασία, λόγω της εκθετικής συναρτήσεως που χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό της σταθεράς της ταχύτητας των αντιδράσεων, καθώς επίσης και η εξάρτηση από το διαθέσιμο O_2 . Συνεπώς το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ο σχηματισμός του NO είναι μία διαδικασία που δεν ελέγχεται από την χημική ισορροπία, αλλά από την χημική κινητική των αντιδράσεων.

Για την διεργασία σχηματισμού του NO μπορούμε να ορίσουμε ένα χαρακτηριστικό χρόνο ως εξής:

$$\tau_{NO}^{-1} = \frac{1}{[NO]_e} \frac{d[NO]}{dt} \quad (7)$$

όπου για την εκτίμηση της συγκεντρώσεως ισορροπίας θεωρούμε την αντίδραση,



με σταθερά χημικής ισορροπίας που δίνετε από την σχέση,

$$K_{NO} = 20.3 \exp\left(-\frac{21650}{T}\right) \quad (9)$$

Συνεπώς ο χαρακτηριστικός χρόνος της εξίσωσης (7) γίνεται,

$$\tau_{NO} = \frac{8 \times 10^{-16} T \exp\left(\frac{58300}{T}\right)}{p^{0.5}} \quad (10)$$

Στην εξαγωγή της σχέσεως (10) έχει γίνει η υπόθεση ότι το μοριακό κλάσμα του N_2 είναι περίπου ίσο προς αυτό στον ατμοσφαιρικό αέρα, δηλαδή 0,71. Για τις τυπικές συνθήκες λειτουργίας των εμβολοφόρων κινητήρων παρατηρείται ότι ο χαρακτηριστικός χρόνος είναι της αυτής τάξης μεγέθους και μεγαλύτερος από τον χρόνο μεταβολής (στον κύλινδρο) των συνθηκών λειτουργίας, με αποτέλεσμα ο ρυθμός του σχηματισμού του να ελέγχεται από την κινητική των αντιδράσεων. Όμως σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες στην περιοχή της αντιδράσεως είναι κοντά στην στοιχειομετρία και η πίεση και θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλές, είναι δυνατόν να έχουμε χημική ισορροπία. Στις περιπτώσεις αυτές ο χαρακτηριστικός χρόνος είναι της τάξεως του 1 ms, πλησιάζει δηλαδή τον χαρακτηριστικό χρόνο (διάρκεια) της καύσεως.

3.3.2 Άμεσος Μηχανισμός Σχηματισμού NO

Ο άμεσος μηχανισμός σχηματισμού του NO ανακαλύφθηκε από τον Fenimore. Το γενικό πλάνο του είναι ότι οι ρίζες των υδρογονανθράκων αντιδρούν με το μόριο N και δημιουργούν αμίνες και μείγματα κυανίου.

Μπορεί να γραφεί ως εξής:



Για ρυθμούς ισορροπίας χαμηλότερους από 1,2 ο μηχανισμός γίνεται:

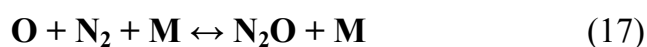


Ο μηχανισμός αυτός υποστηρίζει τον σχηματισμό του NO στις φλόγες των υδρογονανθράκων και του αέρα κατά τα πρώτα στάδια της καύσης, ως αποτέλεσμα μίας επίθεσης ατόμων άνθρακα και υδρογόνου στο άζωτο για το σχηματισμό κυανίου HCN. Αυτό ακολουθείται από την από την οξείδωση του HCN για τον σχηματισμό NO.

Ο άμεσος σχηματισμός NO παρουσιάζει μικρή εξάρτηση από την θερμοκρασία, που είναι σημαντική μόνο σε πλούσιες από καύσιμο φλόγες. Στην πράξη ο άμεσος σχηματισμός NO είναι μη μείζονος σημασίας, σε σχέση με την ολική ποσότητα NO, ιδίως στους κινητήρες Ντίζελ.

3.3.3 Ενδιάμεσος Μηχανισμός N₂O

Ο ενδιάμεσος μηχανισμός N₂O έχει σημαντική συνεισφορά στο σχηματισμό NO σε χαμηλές θερμοκρασίες και περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:



όπου αργότερα αποσυντίθεται σε μονοξείδιο του αζώτου σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Σύμφωνα με τον Correa (1992), ο ενδιάμεσος μηχανισμός N₂O, είναι σημαντικός όσον αφορά την συνεισφορά του στον σχηματισμό μονοξειδίου του αζώτου, σε πτωχές σε καύσιμο φλόγες προανάμιξης, με αναλογίες καυσίμου-αέρα $\lambda > 1,6$.

3.3.4. NO που παράγεται από το N₂ που περιέχεται στο καύσιμο

Το NO του καυσίμου σχηματίζεται από την οξείδωση του αζώτου που περιέχεται στο καύσιμο. Οι αντιδράσεις που οδηγούν σε αυτή την μετατροπή δεν είναι πλήρως γνωστές. Μόνο ένα μικρό μέρος του αζώτου που περιέχεται στο καύσιμο μετατρέπεται σε NO. Το μεγαλύτερο μέρος απελευθερώνεται ως N₂. Η συγκέντρωση αζώτου στο

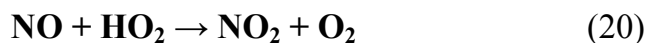
καύσιμό είναι πολύ μικρή, συνήθως χαμηλότερη από 0,01% κατά βάρος. Για τον λόγο αυτό ο σχηματισμός NO από το καύσιμό δεν αποτελεί πρόβλημα για τους κινητήρες Ντίζελ.

3.4. Μηχανισμός σχηματισμού Διοξειδίου του Αζώτου

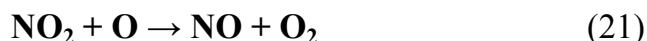
Κατά την διάρκεια μελετών πάνω στην χημική ισορροπία της αντίδρασης της καύσης, παρατηρήθηκε ότι σε καυσαέρια σε τυπικές θερμοκρασίες φλόγας, οι λόγοι NO₂/NO είναι πάρα πολύ μικροί. Τα πειραματικά δεδομένα μας δείχνουν ότι σε κινητήρες Ντίζελ, η συγκέντρωση διοξειδίου του αζώτου κυμαίνεται μεταξύ 10% στα υψηλά φορτία και 30% στα χαμηλά φορτία των συνολικά παραγόμενων οξειδίων του αζώτου.

Ο μηχανισμός του σχηματισμού του διοξειδίου του αζώτου περιγράφεται ως εξής:

Σχηματίζεται μονοξείδιο του αζώτου, το οποίο στιγμιαία μετατρέπεται σε διοξείδιο του αζώτου, σύμφωνα με την αντίδραση:



Στην συνέχεια, γίνεται η μετατροπή του διοξειδίου του αζώτου σε μονοξείδιο του αζώτου μέσω της αντίδρασης:



εκτός αν το παραγόμενο διοξείδιο του αζώτου, το οποίο σχηματίζεται στην ζώνη της φλόγας, έρθει σε επαφή με τις ψυχόμενες επιφάνειες του κυλίνδρου. Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί οι υψηλότεροι λόγοι NO₂/NO παρουσιάζονται για λειτουργία του κινητήρα σε χαμηλά φορτία, όπου υπάρχει επαρκής χρόνος έτσι ώστε το διοξείδιο του αζώτου να έρθει σε επαφή με τις ψυχόμενες επιφάνειες του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η μετατροπή του διοξειδίου του αζώτου σε μονοξείδιο.

3.5. Απλουστευτικές Θεωρητικές Προσεγγίσεις για την Εξήγηση του Μηχανισμού Σχηματισμού NO.

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στην λεπτομερή ανάλυση και την μοντελοποίηση του σχηματισμού NO σε όλες τις περιοχές του κυλίνδρου της μηχανής κατά την διάρκεια του κύκλου καύσης. Παρόλα αυτά καταβάλλεται προσπάθεια ερμηνείας αλλά και μοντελοποίησης του μηχανισμού σχηματισμού των Οξειδίων του Αζώτου χρησιμοποιώντας απλοϊκά μεγέθη:

- Η Μέγιστη θερμοκρασία καύσης
- Η Μέση θερμοκρασία κύκλου
- Η ποσότητα του καυσίμου που καίγεται υπό συνθήκες προανάμιξης

Η χρήση των απλοϊκών αυτών μεγεθών γίνεται προκειμένου να υπάρξει μία ερμηνεία για την επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα στις εκπομπές NO_x. Παράλληλα γίνεται και για την ανάπτυξη απλοϊκών μοντέλων εκτίμησης των εκπομπών NO_x.

Κατά την διαδικασία του υπολογισμού του ρυθμού έκλυσης θερμότητας λαμβάνουμε ένα μέσο θερμοδυναμικό κύκλο των θερμοκρασιών. Επειδή ο σχηματισμός του NO, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία, μπορούμε να κάνουμε μία απλή υπόθεση, ότι η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου σχετίζεται με την ποσότητα των εκπομπών NO_x. Η μέση θερμοκρασία του θερμοδυναμικού κύκλου προφανώς είναι μικρότερη από την τοπική θερμοκρασία καύσης. Το NO σχηματίζεται στην ζώνη της φλόγας, η οποία προφανώς δεν αντιπροσωπεύεται από την μέση μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου, όμως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μεταβάλλεται ποιοτικά με παρόμοιο τρόπο.

Είναι δυνατόν να υποθέσουμε μία πιο ακριβή προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας καθόλη την διάρκεια του κύκλου. Εάν η θερμοκρασία ολόκληρου του κύκλου σε μία περίπτωση είναι χαμηλότερη από μία άλλη, τότε μπορούμε να πούμε ότι και οι εκπομπές NO_x αναμένεται να είναι χαμηλότερες. Αυτό προσφέρει μία

ερμηνεία για την επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής. Η αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας που ελέγχει τον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου, εξαρτάται και από την αρχική θερμοκρασία του μίγματος.

Ο σχηματισμός του NO συνδέεται και με την ποσότητα του προαναμεμιγμένου καυσίμου που καίγεται στο στάδιο της προαναμεμιγμένης καύσης. Παρατηρείται ότι οι εκπομπές NO_x είναι υψηλότερες αν το ποσοστό του καυσίμου που καίγεται στο στάδιο αυτό αυξάνει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αναπτύσσονται ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες παρουσία οξυγόνου.

Η μεγαλύτερη ποσότητα μονοξειδίου του αζώτου σχηματίζεται κυρίως στην περιοχή των θερμών προϊόντων της καύσης, παρά στο μέτωπο της καύσης. Αυτό οφείλεται στο υπερβολικά λεπτό μέτωπο της φλόγας, εξαιτίας του οποίου ο χρόνος παραμονής σε αυτή είναι πολύ μικρός. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για την περίοδο καύσης πριν από την εμφάνιση της μέγιστης πίεσης καύσης. Στην περίπτωση αυτή τα αέρια μετά την καύση συμπιέζονται από την αυξανόμενη πίεση του κυλίνδρου σε υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας, που αυξάνει τον ρυθμό σχηματισμού οξειδίου του αζώτου. Ακόμη, όσο μικρότερη είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ της συμπίεσης και της μέγιστης πίεσης, τόσο ελαχιστοποιείται ο σχηματισμός οξειδίου του αζώτου.

3.6. Παράμετροι που Επιδρούν στον Σχηματισμό του Οξειδίου του Αζώτου

3.6.1. Ιστορικό Σχηματισμού του NO

Στους κινητήρες Ντίζελ το καύσιμο εγχύεται στον θάλαμο καύσεως σε υγρή μορφή και στην συνέχεια ατμοποιούμενο αναμειγνύεται με τον αέρα που απαιτείται για την καύση του. Αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού είναι η μεγάλη στρωμάτωση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του καυσίμου στον θάλαμο καύσεως, με αποτέλεσμα ο σχηματισμός του NO να λαμβάνει χώρα σε ορισμένες μόνο περιοχές όπου οι επικρατούσες συνθήκες το επιτρέπουν.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του NO σχηματίζεται κυρίως κατά το στάδιο της ανεξέλεγκτης καύσεως, οπότε η φλόγα είναι τύπου προαναμείξεως, με τιμές του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου πλησίον της μονάδας, ενώ η θερμοκρασία λόγω της προαναμειγμένης καύσεως είναι ιδιαίτερα υψηλή. Λόγω της συνεχούς εξάπλωσης της δέσμης του καυσίμου, οι ζώνες της αντιδράσεως έρχονται σε επαφή με τον ψυχρό αέρα που τις περιβάλλει, κατά την διάρκεια της ελεγχόμενης καύσεως, με αποτέλεσμα την πτώση της θερμοκρασίας τους και το πάγωμα των αντιδράσεων διασπάσεως του μονοξειδίου του αζώτου. Στο σημείο αυτό παγώνει η συγκέντρωση του μονοξειδίου του αζώτου σε αρκετά υψηλές τιμές.

Συνεπώς το σημαντικότερο τμήμα του κύκλου, για τον σχηματισμό του μονοξειδίου του αζώτου στον κινητήρα Ντίζελ, είναι αυτό από την αρχική έναυση έως και περίπου 25 μοίρες γωνίας στροφάλου μετά από αυτή.

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει, για την μελέτη σχηματισμού του NO στον θάλαμο καύσεως των κινητήρων Ντίζελ μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο των αντιδράσεων Zeldovich, με την προϋπόθεση ότι γνωρίζουμε την τοπική σύσταση και θερμοκρασία. Αυτό είναι δυνατό με την χρήση προωθημένων μοντέλων προσομοιώσεως καύσεως, τα οποία πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους την κατανομή του καυσίμου, διαχωρίζοντας τον θάλαμο καύσεως σε ζώνες (πολυζωνικά μοντέλα).

3.6.2. Επίδραση των Παραμέτρων Λειτουργίας στην Τιμή του NO

Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε στην επίδραση μερικών παραμέτρων στην συγκέντρωση του NO και συγκεκριμένα: στο φορτίο, την προπορεία εγχύσεως καυσίμου και στο κλάσμα του παραμένουτος καυσαερίου. Όσον αφορά στην επίδραση της ταχύτητας περιστροφής σημειώνεται ότι η κατάσταση είναι συγκεχυμένη και δεν μπορούν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα, όπως για τις τρεις άλλες παραμέτρους λειτουργίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, η ταχύτητα περιστροφής

επηρεάζει με διάφορους τρόπους, πολλές επί μέρους διαδικασίες της όλης προετοιμασίας και καύσεως του σχηματιζόμενου καυσίμου μείγματος στον κύλινδρο.

- Επίδραση του Φορτίου

Επειδή η ρύθμιση του φορτίου του κινητήρα Ντίζελ είναι ποιοτική, όταν αναφερόμαστε σε αυτό ουσιαστικά εννοούμε τον λόγο ισοδυναμίας καυσίμου. Με την αύξηση του φορτίου παρατηρείται αύξηση της συγκεντρώσεως του NO στο καυσαέριο, λόγω της αυξήσεως της θερμοκρασίας στην ζώνη αντιδράσεως και λόγω της ύπαρξης αρκετών περιοχών με συγκέντρωση αέρα καυσίμου γύρω από την στοιχειομετρική τιμή.

- Επίδραση της Προπορείας Εγχύσεως του Καυσίμου

Με την αύξηση της προπορείας εγχύσεως παρατηρείται σημαντική αύξηση του παραγόμενου NO, λόγω της σημαντικής αυξήσεως της πίεσεως και θερμοκρασίας των αερίων στον θάλαμο καύσεως.

- Επίδραση του Ποσοστού του Παραμένουτος Καυσαερίου

Με την αύξηση του ποσοστού του παραμένουτος καυσαερίου στον θάλαμο καύσεως παρατηρείται σημαντική μείωση του παραγόμενου NO. Αιτία αυτής της πτώσεως είναι η αύξηση της ειδικής θερμοχωρητικότητας του περιβάλλοντος μέσου με την συνεπαγόμενη μείωση της πίεσεως και θερμοκρασίας εντός της ζώνης αντιδράσεως στην διάρκεια του κύκλου. Τα προβλήματα που προκύπτουν όταν χρησιμοποιείται Ανακυκλοφορία Καυσαερίου είναι μείωση της συγκεντρώσεως ισχύος του κινητήρα και αύξηση της ειδικής καταναλώσεως καυσίμου.

4. Μέθοδοι Περιορισμού Εκπομπών NO_x

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι πιο γνωστές μέθοδοι που εφαρμόζονται σε μεγάλους κινητήρες Ντίζελ 2-X ή 4-X, που χρησιμοποιούνται είτε στην ναυτιλία είτε σε εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, με σκοπό τον περιορισμό των εκπομπών στην ατμόσφαιρα NO_x.

4.1 Επιβράδυνση του Χρονισμού Έγχυσης Καυσίμου με ταυτόχρονη Αύξηση της Πίεσης Εγχύσεως

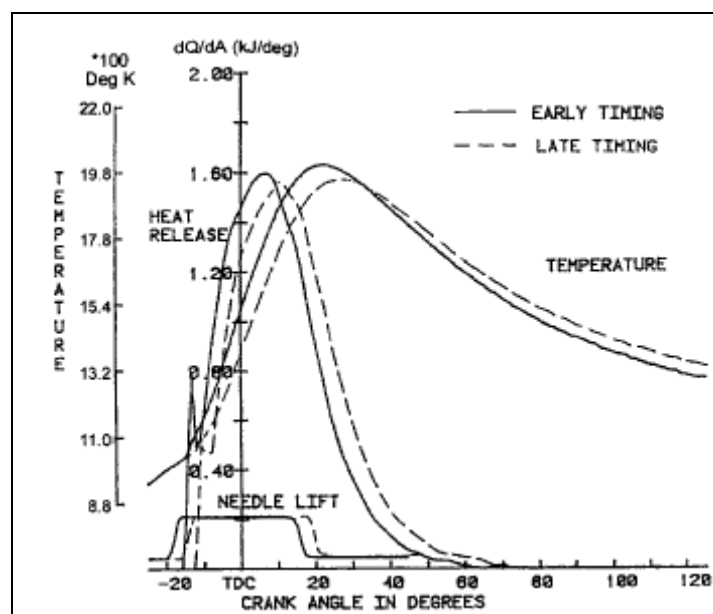
Κατά το παρελθόν, ο χρονισμός του έγχυσης του καυσίμου ρυθμιζόταν με κριτήριο τον μέγιστο βαθμό απόδοσης, κάτω από συγκεκριμένα κατασκευαστικά όρια όσον αφορά την μέγιστη πίεση καύσης. Σήμερα όμως, η μείωση των εκπομπών NO_x έχει όλο και μεγαλύτερη σημασία. Ακολουθεί ένα τυπικό παράδειγμα ενός κινητήρα που λειτουργεί με δύο διαφορετικούς χρονισμούς έγχυσης καυσίμου, στο ίδιο φορτίο και ταχύτητα περιστροφής. Στον πίνακα 4.1 δίνεται η λειτουργική συμπεριφορά του κινητήρα με δύο διαφορετικές ρυθμίσεις της προπορείας έγχυσης. Παρατηρούμε ότι με την μείωση της προπορείας έγχυσης κατά τρεις μοίρες γωνίας στροφάλου, προκαλεί μείωση εκπομπών του αζώτου κατά περίπου 20%. Ταυτόχρονα όμως αυξάνονται η ειδική κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές αιθάλης.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα δοκιμών με διαφορετικούς χρονισμούς έγχυσης

Χρονισμός Έγχυσης Καυσίμου	Κανονική Προπορεία Έγχυσης	Μειωμένη Προπορεία Έγχυσης
P _{max} (bar)	164	150.7
Ειδική Κατανάλωση (kg/kWh)	0.1919	0.1968
Εκπομπές αιθάλης (Bosch #)	0.15	0.27
Εκπομπές NO _x (ppm)	1413	1145
Έναρξη Έγχυσης (° πριν το ANΣ)	19,5	16,5
Υπολογιζόμενη Μέγιστη Θερμοκρασία Κυλίνδρου (°K)	2028	1979
Θερμοκρασία καυσαερίων (°C)	455	473

Παρατηρώντας το διάγραμμα του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (Σχ. 4.1), παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της καθυστερημένης έγχυσης, η καύση μετατοπίζεται προς τα δεξιά, μετά το ΑΝΣ. Στην περίπτωση της κανονικής προπορείας ότι η καύση ξεκινάει νωρίτερα (15,5° πριν το ΑΝΣ). Στην περίπτωση της μειωμένης προπορείας έγχυσης, η έκλυση της θερμότητας ξεκινάει περίπου στις 13° πριν το ΑΝΣ.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ταυτόχρονα με την μείωση των εκπομπών NO_x, να προκαλείται και αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών HC, του CO και της αιθάλης. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι με την μετατόπιση της καύσης προς τα δεξιά του διαγράμματος, μεγαλώνει η διάρκεια της καύσης και μειώνεται η θερμοκρασία στα τελευταία στάδια της καύσης, με αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού οξειδωσης της αιθάλης που έχει σχηματιστεί.



Σχήμα 4.1.: Ανάλυση καύσης για τις δύο διαφορετικές προπορείες έγχυσης

Η αύξηση των εκπομπών HC, CO και αιθάλης μπορεί να αντιμετωπιστεί με την αύξηση της πίεσης έγχυσης του καυσίμου, επιτρέποντας στην έγχυση να περατώνεται νωρίτερα (μικρότερη διάρκεια ψεκασμού για την ίδια ποσότητα καυσίμου). Με την διπλή αυτή ρύθμιση επιτυγχάνουμε, την απαραίτητη για την μείωση των εκπομπών NO_x, μέσω της μείωσης της προπορείας έγχυσης, χωρίς όμως να έχουμε

ταυτόχρονη καθυστέρηση στο πέρας της έγχυσης του καυσίμου που προκαλεί την αύξηση των εκπομπών HC, CO και αιθάλης. Ακόμη η αύξηση της πίεσης έγχυσης συνεισφέρει και στην μείωση της καθυστέρησης ανάφλεξης, λόγω του μικρότερου μεγέθους των σταγονιδίων του καυσίμου (καλύτερη διασπορά του καυσίμου).

4.2. Μείωση της Θερμοκρασίας Εισαγωγής του Αέρα

Η μειωμένη θερμοκρασία του αέρα σάρωσης, επιφέρει σοβαρή μείωση της θερμοκρασίας καύσης και συνεπώς μείωση των εκπομπών NO_x. Ακολουθεί τυπικό παράδειγμα ενός κινητήρα που λειτουργεί με δύο διαφορετικές τιμές θερμοκρασίες αέρα σάρωσης. Στο παράδειγμα αυτό έχουν διατηρηθεί στα ίδια επίπεδα οι πιέσεις καύσεως, με την μείωση κατά μία μοίρα γωνίας στροφάλου, της προπορείας εγχύσεως.

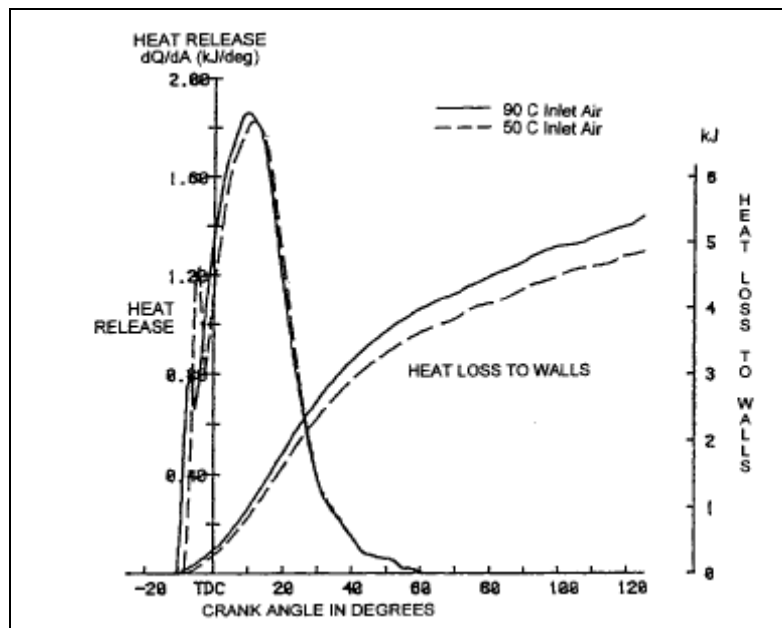
Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών. Η Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου παρουσιάζει μείωση κατά περίπου 2% με την μείωση της θερμοκρασίας του αέρα σάρωσης, ενώ οι εκπομπές NO_x παρουσιάζονται μειωμένες κατά 30% περίπου, γεγονός που οφείλεται στην μειωμένη μέση θερμοκρασία του κυλίνδρου.

Πίνακας 4.2: Κατάσταση και αποτελέσματα δοκιμών με διαφορετικές θερμοκρασίες αέρα εισαγωγής

Θερμοκρασία Εισαγωγής Αέρα (°C)	90	50
P _{max} (bar)	161.1	160.9
Ειδική Κατανάλωση (kg/kWh)	0.2126	0.2084
Εκπομπές αιθάλης (Bosch #)	0.05	0.06
Εκπομπές NO _x (ppm)	1317	942
Έναρξη Έγχυσης (° πριν το ANΣ)	14	13
Διάρκεια Έγχυσης (°)	29	28
Υπολογιζόμενη Μέγιστη Θερμοκρασία Κυλίνδρου (°K)	1956	1771
Θερμοκρασία καυσαερίων (°C)	478	417

Στο σχήμα 4.2 δίνεται ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας, όπου φαίνεται ότι η καύση στην περίπτωση της χαμηλότερης θερμοκρασίας εισαγωγής ξεκινάει με μια μικρή καθυστέρηση. Η διαφορά αυτή οφείλεται κατά

ένα μέρος στην μικρή διαφορά της προπορείας έγχυσης αλλά κυρίως στην καθυστέρηση ανάφλεξης λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας που επικρατεί στον κύλινδρο (σχήμα 4.3) κατά την στιγμή έναρξης της εγχύσεως. Η μεγαλύτερη σε χρόνο καθυστέρηση ανάφλεξης, αυξάνει σημαντικά τον αρχικό ρυθμό καύσης (καύση προανάμιξης).

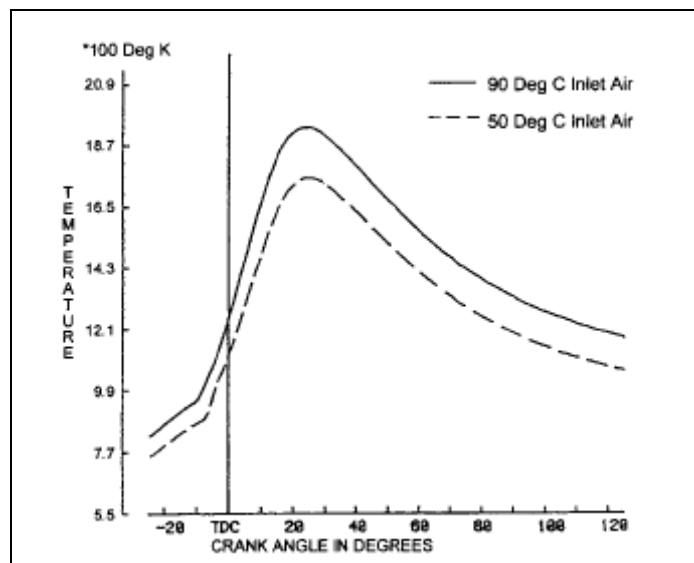


Σχήμα 4.2.: Απελευθέρωση θερμότητας και απώλειες θερμότητας για τις δύο περιπτώσεις θερμοκρασιών αέρα εισαγωγής

Στο σχήμα 4.2 μπορούμε ακόμη να δούμε και τις απώλειες θερμότητας προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Το μικρότερο ποσό των απωλειών θερμότητας, που παρουσιάζεται στην περίπτωση της μειωμένης θερμοκρασίας του αέρα σάρωσης, συμβάλει στην χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χαμηλότερη θερμοκρασία αέρα σάρωσης επιφέρει μείωση της μέσης θερμοκρασίας καύσης, μειώνοντας την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ αερίων και τοιχωμάτων και συνεπώς μείωση των απωλειών προς αυτούς.

Η σύγκριση των καμπυλών έκλυσης θερμότητας, φανερώνει ότι η διάρκεια καύσης είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις θερμοκρασίας αέρα σάρωσης. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, οι εκπομπές αιθάλης και υδρογονανθράκων είναι περίπου ίδιες.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι στο Σχήμα 4.2 το αρχικό μέγιστο του διαγράμματος έκλυσης θερμότητας είναι σημαντικά υψηλότερο στο διάγραμμα της χαμηλότερης θερμοκρασίας του αέρα εισαγωγής. Κανονικά το γεγονός αυτό θα προκαλούσε αύξηση στις εκπομπές NOx. Όμως κυριαρχεί η επίδραση της χαμηλής θερμοκρασίας καύσης, λόγω του μικρού ποσοστού του καυσίμου που εισάγεται στο πρώτο στάδιο της καύσης.



Σχήμα 4.3.: Μέση θερμοκρασία κυλίνδρου στις δύο περιπτώσεις θερμοκρασίας αέρα εισαγωγής

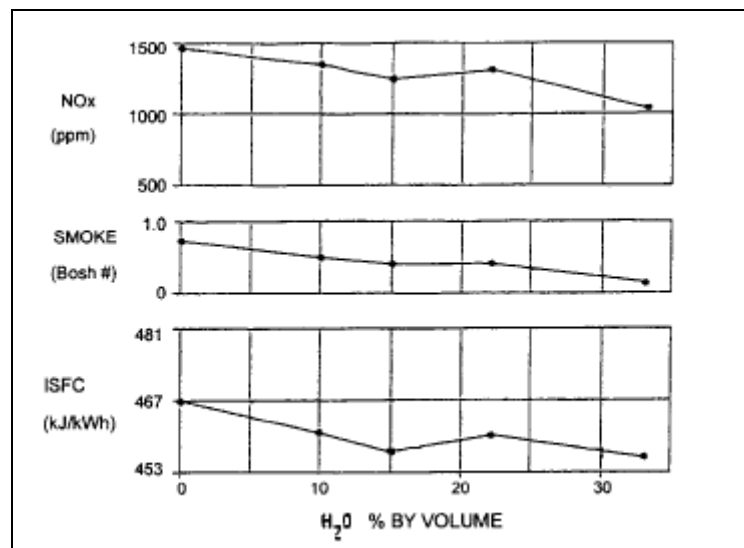
4.3. Χρήση Νερού

Για την μείωση των εκπομπών NOx, μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος είναι η μείωση της θερμοκρασίας της καύσης. Μία αποδοτική μέθοδος για να επιτευχθεί αυτό είναι να προσθέσουμε νερό στο σύστημα καύσης. Το νερό δεν λαμβάνει μέρος στην χημεία της καύσης. Η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης μειώνει την θερμοκρασία του αέρα πλήρωσης. Ο ατμός μετά την ατμοποίηση, ενεργεί ως αδρανές αέριο για την περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας καύσης. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εισαγωγή νερού μέσα στο σύστημα καύσης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν νερό για την μείωση των εκπομπών NOx είναι οι εξής:

- Χρήση Γαλακτώματος Νερού – Καυσίμου
- Απευθείας Έγχυση Νερού στον Κύλινδρο
- Ύγρανση του Αναρροφόμενου Αέρα

4.3.1. Χρήση Γαλακτώματος Νερού - Καυσίμου

Μία από τις μεθόδους για την μείωση των εκπομπών NOx με την χρήση νερού, είναι η χρήση του γαλακτώματος νερού – καυσίμου. Το παράδειγμα που ακολουθεί, μας δείχνει την επίδραση της χρήσης γαλακτώματος νερού - καυσίμου στην καύση.

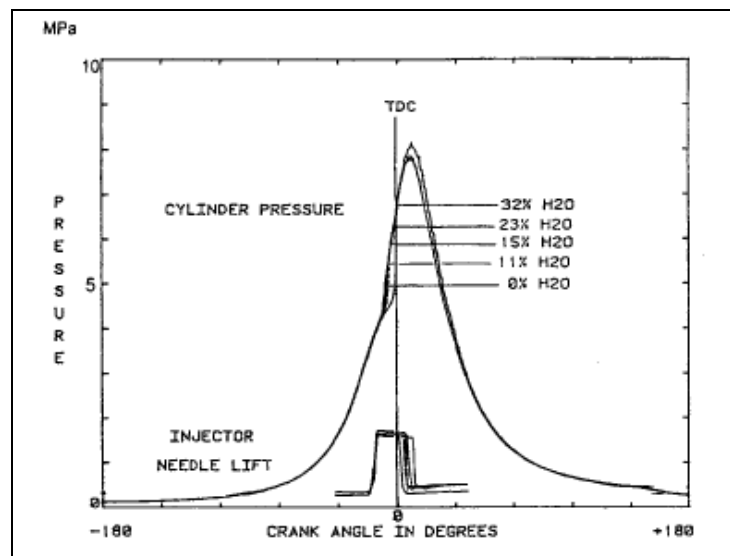


Σχήμα 4.4.: Επιδόσεις μηχανής που χρησιμοποιεί γαλακτοποιημένο καύσιμο

Δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε μία μονοκύλινδρη μηχανή που χρησιμοποιεί γαλάκτωμα νερού - καυσίμου, με διαφορετικές αναλογίες νερού στο καύσιμο. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε, ότι καθώς αυξάνεται το ποσοστό του νερού (έως και 35 %), οι εκπομπές NOx, οι εκπομπές καπνού και η ειδική κατανάλωση καυσίμου μειώνονται (Σχήμα 4.4).

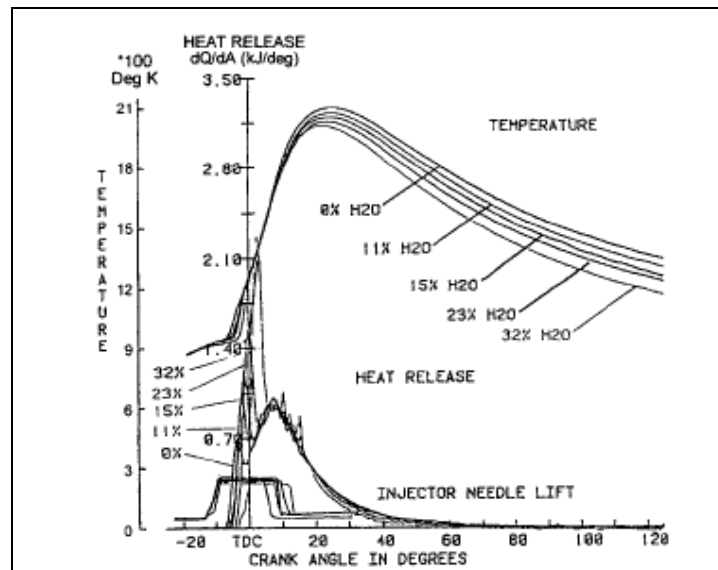
Στο σχήμα 4.5 δίνονται οι καμπύλες της πίεσης του κυλίνδρου και της ανύψωσης της βελόνας του εκχυτήρα. Στο διάγραμμα αυτό, παρατηρούμε ότι υπάρχει μία μικρή μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας καύσης, καθώς το ποσοστό του νερού στο καύσιμο αυξάνεται. Η διάρκεια της ανύψωσης της βελόνας του εκχυτήρα επιμηκώνεται καθώς

το ποσοστό του νερού αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί ο κινητήρας, που λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο φορτίο και καθώς το νερό δεν μεταφέρει χημική ενέργεια για μετατροπή, η διάρκεια της ανύψωσης πρέπει να επιμηκυνθεί για την εισαγωγή της απαραίτητης ποσότητας πετρελαίου στον κύλινδρο.



Σχήμα 4.5.: Πίεση κυλίνδρου και ανύψωση ακίδας εκχυτήρα μηχανής που κάνει χρήση γαλακτώματος νερού – καυσίμου

Στο σχήμα 4.6 συγκρίνονται τις μέσες θερμοκρασίες κυλίνδρου και η έκλυση θερμότητας για διαφορετικές αναλογίες νερού στο καύσιμο. Συγκρίνοντας τις μέσες θερμοκρασίες του κυλίνδρου παρατηρούμε ότι η μέγιστη θερμοκρασία κυλίνδρου είναι σαφώς μικρότερη, καθώς η ποσότητα του νερού αυξάνεται. Αυτός εξηγεί και την μείωση των εκπομπών NOx όσο αυξάνεται η αναλογία νερού στο καύσιμο. Ακόμη η θερμοκρασία του κυλίνδρου είναι χαμηλότερη κατά την διάρκεια της καθυστέρησης έναυσης όσο αυξάνεται η ποσότητα του νερού στο καύσιμο. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμότητα που απαιτείται για την ατμοποίηση του νερού είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η ποσότητα του νερού στο καύσιμο. Η χαμηλότερη θερμοκρασία κυλίνδρου αυξάνει τον χρόνο της καθυστέρησης της έναυσης. Κατά την διάρκεια όλων των δοκιμών, η προπορεία της έγχυσης του καυσίμου παραμένει σταθερή.



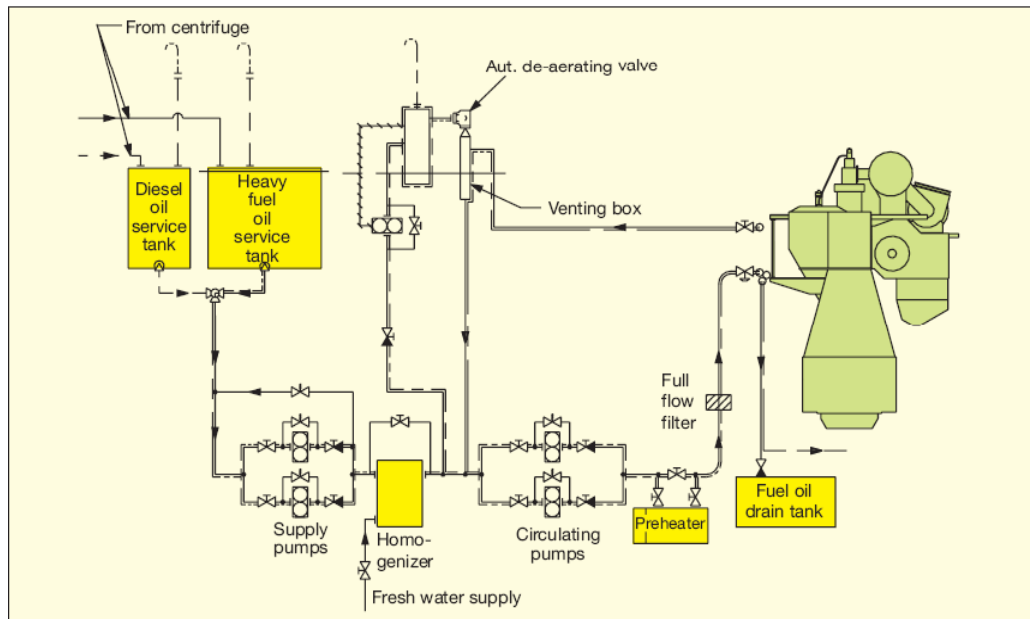
Σχήμα 4.6.: Σύγκριση λειτουργίας μηχανής για διαφορετικές αναλογίες νερού-καυσίμου

Οι θερμοκρασίες που επικρατούν στον κύλινδρο σε όλες τις αναλογίες νερού στο καύσιμο είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις θερμοκρασίες που παρατηρούνται χωρίς την χρήση γαλακτώματος νερού – καυσίμου. Αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά δικαιολογεί και την μικρή μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, αφού η μείωση της θερμοκρασίας καύσης περιορίζει τις απώλειες θερμότητας προς τα τοιχώματα του κυλίνδρου.

Η τεχνολογία του γαλακτώματος νερού - καυσίμου είναι μία ελκυστική μέθοδος για την μείωση των εκπομπών NOx, λόγω της σχετικής απλότητας στην εγκατάσταση και στην λειτουργία. Τα γαλακτώματα και ιδιαίτερα τα μικρο-γαλακτώματα, είναι πολύ αποδοτικά κατευθύνοντας το νερό απευθείας στην ζώνη φλόγας. Συχνά επιτυγχάνεται και μείωση των εκπομπών αιθάλης, ενώ η κατανάλωση καυσίμου δεν επηρεάζεται στις χαμηλές αναλογίες νερού / καυσίμου (έως 30 %). Αντίθετα σε μερικές περιπτώσεις παρατηρείται ακόμη και μείωση αυτής.

Παρόλα αυτά, ο έλεγχος κατά την εισαγωγή του νερού στον κύλινδρο στα συστήματα αυτού του τύπου, αποτελεί το κύριο θέμα που απασχολεί τους μηχανικούς. Μία περίπτωση του νερού που ψεκάζεται

στον κύλινδρο αρκετά νωρίς ή αρκετά αργά κατά την διαδικασία της καύσης, μπορεί να προκαλέσει θερμικές καταπονήσεις, να αυξήσει σημαντικά την καθυστέρηση της έναυσης, συντελώντας σε θορυβώδη λειτουργία ή και καθυστερημένη ή μη ολοκληρωμένη καύση. Το πρόβλημα είναι εντονότερο στα χαμηλά φορτία και στην διάρκεια της εκκίνησης και της παύσης λειτουργίας.



Σχήμα 4.7.: Δίκτυο Πετρελαίου με ομογενοποιητή

4.3.2. Άμεση Έγχυση Νερού στον Θάλαμο Καύσεως

Η μέθοδος αυτή μείωσης των εκπομπών NOx μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

1. Με την απευθείας έγχυση νερού στον θάλαμο καύσης μέσω ξεχωριστού εγχυτήρα
2. Με την έγχυση του νερού και του καυσίμου μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου εγχυτήρα

Και οι δυο αυτές τεχνικές για την εισαγωγή του νερού μέσα στον κύλινδρο βασίζονται στην ίδια αρχή:

Ο ψεκασμός του νερού μέσα στον κύλινδρο κατά την διάρκεια της καύσης μειώνει την μέγιστη θερμοκρασία καύσης, με αποτέλεσμα την μείωση του σχηματισμού NOx.

Το κύριο πλεονέκτημα της απευθείας έγχυσης του νερού στον θάλαμο καύσης μέσω ενός ξεχωριστού εγχυτήρα είναι ότι η ποσότητα και ο χρονισμός της έγχυσης του νερού στον θάλαμο καύσης μπορεί να ποικίλει και να ελέγχεται ξεχωριστά από το καύσιμο, ενώ στην περίπτωση του κοινού εγχυτήρα η ποσότητα του νερού που εγχύεται στον θάλαμο καύσεως μαζί με το καύσιμο μπορεί να ποικίλει αλλά ο χρονισμός του έγχυσης εξαρτάται από την αναλογία νερού / καυσίμου. Γενικώς οι μέθοδοι αυτοί επιτρέπουν την εισαγωγή σημαντικών ποσοτήτων νερού μέσα στο σύστημα, που οδηγούν σε μεγάλες μειώσεις των εκπομπών NOx. Άλλο πλεονέκτημα της απευθείας έγχυσης του νερού μέσα στον θάλαμο καύσης είναι ότι το υγρό νερό μπορεί να εγχυθεί απευθείας στην φλόγα (ζώνη καύσης) πιο αποδοτικά. Τυπικά το νερό εξατμίζεται κατά την έγχυση του, αποτρέποντας την επαφή του υγρού νερού με τα τοιχώματα του κυλίνδρου και δημιουργώντας ένα πιο ομογενές μίγμα αέρα – καυσίμου.

Όπως και με άλλες μεθόδους μείωσης εκπομπών NOx, η μείωση των εκπομπών NOx συνοδεύεται με την αύξηση άλλων εκπομπών όπως πτητικών υδρογονανθράκων και αιθάλης. Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάζει η απευθείας έγχυση του νερού στο θάλαμο καύσης (με μία υψηλή ειδική κατανάλωση νερού), είναι οι αυξημένες απαιτήσεις για χώρο αποθήκευσης του νερού που πρόκειται να εγχυθεί στον κινητήρα και το βάρος αυτού, ιδίως στις περιπτώσεις όπου το σύστημα πρόκειται να εγκατασταθεί σε Ναυτικό Κινητήρα. Πρέπει ακόμη να αναλογιστούμε, ότι παρόλο που το κόστος λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος είναι σχετικά χαμηλό, η επένδυση που απαιτείται για τις απαραίτητες σχεδιαστικές αλλαγές, και την κατάσταση ειδικών εγχυτήρων είναι υψηλό. Ακόμη ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των ειδικών αυτών εγχυτήρων είναι μικρός.

Η παράμετρος που έχει μεγαλύτερη επίδραση στις εκπομπές NOx, από κινητήρες με εγκατεστημένο το σύστημα απευθείας έγχυσης νερού,

είναι η ποσότητα του νερού που εγχύεται. Υπάρχει όμως ένας αριθμός από παραμέτρους που έχουν σημαντική επίδραση όχι μόνο στις εκπομπές NO_x, αλλά και των υδρογονανθράκων και της αιθάλης. Πολλές από αυτές τις μεταβλητές σχετίζονται με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η έγχυση του νερού, όπως ο χρονισμός της έγχυσης και το σημείο που γίνεται η έγχυση του νερού μέσα στον θάλαμο καύσης. Ακόμη το φορτίο που λειτουργεί η μηχανή έχει άμεση επίδραση στις εκπομπές και την λειτουργία της.

- *Αναλογία Νερού / Καυσίμου*

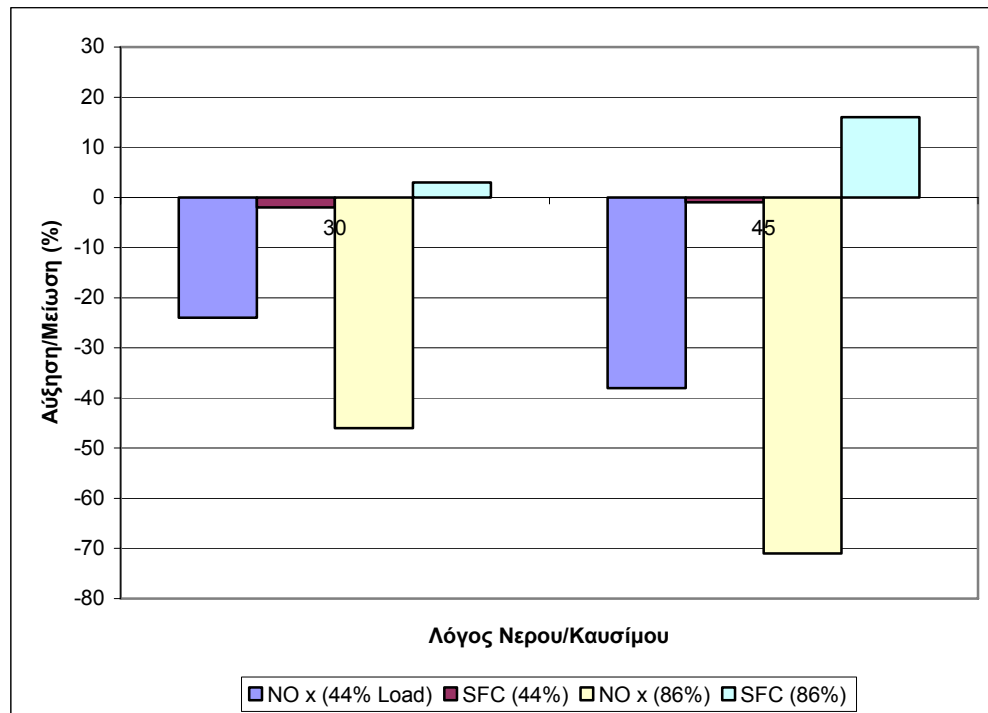
Όπως έχουμε αναφέρει ο σχηματισμός NO_x λαμβάνει χώρα σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Καθοριστικός παράγοντας για την μείωση των εκπομπών NO_x είναι η μείωση των υψηλότερων θερμοκρασιών σε περιοχές όπου εμφανίζονται για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, δηλαδή στην ζώνη της φλόγας. Η έγχυση του νερού γίνεται για την μείωση των θερμοκρασιών του θαλάμου καύσης, μέσω της θερμότητας που απορροφάται για την εξάτμιση.

Η αύξηση της ποσότητας του νερού που εγχύεται στο θάλαμο καύσεως ακολουθείται από σχεδόν ανάλογη μείωση των εκπομπών NO_x. Η σχέση είναι σχεδόν γραμμική καθώς η απευθείας έγχυση νερού επιτρέπει μείωση των εκπομπών NO_x κατά 1% για κάθε 1% αύξησης της αναλογίας νερού / καυσίμου.

Η αύξηση της αναλογίας νερού / καυσίμου όμως μπορεί να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στις εκπομπές των υπολοίπων ρύπων. Καθώς μειώνονται οι εκπομπές NO_x, η μεγάλη ποσότητα νερού προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας σε όλο το χώρο καύσης, που οδηγεί στην αύξηση των ποσοτήτων επικαθήσεων, πτητικών υδρογονανθράκων και αιθάλης.

Από μελέτες που έχουν γίνει για να αναλύσουν την επίδραση της αύξησης της αναλογίας νερού / καυσίμου, σε κινητήρες με σύστημα απευθείας έγχυσης νερού στον θάλαμο καύσης παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται η αναλογία νερού / καυσίμου, οι τιμές των εκπομπών NO_x

μειώνονται, το οποίο παρατηρείται και στα μικρά και στα υψηλά φορτία. Όμως η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται (ή μειώνεται λιγότερο) καθώς αυξάνεται η αναλογία νερού / καυσίμου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8.: Μεταβολή εκπομπών NOx και ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σε διάφορες αναλογίες Νερού / Καυσίμου

- Επίδραση του Χρονισμού Έγχυσης

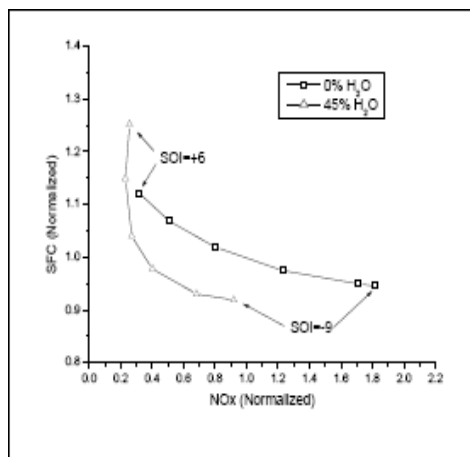
Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της απευθείας έγχυσης του νερού, σε σχέση με την χρήση γαλακτώματος νερού – καυσίμου για την μείωση των εκπομπών NOx, είναι ότι ο χρονισμός έγχυσης του νερού μπορεί να είναι διαφορετικός από αυτόν του καυσίμου.

Όπως έχουμε αναφέρει, ο σχηματισμός των NOx μειώνεται όσο μειώνεται η θερμοκρασία καύσης. Καθώς το νερό εγχύεται στο θάλαμο καύσης, η ζώνη καύσης ψύχεται και έτσι έχουμε μείωση των εκπομπών NOx. Η ψύξη είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον χρονισμό της έγχυσης του νερού. Εάν η έγχυση του νερού γίνεται πολύ νωρίς, τότε όλη η περιοχή του κυλίνδρου ψύχεται και το σύστημα επιτυγχάνει μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών NOx. Όμως είναι πιθανόν να μην γίνεται πλήρης

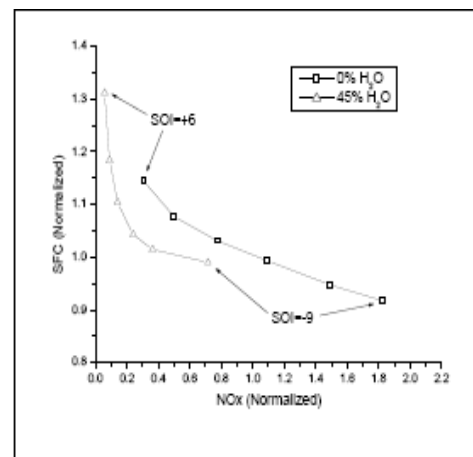
καύση με αποτέλεσμα να αυξηθούν τα επίπεδα εναποθέσεων αιθάλης. Ακόμη εάν η θερμοκρασία μειωθεί αρκετά νωρίς κατά την διαδικασία της καύσης, μπορεί να αυξηθεί η αργοπορία καύσης και του θορύβου που παράγεται κατά την καύση.

Ο χρονισμός είναι σημαντικός για την εξισορρόπηση της επιθυμητής μείωσης των εκπομπών NOx, με μία περιορισμένη αύξηση των άλλων εκπομπών και της κατανάλωσης καυσίμου. Στην ιδανική περίπτωση το νερό θα πρέπει να εγχύεται στο τέλος της φάσης της συμπίεσης ή παράλληλα με το καύσιμο. Αυτό προσφέρει προστασία από την υπερβολική ψύξη και εξασφαλίζει την πλήρη εξάτμιση του νερού, έτσι ώστε να μην επικάθεται αυτό στα τοιχώματα του κυλίνδρου, με αρνητικές συνέπειες για την δομή του.

Κατά την απευθείας έγχυση νερού, η έγχυση γίνεται με την εξής σειρά: καύσιμο – νερό – καύσιμο. Ο χρονισμός της έγχυσης, οπότε και η μείωση των εκπομπών NOx, εξαρτώνται από τον όγκο του καυσίμου που εγχύεται στην πρώτη φάση της καύσης. Η ποσότητα του καυσίμου που θα εγχυθεί καθορίζει αν η έγχυση του νερού έχει γίνει αργά ή νωρίς.



Σχήμα 4.9α



Σχήμα 4.9β

Σχήμα 4.9.: Επίδραση της προπορείας έγχυσης στις εκπομπές NOx και την ειδική κατανάλωση καυσίμου στα φορτία 44% (4.9α.) και 86% (4.9β.) σε αναλογία νερού / καύσιμου 45%

Στο σχήμα 4.9, παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής της προπορείας έγχυσης στον σχηματισμό NOx και την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Η επίδραση αυτή δίνεται μέσω της εξομοίωσης των

εκπομπών NOx και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου για διάφορες γωνίες έγχυσης (-9°, -6°, -3°, 0°, 3° και 6° μετά το ANΣ) και σύγκριση των αποτελεσμάτων με την κατάσταση αναφοράς (έγχυση καυσίμου στις -2° από το ANΣ), για φορτία λειτουργίας 44% και 86% και για αναλογία νερού / καυσίμου 45 %. Κατά την διάρκεια των υπολογισμών αυτών η πίεση έγχυσης, η διάρκεια έγχυσης και οι παράμετροι διασποράς του νερού στον κύλινδρο παραμένουν σταθεροί. Για τα φορτία 44% παρατηρείται αισθητή μείωση των εκπομπών NOx σε όλες τις γωνίες έγχυσης, με ταυτόχρονη μείωση και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, εκτός των περιπτώσεων αργοπορίας εγχύσεως (μετά το ANΣ). Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζει και ο κινητήρας για φορτία λειτουργίας 86% όσον αφορά τις εκπομπές NOx, οι οποίες παρουσιάζουν μείωση σε όλο το εύρος των γωνιών έγχυσης, χωρίς όμως να παρατηρείται και η μείωση της ειδικής κατανάλωσης του καυσίμου που παρατηρείται στα χαμηλότερα φορτία.

- Περιοχή έγχυσης νερού

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο χρονισμός της έγχυσης του νερού είναι πιο αποδοτικός όταν γίνεται παράλληλα με την έγχυση του καυσίμου. Η μείωση των εκπομπών NOx μπορεί να γίνει μεγαλύτερη εάν γίνει προσεκτική επιλογή της θέσης τοποθέτησης των εγχυτήρων. Το νερό μπορεί να εγχύεται στο θάλαμο καύσης είτε από δύο ξεχωριστά ακροφύσια σε ένα κοινό στήριγμα (δίδυμοι οι συνδυασμένοι εγχυτήρες), είτε μέσω του ίδιου ακροφυσίου με αυτό του καυσίμου (στρωματοειδής έγχυση καυσίμου - νερού).

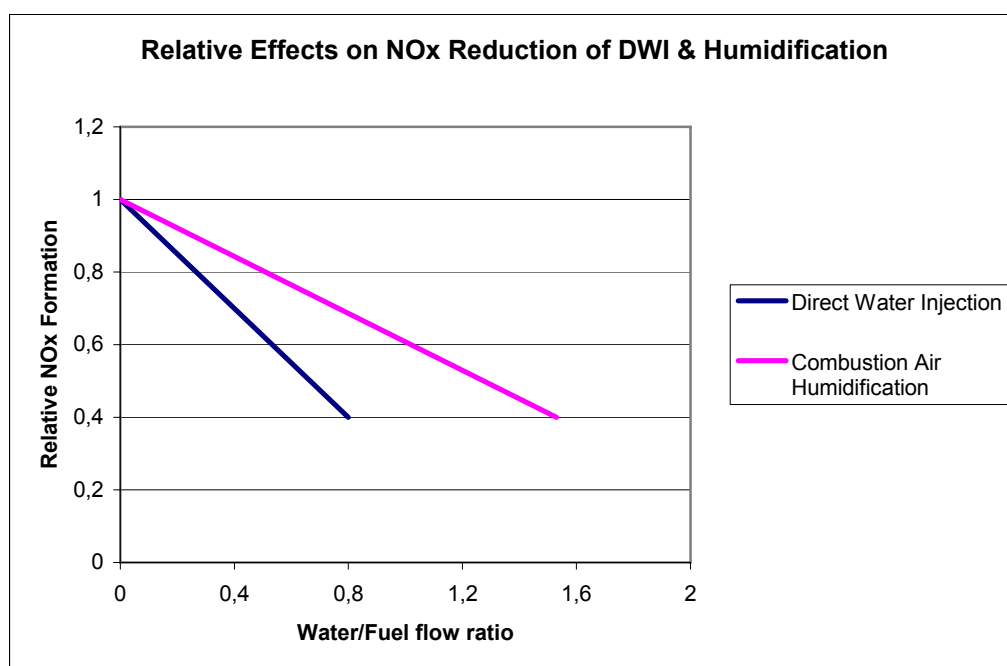
Πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα μας δείχνουν ότι η στρωματοειδής έγχυση είναι πιο αποδοτική όσον αφορά την μείωση των εκπομπών NOx, χωρίς να αυξήσει άλλες επιβλαβείς εκπομπές και την κατανάλωση του καυσίμου. Έχει τα πλεονεκτήματα της μεθόδου του γαλακτώματος νερού – καυσίμου, χωρίς τα μειονεκτήματα στην λειτουργία του κινητήρα όπως καθυστέρηση στην έναυση και κτύπημα κατά την λειτουργία του κινητήρα. Ακόμη είναι εφικτός ο έλεγχος του όγκου του νερού που εγχύεται στον θάλαμο της καύσης. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι

απαιτείται ένα αρκετά δαπανηρό σύστημα ελέγχου και έναν πολύπλοκο εγχυτήρα.

4.3.3. Ύγρανση του Αναρροφόμενου Αέρα

Μία άλλη μέθοδος για την εισαγωγή νερού στον θάλαμο καύσης του κινητήρα είναι και η ύγρανση του αναρροφόμενου αέρα. Οι λόγοι νερού / καυσίμου που μπορούν να επιτευχθούν με την μέθοδο αυτή είναι από 1 έως 3.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10, η μέθοδος της ύγρανσης του αναρροφόμενου αέρα, απαιτεί την διπλάσια ποσότητα νερού, σε σχέση με τις μεθόδους της χρήσης γαλακτώματος νερού – καυσίμου και απευθείας έγχυσης νερού στον θάλαμο καύσης, ώστε να επιτύχει την ίδια μείωση των εκπομπών NOx.



Σχήμα 4.10.: Σύγκριση σχετικής μείωσης εκπομπών NOx μεταξύ της μεθόδου Απευθείας Έγχυσης Καυσίμου και Ύγρανσης του Αναρροφόμενου Αέρα

Για την επιτυχή εφαρμογή του συστήματος αυτού, θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι στο θάλαμο καύσεως εισέρχεται μόνο ατμός νερού και όχι σταγονίδια, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα διάβρωσης

στα χιτώνια των κυλίνδρων. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιτυχή εφαρμογή του συστήματος είναι:

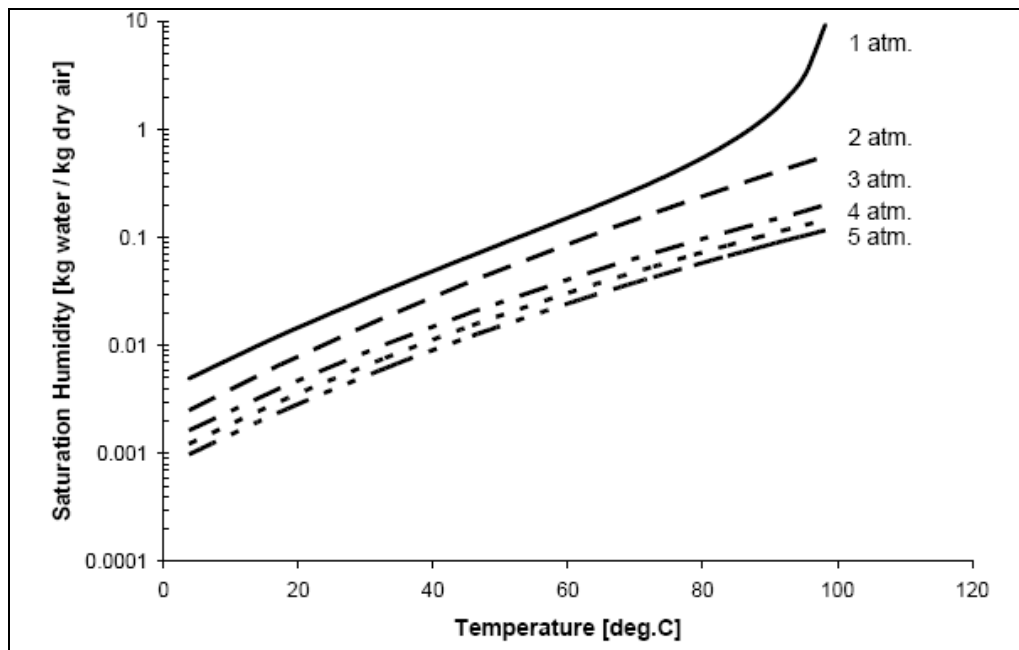
- Η θερμοκρασία από το σημείο που εγχύεται το νερό στο ρεύμα του αέρα μέχρι και το σημείο που ο υγρός πλέον αέρας εισέρχεται στον κύλινδρο
- Το μέγεθος των σταγονιδίων έγχυσης του νερού
- Το σημείο στο οποίο εγχύεται το νερό
- Το φορτίο λειτουργίας του κινητήρα και ο λόγος νερού / καυσίμου

Οι παράμετροι αυτοί είναι αλληλένδετοι μεταξύ τους και κάθε μεταβολή σε μία από αυτές τις παραμέτρους θα επιφέρει αλλαγές στις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, μία αλλαγή στο φορτίο της μηχανής επιφέρει αλλαγές στην πίεση και την θερμοκρασία του αναρροφώμενου αέρα.

Η πίεση και η θερμοκρασία είναι παράγοντες που επιδρούν στην ικανότητα του αέρα να συγκρατήσει νερό. Στο σχήμα 4.10 δίνεται η απόλυτη υγρασία του κορεσμένου αέρα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας σε διαφορετικές πιέσεις. Γενικά, η ποσότητα της υγρασίας που ο αέρας μπορεί να μεταφέρει αυξάνεται εκθετικά με την θερμοκρασία (e^{aT}) και μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την πίεση ($1/P$). Για το εύρος των θερμοκρασιών και των πιέσεων που μας απασχολούν στους κινητήρες Ντίζελ, μία αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C μπορεί να διπλασιάσει την ποσότητα της υγρασίας που μπορεί ο αέρας να συγκρατήσει. Η επίδραση της πίεσης δεν είναι τόσο σημαντική, όσο αυτή της θερμοκρασίας αλλά εξακολουθεί να είναι σημαντική.

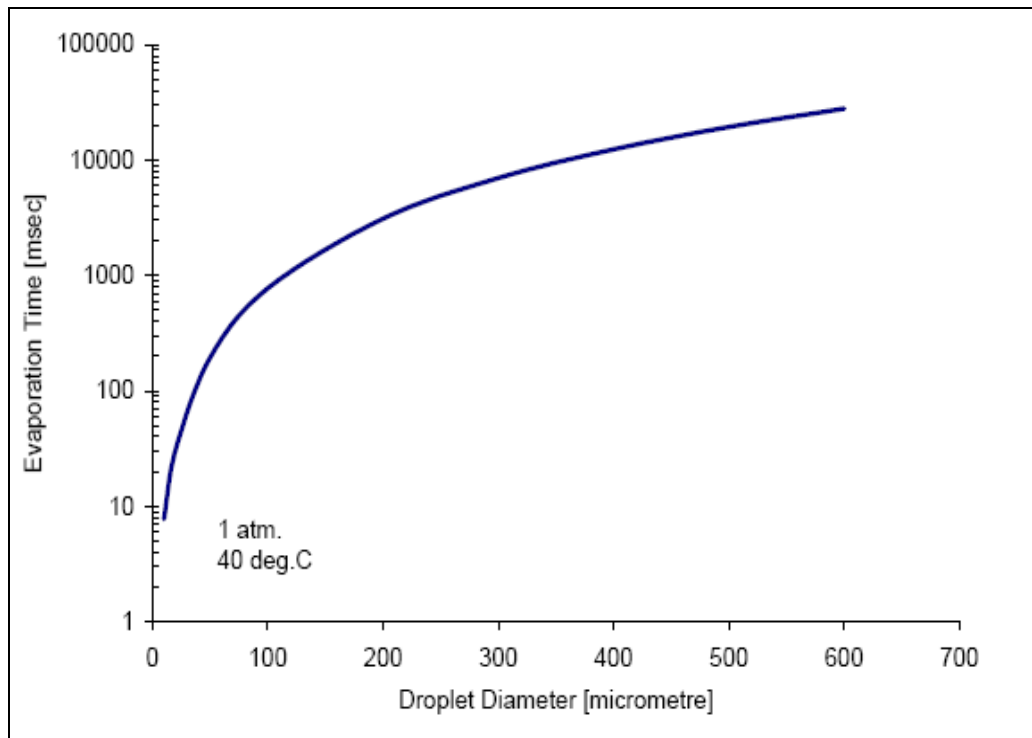
Η ύγρανση του αναρροφώμενου αέρα γίνεται με την έγχυση του νερού και την εξάτμιση των σταγονιδίων του. Σημαντικό ρόλο στον χρόνο που απαιτείται για την εξάτμιση αυτών, έχει η διάμετρος του σταγονιδίου. Ο χρόνος αυτός είναι ανάλογος του τετραγώνου της διαμέτρου του σταγονιδίου. Στο σχήμα 4.11 φαίνεται η μεταβολή του χρόνου εξάτμισης

του σταγονιδίου με την διάμετρο αυτού. Η επιθυμητή διάσταση του σταγονιδίου του νερού εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία του ρεύματος αέρα που επιθυμούμε να υγρανουμε και όσο πιο κοντά στο θάλαμο καύσης βρίσκεται το σημείο έγχυσης του καυσίμου – μικρότερος διαθέσιμος χρόνος για την εξάτμιση του – τόσο πιο σημαντικό είναι να είναι μικρές οι διαστάσεις των σταγονιδίων. Οι τυπικές διαστάσεις των σταγονιδίων είναι 10 – 20 μm .



Σχήμα 4.11.: Απόλυτη υγρασία υγρού αέρα σε κορεσμό

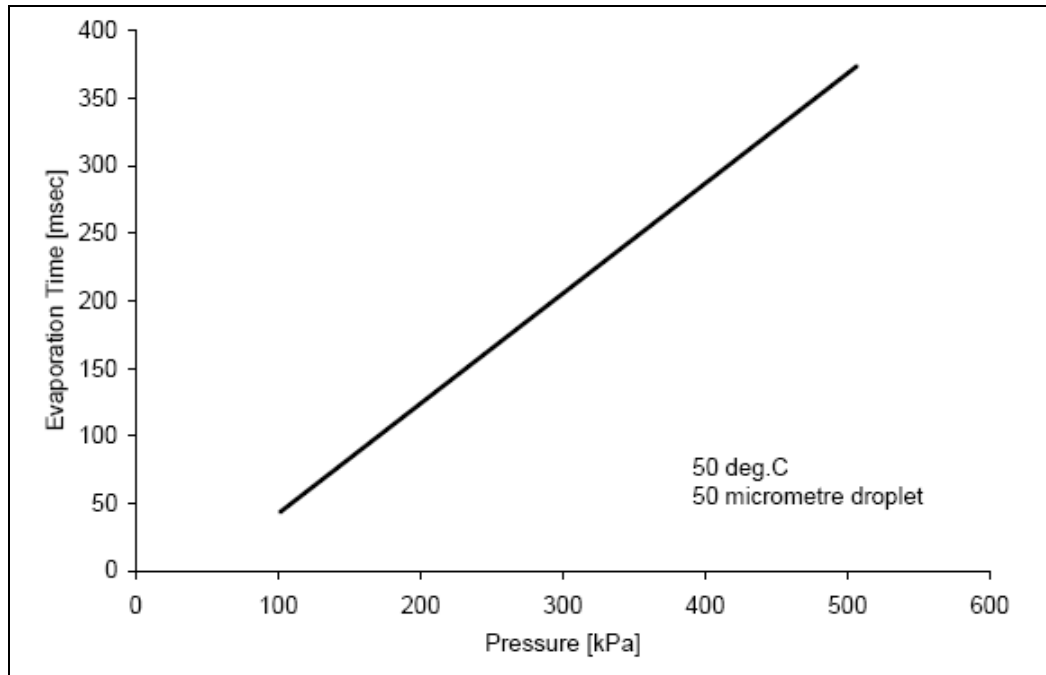
Σημαντική είναι και η επίδραση της πίεσης του ρεύματος αέρα. Στο σχήμα 4.11 φαίνεται η επίδραση της πίεσης του περιβάλλοντος στον χρόνο που απαιτείται για ένα σταγονίδιο διαμέτρου 50 μm και θερμοκρασίας 50°C για να εξατμιστεί. Παρατηρούμε ότι ο απαιτούμενος χρόνος για την εξάτμιση του σταγονιδίου αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της πίεσης.



Σχήμα 4.12.: Επίδραση της διαμέτρου σταγονιδίου στον χρόνο εξάτμισης του

Η θέση η οποία επιλέγεται ώστε να γίνει η έγχυση του νερού στον αναρροφώμενο αέρα καθορίζεται από δύο κριτήρια: την μέγιστη δυνατή ποσότητα που μπορεί να προστεθεί στον αέρα και την επίτευξη της πλήρους εξάτμισης των σταγονιδίων του νερού πριν ο αέρα εισέλθει στον κύλινδρο. Η έγχυση του νερού μπορεί να γίνει στις τρεις ακόλουθες θέσεις:

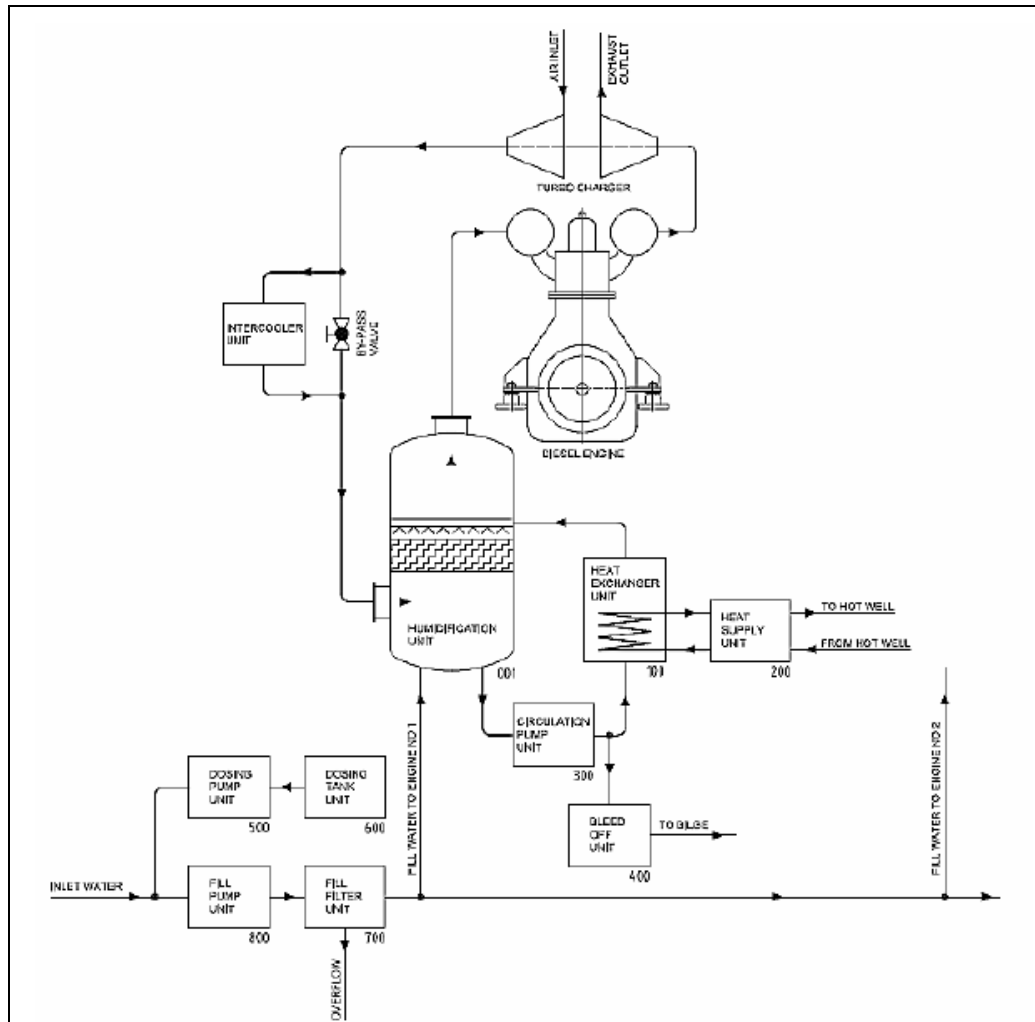
- Πριν τον συμπιεστή: Με την τοποθέτηση του εγχυτήρα του νερού πριν από τον συμπιεστή του υπερπληρωτή, αποφεύγουμε την λειτουργία αυτού σε περιβάλλον υψηλής πίεσης. Στην περίπτωση που ο αέρας δεν προθερμαίνεται πριν την είσοδο του στον συμπιεστή, η θερμοκρασία του αέρα είναι χαμηλή και παρόλο που αντισταθμίζεται μερικώς από την χαμηλή πίεση, δεν βοηθάει στην επίτευξη επαρκούς εξάτμισης του νερού, που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην λειτουργία του συμπιεστή. Η μέθοδος αυτή μας δίνει το πλεονέκτημα του μεγαλύτερου χρόνου παραμονής του νερού με τον αέρα και συνεπώς καλύτερη ανάμειξη τους, για την ομοιόμορφη κατανομή των ατμών νερού σε όλους τους κυλίνδρους.



Σχήμα 4.13.: Επίδραση της πίεσης περιβάλλοντος στον χρόνο εξάτμισης σταγονιδίου (σταγονίδιο 50 μm στους 50°C)

- Μετά τον συμπίεσή και πριν από το ψυγείο σάρωσης: Η θερμοκρασία του αέρα στο σημείο αυτό είναι συνήθως πάνω από τους 100°C και πολλές φορές, πάνω από το σημείο βρασμού του νερού. Αυτό βοηθάει στην τέλεια ατμοποίηση των σταγονιδίων. Η διαδικασία της ύγρανσης του αέρα βοηθάει την ψύξη του και κάνει δυνατή ή και επιθυμητή την μείωση της ροής του ψυκτικού μέσου από το ψυγείο σάρωσης. Σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατή και η πλήρης κατάργηση του ψυγείου εισαγωγής, καθώς η εξάτμιση του νερού μπορεί να διατηρήσει την θερμοκρασία του αέρα στα επιθυμητά για την σωστή λειτουργία του κινητήρα επίπεδα.
- Μετά το ψυγείο σάρωσης: Αυτή δεν είναι και η καλύτερη θέση καθώς η θερμοκρασία του αέρα έχει ήδη μειωθεί από το ψυγείο σάρωσης, με συνέπεια να έχει μειωθεί η δυνατότητα ύγρανσης του αέρα. Η εισαγωγή νερού στο ρεύμα αέρα μειώνει ακόμη περισσότερο την θερμοκρασία του μειώνοντας την δυνατότητα του για την μεταφορά υγρασίας. Το δεύτερο πρόβλημα είναι ότι λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας, η εξάτμιση των σταγονιδίων διαρκεί περισσότερο χρόνο αλλά και η

διαδρομή μέχρι την εισαγωγή στους κυλίνδρους του κινητήρα είναι πολύ μικρότερη, μειώνοντας δραματικά τον διαθέσιμο χρόνο για την ατμοποίηση των σταγονιδίων.



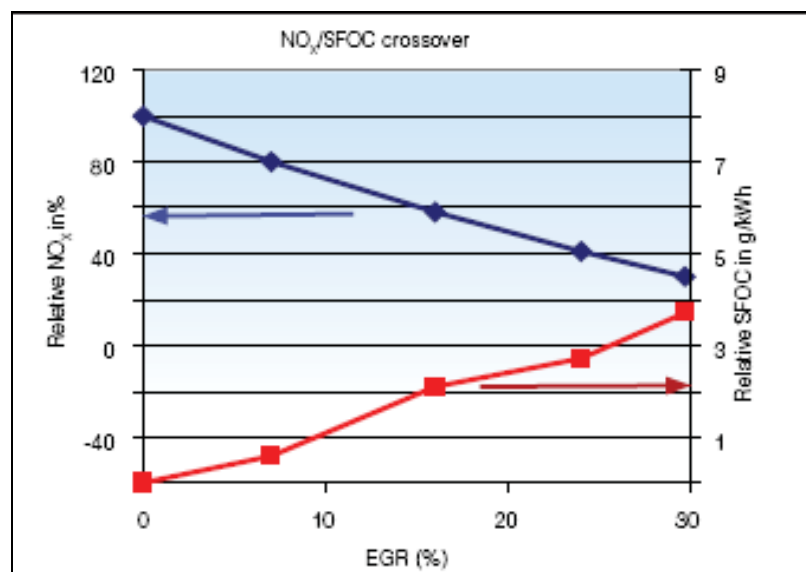
Σχήμα 4.14.: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος ύγρανσης του αναρροφώμενου αέρα

Σε εργασία που πραγματοποιήθηκε στο Lulea University of Technology της Σουηδίας, σε έναν κινητήρα Ντίζελ με εγκατεστημένο το σύστημα ύγρανσης του αναρροφώμενου αέρα, παρατηρήθηκε αύξηση των εκπομπών αιθάλης σε ποσοστό από 46% έως 148%, σε όλα τα φορτία της λειτουργίας του κινητήρα. Ακόμη παρατηρήθηκε αύξηση στις εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων, στις εκπομπές CO και στην ειδική κατανάλωση καυσίμου, ως αποτέλεσμα της μείωσης της μέγιστης θερμοκρασίας και της επιβράδυνσης της διαδικασίας καύσης.

4.4. Ανακυκλοφορία Καυσαερίων

Η ανακυκλοφορία των καυσαερίων λειτουργεί με την ανακυκλοφορία ενός μέρους των καυσαερίων στους κυλίνδρους του κινητήρα. Με την ανάμιξη του εισερχόμενου αέρα με τα ανακυκλοφορούντα καυσαέρια, προκύπτει ένα μίγμα με αδρανές αέριο, το οποίο μειώνει την αδιαβατική θερμοκρασία της φλόγας και την ποσότητα της περίσσειας οξυγόνου. Ακόμη τα καυσαέρια ακόμη αυξάνουν την ειδική θερμοχωρητικότητα του μίγματος μειώνοντας την μέγιστη θερμοκρασία καύσης.

Η ανακυκλοφορία των καυσαερίων χρησιμοποιείται κατά κόρον στους μικρούς κινητήρες Ντίζελ. Στους μεγάλους κινητήρες Ντίζελ και δη στους ναυτικούς κινητήρες δεν έχει χρησιμοποιηθεί. Μεγαλύτερο πρόβλημα αποτελεί ο κίνδυνος φθορών που μπορεί να προκληθούν στο σύστημα υπερπλήρωσης λόγω του καυσαερίου που ανακυκλοφορεί.



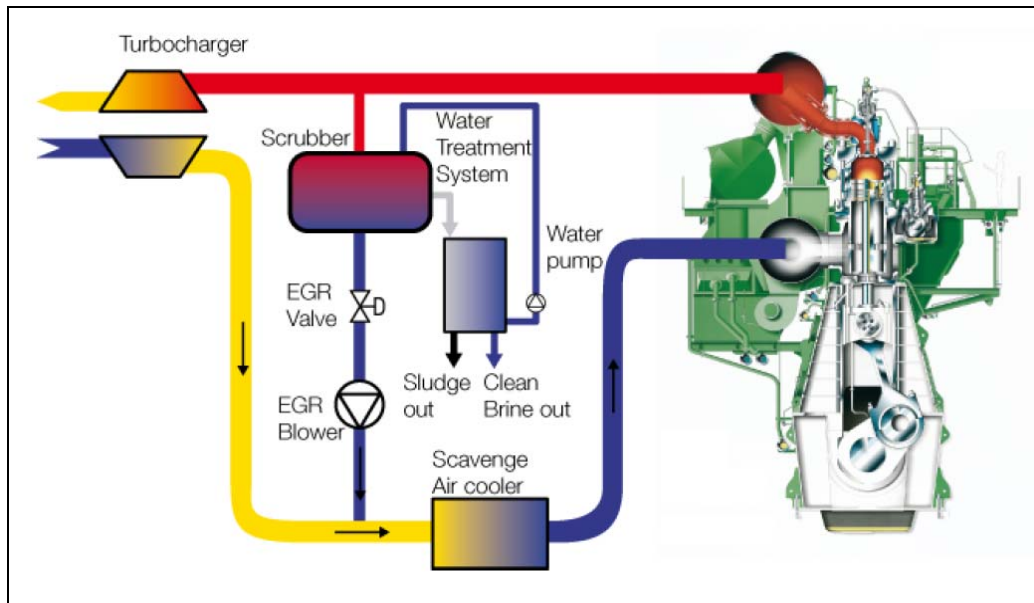
Σχήμα 4.15.: Σχέση μεταξύ μείωσης εκπομπών NO_x και της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου με την χρήση EGR

4.4.1 Η ανακυκλοφορία των καυσαερίων στους κινητήρες Ντίζελ

Στους κινητήρες Ντίζελ, τα ανακυκλοφορώντα καυσαέρια ψύχονται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας για να επιτρέψει την μεγαλύτερη εισαγωγή μάζας ανακυκλοφορούμενου καυσαερίου. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι κινητήρες Ντίζελ λειτουργούν πάντα με περίσσεια αέρα, με λόγους ανακυκλοφορίας έως και 30%, επιτυγχάνεται

μείωση των εκπομπών NOx έως και 70%, σε σχέση με τις κανονικές εκπομπές του κινητήρα όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.15.

Όμως η ανακυκλοφορία των καυσαερίων στον κινητήρα Ντίζελ έχει και μειονεκτήματα. Η ανακυκλοφορία του καυσαερίου αυξάνει την διάρκεια της καύσης, γεγονός που έχει ιδιαίτερα αρνητική επίδραση στις εκπομπές αιθάλης.



Σχήμα 4.16.: Σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων σε κινητήρα MAN B&W

Οι αυστηρότεροι περιορισμοί που αφορούν τις εκπομπές σωματιδίων, κάνουν επιτακτική την ανάγκη για επιπλέον έλεγχο των εκπομπών από τους κινητήρες στους οποίους εφαρμόζεται η τεχνολογία της ανακυκλοφορίας καυσαερίων. Το πιο κοινό σύστημα για τον περιορισμό αυτών των εκπομπών σωματιδίων είναι, ξεχωριστά φίλτρα στο σύστημα του καυσαερίου, που έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης του κινητήρα. Ακόμη λόγω των αυξημένων εκπομπών αιθάλης, τα φίλτρα θα φράζουν συχνά, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της απόδοσης του κινητήρα. Για να προστατέψουν τα φίλτρα από το φράξιμο, οι κατασκευαστές τέτοιων συστημάτων προσανατολίζονται στην καύση των σωματιδίων με την τροφοδοσία αέρα και καυσίμου απευθείας στο σύστημα των καυσαερίων.

4.5. Καταλυτική Μείωση Εκπομπών των Οξειδίων του Αζώτου

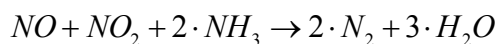
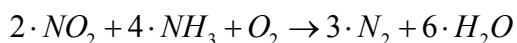
Η καταλυτική μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου (Selective Catalytic Reduction, SCR) είναι ένα μέσο μετατροπής των οξειδίων του αζώτου, με την βοήθεια ενός καταλύτη, σε δυατομικό άζωτο N_2 και νερό H_2O . Ένα αέριο μέσο αναγωγής, συνήθως Άνυδρη Αμμωνία, Ένυδρη Αμμωνία ή Ουρία, προστίθεται στο ρεύμα του ρευστού και απορροφάται στον καταλύτη.

Η καταλυτική μείωση εκπομπών των οξειδίων του αζώτου, με την χρήση της αμμωνίας ως αναγωγικό μέσο κατοχυρώθηκε ως ευρεσιτεχνία στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής από την εταιρεία Englehard Corporation το 1957. Η εξέλιξη της τεχνολογίας της καταλυτικής μείωσης των εκπομπών NO_x , συνεχίστηκε στην Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες στις αρχές της δεκαετίας του '60, με κύριο σκοπό την χρήση πιο οικονομικών και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μέσων αναγωγής. Η πρώτη μεγάλου εύρους εφαρμογή πραγματοποιήθηκε από την IHI Corporation το 1978.

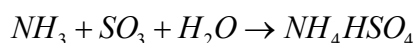
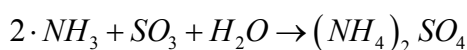
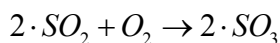
Η καταλυτική μείωση εκπομπών των οξειδίων του αζώτου χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλες εφαρμογές λεβήτων, βιομηχανικούς λέβητες και σε λέβητες αποτέφρωσης απορριμμάτων, όπου έχει παρατηρηθεί μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου από 70% έως και 95%. Οι πιο πρόσφατες εφαρμογές περιλαμβάνουν μεγάλους κινητήρες Ντίζελ οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε μεγάλα εμπορικά πλοία, τρένα κινούμενα με κινητήρες Ντίζελ, αεριοστροβίλους ακόμη και σε αυτοκίνητα.

4.5.1. Η Αντίδραση Αναγωγής

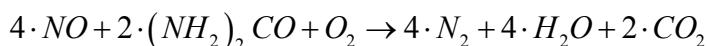
Η αναγωγή των οξειδίων του αζώτου λαμβάνει χώρα καθώς τα αέρια περνούν από τον θάλαμο του καταλύτη. Πριν την είσοδο στον θάλαμο του καταλύτη, η αμμωνία ή η ουρία, ψεκάζεται και αναμειγνύεται με τα καυσαέρια. Η χημική εξίσωση για την στοιχειομετρική αντίδραση, χρησιμοποιώντας είτε ένυδρη ή άνυδρη αμμωνία είναι η εξής:



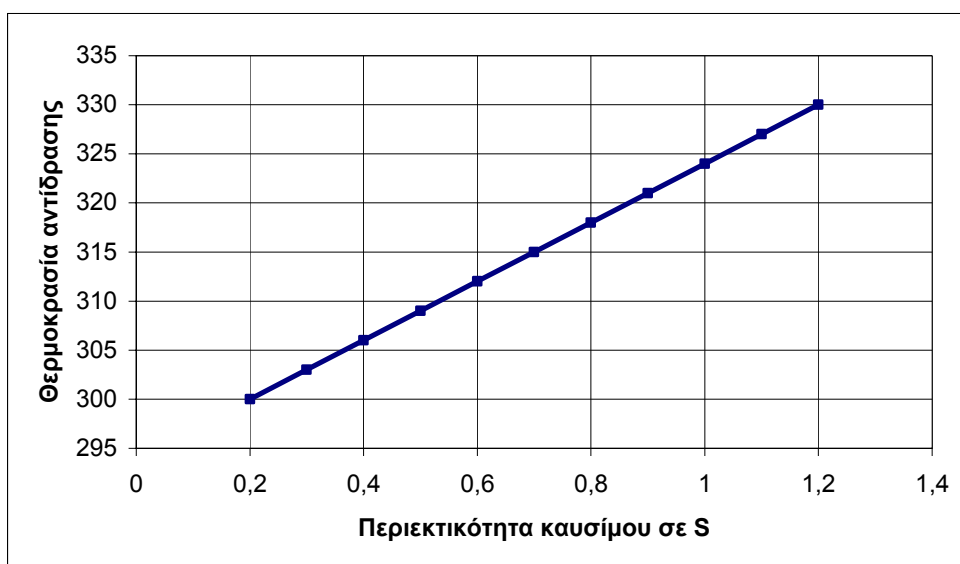
ενώ λαμβάνουν χώρα και οι παρακάτω δευτερεύουσες αντιδράσεις:



Η αντίδραση της Ουρίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά αντί της ένυδρης ή άνυδρης αμμωνίας είναι η εξής:



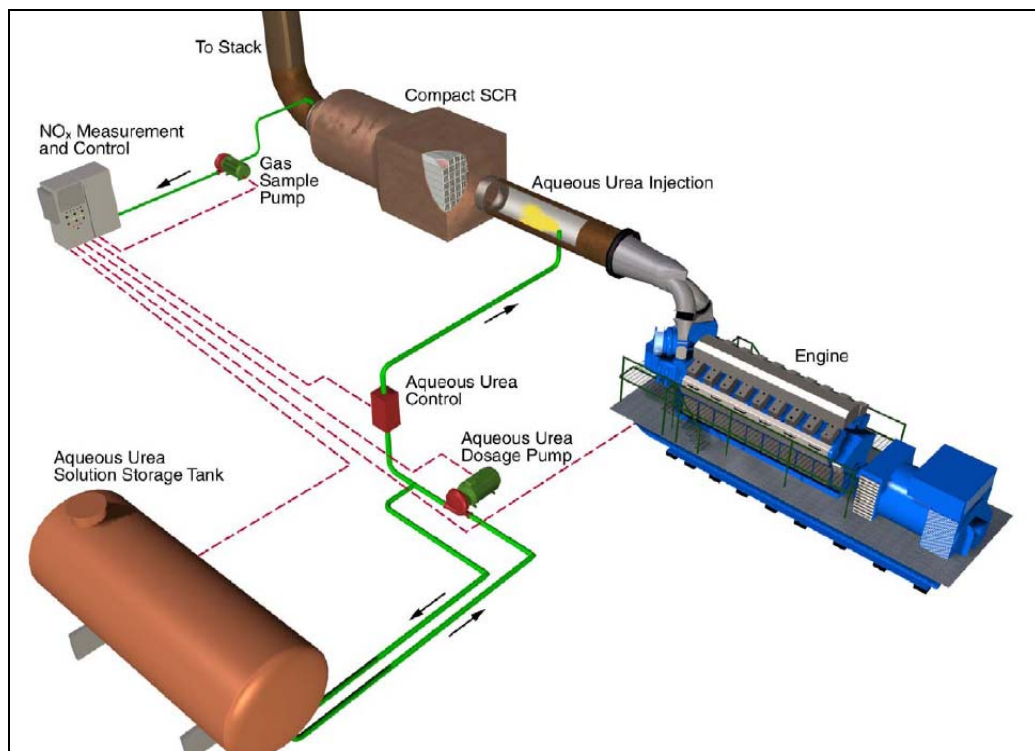
Το ιδανικό εύρος θερμοκρασιών για την αναγωγή του Μονοξειδίου του Αζώτου είναι από 360°C έως 450°C, αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί και από την θερμοκρασία των 230°C, όπου απαιτείται όμως μεγαλύτερος χρόνος παραμονής μέσα στον καταλύτη.



Σχήμα 4.17.: Θερμοκρασία αντίδρασης ως συνάρτηση της περιεκτικότητας σε S

Ακόμη τα επίπεδα της θερμοκρασίας μέσα στα οποία μπορούν να λάβουν χώρα οι αντιδράσεις της αναγωγής του NOx, εξαρτώνται άμεσα από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε S (Σχήμα 4.17). Η αυξημένη

περιεκτικότητα του καυσίμου σε S, αυξάνει την απαιτούμενη θερμοκρασία για την αποδοτική αναγωγή των οξειδίων του αζώτου. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις όπου η τεχνολογία SCR δεν μπορεί να επιτύχει τους απαιτούμενους ρυθμούς μετατροπής ή η αναθέρμανση του καυσαερίου θα είναι επιβεβλημένη για να επιτύχουμε τους ίδιους ρυθμούς μετατροπής όπως με ένα καύσιμο με χαμηλή περιεκτικότητα σε S. Η μείωση στην απόδοση της εγκατάστασης SCR, αυξάνει την κατανάλωση της αμμωνίας ή της ουρίας και μειώνει σημαντικά την διάρκεια ζωής του καταλύτη.



Σχήμα 4.18.: Σχηματική διάταξη εγκατάστασης καταλυτικής μείωσης εκπομπών

4.5.2. Οι Καταλύτες των Συστημάτων SCR

Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται για την καταλυτική μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου, κατασκευάζονται από διάφορα κεραμικά υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται ως φορείς, όπως το οξείδιο του Τιτανίου και ενεργά καταλυτικά υλικά που συνήθως είναι άλλα οξείδια βασικών μετάλλων (όπως το Βανάδιο και Βολφράμιο), ζεόλιθοι

και διάφορα πολύτιμα μέταλλα. Όλα τα καταλυτικά υλικά έχουν τα πλεονεκτήματα τους και τα μειονεκτήματα τους.

Οι καταλύτες βασικών μετάλλων, όπως το Βανάδιο και το Βολφράμιο, δεν έχουν μεγάλη θερμική αντοχή, αλλά κοστίζουν λιγότερο και λειτουργούν αρκετά καλύτερα στο εύρος των θερμοκρασιών που κυρίως παρουσιάζονται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις λεβήτων. Ένα ακόμη μειονέκτημα τους είναι ότι λειτουργούν ως καταλύτες κατά την οξείδωση του SO_2 σε SO_3 , το οποίο μπορεί να γίνει καταστροφικό αν αναλογιστεί κανείς τις οξειδωτικές του ιδιότητες.

Οι Ζεολιθικοί καταλύτες έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν σε αισθητά μεγαλύτερες θερμοκρασίες από αυτές που λειτουργούν οι καταλύτες βασικών μετάλλων, καθώς μπορούν να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα σε θερμοκρασίες της τάξης των 650°C και αντέχουν σε αιφνίδιες μεταβολές της θερμοκρασίας μέχρι και στους 850°C . Ακόμη οι Ζεολιθικοί καταλύτες δεν παρουσιάζουν τόσο έντονη την δυνατότητα να οξειδώνουν το SO_2 .

Πρόσφατα αναπτύχθηκαν καταλύτες από Σίδηρο και Χαλκό οι οποίοι αντικατέστησαν τους καταλύτες Ζεόλιθου-Ουρίας, και παρουσιάζουν τις ίδιες περίπου επιδόσεις με τους καταλύτες Βαναδίου-Ουρίας, εφόσον η περιεκτικότητα του NO_2 είναι από 20% έως 50% από τα συνολικά οξείδια του αζώτου.

Οι δύο από τις πιο κοινές γεωμετρίες σχεδίασης SCR καταλυτών που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η κυψελοειδής και ελασμάτων. Ο κυψελοειδής τύπος είναι ένα προεξέχον κεραμικό το οποίο εφαρμόζεται στον κεραμικό φορέα ή επιχρίεται στο υπόστρωμα. Όπως οι διάφοροι τύποι καταλυτών έτσι και οι διαφορετικές γεωμετρίες έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους. Οι καταλύτες με γεωμετρία ελασμάτων παρουσιάζουν μικρότερη πτώση πίεσης και είναι λιγότερο ευπαθείς στις επικαθίσεις και στην διάβρωση, αλλά είναι πολύ μεγαλύτεροι σε μέγεθος και πολύ πιο δαπανηροί από τους κυψελοειδείς. Από την άλλη πλευρά οι κυψελοειδείς καταλύτες είναι σαφώς

μικρότεροι σε μέγεθος αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερη πτώση πίεσης και φράζουν πολύ πιο εύκολα.

4.5.3. Αναγωγικά μέσα

Τα αναγωγικά μέσα που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές SCR, είναι συνήθως η άνυδρη και ένυδρη αμμωνία ή η ουρία. Και τα τρία αυτά αναγωγικά μέσα είναι διαθέσιμα σε μεγάλες ποσότητες.

Η καθαρή άνυδρη αμμωνία είναι πολύ τοξική και είναι πολύ δύσκολη η ασφαλής αποθήκευση της, αλλά δεν χρειάζεται καμία μετατροπή ώστε να χρησιμοποιηθεί σε μία εφαρμογή SCR. Από την στιγμή που δεν χρειάζεται καμία μετατροπή για να χρησιμοποιηθεί, είναι το αναγωγικό μέσο που χρησιμοποιείτε από τους μεγάλους βιομηχανικούς χρήστες.

Η ένυδρη αμμωνία πρέπει να υδρολυθεί για να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις SCR αλλά είναι πιο ασφαλής η αποθήκευση και η μεταφορά της, σε σχέση με την άνυδρη αμμωνία.

Η ουρία είναι ακόμη πιο εύκολη στην αποθήκευση της αλλά απαιτείται η μετατροπή της σε αμμωνία, μέσω μίας θερμικής διεργασίας, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί ως αναγωγικό μέσο. Λόγω της υψηλής ασφάλειας που μας παρέχει σε σχέση με τα υπόλοιπα αναγωγικά μέσα, προτιμάται πλέον για χρήση σε επιβατηγά οχήματα, σταθμούς παραγωγής ενέργειας, αλλά και στις περιορισμένες έως τώρα εφαρμογές σε Ναυτικούς Κινητήρες.

5. Συσχετισμός Εκπομπών NOx με την Λειτουργική Κατάσταση του Κινητήρα – Προσδιορισμός Λειτουργικής Συμπεριφοράς

Για να δοθεί μία εικόνα του προβλήματος των εκπομπών NOx κινητήρων Ντίζελ μεγάλου μεγέθους, στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια αξιολόγησης των εκπομπών NOx ενός 2-X κινητήρα που χρησιμοποιείται στην Ηλεκτροπαραγωγή. Για τον σκοπό αυτό μετρήθηκαν οι εκπομπές NOx αυτής και στην συνέχεια προσδιορίσθηκε η λειτουργική κατάσταση προκειμένου να συσχετιστεί αυτή με τις εκπομπές. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού ελήφθησαν παράλληλα μετρήσεις εκπομπών ρύπων και λειτουργικής συμπεριφοράς, με έμφαση στα δυναμοδεικτικά διαγράμματα πίεσης.

5.1. Περιγραφή της Διαδικασίας

Στην συνέχεια της εργασίας αυτής γίνεται ο προσδιορισμός της κατάστασης 2-X κινητήρα CEGIELSKI 9RTA 58F εγκατεστημένου στον Α.Η.Σ. Σορώνης Ρόδου. Οι μετρήσεις των οποίων τα αποτελέσματα θα αξιολογηθούν είναι οι εξής:

Πίνακας 5.1.: Μετρήσεις για τον προσδιορισμό της λειτουργικής συμπεριφοράς

α/α	Ονομαστικό Φορτίο MW	Πραγματικό Φορτίο MW
1	6.0	6.2
2	9.5	10.4
3	8.0	8.4

Στη δεύτερη στήλη δίνετε το ονομαστικό φορτίο στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις, ενώ στην τρίτη στήλη το πραγματικό φορτίο όπως αυτό προέκυψε από το διαγνωστικό σύστημα. Το φορτίο αυτό αναφέρεται σε ηλεκτρική ισχύ και όχι ισχύ κινητήρα. Η ισχύς του κινητήρα προκύπτει θεωρώντας βαθμό απόδοσης γεννήτριας ίσο προς 95%.

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, όπως αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα, καταγράφηκαν τα ακόλουθα μεγέθη:

- Δυναμοδεικτικά διαγράμματα πιέσεων
- Η Πίεση Σαρώσεως
- Η Θερμοκρασία του Αέρα Προ και Μετά τα Ψυγεία Αέρα

- Θερμοκρασία Καυσαερίων των Κυλίνδρων
- Θερμοκρασία του Καυσαερίου Πριν και Μετά τον Στρόβιλο
- Ταχύτητα Περιστροφής των Στροβίλων
- Πτώση Πίεσης των Ψυγείων Αέρα

Για την ανάλυση των μετρήσεων γίνεται μέσω της χρήσης του διαγνωστικού συστήματος που ανεπτύχθη στο ΕΜΠ για λογαριασμό του Α.Η.Σ. Σορωνής Ρόδου.

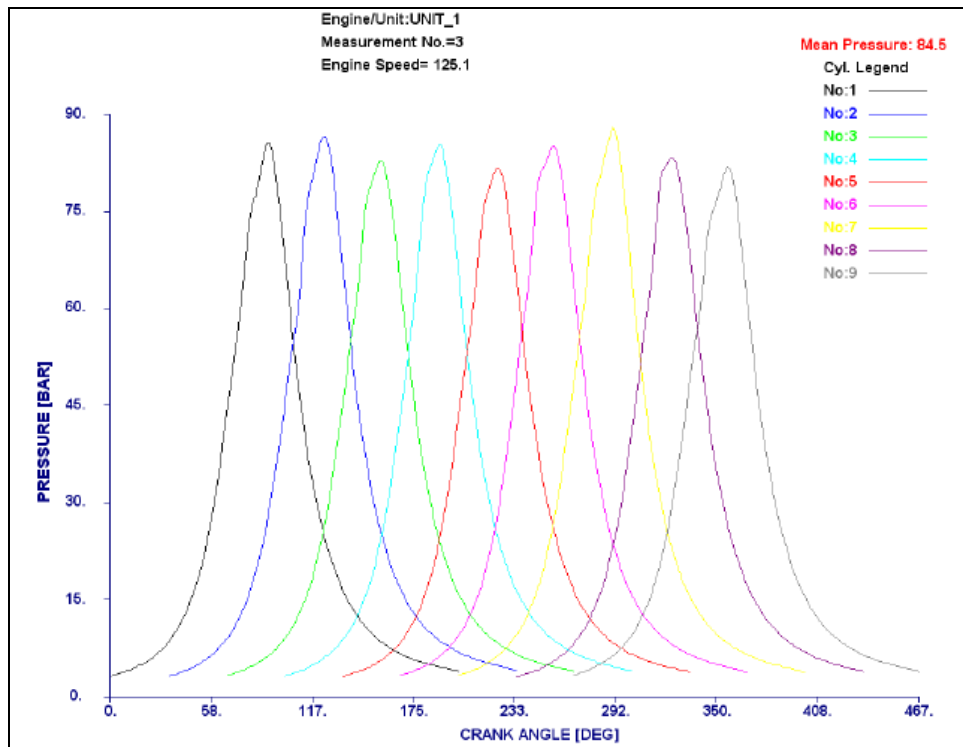
Από την ανάλυση των μεγεθών αυτών, μέσω του διαγνωστικού συστήματος, παρουσιάζεται η κατάσταση των κύριων υποσυστημάτων του κινητήρα. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις για τον προσδιορισμό της κατάστασης του κινητήρα, ελήφθησαν και μετρήσεις των εκπομπών NO_x.

5.2. Αποτελέσματα Διαγνώσεως - Λειτουργική Κατάσταση Μονάδας

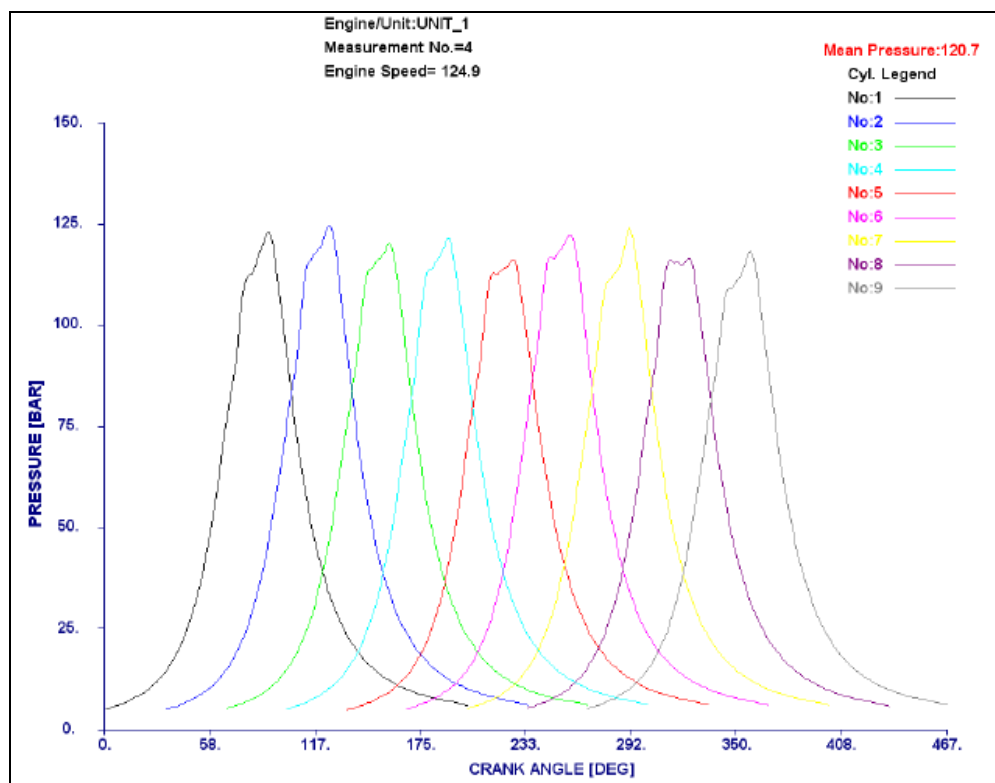
5.2.1. Διαγράμματα Πίεσεως

Στα σχήματα 5.1 έως 5.3 δίνονται τα δυναμοδεικτικά διαγράμματα όλων των κυλίνδρων του κινητήρα για τα φορτία των μετρήσεων 1, 2 και 3 όπως αυτές αναφέρονται στον σχετικό πίνακα, όπως παρουσιάζονται στο διαγνωστικό σύστημα, χωρίς την αναφορά γωνίας στροφάλου.

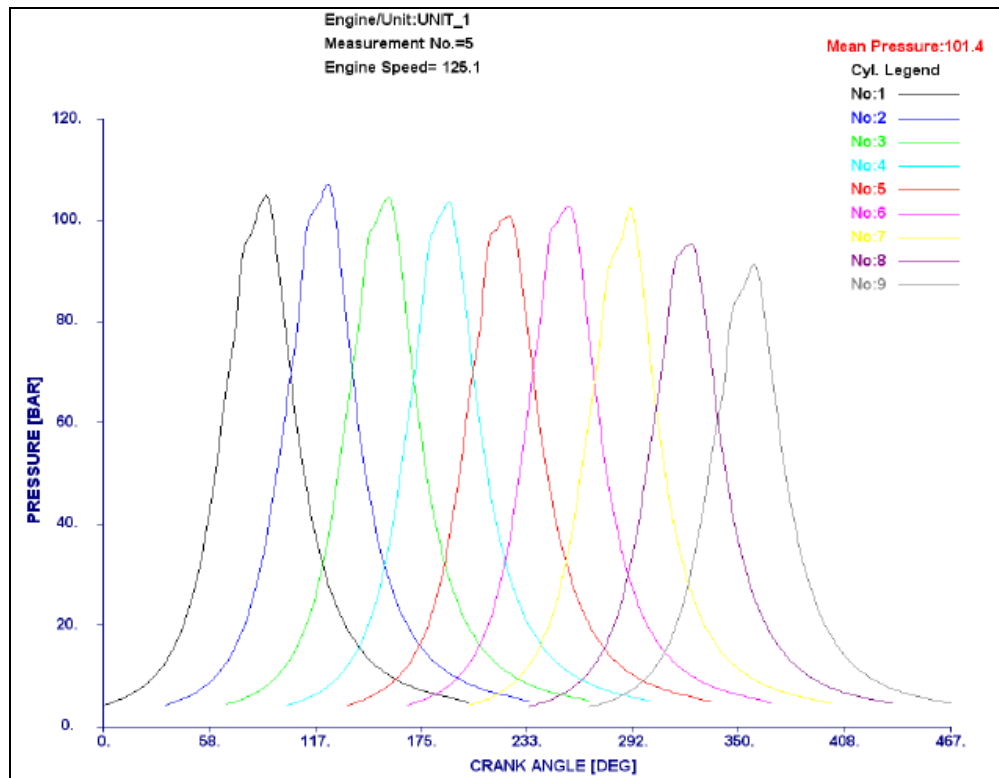
Παρατηρούμε ότι παρουσιάζονται διακυμάνσεις μεταξύ των κυλίνδρων της τα αίτια των οποίων θα αναλύσουμε στην συνέχεια, καθώς τα σχήματα αυτά παρέχουν μόνο μία γενική εικόνα για την κατάσταση του κινητήρα.



Σχήμα 5.1.: Δυναμοδεικτικά διαγράμματα Κινητήρα – Μέτρηση 1



Σχήμα 5.2.: Δυναμοδεικτικά διαγράμματα Κινητήρα – Μέτρηση 2

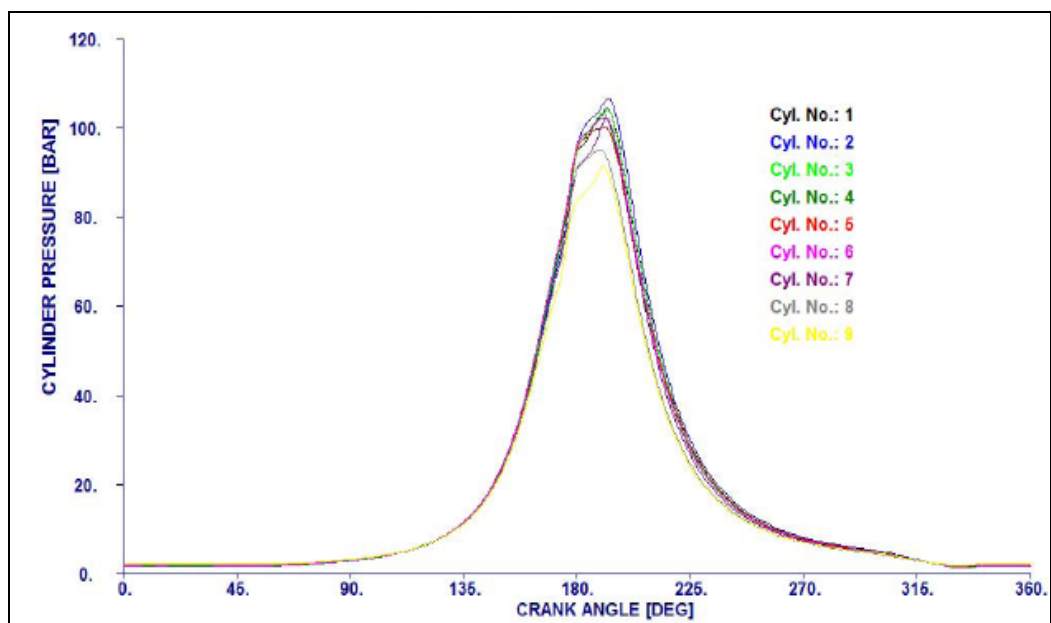


Σχήμα 5.3.: Δυναμοδεικτικά διαγράμματα Κινητήρα – Μέτρηση 3

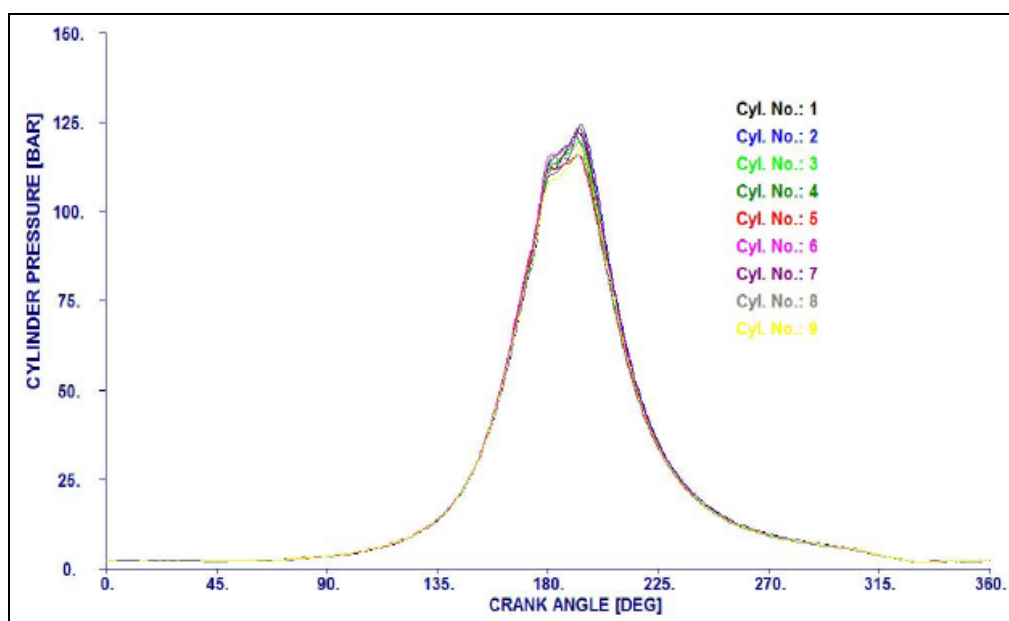
5.2.2. Δυναμοδεικτικά Διαγράμματα Πίεσης - Γωνίας Στροφάλου

Στα σχήματα 5.4 έως 5.6 δίνονται τα αντίστοιχα δυναμοδεικτικά διαγράμματα πίεσης - γωνίας στροφάλου του κινητήρα, για τα φορτία των μετρήσεων 1, 2 και 3 όπως αυτές αναφέρονται στον σχετικό πίνακα.

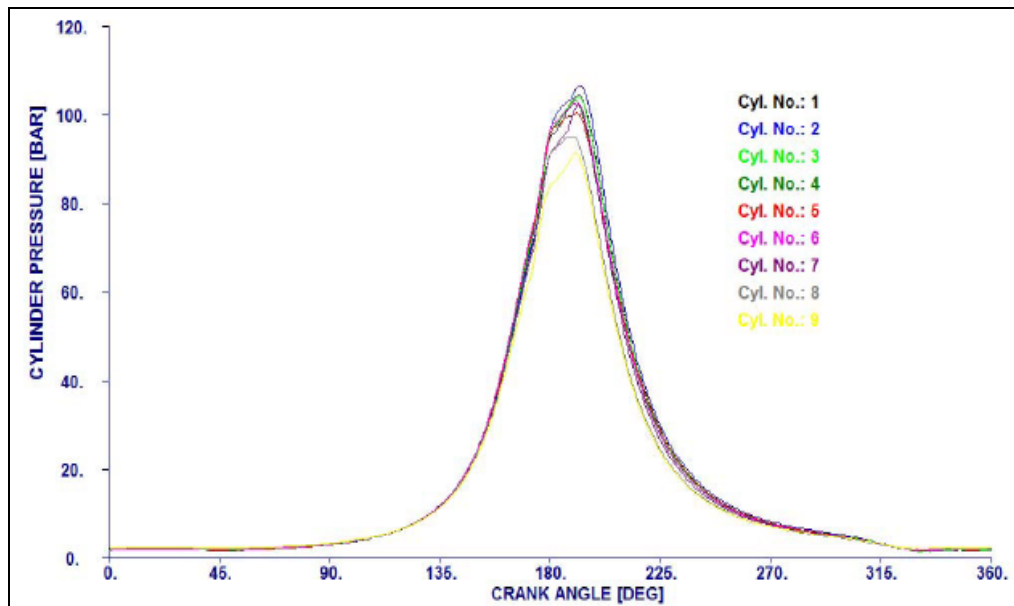
Στα σχήματα αυτά παρατηρούμε διακυμάνσεις της πίεσης καύσης, τα αίτια της οποίας θα διευκρινιστούν στην συνέχεια. Παράλληλα παρατηρείται και διακύμανση του μηχανισμού καύσης των κυλίνδρων No.5 και No.8 η οποία είναι πιο εμφανής στα υψηλά φορτία, όπου παρουσιάζεται διαφοροποίηση στην διάρκεια καύσης. Αυτή η διαφοροποίηση του μηχανισμού καύσης σχετίζεται άμεσα με τον μηχανισμό σχηματισμού NO_x και θα αναλυθεί στην συνέχεια με την βοήθεια των διαγραμμάτων ρυθμού έκλυσης θερμότητας.



Σχήμα 5.4.: Διάγραμμα πίεσης-γωνίας στροφάλου Κινητήρα – Μέτρηση 1



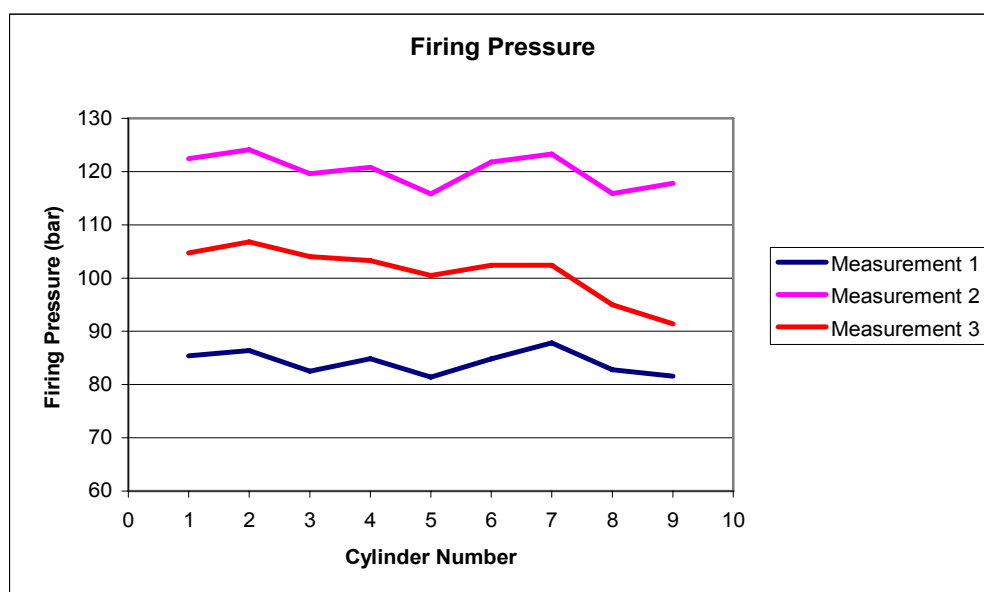
Σχήμα 5.5.: Διάγραμμα πίεσης-γωνίας στροφάλου Κινητήρα – Μέτρηση 2



Σχήμα 5.6.: Διάγραμμα πίεσης-γωνίας στροφάλου Κινητήρα – Μέτρηση 3

5.2.3. Μέγιστες τιμές πίεσης καύσεως

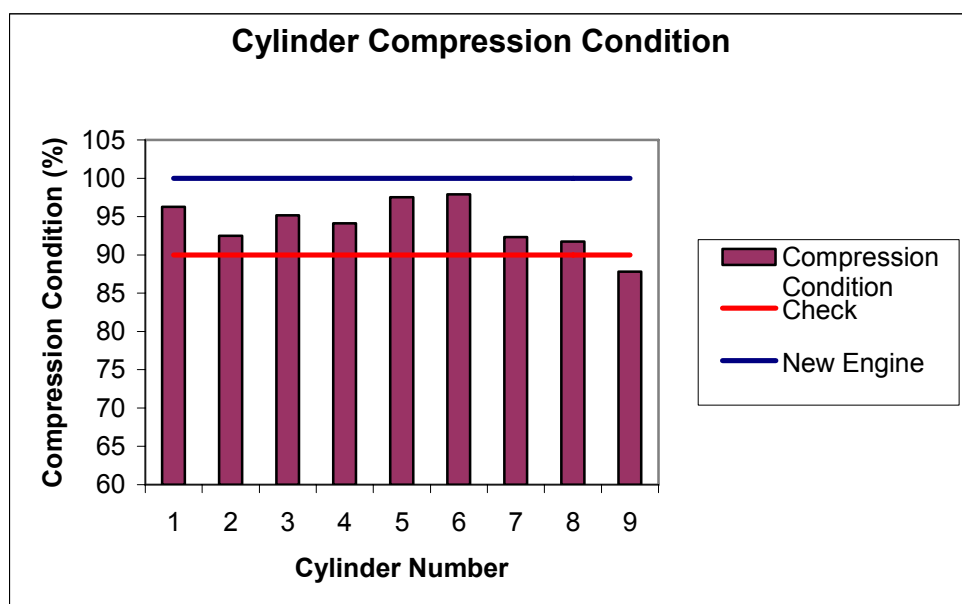
Οι μέγιστες πιέσεις καύσεως των κυλίνδρων του κινητήρα δίνονται στο σχήμα 5.7. Είναι εμφανές ότι υπάρχει διακύμανση των πιέσεων καύσεως μεταξύ των κυλίνδρων. Η διακύμανση των πιέσεων ακολουθεί την ίδια μορφή σε όλους τους κυλίνδρους και σε όλα τα φορτία, γεγονός που φανερώνει ότι αυτή δεν είναι τυχαία αλλά οφείλεται στην ρύθμιση των κυλίνδρων και από την λειτουργική κατάσταση αυτών. Η μέγιστη πίεση καύσεως προφανώς σχετίζεται με τις εκπομπές NO_x, εξαιτίας της συσχέτισης της με την θερμοκρασία της καύσης.



Σχήμα 5.7.: Μέγιστες τιμές πίεσης καύσεως Κινητήρα

5.2.4. Ποιότητα Συμπίεσης των Κυλίνδρων

Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η ποιότητα συμπίεσης όλων των κυλίνδρων, όπως αυτή προσδιορίζεται από το διαγνωστικό σύστημα. Όπως προκύπτει ότι η ποιότητα συμπίεσης όλων των κυλίνδρων κρίνεται ως ικανοποιητική με εξαίρεση τον κύλινδρο No.9 όπου θα πρέπει να επιθεωρηθεί κατά την διάρκεια της επόμενης τακτικής επιθεώρησης. Και το μέγεθος αυτό είναι σημαντικό για τις εκπομπές NOx λόγω της επίδρασης του ενεργού λόγου συμπίεσης σε αυτές.



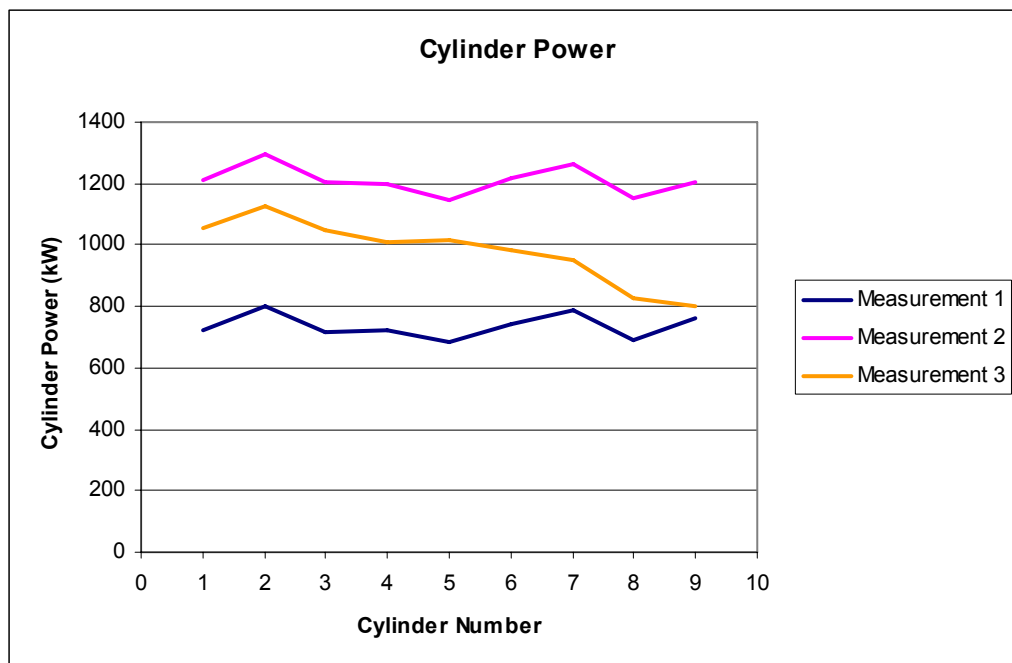
Σχήμα 5.8.: Ποιότητα Συμπίεσης Κυλίνδρων Κινητήρα

5.2.5. Παραγόμενη Ισχύς των Μονάδων

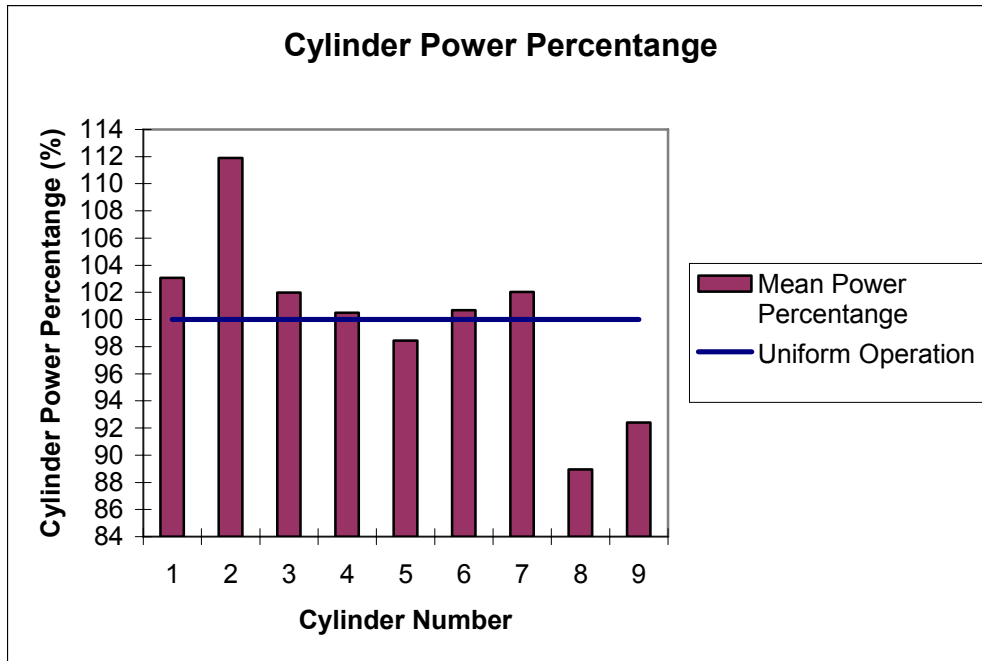
Στο σχήμα 5.9 δίνετε η πραγματική ισχύς ανά κύλινδρο, όπως αυτή προσδιορίστηκε από το διαγνωστικό πρόγραμμα. Παρατηρούμε ότι η ισχύς των κυλίνδρων ακολουθεί την ίδια διακύμανση με εξαίρεση την μέτρηση 2, κατά την διάρκεια της οποίας παρουσιάστηκε μείωση του φορτίου της μονάδας. Για τον λόγο αυτό η μέτρηση 2 δεν θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της Ποσοστιαίας Παραγόμενης Ισχύος των κυλίνδρων. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η διακύμανση που παρατηρείται οφείλεται στην διαφορετική ρύθμιση των κυλίνδρων του κινητήρα και δεν αποτελεί τυχαίο γεγονός.

Στο σχήμα 5.10, με την βοήθεια των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για το διάγραμμα 5.9, δίνετε η Ποσοστιαία Παραγόμενη Ισχύς ανά κύλινδρο σε σχέση με την ομοιόμορφη φόρτιση τους. Το ποσοστό της φόρτισης κάθε κυλίνδρου είναι ανεξάρτητο του φορτίου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων επεμβάσεων, για την επίτευξη της ομοιόμορφης κατανομής του φορτίου ανά κύλινδρο.

Η διαφοροποίηση ως προς την παραγόμενη ισχύ ανά κύλινδρο, έχει αρνητικές επιπτώσεις στον βαθμό απόδοσης της μονάδας και στην διάρκεια της ωφέλιμης ζωής της μονάδας. Ως ένα όριο ομοιόμορφης λειτουργίας του κινητήρα λαμβάνεται συνήθως το $\pm 3\%$. Από το σχήμα 5.10 φαίνεται ότι είναι απαραίτητη η επέμβαση στους κυλίνδρους No.1, No.2, No.8 και No.9, όπου η διακύμανση ξεπερνάει το παραπάνω αναφερθέν όριο.



Σχήμα 5.9.: Ισχύς Κυλίνδρων του Κινητήρα



Σχήμα 5.10.: Ποσοστό Παραγόμενης Ισχύος σε σχέση με την Μέση ανά κύλινδρο Παραγόμενη Ισχύ

Συνήθως οι κύλινδροι με μεγαλύτερο ποσοστό παραγόμενης ισχύος συμβάλουν περισσότερο στις εκπομπές NOx που εκπέμπονται από τον κινητήρα. Για τον λόγο αυτό πρέπει αυτή η διακύμανση στην παραγόμενη ισχύ από τους κυλίνδρους να διατηρείται στο ελάχιστο.

5.3. Αποτελέσματα Διαγνώσεως Συστήματος Εγχύσεως

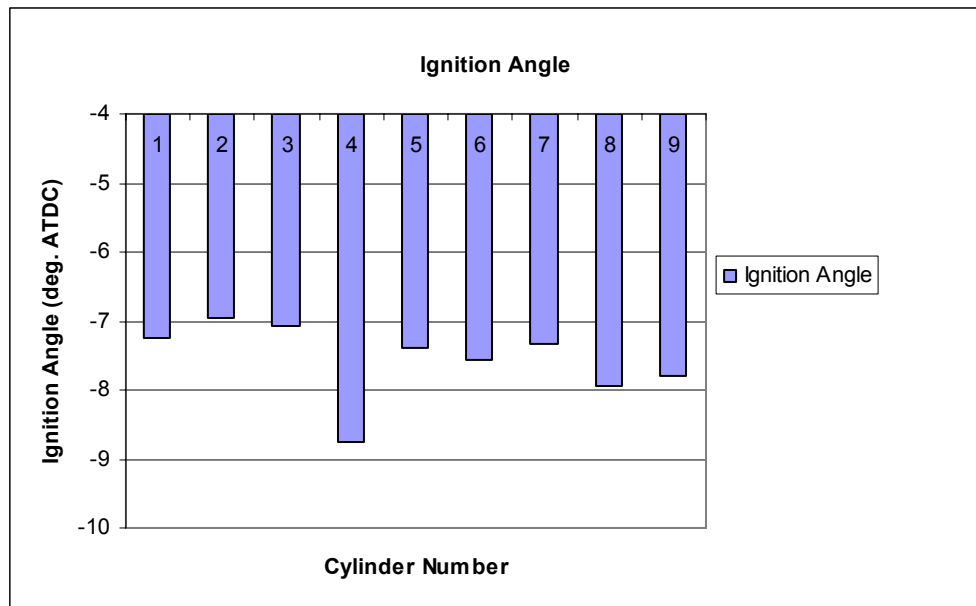
Στην συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα της διάγνωσης, που αφορά στην κατάσταση του συστήματος εγχύσεως καυσίμου που επηρεάζει σημαντικά τις εκπομπές NOx μέσω της προπορείας έγχυσης.

Το σύστημα εγχύσεως καυσίμου είναι από τα βασικότερα, για την ορθή λειτουργία της μηχανής και σχετίζεται άμεσα με την ομοιόμορφη λειτουργία του κινητήρα και σχετίζεται άμεσα με τον σχηματισμό NOx. Από την επεξεργασία των δυναμοδεικτικών διαγραμμάτων πίεσης μέσω του διαγνωστικού λογισμικού και την χρήση του προγράμματος προσομοίωσης, μπορούμε να προσδιορίσουμε τα βασικότερα στοιχεία που αφορούν το σύστημα έγχυσης καυσίμου, που είναι:

- Το Γωνία Εναύσεως
- Η Δυναμική Προπορεία Εγχύσεως
- Η κατάσταση των εγχυτήρων
- Η κατάσταση των αντλιών καυσίμου

5.3.1. Γωνία Εναύσεως

Στο σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η πραγματική γωνία έναυσης, όπως αυτή προέκυψε από την επεξεργασία των μετρήσεων μέσω του διαγνωστικού συστήματος. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ των κυλίνδρων, που προφανώς οφείλονται σε διαφορά του χρονισμού έγχυσης.

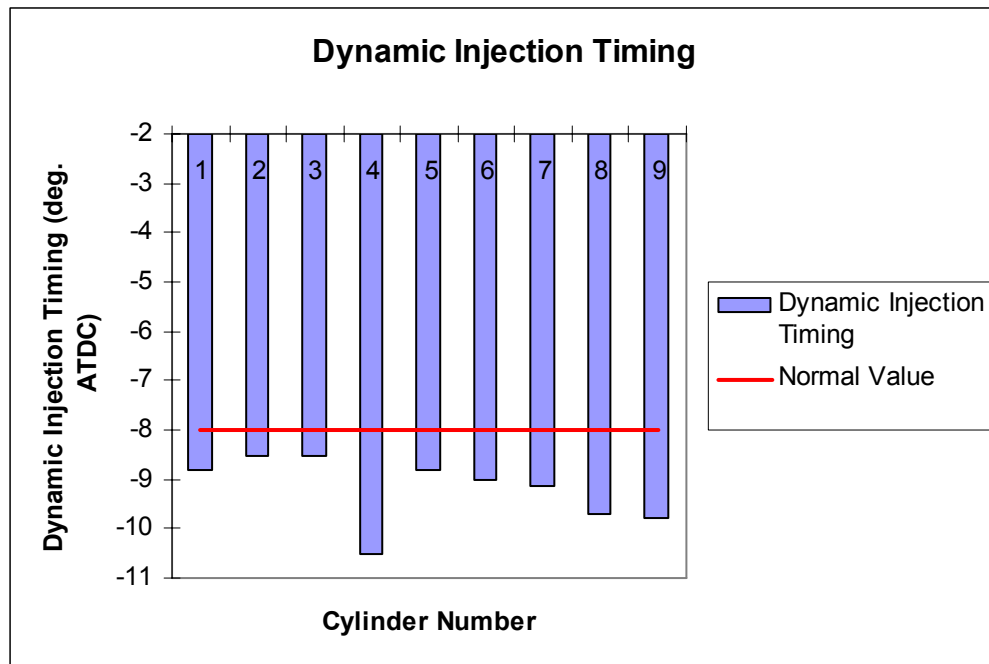


Σχήμα 5.11.: Γωνία Έναυσης Κυλίνδρων Κινητήρα

5.3.2. Δυναμική Προπορεία Εγγύσεως

Στο παρακάτω σχήμα (5.12) δίνετε, μέσω της επεξεργασίας από το διαγνωστικό σύστημα, η δυναμική προπορεία έγχυσης στους κυλίνδρους της μονάδας. Δυναμική προπορεία είναι η στιγμή όπου πραγματικά εγχύεται το καύσιμο στους κυλίνδρους. Η κανονική προπορεία έγχυσης για τις μηχανές αυτές, είναι περίπου 8° πριν από το ΑΝΣ. Οι διαφορές στην προπορεία έγχυσης οφείλονται στις διαφορές που πιθανόν υπάρχουν στην ρύθμιση του χρονισμού έγχυσης μεταξύ των κυλίνδρων. Ακόμη μπορεί να οφείλονται στη σχετική θέση του αντίστοιχου έκκεντρου, σε φθορές, ανοχές κ.λ.π. Η διαφορά αυτή μπορεί να υπάρχει παρά το γεγονός ότι κύλινδρος έχει ρυθμιστεί σωστά στα “σημάδια” του. Το πρόβλημα αυτό είναι σύνηθες στις μηχανές, καθώς ο χρονισμός γίνεται στατικά, δηλαδή με την μηχανή εκτός λειτουργίας.

Στο σχήμα 5.12 φαίνεται ότι στους κυλίνδρους No.4, No.8 και No.9 παρουσιάζεται η μεγαλύτερη προπορεία έγχυσης. Γενικά όμως παρατηρούμε ότι όλοι οι κύλινδροι έχουν ελαφρά αυξημένη προπορεία, γεγονός που ευνοεί τον σχηματισμό οξειδίων του αζώτου.



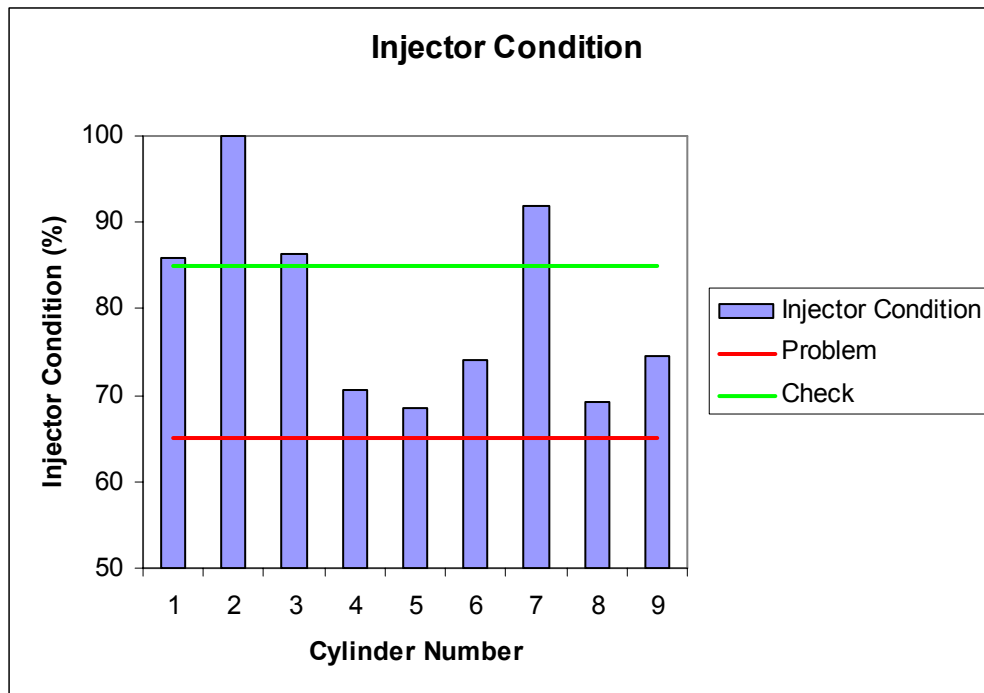
Σχήμα 5.12.: Δυναμική προπορεία έγχυσης κυλίνδρων κινητήρα

5.3.3. Έλεγχος Κατάστασης Εγχυτήρων

Στο παρακάτω διάγραμμα δίνεται η κατάσταση των εγχυτήρων, που εκφράζεται μέσω της ποιότητας ψεκασμού, όπως αυτή εκτιμήθηκε από το διαγνωστικό σύστημα. Η ποιότητα ψεκασμού δεν εξαρτάται μόνο από την πίεση έναρξης της έγχυσης των εγχυτήρων αλλά και από την ποιότητα διασκορπισμού του καυσίμου που επιτυγχάνουν κατά την λειτουργία τους, η οποία επηρεάζεται σημαντικά και από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εντός του κυλίνδρου.

Ως ένα όριο κανονικής λειτουργίας του εγχυτήρα λαμβάνεται το 90%. Κάτω από το όριο αυτό προτείνεται ο έλεγχος της κατάστασης του εγχυτήρα. Ακόμη λαμβάνεται και ένα όριο 65% κάτω από το οποίο είναι επιτακτική η ανάγκη για τον έλεγχο – επιθεώρηση του εγχυτήρα.

Στο σχήμα 5.13 προκύπτει ότι όλοι οι κύλινδροι εκτός από τους No.2 και No.7 απαιτούν έλεγχο με πιο επιτακτική την ανάγκη για έλεγχο στους εγχυτήρες των κυλίνδρων No.4, No.5, No.6, No.8 και No.9.

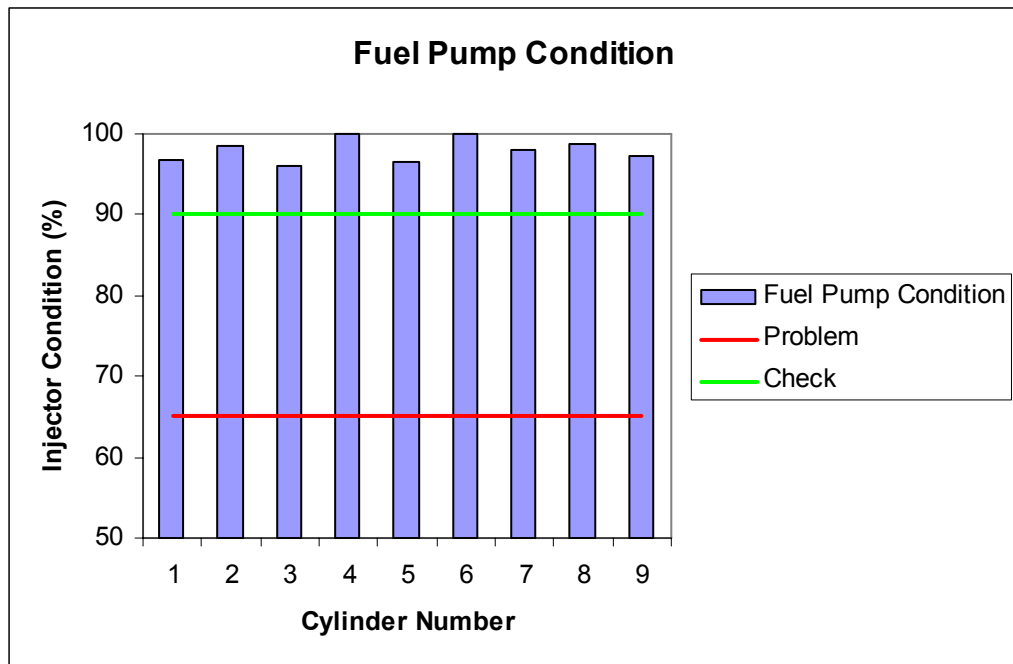


Σχήμα 5.13.: Κατάσταση εγχυτήρων κινητήρα

5.3.4. Κατάσταση Αντλιών Καυσίμου

Στο σχήμα 5.14 δίνετε η κατάσταση των αντλιών καυσίμου όπως προσδιορίζεται από το διαγνωστικό σύστημα. Η κατάσταση των αντλιών καυσίμου προκύπτει χρησιμοποιώντας τη κοινή τιμή της θέσης του κανόνα καυσίμου, διότι δεν ήταν διαθέσιμες τοπικές ενδείξεις για κάθε κύλινδρο. Κατά συνέπεια τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά, δηλαδή ισχύουν υπό την προϋπόθεση ότι η ρύθμιση των κανόνων καυσίμου όλων των αντλιών είναι ομοιόμορφη. Οι τιμές των σχημάτων αναφέρονται στην συναρμογή εμβόλου – χιτωνίου των αντλιών καυσίμου υψηλής πίεσης, δηλαδή φανερώνουν τις διαρροές καυσίμου από τον θάλαμο των αντλιών.

Από το σχήμα 5.14 φαίνεται ότι η κατάσταση των αντλιών είναι ικανοποιητική και δεν απαιτείται επιθεώρηση αυτών.



Σχήμα 5.14.: Κατάσταση Αντλιών Καυσίμου Υψηλής Πίεσης του κινητήρα

5.4. Αποτελέσματα Διαγνώσεως Συστήματος Εναλλαγής Αερίων

Στο σημείο αυτό θα δοθούν τα αποτελέσματα της διάγνωσης που αφορούν την κατάσταση του συστήματος εναλλαγής αερίων. Συγκεκριμένα θα δοθούν αποτελέσματα που αφορούν τα εξής μεγέθη:

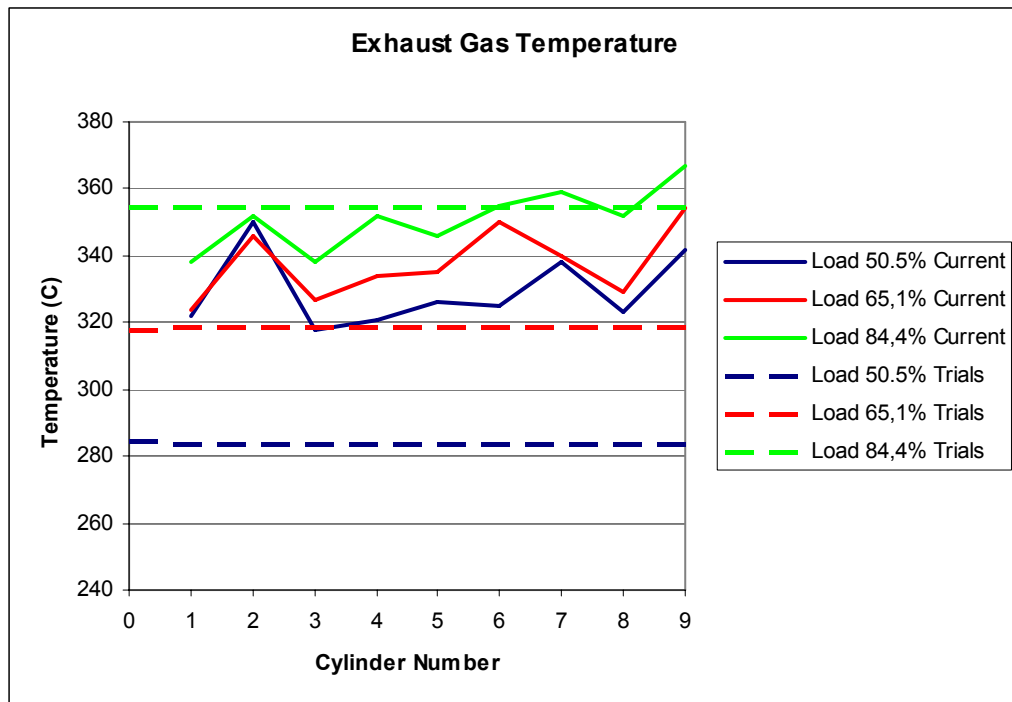
- Την θερμοκρασία καυσαερίου στην έξοδο των κυλίνδρων
- Τη κατάσταση του ψυγείου αέρα
- Την κατάσταση του συμπιεστή και του στροβίλου

Το σύστημα εναλλαγής αερίων επιδρά σημαντικά στις εκπομπές NOx καθώς επηρεάζει τη διαθεσιμότητα O₂ καύσης και την θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου.

5.4.1. Θερμοκρασία Καυσαερίου στην έξοδο των Κυλίνδρων

Στο σχήμα 5.15 δίνονται οι θερμοκρασίες καυσαερίου όλων των κυλίνδρων και για τις τρεις μετρήσεις. Παράλληλα δίνεται και η μέση θερμοκρασία της εξόδου των καυσαερίων από τους κυλίνδρους όπως αυτά προκύπτουν από τις δοκιμές παραλαβής της μονάδας. Παρατηρούμε ότι η διακύμανση της θερμοκρασίας καυσαερίου των κυλίνδρων ακολουθεί γενικά την ίδια μεταβολή σε σχέση με το φορτίο, με αποτέλεσμα να είναι συστηματική και όχι τυχαία.

Παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων παρουσιάζονται αυξημένες στα φορτία 50,5% και 65,1%, ενώ στο υψηλότερο φορτίο του 84,4% οι τιμές των θερμοκρασιών εμφανίζονται να προσεγγίζουν τις τιμές των δοκιμών παραλαβής. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει πιθανότατα υπολειτουργία του συστήματος υπερπλήρωσης, στα μερικά φορτία, γεγονός που θα επιβεβαιωθεί στην συνέχεια, από τον έλεγχο της κατάστασης του συστήματος υπερπλήρωσης. Η αύξηση της θερμοκρασίας καυσαερίων είναι γενικά παράγοντας που ευνοεί τις εκπομπές NOx.



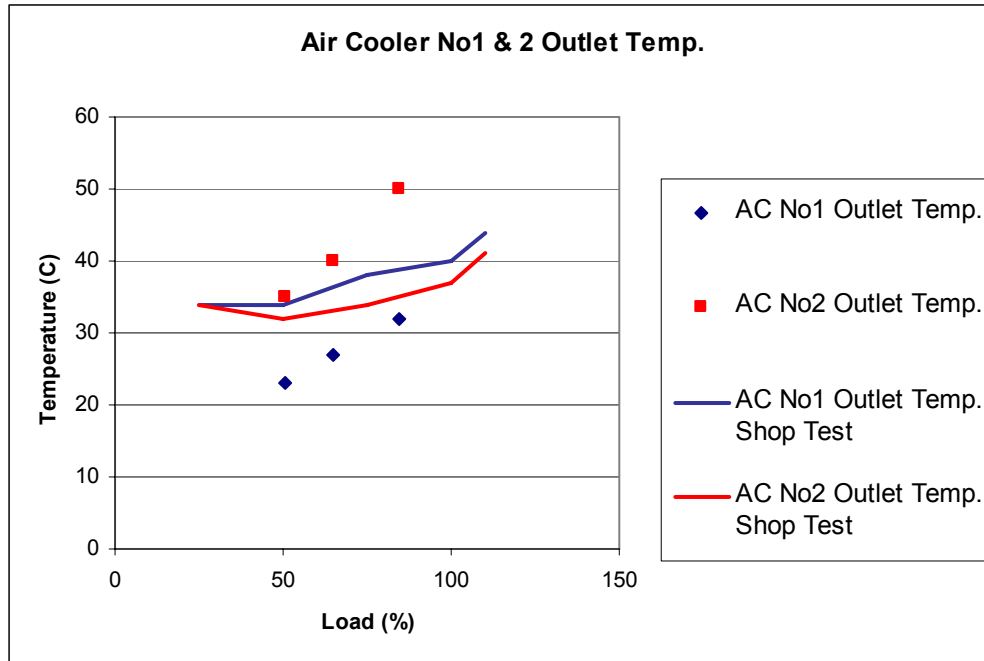
Σχήμα 5.15.: Θερμοκρασία Καυσαερίων στην Έξοδο των Κυλίνδρων και σύγκριση τους με τις δοκιμές παραλαβής

5.4.2. Κατάσταση των Ψυγείων Αέρα του Κινητήρα

Ένας παράγοντας ο οποίος έχει αναλυθεί επιδρά σημαντικά στις εκπομπές NOx είναι η θερμοκρασία του αέρα. Για αυτό τον λόγο στην συνέχεια δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον προσδιορισμό της κατάστασης των ψυγείων αέρα.

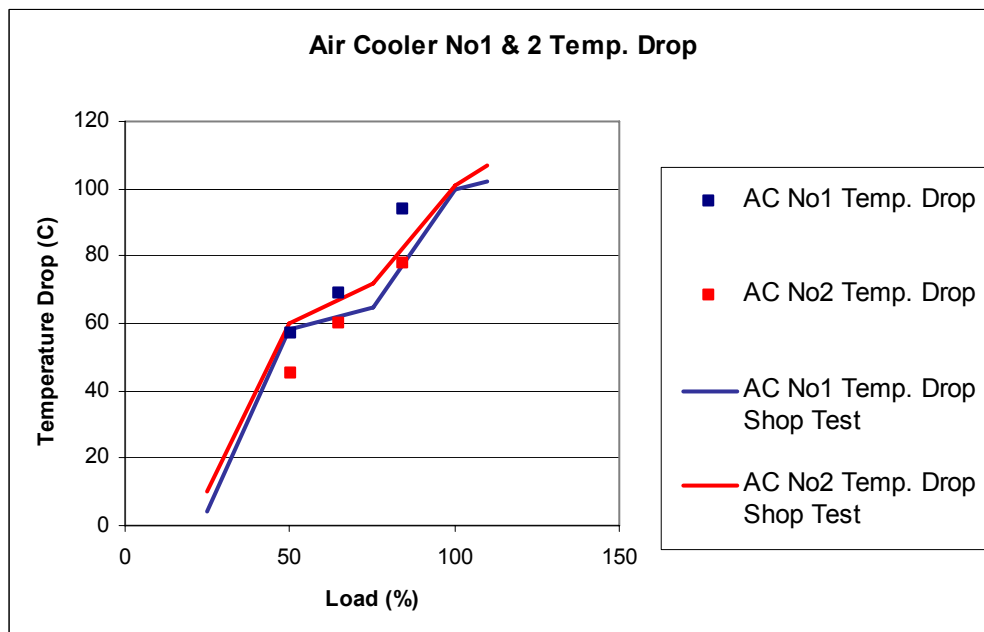
Στο σχήμα 5.16 παρουσιάζεται η θερμοκρασία εξόδου από τα ψυγεία αέρα του κινητήρα. Εδώ φαίνεται ότι ενώ η θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το ψυγείο No.1 είναι χαμηλότερη από αυτή που μετρήθηκε στη διάρκεια των δοκιμών παραλαβής και δεν φαίνεται να παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα στην λειτουργία του, στο ψυγείο No.2 παρατηρούνται θερμοκρασίες εξόδου πολύ μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν (διαφορές της τάξης των 15°C στα υψηλά φορτία). Το γεγονός αυτό είναι επιβαρυντικό για τις εκπομπές NOx.

Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζεται η πτώση της θερμοκρασίας στα ψυγεία του αέρα. Η κατάσταση στο ψυγείο No.1 κρίνεται ως ικανοποιητική, καθώς η μείωση της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη από αυτή που μετρήθηκε στην διάρκεια των δοκιμών παραλαβής. Στο ψυγείο No.2 η



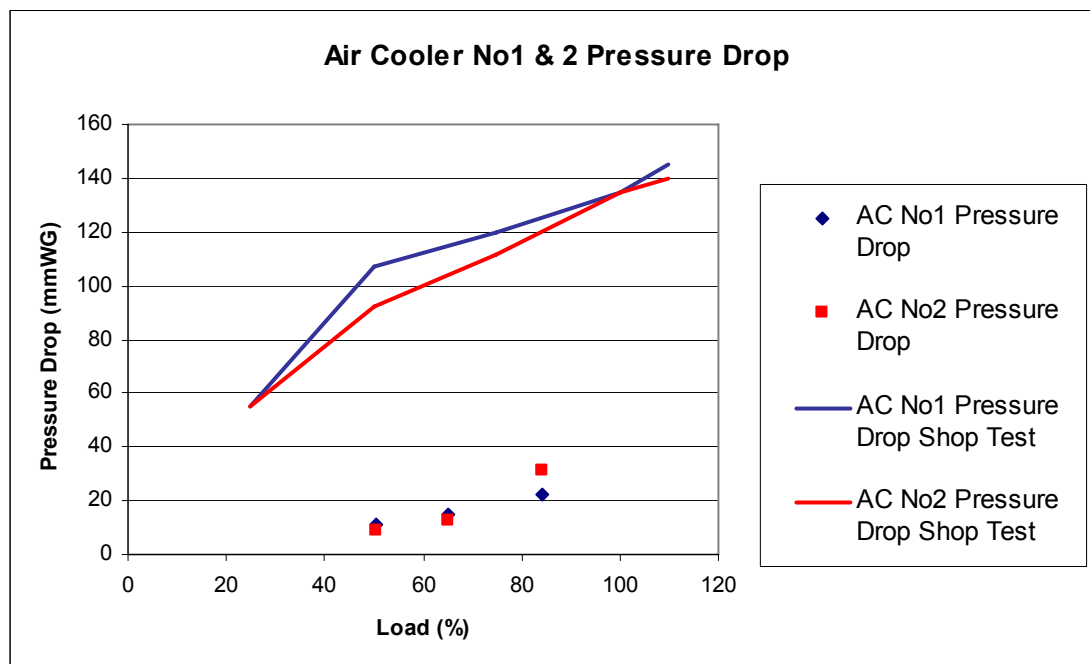
Σχήμα 5.16.: Θερμοκρασία Εξόδου Αέρα από τα Ψυγεία Αέρα No1 & No2

μείωση της θερμοκρασίας είναι μικρότερη από αυτή που παρατηρείται στην διάρκεια των δοκιμών παραλαβής, αλλά όχι τόσο ώστε να δικαιολογεί τη διαφορά που παρατηρείται στην θερμοκρασία εξόδου του αέρα από το ψυγείο. Κατά συνέπεια η τελευταία μάλλον οφείλεται και στην αυξημένη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή.



Σχήμα 5.17.: Μείωση της θερμοκρασίας του αέρα στα Ψυγεία Σαρώσεως

Στο σχήμα 5.18 παρουσιάζεται η πτώση πίεσης του αέρα κατά την διαδρομή του από το ψυγείο αέρα. Όπως φαίνεται και στο σχετικό διάγραμμα η πτώση πίεσης του αέρα που παρατηρείται και στα δύο ψυγεία No.1 και No.2, είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή που παρατηρήθηκε στην διάρκεια των δοκιμών παραλαβής. Το γεγονός αυτό φανερώνει την καλή κατάσταση των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας από την πλευρά του αέρα τουλάχιστον.



Σχήμα 5.18: Πτώση πίεσης στα ψυγεία σαρώσεως του κινητήρα

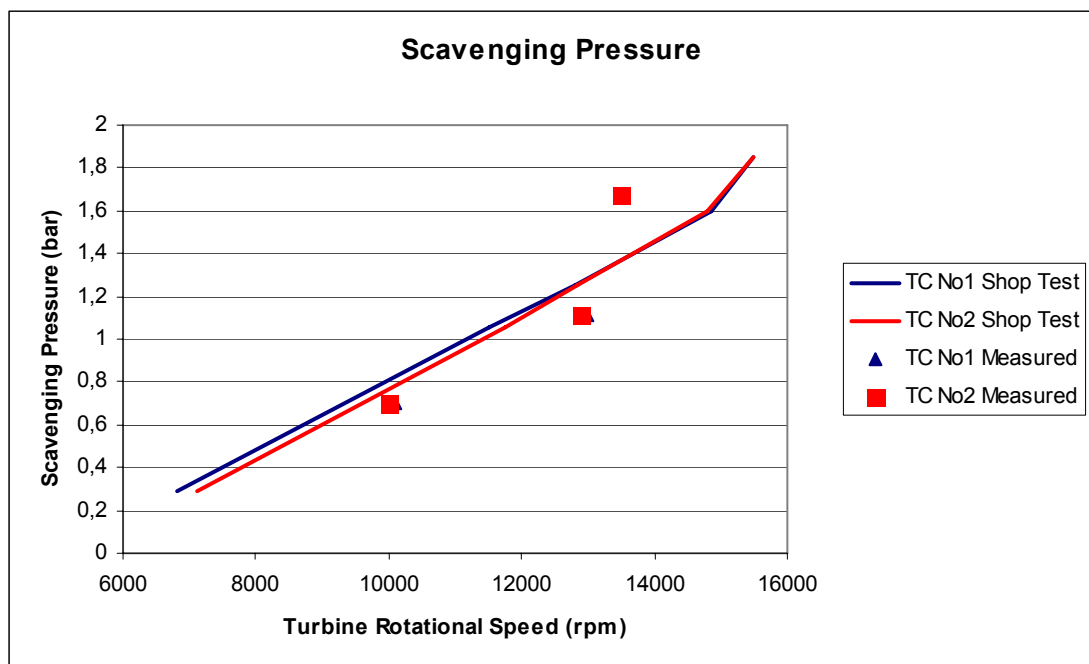
Συνεπώς η αυξημένη θερμοκρασία που παρατηρείται κατά την έξοδο του αέρα από το ψυγείο No.2, οφείλεται κατά ένα ποσοστό στην κατάσταση του ψυγείου αέρα από την πλευρά του ψυκτικού μέσου (ακάθαρτοι αυλοί νερού) και στην αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή. Η αυξημένη αυτή θερμοκρασία του αέρα σαρώσεως είναι ένας παράγοντας ο οποίος συνοδεύεται με αύξηση της θερμοκρασίας καύσης στον κύλινδρο, που όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο προκαλεί αύξηση του σχηματισμού οξειδίων του αζώτου.

5.4.3. Κατάσταση Συμπιεστών Κινητήρα

Στην παράγραφο αυτή, με την βοήθεια του διαγνωστικού λογισμικού, γίνεται εκτίμηση της κατάστασης των συμπιεστών και σύγκριση με τις δοκιμές παραλαβής. Για την επίτευξη αυτού χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω μετρήσεις:

- Πίεση Σάρωσης
- Θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο των συμπιεστών
- Θερμοκρασία αέρα στην έξοδο των συμπιεστών

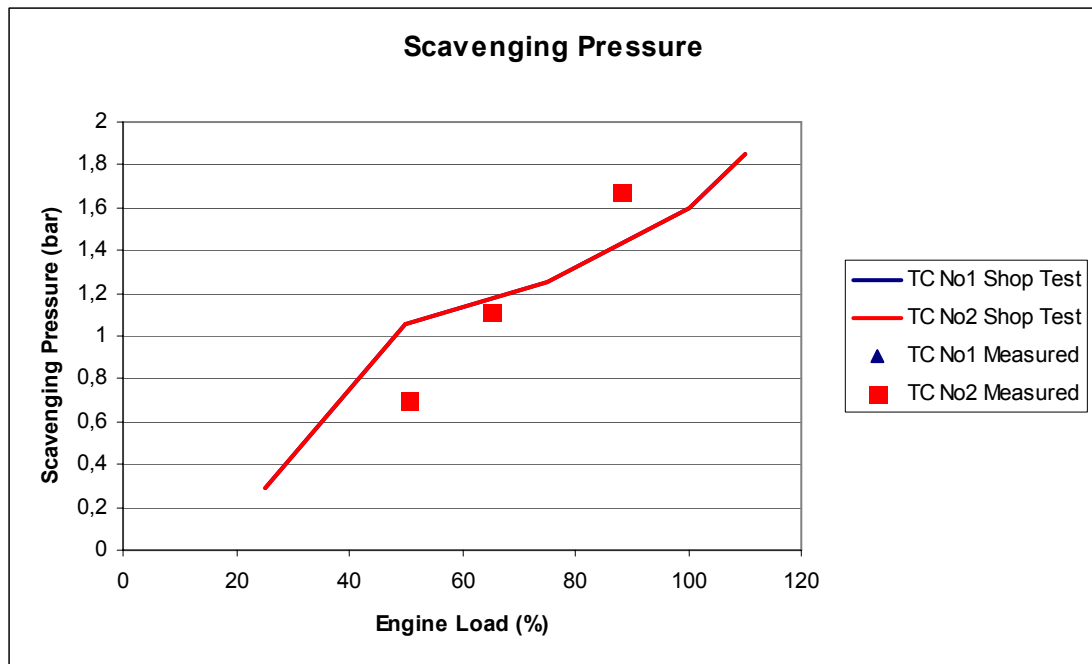
Στο σχήμα 5.19 παρουσιάζεται η πίεση σάρωσης συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του υπερπληρωτή. Στο σχήμα 5.20 παρουσιάζεται η μεταβολή της πίεσης σαρώσεως σε σχέση με το φορτίο του κινητήρα, σε σύγκριση με τις δοκιμές παραλαβής. Όπως παρατηρούμε, σε φορτία μεγαλύτερα του 60% η πίεση σαρώσεως είναι μεγαλύτερη από αυτή που μετρήθηκε στις δοκιμές παραλαβής.



Σχήμα 5.19.: Μεταβολή της πίεσης σαρώσεως σε σχέση με τις στροφές λειτουργίας των υπερπληρωτών

Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και την αύξηση της θερμοκρασίας σε σχέση με αυτή των δοκιμών παραλαβής που παρατηρείται στα ψυγεία σαρώσεως, καθώς η αύξηση της πίεσης που παρατηρείται σε φορτία

μεγαλύτερα του 60%, συνοδεύεται και με αύξηση της θερμοκρασίας. Όμως πέραν αυτού η υψηλότερη πίεση σάρωσης επηρεάζει την απόπλυση του θαλάμου καύσεως από τα καυσαέρια, και συνεπώς την διαθεσιμότητα οξυγόνου, που επηρεάζει σημαντικά τις εκπομπές NOx.



Σχήμα 5.20.: Μεταβολή της πίεσης σαρώσεως σε σχέση με το φορτίο

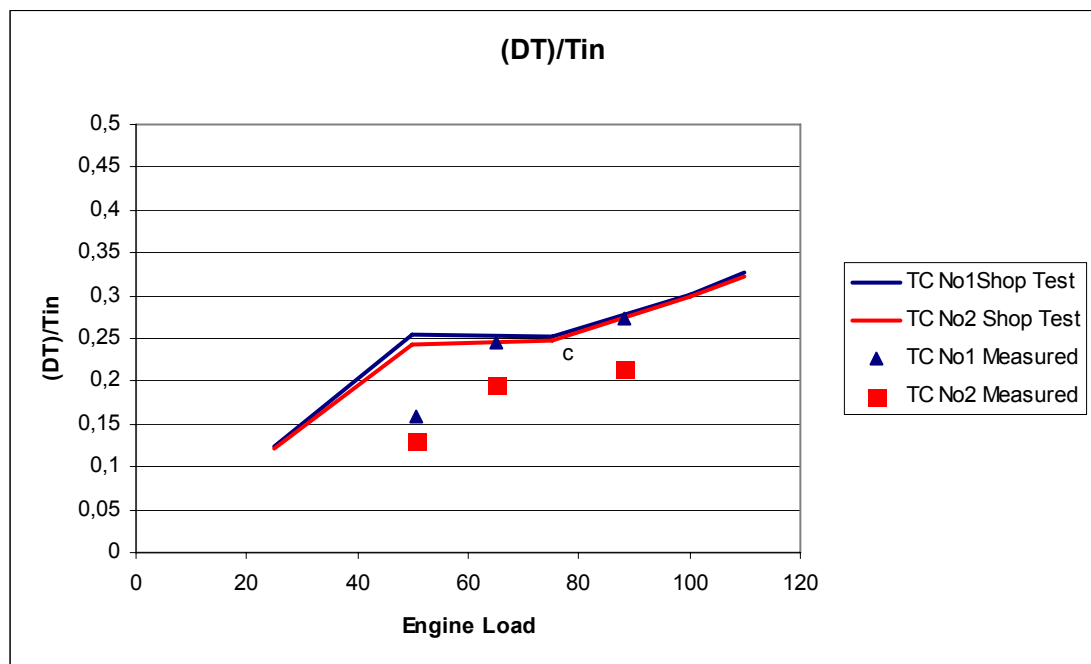
5.4.4. Κατάσταση Στροβίλων Υπερπληρωτών

Χρησιμοποιώντας τις παρακάτω μετρήσεις:

- Τις θερμοκρασίες καυσαερίου στην είσοδο των στροβίλων
- Τις θερμοκρασίες καυσαερίων στην έξοδο των στροβίλων
- Τις ταχύτητες περιστροφής των υπερπληρωτών

γίνεται εκτίμηση της κατάστασης των στροβίλων των υπερπληρωτών του κινητήρα. Στο σχήμα 5.21 παρουσιάζεται η ανηγμένη στην θερμοκρασία, θερμοκρασιακή πτώση στους στροβίλους. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει πως στα μερικά φορτία και οι δύο στροβίλοι εμφανίζουν μικρότερη ανηγμένη θερμοκρασιακή πτώση σε σχέση με τις δοκιμές παραλαβής, που αποτελεί ένδειξη μειωμένης απόδοσης, ενώ στα υψηλά φορτία η διαφορά αμβλύνεται και οι τιμές που υπολογίζεται

προσεγγίζουν τις τιμές των δοκιμών παραλαβής. Μεγαλύτερη υστέρηση παρατηρείται στον υπερπληρωτή No.2.



Σχήμα 5.21.: Ανηγγεμένη θερμοκρασιακή πτώση στους στροβίλους των υπερπληρωτών

5.5. Προτεινόμενες Ρυθμίσεις – Επεμβάσεις για την Μονάδα

Σύμφωνα με τις πληροφορίες που προέκυψαν από την διάγνωση της λειτουργικής κατάστασης του κινητήρα και των υποσυστημάτων του προκύπτουν οι ακόλουθες προτάσεις για ρυθμίσεις ώστε αυτή να επανέλθει πλησίον της κανονικής λειτουργίας (Δοκιμές Παραλαβής).

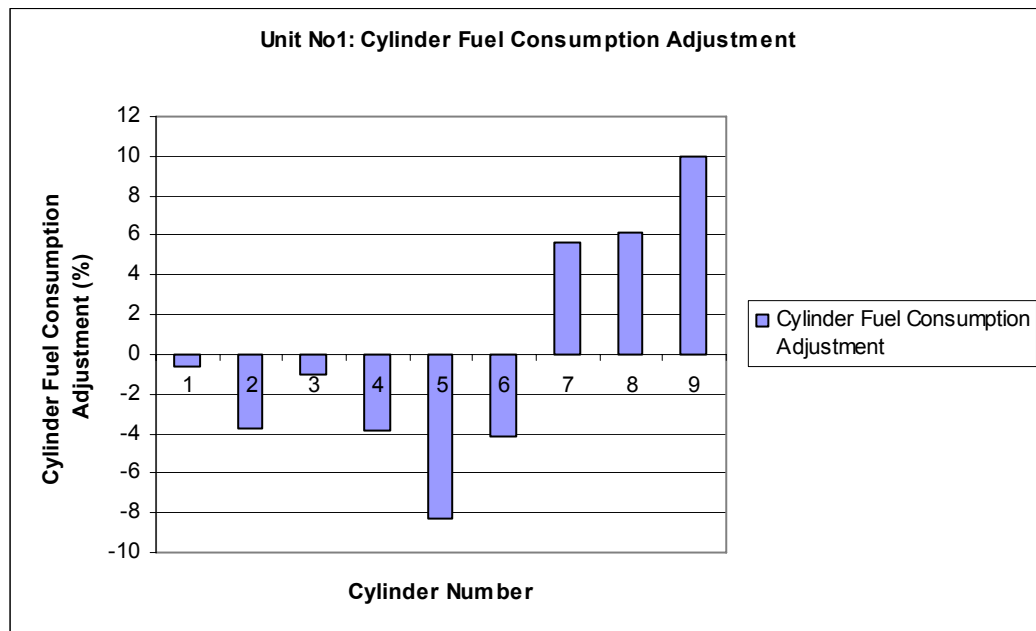
Κατάσταση Στεγανότητας Κυλίνδρων

Προτείνεται ο έλεγχος της στεγανότητας του κυλίνδρου Νο9, όπου βρίσκεται κάτω από το όριο κανονικής λειτουργίας καθώς και του κυλίνδρου Νο.2, Νο.7 και Νο.8 όπου η ποιότητα συμπίεσης προσεγγίζει το όριο κανονικής λειτουργίας.

Ρύθμιση Αντλιών Καυσίμου

Για να επιτευχθεί ομοιομορφία στη φόρτιση των κυλίνδρων απαιτείται η ρύθμιση της παροχής καυσίμου σύμφωνα με το διάγραμμα 5.22. Οι

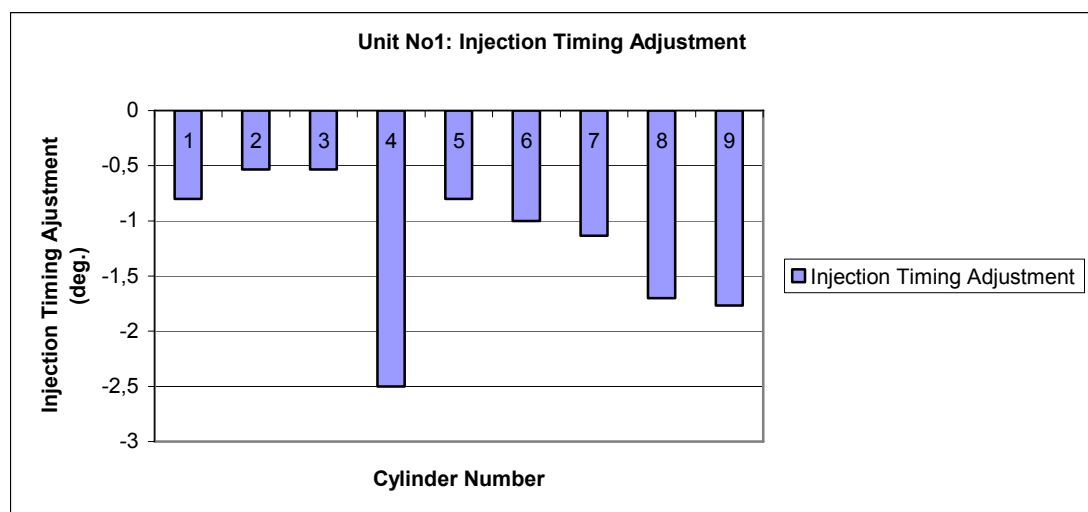
επεμβάσεις που είναι μικρότερες του 2%, μπορούν να γίνουν επιλεκτικά.



Διάγραμμα 5.22.: Προτεινόμενη ρύθμιση κατανάλωσης καυσίμου στους κυλίνδρους της Μονάδας Νο1

Ρύθμιση Προπορείας Εγχύσεως

Στην συνέχεια δίνονται οι ρυθμίσεις της προπορείας έγχυσης του καυσίμου, όπως αυτές προέκυψαν από το διαγνωστικό σύστημα, για να επιτύχουμε γωνία πραγματικής έγχυσης σε όλους τους κυλίνδρους ίση με την κανονική.



Διάγραμμα 5.23.: Προτεινόμενη Ρύθμιση Προπορείας Εγχύσεως στους κυλίνδρους του κινητήρα

Επεμβάσεις στους εγχυτήρες

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διάγνωσης προτείνεται ο άμεσος έλεγχος των εγχυτήρων των κυλίνδρων Νο4, Νο5 ,Νο6, Νο8 και Νο9, ενώ έλεγχος πρέπει να γίνει και στους εγχυτήρες των κυλίνδρων Νο1 και Νο3.

Επεμβάσεις στις Αντλίες Καυσίμου

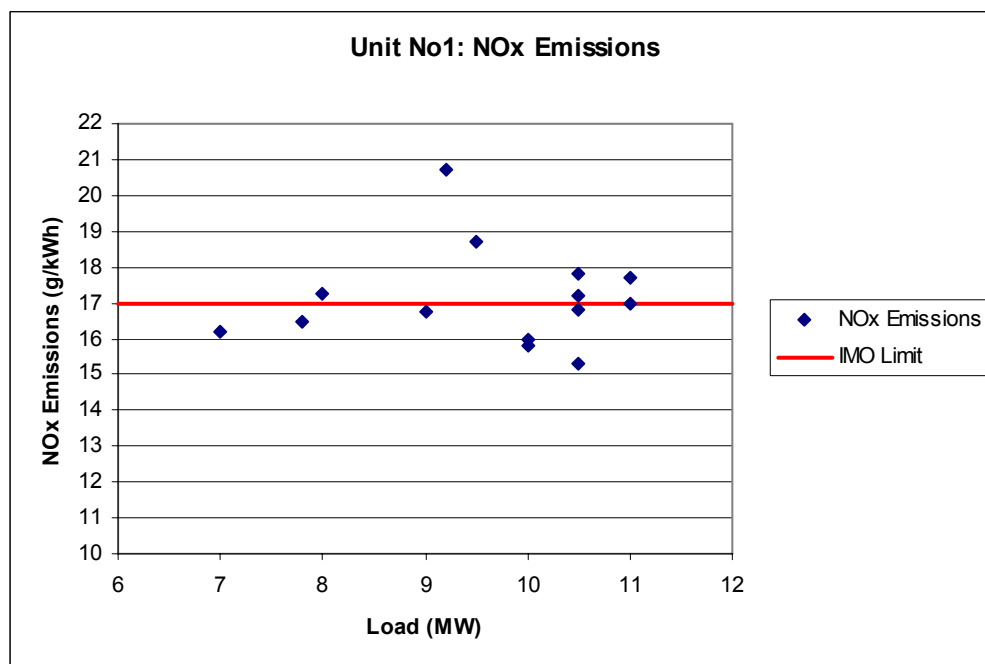
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διάγνωσης δεν απαιτείται η επέμβαση σε κάποια αντλία καυσίμου καθώς η κατάσταση όλων των αντλιών κρίθηκε ως ικανοποιητική.

6. Αξιολόγηση Εκπομπών NOx της Μονάδας

Στην παρούσα παράγραφο αναλύονται οι εκπομπές NOx χρησιμοποιώντας μετρήσεις που ελήφθησαν στο παρελθόν από το προσωπικό του Σταθμού της ΔΕΗ και στην διάρκεια των δοκιμών που αναλύσαμε στις προηγούμενες παραγράφους.

6.1. Ιστορικό Εκπομπών NOx του Κινητήρα

Στο διάγραμμα 6.1 παρουσιάζεται η καταγραφή των εκπομπών NOx σε διάφορα ονομαστικά φορτία λειτουργίας της Μονάδας Νο1. Παρατηρούμε ότι παρότι η μονάδα έχει σχεδιαστεί πολύ πριν την θέσπιση ορίων για τις εκπομπές NOx, δεν αποκλίνει σημαντικά από το ισχύον όριο του 17 g/kWh.



Διάγραμμα 6.1.: Εκπομπές NOx από την Μονάδα Νο1 σε διάφορα φορτία

6.2. Καταγραφή των Εκπομπών NOx στην διάρκεια των Μετρήσεων για τον Προσδιορισμό της Λειτουργικής Κατάστασης του Κινητήρα

Στην διάρκεια των μετρήσεων για τον προσδιορισμό της κατάστασης του κινητήρα έγινε και μέτρηση εκπομπών NOx. Στο πίνακα 6.1 δίνονται οι εκπομπές NOx στα διάφορα ονομαστικά φορτία όπου ελήφθησαν οι μετρήσεις.

Πίνακας 6.1.: Μετρήσεις εκπομπών NOx

Φορτίο (Ονομαστικό)	MW	6.0	8.0	9.5
Εκπομπές NOx				
NOx	ppm	1365	1341	1774
NOx	g/kWh	15.66	16.01	19.30
NOx	Mg/Nm ³ – 15% O ₂	2526	2609	3159
Χαρακτηριστικά Καυσαερίου				
O ₂	%	14.36	14.21	14.10
Θερμοκρασία	°C	234	263	265
Παροχή	Kg/h	54948	70685	81551

Παρατηρούμε ότι κατά την μέτρηση των εκπομπών στο ονομαστικό φορτίο των 9.5 MW, οι εκπομπές NOx ξεπερνούν το όριο του IMO, σε αντίθεση των μετρήσεων στα μερικά φορτία (6 και 8 MW) που είναι μικρότερες από αυτό. Η αύξηση σε αυτό το φορτίο, όπως έχει αναπτυχθεί, οφείλεται στην αυξημένη πίεση σάρωσης σε σχέση με την κανονική τιμή που προκαλεί αύξηση του διαθέσιμου O₂ στο θάλαμο καύσης και στην ελαφρά αυξημένη προπορεία έγχυσης. Συμβολή στις αυξημένες αυτές τιμές των εκπομπών NOx έχει και η αυξημένη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής.

Οι εκπομπές της μονάδας για τα φορτία των 6 και των 8 MW είναι μικρότερες των αντίστοιχων που μετρήθηκαν στο παρελθόν, λόγω της έλλειψης αέρα εξαιτίας της μικρής πίεσης σάρωσης.

6.3. Αξιολόγηση των Εκπομπών NOx

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των εκπομπών NOx, όπως παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, καθώς και από τις παλαιότερες μετρήσεις όπως παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 6.2, παρατηρούμε τα εξής:

- Οι τιμές εκπομπών NOx στην παρούσα κατάσταση είναι βελτιωμένες σε σχέση με το παρελθόν
- Οι τιμές των εκπομπών NOx του κινητήρα είναι αυξημένες μόνο στα υψηλά φορτία, που οφείλεται κύρια στην αυξημένη πίεση σάρωσης
- Παρατηρείται ιδιαίτερα απότομη αύξηση των εκπομπών NOx με το φορτίο
- Οι εκπομπές NOx της μονάδας No1 είναι χαμηλότερες από το όριο του IMO για τα μερικά φορτία, που οφείλεται κυρίως στην μειωμένη διαθεσιμότητα αέρα

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στον σχηματισμό NOx είναι:

- Η διαθεσιμότητα O₂: Επηρεάζεται από την πίεση σάρωσης και τον βαθμό της απόπλυσης που επηρεάζεται με την σειρά της από την διαφορά πίεσης μεταξύ των οχετών εξαγωγής και εισαγωγής
- Η θερμοκρασία στον θάλαμο καύσης: Επηρεάζεται από τον χρονισμό της έγχυσης, τον ρυθμό καύσης, την θερμοκρασία του αέρα σάρωσης και την ποιότητα απόπλυσης
- Παραμένον καυσαέριο στο κύλινδρο στην αρχή της συμπίεσης: Επηρεάζεται κυρίως από τον χρονισμό της βαλβίδας εξαγωγής και από την ποιότητας της απόπλυσης

6.3.1. Επίδραση της διαθεσιμότητας O₂

Η διαθεσιμότητα O₂ έχει την μεγαλύτερη επίδραση στις εκπομπές NOx. Όπως έχουμε παρουσιάσει η πίεση σαρώσεως της Μονάδας No1 είναι

μεγάλη στα υψηλά φορτία που προκαλεί αύξηση της διαθεσιμότητας O_2 , και συμβάλει στην ραγδαία αύξηση των εκπομπών NO_x .

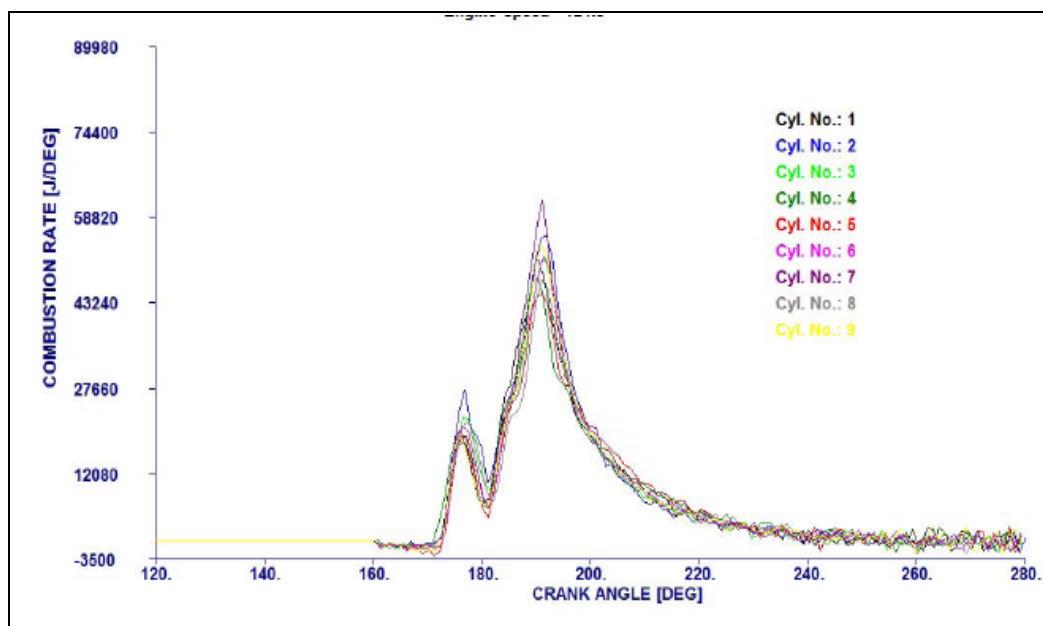
6.3.2. Επίδραση της Θερμοκρασίας Καύσης

Η τιμή της μέσης θερμοκρασίας στη διάρκεια της καύσης επηρεάζεται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Τον μηχανισμό της καύσης
- Την θερμοκρασία του αέρα σάρωσης
- Τη προπορεία έκχυσης

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης της θερμοκρασίας καύσης στην συγκεκριμένη μονάδα, δίνονται στη συνέχεια τα αποτελέσματα που αφορούν στο μηχανισμό της καύσης στη διάρκεια του κύκλου, όπως αυτά αξιολογήθηκαν από το διαγνωστικό λογισμικό.

Όπως προκύπτει υπάρχει σχετικά έντονη προαναμεμειγμένη καύση, που συμβάλει στον σχηματισμό NO_x . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η Μονάδα είναι σχεδιασμένη ώστε να λειτουργεί με μηχανισμό προέγχυσης το οποίο ευνοεί την απόδοση εις βάρος όμως των εκπομπών NO_x .



Σχήμα 6.1.: Ρυθμός καύσης κυλίνδρων στο φορτίο των 9.5 MW

7. Συμπεράσματα

Οι παραγόμενες από τους Ναυτικούς Κινητήρες εκπομπές οξειδίων του αζώτου και οι σημαντικές επιπτώσεις που αυτές έχουν στην ποιότητα του αέρα στην στεριά, αποτελεί ένα πρόβλημα το οποίο θα κληθεί η Ναυτική Βιομηχανία να αντιμετωπίσει στο άμεσο μέλλον. Ως προς επιβεβαίωση των παραπάνω, έρχονται οι κανονισμοί που διάφοροι διεθνείς και εθνικοί νομοθετικοί οργανισμοί έχουν θεσπίσει, όπου θέτουν όλο και πιο αυστηρά όρια με σκοπό τον έλεγχο των εκπομπών NOx.

Η πρόκληση για τους κατασκευαστές Ναυτικών Κινητήρων είναι ο έλεγχος των εκπομπών οξειδίων του αζώτου χωρίς την παράλληλη αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της αύξησης άλλων επιβλαβών εκπομπών.

Για την επίτευξη των ορίων που έχουν τεθεί και ισχύουν σήμερα, επιτυγχάνονται με την ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας του κινητήρα (εσωτερικά μέτρα). Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των εκπομπών NOx μέσω του ελέγχου του μηχανισμού καύσης είναι η αύξηση της πίεσης συμπίεσης σε συνδυασμό με την μείωση της προπορείας έγχυσης του καυσίμου και ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης έγχυσης του, εξελιγμένες τεχνικές έγχυσης καυσίμου, μείωση της θερμοκρασίας πληρώσεως του θαλάμου καύσης, ηλεκτρονικά ελεγχόμενη έγχυση καυσίμου και μεταβλητός χρονισμός έγχυσης αυτού. Περαιτέρω μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των ορίων που θα τεθούν στο άμεσο μέλλον, απαιτούν πρόσθετα μέτρα όπως η έγχυση νερού στον θάλαμο καύσης (χρήση γαλακτώματος νερού – καυσίμου, απευθείας έγχυση νερού στον θάλαμο καύσης και ύγρανση του αναρροφώμενου αέρα), ανακυκλοφορία καυσαερίου ή την χρήση συστημάτων επεξεργασίας καυσαερίων.

Η πλέον πρόσφορη μέθοδος για τον περιορισμό των εκπομπών NOx είναι η μείωση της προπορείας έγχυσης καυσίμου καθώς επιτυγχάνει την συμμόρφωση με τα ισχύοντα όρια εκπομπών χωρίς την εγκατάσταση πρόσθετων συστημάτων ή τροποποίηση μερών του κινητήρα, που συνεπάγεται και αύξηση του κόστους. Για την περαιτέρω μείωση των εκπομπών NOx είναι μέσω της χρήσης γαλακτώματος νερού – καυσίμου, καθώς επιτυγχάνει μείωση των εκπομπών NOx με το χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και χωρίς μεγάλη αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και την αύξηση των υπολοίπων επιβλαβών εκπομπών.

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε ο συσχετισμός των εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου με την λειτουργική κατάσταση 2-X Κινητήρα Ντίτζελ Ηλεκτροπαραγωγής, αφού πρώτα διερευνήθηκε ο μηχανισμός σχηματισμού των Οξειδίων του Αζώτου και τις διαθέσιμες τεχνικών για τον περιορισμό τους.

Από τις μετρήσεις των εκπομπών των Οξειδίων του Αζώτου που έγιναν παράλληλα με τις μετρήσεις που διενεργήθηκαν για τον προσδιορισμό της κατάστασης του 2-X κινητήρα Ντίτζελ, παρατηρήθηκε ότι αυτές στο φορτίο των 9.5 MW υπερβαίνουν το όριο του IMO (19.3 gr/kWh με όριο τα 17 gr/kWh). Αντιθέτως στα μερικά φορτία των 6 και 8 MW, οι εκπομπές που μετρήθηκαν ήταν χαμηλότερες από το όριο.

Από την ανάλυση των λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα, διαπιστώθηκε ότι οι αυξημένες εκπομπές Οξειδίων του Αζώτου στο μεγάλο φορτίο οφείλονται στους εξής παράγοντες:

- Στην αυξημένη πίεση σάρωσης σε σχέση με την κανονική (Δοκιμές Παραλαβής). Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του διαθέσιμου οξυγόνου στον θάλαμο καύσης γεγονός που επιβεβαιώνεται απόλυτα και από την αυξημένη ποσότητα οξυγόνου στο καυσαέριο.

- Όλοι οι κύλινδροι του κινητήρα παρουσιάζουν ελαφρά αυξημένη προπορεία έγχυσης, γεγονός που όπως έχουμε αναπτύξει οδηγεί στην αύξηση των εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου
- Μικρή συμβολή στην αύξηση αυτή των εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου έχει και η αυξημένη θερμοκρασία εξαγωγής του αέρα από το ψυγείο σάρωσης, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην αυξημένη πίεση σάρωσης που παρατηρείται στα υψηλά φορτία
- Από το διάγραμμα έκλυσης θερμότητας προκύπτει ότι ο μηχανισμός καύσης όλων των κυλίνδρων συμβάλει στις εκπομπές NOx λόγω έντονα προαναμεμειγμένης καύσης.

Για τον περιορισμό των αυξημένων εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου προτείνονται τα ακόλουθα:

1. Επαναφορά της προπορείας έγχυσης στην κανονική της τιμή
2. Μείωση της πίεσης σάρωσης και επαναφορά της σε κανονικές τιμές. Η μείωση της πίεσης σάρωσης θα επιφέρει μείωση και στην θερμοκρασία του αέρα σάρωσης. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω της συντήρησης του συστήματος υπερπλήρωσης και κύρια του ελέγχου της πίεσης στον οχετό εξαγωγής του κινητήρα.

Κατά συνέπεια από την παρούσα εργασία φαίνεται ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου με την λειτουργική κατάσταση των κινητήρων.