



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΗΣ ΦΟΡΗΤΟΥ
ΑΝΑΛΥΤΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x ΝΑΥΤΙΚΩΝ
ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΕΝ ΠΛΩ

Διπλωματική εργασία του Μπενέκου Παρασκευά

Επιβλέπων :
Καθηγητής Δημήτριος Θ. Χουντάλας

Αθήνα, Οκτώβριος, 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΗΣ ΦΟΡΗΤΟΥ
ΑΝΑΛΥΤΗ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x ΝΑΥΤΙΚΩΝ
ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΑΙ ΕΝ ΠΛΩ**

Διπλωματική εργασία του Μπενέκου Παρασκευά

Εξεταστική επιτροπή :

Δ. Θ. Χουντάλας (Καθηγητής Ε.Μ.Π, Επιβλέπων)

Κ. Δ. Ρακόπουλος (Καθηγητής Ε.Μ.Π)

Ε. Γ. Γιακουμής (Λέκτορας Ε.Μ.Π)

Αθήνα, Οκτώβριος, 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο και το πιο δημιουργικό στάδιο της φοίτησης μου στην Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κατά την διάρκεια της φοίτησης μου, απέκτησα πλήθος γνώσεων και εμπειριών, οι οποίες συνέβαλλαν στην ανάπτυξη ακαδημαϊκών αρχών που θα με καθοδηγούν πάντα. Η εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς τη βοήθεια και τη καθοδήγηση ορισμένων ανθρώπων στους οποίους οφείλω να αποδώσω ευχαριστίες. Πρωτίστως, οφείλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κύριο Δημήτριο Χουντάλα, ο οποίος αφενός μου παρείχε τις κατάλληλες γνώσεις και κίνητρα για να ασχοληθώ με το αντικείμενο αυτό και αφετέρου με καθοδήγησε έμπρακτα και μου συμπαραστάθηκε αμέριστα σε όλα τα στάδια της εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Μηχανολόγων Μηχανικών και ιδιαίτερα τους υποψήφιους διδακτορικούς κ. Βασίλη Λάμαρη, κ. Αθανάσιο Δημαράτο και κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο, των οποίων η συνεισφορά στις εργαστηριακές μετρήσεις ήταν καθοριστική. Τέλος, θα ήθελα από τα βάθη της καρδιάς μου, να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ηλία και Αδαμαντία, καθώς και τα αδέρφια μου Νικόλαο και Γεώργιο, τόσο για την αμέριστη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου, όσο και για την άνευ όρων στήριξη όλων των στόχων μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της δυνατότητας χρήσης ηλεκτροχημικών αισθητήρων και εν γένει φορητού αναλυτή, ως εναλλακτική λύση έναντι της χρήσης πρότυπων μεθόδων, που παρουσιάζουν πρακτικές δυσκολίες για μετρήσεις συγκεντρώσεων των καυσαερίων σε ναυτικούς κινητήρες Ντήζελ εν πλω. Η αξιολόγηση του φορητού αναλυτή, βασίζεται τόσο σε εκτενή πειραματική διερεύνηση που διεξάχθηκε στο Εργαστήριο Μ.Ε.Κ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανολόγων, όσο και σε εφαρμογή του, σε εν λειτουργία ναυτικού κινητήρα Ντήζελ. Στα πλαίσια της ενδελεχούς διερεύνησης, ο φορητός αναλυτής εξετάστηκε για την δυνατότητα χρήσης προκειμένου να προσδιοριστεί με την απαιτούμενη ακρίβεια η στοιχειομετρική σύσταση του καυσαερίου και η χρήση αυτών των τιμών για τον προσδιορισμό της ειδικής εκπομπής οξειδίων του αζώτου($\text{NO}_x[\text{g/kWh}]$). Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της συμμόρφωσης του κινητήρα με το Κανονισμό (13) του “Παραρτήματος VI” της διεθνούς σύμβασης “MARPOL 73/78” σχετικά με τα πρότυπα όρια εκπομπών NO_x .

Summary

The purpose of this thesis is to evaluate the possibility to use electrochemical sensors and portable emissions analyzer in general, as an alternative to the use of standard exhaust gas analyzers, which present practical difficulties for on-board measurement of marine diesel engine gaseous exhaust emissions. The evaluation of the portable analyzer is based on both extensive experimental research conducted at the Internal Combustion Engine Laboratory (I.C.E.L) of the Mechanical Engineering School and its application on a marine diesel engine whilst in operation. As part of this thorough investigation, the portable analyzer was tested in relation to its potential and its accuracy in measuring the stoichiometric composition of the exhaust gas, determining the specific emissions of nitrogen oxides ($\text{NO}_x[\text{g/kWh}]$) and monitoring engines' compliance with the Regulation (13), Annex VI of the International Convention "MARPOL 73/78" regarding NO_x emissions standards.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ -ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ DIESEL.....	4
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ Μ.Ε.Κ.	5
1.1.1 Κατηγοριοποίηση Μ.Ε.Κ.....	6
1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL.....	8
1.2.1 Εξωτερική Λειτουργία	8
1.2.2 Εσωτερική Λειτουργία.....	11
1.2.3 Η Επικράτηση του Κινητήρα Diesel.....	13
1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ.....	14
1.3.1 Κατηγοριοποίηση Ναυτικών Κινητήρων Diesel	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΚΑΥΣΗ – ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ	17
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΚΑΥΣΗ.....	18
2.1.1 Χημεία της Καύσης	18
2.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL	21
2.2.1 Θεμελιώδεις Εξισώσεις Καύσης στις Εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ	22
2.2.1.1 Εξισώσεις Καύσης Τυχαίου Υγρού Καυσίμου.....	22
2.2.1.2 «Τυπικό Καύσιμο»	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΜΗΧΑΝΕΣ DIESEL	26
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ Μ.Ε.Κ.	27
3.2 ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΟΙ ΡΥΠΟΙ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ DIESEL.....	28
3.2.1 Οξείδια του Αζώτου(NO _x)	29
3.2.1.1 Τα Οξείδια του Αζώτου (NO _x)	29
3.2.1.2 Σχηματισμός Οξειδίων του Αζώτου (NO _x).....	29
3.2.2 Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	30
3.2.2.1 Το Μονοξείδιο του Άνθρακα(CO)	30
3.2.3 Άκαυστοι Υδρογονάνθρακες(HC)	31
3.2.3.1 Οι Άκαυστοι Υδρογονάνθρακες (HC).....	31
3.2.3.2 Σχηματισμός Άκαυστων Υδρογονανθράκων (HC)	31
3.2.4 Σωματιδιακές εκπομπές	32
3.2.4.1 Γενικά	32
3.2.4.2 Αιθάλη(soot).....	32
3.2.4.2.1 Η Αιθάλη(soot)	32
3.2.4.2.2 Σχηματισμός Αιθάλης(soot)	33
3.2.5 Οξείδια του Θείου(SO ₂).....	35
3.2.5.1 Τα Οξείδια του Θείου(SO ₂).....	35
3.2.6 Διοξείδιο του Άνθρακα(CO ₂) ^{**}	35

3.2.6.1 Το Διοξείδιο του Άνθρακα(CO ₂).....	35
3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	36
3.3.1 Εισαγωγή.....	36
3.3.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Εκπομπή Ρύπων	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΑΛΥΤΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	43
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΑ ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΌΡΓΑΝΑ	44
4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ	44
4.3 ΌΡΓΑΝΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	46
4.3.1 Μέθοδος Orsat [O ₂ , CO , CO ₂].....	46
4.3.2 Παραμαγνητικός Αναλυτής (ParaMagnetic Detector(PMD)) [O ₂].....	47
4.3.3 Καταλυτική Καύση [O ₂ , CO].....	49
4.3.4 Αναλυτής Zirconium Dioxide(ZRDO)(Ηλεκτροχημική Ανίχνευση) [O ₂]	49
4.3.5 Αναλυτής Επιλεκτικής Απορρόφησης Υπέρυθρης Ακτινοβολίας (Non-Dispersive Infrared Analyser(NDIR)) [CO , CO ₂ , SO ₂]	50
4.3.6 Αναλυτής Χημικοφωταύγειας (ChemiLuminescence Analyser(CLA)) [NO _x].....	53
4.3.7 Αναλυτής Ανίχνευσης Ιονισμού Φλόγας (FammenIonisation Detector (FID) [HC]	56
4.3.8 Μετρητής Bacharach για την Καταγραφή του Δείκτη Αιθάλης [Αιθάλη(Soot)].....	59
4.3.9 Βαθμός Αμαυρώσεως κατά Ringelmann [Αιθάλη (Soot)]	59
4.3.10 Ισοκίνητική αναρρόφηση [Σωματιδιακές εκπομπές (PM)]	59
4.3.11 Ηλεκτροχημικοί Αισθητήρες(ElectroChemical Sensors(ECSs)).....	61
4.3.11.1 Ηλεκτροχημεία	61
4.3.11.2 Περιγραφή Ηλεκτροχημικών Αισθητήρων (ElectroChemical Sensors (ECSs)) [O ₂ , CO , NO _x , SO ₂].....	62
4.4 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΑΛΥΤΩΝ ΑΝΑ ΡΥΠΟ	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - Ο ΔΙΕΘΝΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ(ΙΜΟ, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION) ΚΑΙ ΤΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΑΕΡΙΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	66
5.1 Ο ΔΙΕΘΝΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ(ΙΜΟ, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION)	67
5.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΙΜΟ	68
5.2.1 Γενική Συνέλευση(Assembly)	68
5.2.2 Συμβούλιο(Council).....	68
5.2.3 Επιτροπές	69
5.2.3.1 Επιτροπή Ασφάλειας της Ναυτιλίας (Maritime Safety Committee(MSC)).	69
5.2.3.2 Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος(Marine Environment Protection Committee(MPEC)	69
5.2.3.3 Νομική Επιτροπή (Legal Committee(LC))	70

5.2.3.4 Επιτροπή Τεχνικής Συνεργασίας(Technical Co-operation Committee (TCC))	70
5.2.3.5 Επιτροπή Διευκόλυνσης(Facilitation Committee)	70
5.2.4 Υποεπιτροπές	70
5.3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ	
ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	71
5.3.1 Εισαγωγή	71
5.3.2 Διεθνής Σύμβαση (MARPOL)	72
5.3.2.1 Εισαγωγή	72
5.3.2.2 Παραρτήματα (MARPOL 73/78)	73
5.3.2.2.1 Παράρτημα VI(Annex VI)	73
5.3.3 Πρότυπα (όρια) Εκπομπών NOx και SOx	74
5.3.3.1 Εισαγωγή	74
5.3.3.2 Διάκριση Ορίων Εκπομπής Ρύπων	75
5.3.3.3 Πρότυπα (όρια) Εκπομπών NOx	76
5.3.3.4 Πρότυπα (όρια) Εκπομπής SOx	77
5.3.3.5 Παράρτημα VI - Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα	77
5.3.3.6 Παράρτημα VI και άλλοι ρύποι	78
5.3.4 Εφαρμογή Ορίων Εκπομπών	78
5.3.4.1 Εισαγωγή	78
5.3.4.2 Υπολογισμός Ειδικής Εκπομπής NOx(g/kWh)	79
5.3.4.2.1 Ανάλυση Καυσαερίου –Αναλυτές Καυσαερίου-Δειγματοληψία	79
5.3.4.2.2 Προσδιορισμός των Απαιτούμενων Τεχνικών Παραμέτρων του Κινητήρα	80
5.3.4.2.3 Προσδιορισμός των Συνθηκών Περιβάλλοντος	82
5.3.4.2.4 Δοκιμές Κύκλων-Φορτία Δοκιμών	82
5.3.4.2.5 Απλοποιημένες μέθοδοι υπολογισμού της ειδικής εκπομπής NOx(g/kwh) (Simplified measurement method)	83
5.3.4.2.6 Μέθοδος 2, Ισορροπίας οξυγόνου /άνθρακα σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα	84
5.3.5 Σχηματική Αναπαράσταση Διαδικασιών για την Επιθεώρηση και την Πιστοποίηση Ναυτικών Κινητήρων Diesel	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΗΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΗ	89
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	90
6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	91
6.2.1 Εργαστηριακή Κλίνη	91
6.2.2 Περιγραφή του Κινητήρα	92
6.2.3 Περιγραφή των Πρότυπων Εργαστηριακών Αναλυτών Καυσαερίου	93
6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	94
6.3.1 Σημεία Λειτουργίας κατά την μέτρηση	94
6.3.2 Μετρήσεις των Παραμέτρων του Κινητήρα	94
6.3.3 Μετρήσεις Συγκεντρώσεων Καυσαερίου	95
6.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	96
6.4.1 Εισαγωγή	96
6.4.2 Εκπομπές Μονοξειδίου του Αζώτου (NO)	97
6.4.2.1 Σύγκριση Τιμών Συγκεντρώσεων NO	97

6.4.2.2 Απόλυτο και Σχετικό Σφάλμα Συγκεντρώσεων NO	99
6.4.3 Εκπομπή Μονοξειδίου του Άνθρακα (CO)	100
6.4.3.1 Σύγκριση Τιμών Συγκεντρώσεων CO	100
6.4.3.2 Απόλυτο και Σχετικό Σφάλμα Συγκεντρώσεων CO	102
6.4.4 Εκτίμηση Συγκεντρώσεων O ₂ και CO ₂ με την Υπολογιστική Μέθοδο	103
6.4.4.1 Γενική Περιγραφή της Υπολογιστικής Μεθόδου για την Εκτίμηση του O ₂ και του CO ₂	103
6.4.4.2 Εκπομπή Διοξειδίου του Άνθρακα (CO ₂)	104
6.4.4.2.1 Σύγκριση Τιμών Συγκεντρώσεων CO ₂	104
6.4.4.2.2 Απόλυτο και Σχετικό σφάλμα συγκεντρώσεων CO ₂	107
6.4.4.3 Εκπομπή Οξυγόνου (O ₂)	108
6.4.4.3.1 Σύγκριση Τιμών Συγκεντρώσεων O ₂	108
6.4.4.3.2 Απόλυτο και Σχετικό σφάλμα συγκεντρώσεων O ₂	111
6.4.5 Επίδραση του Σφάλματος Μέτρησης των Συγκεντρώσεων (O ₂ , CO ₂ , NO, CO) στην Εκτίμηση του Λόγου Ισοδυναμίας Αέρα, της Παροχής Αέρα Καύσης και της Ειδικής Εκπομπής NO _x	112
6.4.5.1 Λόγος Ισοδυναμίας Αέρα [λα]	113
6.4.5.2 Παροχή Αέρα Καύσης [kg / h]	115
6.4.5.3 Ειδική Εκπομπή NO _x [g/kWh]	116
6.4.6 Συμπεράσματα	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΦΟΡΗΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΗ ΣΕ ΝΑΥΤΙΚΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΝ ΠΛΩ.....119

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

7.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ..... 120

7.2.1 Μετρημένες Συγκεντρώσεις

7.2.2 Εκπομπή Οξυγόνου (O₂) και Διοξειδίου του Άνθρακα(CO₂)

7.2.2.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΟΞΥΓΟΝΟΥ (O₂)..... 121

7.2.2.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ (CO₂)

7.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ NO_x(G/KWH) ΕΝ ΠΛΩ.....123

7.3.1 Παράμετροι Κινητήρα

7.3.1.1 ΙΣΧΥΣ

7.3.1.2 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟ ΚΑΥΣΙΜΟ..... 123

7.3.1.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ..... 124

7.3.2 Διόρθωση Συγκέντρωσης NO_x για Μετατροπή τους σε Ξηρή από Υγρή Βάση (Kw.r')

7.3.3 Διόρθωση της Επίδρασης της Θερμοκρασίας και της Υγρασίας στο Ξηρό ρεύμα των NO_x(KHDIES)..... 125

7.3.4 Υπολογισμός Ειδικής Εκπομπής Οξειδίων του Αζώτου NO_x(g/kWh)..... 125

7.3.6 Επίδραση του Σφάλματος Μέτρησης του O₂ και του CO₂ στο Υπολογισμό της Ειδικής Εκπομπής NO_x

7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....129

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	134
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	134
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2	135

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1. Σχηματική αναπαράσταση διεργασιών δίχρονης μηχανής Diesel.	9
Εικόνα 1.2. Σχηματική αναπαράσταση διεργασιών τετράχρονης μηχανής Diesel.....	10
Εικόνα 1.3. Τετράχρονος μεσόστροφος ναυτικός κινητήρας(αριστερά) και Δίχρονος βραδύστροφος ναυτικός κινητήρες(δεξιά).....	15
Εικόνα 2.1. Στάδια της καύσης σε δυναμοδεικτικό διάγραμμα κινητήρα Diesel.....	21
Εικόνα 3.1. Συνήθειες εκπεμπόμενοι ρύποι από μηχανή Diesel	28
Εικόνα 3.2. Συγκέντρωση αιθάλης κατά την καύση με έγχυση σε κινητήρα Diesel.....	34
Εικόνα 3.3. Μέθοδοι μείωσης των NOx.....	37
Εικόνα 3.4. Σχηματική απεικόνιση κινητήρα με διάταξη καταλυτικής αναγωγής καυσαερίων.	42
Εικόνα 4.1. Τυπική συσκευή Orsat.....	47
Εικόνα 4.2. Δομή του αναλυτή οξυγόνου που βασίζεται στο φαινόμενο του παραμαγνητισμού	48
Εικόνα 4.3. Αναλυτής ZRDO	50
Εικόνα 4.4. Σχηματική δομή του υπέρυθρου αναλυτή καυσαερίων παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα	51
Εικόνα 4.5. Σχηματική διάταξη αναλυτή χημικοφωταύγειας (CLA)	54
Εικόνα 4.6. Αρχή λειτουργίας FID	56
Εικόνα 4.7. Διάταξη κεντρικής μονάδας καύσεως και ανιχνεύσεως ακαύστων υδρογονανθράκων FID	57
Εικόνα 4.8. Σχηματική διάταξη ισοκινητικής αναρρόφησης στερεών σωματιδίων	60
Εικόνα 4.9. (α)Σχηματική αναπαράσταση της διπλοστοιβάδας Helmholtz.β)Πτώση του δυναμικού (φ)κατά μήκος της διπλοστοιβάδας	62
Εικόνα 4.10. Τυπικός αμπερομετρικός αισθητήρας αερίων με υγρό ηλεκτρολύτη.....	63
Εικόνα 5.1. Σημαία του IMO.....	67
Εικόνα 5.2. Ο IMO σε παγκόσμιο επίπεδο.	677
Εικόνα 5.3. Οργανόγραμμα οργανισμού IMO	71
Εικόνα 5.4. Περιοχές της Ευρώπης που ισχύουν αυστηρές απαιτήσεις για τα όρια εκπομπών οξειδίων του θείου (SECA)	76
Εικόνα 5.5. Τυπική καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου συναρτήση του φορτίου.	82
Εικόνα 5.6. Διάγραμμα ροής I, Πρωτογενής πιστοποίηση της μηχανής κατά την διάρκεια κατασκευής.	87
Εικόνα 5.7. Διάγραμμα ροής II, Πρώτη επιθεώρηση της μηχανής στο πλοίο.....	88
Εικόνα 5.8. Διάγραμμα ροής III, Περιοδικές επιθεωρήσεις στο πλοίο.	88
Εικόνα 6.1. Σχηματική διάταξη της πειραματικής εγκατάστασης.....	92
Εικόνα Π.1. Πιστοποιητικό Germanischer Lloyd (GL)(certificate no.59488-08HH).....	134
Εικόνα Π.2. Πιστοποιητικό DET NORSE VERITAS(DNV)(certificate No.A-11316)....	134

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 5.1. Όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου ($\text{NO}_x(\text{g/kWh})$) συναρτήσει των στροφών του κινητήρα	74
Διάγραμμα 5.2. Όρια εκπομπών οξειδίων του θείου ($\text{SO}_x(\text{g/kWh})$) συναρτήσει των στροφών του κινητήρα.....	77
Διάγραμμα 6.1. Σύγκριση συγκεντρώσεων NO από τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων.....	97
Διάγραμμα 6.2. Σύγκριση των συγκεντρώσεων NO από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε χαμηλό φορτίο.....	98
Διάγραμμα 6.3. Σύγκριση των συγκεντρώσεων NO από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε υψηλό φορτίο.....	98
Διάγραμμα 6.4. Απόλυτο σφάλμα μετρήσεων NO μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.....	99
Διάγραμμα 6.5. Σχετικό σφάλμα μετρήσεων NO μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή	99
Διάγραμμα 6.6. Σύγκριση συγκεντρώσεων CO από τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων.....	100
Διάγραμμα 6.7. Σύγκριση των συγκεντρώσεων CO από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε χαμηλό φορτίο	101
Διάγραμμα 6.8. Σύγκριση των συγκεντρώσεων CO από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε υψηλό φορτίο.....	101
Διάγραμμα 6.9. Απόλυτο σφάλμα μετρήσεων CO μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.....	102
Διάγραμμα 6.10. Σχετικό σφάλμα μετρήσεων CO μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.....	103
Διάγραμμα 6.11. Σύγκριση συγκεντρώσεων CO_2 από τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων.....	105
Διάγραμμα 6.12. Σύγκριση των συγκεντρώσεων CO_2 από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε χαμηλό φορτίο.....	106
Διάγραμμα 6.13. Σύγκριση των συγκεντρώσεων CO_2 από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε υψηλό φορτίο.....	106
Διάγραμμα 6.14. Απόλυτο σφάλμα μετρήσεων CO_2 μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.....	107
Διάγραμμα 6.15. Σχετικό σφάλμα μετρήσεων CO_2 μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.....	107
Διάγραμμα 6.16. Σύγκριση συγκεντρώσεων O_2 από τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων.....	109
Διάγραμμα 6.17. Σύγκριση των συγκεντρώσεων O_2 από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε χαμηλό φορτίο.....	110
Διάγραμμα 6.18. Σύγκριση των συγκεντρώσεων O_2 από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε υψηλό φορτίο.....	110

Διάγραμμα 6.19. Απόλυτο σφάλμα μετρήσεων O_2 μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.....	111
Διάγραμμα 6.20. Σχετικό σφάλμα μετρήσεων O_2 μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.....	111
Διάγραμμα 6.21. Λόγος ισοδυναμίας αέρα(λα) για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε χαμηλό φορτίο.....	114
Διάγραμμα 6.22. Λόγος ισοδυναμίας αέρα(λα) για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε υψηλό φορτίο.....	114
Διάγραμμα 6.23. Παροχή αέρα καύσης για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε χαμηλό φορτίο.....	115
Διάγραμμα 6.24. Παροχή αέρα καύσης για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε υψηλό φορτίο.....	115
Διάγραμμα 6.25. Η ειδική εκπομπή $NO_x(g/kWh)$ για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε χαμηλό φορτίο.....	116
Διάγραμμα 6.26. Η ειδική εκπομπή $NO_x(g/kWh)$ για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε υψηλό φορτίο.....	116
Διάγραμμα 7.1. Συγκέντρωση οξυγόνου(%) στα καυσαέρια σε όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής.....	121
Διάγραμμα 7.2. Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (%) στα καυσαέρια σε όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής.....	122
Διάγραμμα 7.3. Ειδική εκπομπή(kg/kWh) και συγκέντρωση NO_x (ppm) σε όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής.....	126
Διάγραμμα 7.4. Ειδική εκπομπή NO_x με τις μετρήσεις του φορητού αναλυτή και τις εκτιμήσεις της πρότυπης μεθόδου.....	127

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1. Σύγκριση αριθμών ατμοστροβίλου - Diesel για την πρόωση πλοίων (έτη 1950 – 1980).....	14
Πίνακας 2.1. Ιδιότητες κανονικού καυσίμου.....	25
Πίνακας 3.1. Επίδραση μεταβολών για μείωση ρυπαντών σε μεγάλους 2-X ναυτιλιακούς κινητήρες.....	37
Πίνακας 5.1. Όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO _x (g/kWh)) συναρτήσει των στροφών του κινητήρα.....	76
Πίνακας 5.2. Κύριοι παράμετροι μηχανής σύμφωνα με τον IMO ,για την σκιαγράφιση του προφίλ της ειδικής εκπομπής NO _x της μηχανής.....	81
Πίνακας 6.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαστηριακής μηχανής	93
Πίνακας 6.2. Συνοπτική παρουσίαση πρότυπων αναλυτών του εργαστηρίου.....	93
Πίνακας 6.3. Σημεία λειτουργίας πειραματικής διαδικασίας.....	94
Πίνακας 6.4. Παράμετροι μηχανής κατά την πειραματική διαδικασία.....	95
Πίνακας 6.5. Αέριοι Ρύποι και Αναλυτές.....	96
Πίνακας 6.6. Συγκεντρώσεις αέριων εκπομπών κατά την πειραματική διαδικασία.....	96
Πίνακας 6.7. Συγκεντρωτικός πίνακας εκτιμήσεων πρότυπης μεθόδου και μετρήσεων φορητού αναλυτή για CO ₂	104
Πίνακας 6.8. Συγκεντρωτικός πίνακας εκτιμήσεων πρότυπης μεθόδου και μετρήσεων φορητού αναλυτή για O ₂	108
Πίνακας 6.9. Συγκεντρωτικός πίνακας των τεσσάρων μεγεθών όπως υπολογίσθηκαν στα σημεία λειτουργίας του κινητήρα.....	113
Πίνακας 7.1. Συγκεντρώσεις συστατικών καυσαερίου στα σημεία λειτουργίας.....	120
Πίνακας 7.2. Συγκεντρωτικός πίνακας εκτιμήσεων πρότυπης μεθόδου και μετρήσεων φορητού αναλυτή για O ₂	121
Πίνακας 7.3. Συγκεντρωτικός πίνακας εκτιμήσεων πρότυπης μεθόδου και μετρήσεων φορητού αναλυτή για CO ₂	122
Πίνακας 7.4. Χαρακτηρισμός σημείων λειτουργίας ναυτικής μηχανής μέσω του φορτίου(%),της ταχύτητας περιστροφής(rpm) και τις ισχύς(kW).....	123
Πίνακας 7.5. Κατανάλωση καυσίμου(kg/h) στα σημεία λειτουργίας.....	123
Πίνακας 7.6. Συνθήκες περιβάλλοντος στα σημεία λειτουργίας.....	124
Πίνακας 7.7. Διόρθωση Kw,r` (wet to dry correction) για την συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου NO _x	124
Πίνακας 7.8. Διόρθωση(KHDIES) για την επίδραση της θερμοκρασίας και τις υγρασίας στο ξηρό ρεύμα.....	125
Πίνακας 7.9. Ειδική εκπομπή NO _x (g/kWh) ανά φορτίο και συνολικά του κύκλου.....	125
Πίνακας 7.10. Τιμές ειδικής εκπομπής NO _x (g/kWh)σε όλο το εύρος του κινητήρα.....	126

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, το θαλάσσιο εμπόριο διαχειρίζεται το 90% των παγκόσμιων εμπορευμάτων και αποτελεί σημαντικό παράγοντα διεθνούς οικονομικής ευμάρειας και σταθερότητας. Οι εμφανείς συνέπειες της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον(αύξηση της θερμοκρασίας, φαινόμενο του θερμοκηπίου, όξινη βροχή κ.ά.) και η ευαισθητοποίηση των κρατικών φορέων και των επιστημονικών οργανισμών στην επερχόμενη κλιματική αλλαγή, δεν μπορούσε να αφήσει ανεπηρέαστη την ναυτιλιακή κοινότητα. Το γεγονός αυτό, οδήγησε τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό(IMO) στην έκδοση της διεθνής σύμβασης “MARPOL 73/78” για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος, από την ρύπανση που προκαλείται από την λειτουργία των πλοίων και τυχόν ναυτικών ατυχημάτων. Εμπεριέχει κανονισμούς που αναβαθμίζονται συνεχώς και που στοχεύουν στην πρόληψη, μείωση και καταστολή της ρύπανσης από πετρέλαιο, χημικά, επιβλαβείς ουσίες σε συσκευασία, λύματα και απορρίμματα και εν τέλει αέριους ρυπαντές.

Οι αέριοι ρυπαντές, προσαρτήθηκαν αρχικά στην σύμβαση το 1997 με πρωτόκολλο, με την ονομασία "1997 Protocol" και μεταγενέστερα ανανεώθηκαν με αυστηρότερες τροπολογίες το 2008. Αν και η συνεισφορά της ναυτιλίας στην παγκόσμια ατμοσφαιρική ρύπανση είναι μικρή, συγκεκριμένα, το ποσοστό εκπεμπόμενων ρύπων από τα πλοία ανέρχεται στα 2.7% των παγκόσμιων ρύπων, πραγματοποιούνται αποφασιστικά βήματα για τον έλεγχο και περιορισμό τους. Ο IMO όρισε τρία όρια εκπομπών(σε g/kWh) συναρτήσει των στροφών του κινητήρα, με τη διαδεδομένη ονομασία “Tier I”, ”Tier II” και “Tier III”, για δύο κύριους ρύπους, τα οξείδια του αζώτου(NOx) και τα οξείδια του θείου(SOx), τα οποία αποδεδειγμένα συμβάλουν στην καταστροφή του όζοντος και στη δημιουργία όξινης βροχής αντίστοιχα. Το “Tier I”, το οποίο αναφέρεται στο πρωτόκολλο του 1997, τέθηκε σε ισχύ το Μάιο του 2005 και αφορά κινητήρες άνω των 130 kW που έχουν εγκατασταθεί ή έχουν υποστεί τροποποιήσεις σε πλοία μετά την 1^η Ιανουαρίου 2000. Σε παγκόσμιο επίπεδο και για σύγχρονες μηχανές (κατασκευασμένες ή τροποποιημένες μετά το 2000) ισχύει το “Tier II” που εγκρίθηκε με τροπολογία του 2008 και θα τεθεί σε ισχύ την 1^η Ιουλίου του 2010. Επιπρόσθετα στην ίδια τροπολογία ορίστηκαν συγκεκριμένες ευαίσθητες περιβαλλοντολογικά περιοχές (“SOx & NOx Emission Control Areas”), στις οποίες θα ισχύσει από τον Ιούλιο του 2010 το πιο αυστηρό όριο “TierIII”. Επιπλέον, ο οργανισμός για να διασφαλίσει την σωστή εφαρμογή των κανονισμών, εξέδωσε

τεχνικούς κώδικες με την ονομασία “NOx Technical Code”, που καθορίζουν όλες τις τεχνικές προδιαγραφές για την αξιόπιστη μέτρηση των συγκεντρώσεων των καυσαερίων και το σωστό υπολογισμό των εκπεμπόμενων ρύπων των μηχανών σε g/kWh, τόσο σε υπό κατασκευή ναυτικούς κινητήρες, όσο και σε εν λειτουργία ναυτικούς κινητήρες.

Ένα ουσιαστικό ζήτημα για την βιωσιμότητα του όλου εγχειρήματος, είναι η εύρεση του κατάλληλου τεχνολογικού εξοπλισμού για την μέτρηση των καυσαερίων των εν λειτουργία πλοίων. Το πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι, ο διαδεδομένος και αξιόπιστος εργαστηριακός εξοπλισμός που εξειδικεύεται στην ανάλυση των καυσαερίων δεν είναι ο πλέον κατάλληλος για ναυτικές εφαρμογές. Εκτός του ότι το κόστος αγοράς του είναι υψηλό, απαιτείται αρκετός χρόνος τόσο για την προετοιμασία των μετρήσεων (συναρμολόγηση και βαθμονόμηση των μηχανημάτων), όσο και για την εκτέλεση αυτών, καθώς ο εξοπλισμός είναι στιβαρός, δυσκίνητος αλλά και ευαίσθητος. Όπως είναι κατανοητό, εκτός από τις εργατοώρες, η καθυστέρηση του πλοίου επιφέρει ανεπιθύμητη ζημία στους ναυλωτές. Το γεγονός αυτό, ώθησε εταιρίες μετρητικών συστημάτων να επικεντρωθούν και στην κατασκευή ελαφριών, ευκίνητων και οικονομικών πολυαναλυτών, που θα προσαρμόζονται εύκολα στο αφιλόξενο ναυτικό περιβάλλον, διεξάγοντας αξιόπιστες δειγματοληψίες και αναλύσεις καυσαερίων με χρήση ηλεκτροχημικών αισθητήρων. Ήδη, εταιρίες έχουν προωθήσει στο εμπόριο μοντέλα πολυαναλυτών αλλά ελάχιστοι από αυτούς τηρούν τις τεχνικές προδιαγραφές όπως τις έχει ορίσει ο IMO για την πραγματοποίηση “on board” μετρήσεων. Οι πρωτότυποι αυτοί αναλυτές υπόκεινται σε εξονυχιστικό έλεγχο από διεθνή και έγκυρα επιστημονικά ιδρύματα ώστε να λάβουν αναγνωρισμένα πιστοποιητικά.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης ηλεκτροχημικών αισθητήρων και εν γένει φορητών αναλυτών ως εναλλακτική λύση έναντι της χρήσης πρότυπων μεθόδων που παρουσιάζουν σημαντικές πρακτικές δυσκολίες για εν πλω μετρήσεις. Η διερεύνηση θα βασιστεί τόσο σε μια εκτενή εργαστηριακή έρευνα που διεξάχθηκε στο Εργαστήριο Μ.Ε.Κ του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, όσο και σε επιτόπια μέτρηση σε εν λειτουργία ναυτικού κινητήρα Diesel. Στο πλαίσιο της αξιολόγησης επιλέχθηκε η χρήση ενός αντιπροσωπευτικού φορητού αναλυτή, με την ονομασία “Testo-350 MARITIME”, ο

οποίος φέρει πιστοποιητικά συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις του "Παραρτήματος VI" της διεθνούς σύμβασης "MARPOL 73/78" (Βλέπε : **παράρτημα 1**). Βασικός άξονα της αξιολόγησης του φορητού αναλυτή αποτελεί η σύγκριση των μετρήσεων των συγκεντρώσεων των συστατικών του καυσαερίου που μετρήθηκαν με το φορητό αναλυτή και των μετρήσεων που προκύπτουν από τους πρότυπους εργαστηριακούς αναλυτές, των οποίων η αξιοπιστία είναι δεδομένη. Συμπληρωματικά, αξίζει να αναφερθεί ότι δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε την ειδική εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO_x[g/kWh]) καθώς ο προσδιορισμός και η διατήρησή της εντός των επιτρεπόμενων ορίων αποτελεί σημαντική ευθύνη για το πλήρωμα και την ναυτιλιακή εταιρία.

Εν κατακλείδι, για την σφαιρική κατανόηση του αντικειμένου της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται διάφορα σχετικά θέματα σε θεωρητικό επίπεδο. Αρχικά πραγματοποιούμε μια συνοπτική αναφορά στους κινητήρες Diesel και στον τρόπο λειτουργίας τους(Κεφάλαιο 1), ενώ προχωρούμε στην επιγραμματική περιγραφή της διαδικασίας της καύσης και κάποιων βασικών εξισώσεων(Κεφάλαιο 2), στην παρουσίαση των εκπεμπόμενων ρύπων και την συνεισφορά τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση(Κεφάλαιο 3). Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται εκτενής αναφορά στους αναλυτές καυσαερίων, επικεντρώνοντας στις μεθόδους ανάλυσης αυτών. Εν συνεχεία, (Κεφάλαιο 5) παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τη δομή του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) και των μέτρων που έχουν θεσπιστεί για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Στο ίδιο κεφάλαιο, δίνεται έμφαση στο τρόπο με τον οποίο σύμφωνα με τον IMO, υπολογίζεται η ειδική εκπομπή NO_x . Τελειώνοντας, προβαίνουμε στην εργαστηριακή αξιολόγηση του αναλυτή (Κεφάλαιο 6), η οποία σε συνδυασμό με την εφαρμογή του σε εν λειτουργία κινητήρα Diesel και τα συναφή αποτελέσματα (Κεφάλαιο 7), οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα (Κεφάλαιο 8).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ - ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ DIESEL

1.1 Εισαγωγή στις Μ.Ε.Κ.

Κινητήρες Εσωτερικής Καύσης ονομάζονται εκείνες οι κινητήριες μηχανές που μετατρέπουν άμεσα την αποθηκευμένη στο καύσιμο χημική ενέργεια σε κινητική, σε αντιδιαστολή με τις ατμομηχανές(μηχανές εξωτερικής καύσης), στις οποίες παρέχεται στον ατμό θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας από την (εξωτερική) καύση κάρβουνου, ξύλου κλπ. Η βασική ιδέα λειτουργίας του κινητήρα εσωτερικής καύσης ήταν η πυροδότηση ενός μείγματος εύφλεκτων αερίων ή υγρών, το οποίο θα εκρήγνυται μέσα στον κύλινδρο και θα κινεί έτσι ένα έμβολο.

Η εξέλιξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης που τροφοδοτούνται με υγρά καύσιμα, πραγματοποιήθηκε σταδιακά από επιστήμονες μηχανολόγους μηχανικούς. Η ιστορία των μηχανών εσωτερικής καύσης, αρχίζει μόλις το 1860,όταν ο Ζάν Ετιέν Λενουάρ κατασκευάζει το πρώτο πρακτικά χρησιμοποιούμενο κινητήρα, από τον οποίο προέρχονται όλοι οι άλλοι κινητήρες ΜΕΚ. Εντούτοις η αποδιδόμενη ισχύς ήταν πολύ μικρή καθώς το μείγμα γκαζιού-αέρα συμπιεζόταν ελάχιστα πριν την ανάφλεξη. Το πρόβλημα αυτό έλυσε ο Γερμανός μηχανικός Νίκολας Ότο, ο οποίος εφάρμοσε με επιτυχία για πρώτη φορά την αρχή του τετράχρονου κύκλου. Με το τετράχρονο κύκλο το μείγμα συμπιεζόταν, πράγμα που βελτίωσε σημαντικά την αποδιδόμενη ισχύ. Την ίδια περίπου εποχή άρχισε να χρησιμοποιείται αντί για το γκάζι η βενζίνη. Κατά την διάρκεια του 1880, σημειώθηκε η μεγαλύτερη πρόοδος από τους Γκότλμπ Νταϊμλερ και Κάρλς Μπέντς, οι οποίοι κατάφεραν να κατασκευάσουν το 1883 ένα κινητήρα που περιστρεφόταν τέσσερις φορές γρηγορότερα από τους κινητήρες Otto, και το 1887 ένα αυτοκινούμενο όχημα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο μηχανικός Ρούντολφ Ντίζελ εκδίδει το 1893 μία μελέτη με το τίτλο “Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschine und der heute bekannten Verbrennungsmotoren”(μεταφρ.”Θεωρία και Κατασκευή μιας Καινοτόμου Θερμικής Μηχανής για να αντικαταστήσει την Ατμομηχανή και της Μηχανές Εσωτερικής Καύσης που είναι γνωστές έως σήμερα”), πάνω στην οποία στηρίζει την κατασκευή της μηχανής Diesel.

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης, εξαιτίας της σημαντικής επιρροής τους στην παγκόσμια βιομηχανία και οικονομία, εξελίχθηκαν σύντομα σε συμπαγείς, ευέλικτες μονάδες, με σημαντικά χαρακτηριστικά. Ο ικανοποιητικός βαθμός απόδοσης των

κινητήρων MEK (20-50%), η στιβαρή και ανθεκτική κατασκευή τους, η ικανότητά τους να δουλεύουν ικανοποιητικά στα μερικά φορτία και η δυνατότητα χρήσης χαμηλής ποιότητας και κόστους καυσίμου, είναι λίγα από τα χαρακτηριστικά τους, που τους επέτρεψαν να κυριαρχήσουν στις επίγειες και εναέριες(παλιότερα) μεταφορές, στην ναυσιπλοΐα και στα αυτοκινούμενα μέσα μεταφοράς. Ενώ αντικατέστησαν σταδιακά τις ατμομηχανές στις μονάδες παραγωγής και στις ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες(κυρίως όπου η εγκατάσταση μεγάλων ατμοηλεκτρικών μονάδων είναι δαπανηρή, πχ. δίκτυο νησιού).

1.1.1 Κατηγοριοποίηση Μ.Ε.Κ

Η πολύχρονη πρακτική εμπειρία που αποκτήθηκε από την χρήση των MEK, σε συνδυασμό με την ραγδαία πρόοδο της τεχνολογίας, οδήγησαν στην εξέλιξη του τρόπου κατασκευής και λειτουργίας τους. Με το πέρασμα των χρόνων, οι MEK εξελίχθηκαν δημιουργώντας κάποιες κύριες υποκατηγορίες ανάλογα το τύπο εφαρμογής τους, το μέγεθος, την γεωμετρία κατασκευής τους, τον αριθμό στροφών τους, το κύκλο λειτουργίας τους(εξωτερική λειτουργία τους), την ρύθμιση ισχύος, το καύσιμο, και το τρόπο έναυσης του κύκλου.(εσωτερική λειτουργία):

- Εφαρμογή : Χρήση των MEK στην επίγεια, εναέρια, θαλάσσια μεταφορά (πχ. επίγεια αυτοκίνηση (αυτοκίνητα , μηχανές, φορτηγά), στην ναυσιπλοΐα, στα αεροσκάφη) και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μέγεθος : Διακρίνονται σε κινητήρες μεγάλης κλίμακας(κινητήρες πλοίων /ηλεκτροπαραγωγής), σε μεσαίας κλίμακας(αυτοκίνητα, φορτηγά) και μικρής(μοτοσυκλέτες, εργαλεία κ.α).
- Γεωμετρία/Δομή κατασκευής τους : Διακρίνονται στις περιστροφικές και στις παλινδρομικές εμβολοφόρες μηχανές (που κυριαρχούν στις MEK), διακρίνονται ανάλογα τον τρόπο με τον οποίο διατάσσονται οι κύλινδροι. Έτσι έχω τους κινητήρες εν σειρά, V, ειδικής διάταξης (X,Δ,W), boxer, αστεροειδείς.
 - *Μηχανές σειράς*: Έχουν τους κυλίνδρους σε μία γραμμή και είναι οι πιο συνηθισμένες εφαρμογές.
 - *Μηχανές τύπου V*: Οι κύλινδροι βρίσκονται συνήθως υπό γωνία 45°, 50°, 55°, 60°, 90°. Η γωνία των κυλίνδρων εξαρτάται από τον αριθμό των κυλίνδρων και από την κατασκευή του στροφαλοφόρου άξονα.

- *Μηχανές επίπεδες(boxer):* Έχουν τους κυλίνδρους τους σε γωνία 180° και χρησιμοποιούνται λόγω του μικρού τους ύψους στα φορτηγά, τα λεωφορεία και στις μηχανές τρένων.
- *Μηχανές αστεροειδούς τύπου:* Έχουν τους κυλίνδρους στις ακτίνες ενός κύκλου, στο κέντρο του οποίου βρίσκεται ο στροφαλοφόρος άξονας. Λόγω του μικρού τους όγκου από την σύνδεση όλων των διωστήρων σε ένα μόνο στρόφαλο, χρησιμοποιούνται κυρίως σε αεροπορικές εφαρμογές.
- *Μηχανές με ειδική διάταξη κυλίνδρων:* Οι μηχανές αυτές που έχουν τους κυλίνδρους σε σχήμα X, W, Δ, χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος.
- Κύκλο λειτουργίας(εξωτερική λειτουργία): Διακρίνονται σε τετράχρονες και δίχρονες.
- Πλήρωση με αέρα: Διακρίνονται σε φυσικής αναπνοής και υπερπληρωμένες.
- Στροφές λειτουργίας: Ανάλογα με το μέγιστο αριθμό στροφών που αναπτύσσουν ανά λεπτό, διακρίνονται σε αργόστροφες (έως 350 rpm), σε μεσαίων στροφών (έως 1200 rpm) και σε πολύστροφες(έως 5000 rpm).
- Εσωτερική λειτουργία(τρόπος έναυσης, ρύθμιση ισχύος, καύσιμο, καύση):
Από άποψη εσωτερικής λειτουργίας γίνεται η βασική διάκριση σε κινητήρες **Otto** και **Diesel**. Η διάκριση αυτή βασίζεται στον τρόπο ανάφλεξης (έναυσης) που επιδρά στον τρόπο καύσεως του καυσίμου, το οποίο μπορεί να είναι υγρό ή αέριο. Στους κινητήρες Otto η ανάφλεξη του μείγματος αέρα-καυσίμου, πραγματοποιείται με την βοήθεια κάποιου εξωτερικού μέσου, συνηθέστερα ενός ηλεκτρικού σπινθήρα. Αντίθετα στους κινητήρες Diesel, πραγματοποιείται αυτανάφλεξη λόγω της κατάλληλης εισαγωγής του καυσίμου στον κύλινδρο τη στιγμή κατά την οποία το περιεχόμενο του έχει ήδη θερμανθεί σε επαρκώς υψηλή θερμοκρασία, λόγω της σχετικής ισχυρής συμπίεσης που έχει προηγηθεί.

Επιπλέον, βασική διαφορά των δύο αυτών τύπων είναι ο διαφορετικός τρόπος ρύθμισης της ισχύος. Στον κινητήρα Otto, η ρύθμιση της ισχύος είναι ποσοτική, δηλ. αυξομείωση του έργου και της ισχύος επιτυγχάνεται με την μεταβολή της ποσότητας του μείγματος που εισέρχεται στο κύλινδρο. Αυτό πραγματοποιείται με την περιστροφή της στραγγαλιστικής δικλείδας

(πεταλούδα), ρυθμίζοντας έτσι την πίεση κατά την είσοδο στους κυλίνδρους. Ταυτόχρονα, η ποιότητα του μείγματος παραμένει περίπου σταθερή. Αντίθετα, στον κινητήρα Diesel, η ρύθμιση της ισχύος είναι ποιοτική, δηλαδή η αυξομείωση του έργου και της ισχύος επιτυγχάνεται με την μεταβολή της ποιότητας του μείγματος(δηλ. του λόγου καυσίμου-αέρα). Πραγματοποιείται μεταβολή της ανά κύκλο εγχυόμενης ποσότητας καυσίμου με ρύθμιση της αντλίας του καυσίμου, ενώ η ποσότητα του αναρροφώμενου αέρα και επομένως και του μείγματος παραμένει σταθερή, για όλα τα φορτία, εφόσον η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή.

Τέλος, ο κινητήρας Diesel αναρροφά συνήθως ατμοσφαιρικό αέρα ενώ σαν καύσιμο χρησιμοποιεί ντίζελ και άλλα αποστάγματα του πετρελαίου που δεν έχουν υποστεί επεξεργασία. Επιπλέον, έχουμε άμεση έγχυση στον κυρίως θάλαμο, ή έμμεση έγχυση, όταν χρησιμοποιείται προθάλαμος. Αντίθετα, στους κινητήρες Otto, χρησιμοποιούμε βενζίνη. Η προετοιμασία του μείγματος αέρα-καυσίμου μπορεί να γίνει με χρήση απλού εξαερωτή (παλιότερη τεχνολογία), με έγχυση του καυσίμου στο ρεύμα αέρα μέσα στον αγωγό εισαγωγής ή με έγχυση του καυσίμου απευθείας στο θάλαμο καύσης.

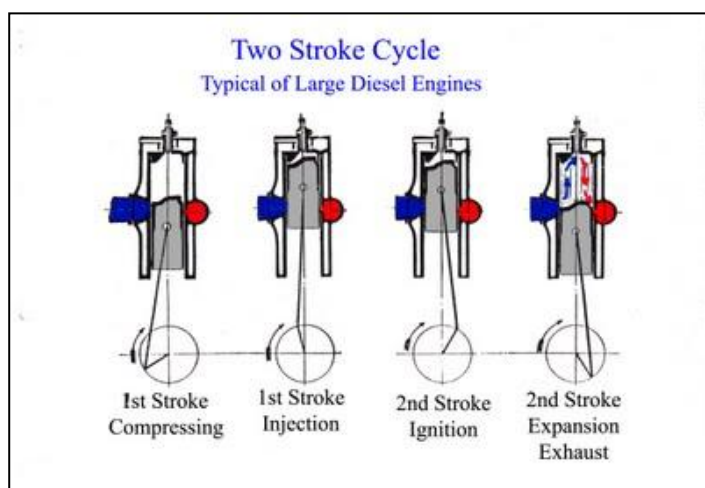
1.2 Εισαγωγή στον Κινητήρα Diesel

Καθώς η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με ναυτικούς κινητήρες, όπου κυριαρχεί ο κινητήρας Diesel, θεωρείται σκόπιμη την, εν συντομία, περιγραφή της εσωτερικής και εξωτερικής λειτουργίας του.

1.2.1 Εξωτερική Λειτουργία

Ο πετρελαιοκινητήρας, διακρίνεται σε δίχρονους(2-X) και τετράχρονους(4-X) ανάλογα με τον κύκλο λειτουργίας του.

- **2-X λειτουργία** : Στους δίχρονους κινητήρες μια περίοδος λειτουργίας διαρκεί όσο μια περιστροφή της στροφαλοφόρου ατράκτου δηλαδή 360°. Περιλαμβάνει δύο διαδρομές του εμβόλου(δύο χρόνους), κατά τις οποίες λαμβάνουν μέρος και οι τέσσερις διεργασίες του κύκλου: συμπίεση, καύση, εκτόνωση, εξαγωγή καυσαερίων και νέα πλήρωση αέρα.



Εικόνα 1.1. Σχηματική αναπαράσταση διεργασιών δίχρονης μηχανής Diesel.

Στην παραπάνω Εικόνα (1.1) φαίνονται και οι τέσσερις διεργασίες του κύκλου:

1) Συμπίεση (1^η διαδρομή, πρώτη περίπτωση σχήματος):

Το έμβολο κινείται προς το Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ), κλείνοντας την θυρίδα ή βαλβίδα εξαγωγής και συμπιέζοντας τον αέρα που εισέρχεται από τις θυρίδες εισαγωγής αυξάνοντας έτσι την πίεση και την θερμοκρασία. Όταν το έμβολο φθάσει στο ΑΝΣ, η θερμοκρασία του αέρα υπερβαίνει τη θερμοκρασία ανάφλεξης του καυσίμου.

2) Εγχυση καυσίμου και καύση (1^η διαδρομή, δεύτερη περίπτωση σχήματος):

Λίγο πριν ο κύλινδρος φθάσει στο ΑΝΣ, ο εγχυτήρας εγχυεί το καύσιμο σε μορφή μικροσκοπικών σταγονιδίων. Το καύσιμο αναμειγνύεται και θερμαίνεται από τον αέρα του κυλίνδρου. Ο διασκορπισμός του μέσα στον κύλινδρο υπό υψηλή πίεση, συμβάλλει στην γρηγορότερη ατμοποίηση του και την καλύτερη ανάμειξη του με τον αέρα, ώστε να δημιουργηθούν οι καλύτερες συνθήκες καύσης.

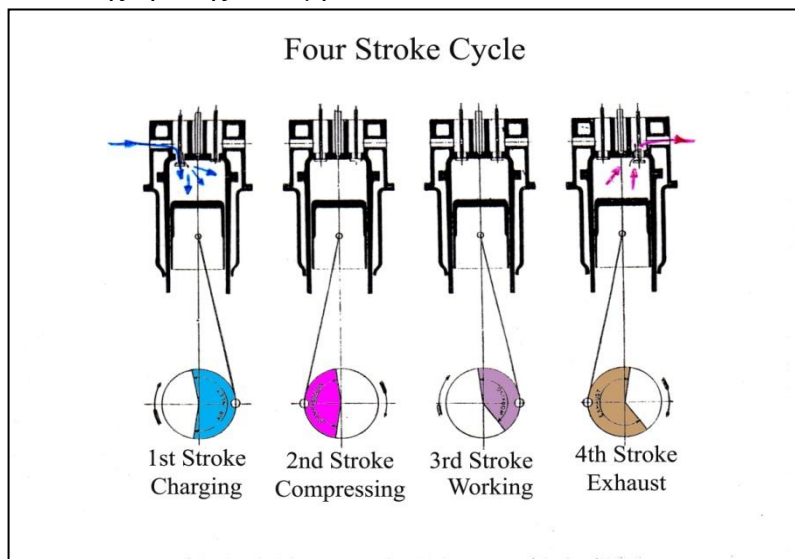
3) Εκτόνωση (2^η διαδρομή, τρίτη περίπτωση σχήματος):

Τα αέρια εκτονώνονται και σπρώχνουν το έμβολο προς τα κάτω. Καθώς το έμβολο κατεβαίνει, μικρή ποσότητα από τα αέρια βρίσκουν διαφυγή δια μέσου της βαλβίδας εξαγωγής, που αρχίζει να αποκαλύπτεται. Στο στάδιο αυτό, πραγματοποιείται η παραγωγή ισχύος.

4)Εξαγωγή καυσαερίων και πλήρωση με αέρα(2^η διαδρομή, τέταρτη περίπτωση σχήματος):

Μετά την εκτόνωση και κατά την εξαγωγή των καυσαερίων ακολουθεί η φάση της εισαγωγής νέου αέρα μετά την αποκάλυψη των βαλβίδων εισαγωγής αέρα. Οι βαλβίδες ή θυρίδες εισαγωγής αποκαλύπτονται μετά το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής καυσαερίων όταν η πίεση εντός του κυλίνδρου μειωθεί στα επίπεδα της πίεσης αέρα στον οχετό εξαγωγής, ώστε να είναι δυνατή η διαφυγή των καυσαερίων προς τον οχετό εξαγωγής. Έτσι εισάγεται στον κύλινδρο ο απαραίτητος αέρας για την καύση, ένα μέρος του οποίου χρησιμοποιείται για να οδηγήσει τα εναπομείναντα καυσαέρια στην εξαγωγή ολοκληρώνοντας με αυτό τον τρόπο τη διαδικασία της απόπλυσης. Το έμβολο συνεχίζει να κινείται καθοδικά έως ότου φτάσει στο Κάτω Νεκρό Σημείο(K.N.Σ). Στη συνέχεια το έμβολο αρχίζει και πάλι να κινείται ανοδικά υπό την επίδραση της στροφαλοφόρου ατράκτου κλείνοντας σταδιακά και πάλι τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής, ολοκληρώνοντας έτσι ένα κύκλο λειτουργίας και ξεκινώντας τη νέα συμπίεση.

- 4-Χ λειτουργία :Στην τετράχρονη λειτουργία μια περίοδος λειτουργίας διαρκεί δύο πλήρεις περιστροφές, δηλαδή 720° της στροφαλοφόρου ατράκτου. Περιλαμβάνει τέσσερις πλήρεις διαδρομές εμβόλου, εκ των οποίων οι δύο(πρώτη και τέταρτη)είναι αφιερωμένες στην εναλλαγή των αερίων, που έτσι διεξάγεται με σχετική άνεση και μάλιστα υπό τον άμεσο έλεγχο της εκτοπιστικής δράσης του εμβόλου.



Εικόνα 1.2. Σχηματική αναπαράσταση διεργασιών τετράχρονης μηχανής Diesel.

Στην παραπάνω (Εικόνα 1.2, σελ 10) φαίνονται και οι τέσσερις διεργασίες του κύκλου:

1) Αναρρόφηση/Εισαγωγή(1^η διαδρομή, πρώτη περίπτωση σχήματος):

Καθώς το έμβολο κατεβαίνει το μείγμα εισέρχεται από την ανοικτή βαλβίδα εισαγωγής και καταλαμβάνει το χώρο του κυλίνδρου(Η βαλβίδα εξαγωγής είναι κλειστή).

2) Συμπίεση(2^η διαδρομή, δεύτερη περίπτωση σχήματος):Καθώς το έμβολο ανεβαίνει, η βαλβίδα εισαγωγής κλείνει. Ο αναρροφούμενος αέρα συμπιέζεται (Η βαλβίδα εξαγωγής είναι κλειστή).

3) Έγχυση/Καύση(3^η διαδρομή, τρίτη περίπτωση σχήματος) : Όταν το έμβολο φθάσει στο ΑΝΣ, καύσιμο εγχύεται σε μορφή σταγονιδίων, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα ετερογενές μείγμα καυσίμου-αέρα. Το μείγμα αυτό αναφλέγεται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Εξαιτίας της ανομοιομορφίας του μείγματος, κατά την καύση, δημιουργούνται ζώνες πλούσιου και φτωχού μείγματος μέσα στον κύλινδρο. Επιπλέον, τα αέρια προϊόντα εκτονώνονται και σπρώχνουν το έμβολο προς τα κάτω. Στον χρόνο αυτό παράγεται και το έργο(Οι βαλβίδες εξαγωγής και εισαγωγής είναι κλειστές).

4) Εξαγωγή(4^η διαδρομή, τέταρτη περίπτωση σχήματος) :

Ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής και το ανερχόμενο έμβολο σπρώχνει τα προϊόντα της καύσης να βγουν από το κύλινδρο(Η βαλβίδα εισαγωγής είναι κλειστή).

1.2.2 Εσωτερική Λειτουργία

Ο κινητήρας Diesel χαρακτηρίζεται από την αυτανάφλεξη ύστερα από κατάλληλη εισαγωγή καυσίμου στο κύλινδρο. Ακολουθεί σε γενικές γραμμές τον κύκλο DIESEL(αδιαβατική συμπίεση, ισοβαρής θέρμανση, αδιαβατική εκτόνωση, ισόχωρη ψύξη). Ο νητζελοκινητήρας αναρροφά συνήθως ατμοσφαιρικό αέρα ενώ ως καύσιμο χρησιμοποιεί βαρέα καύσιμα της κατηγορίας των πετρελαίων(πχ μαζούτ).

Ο σχηματισμός του μείγματος γίνεται με κατάλληλη έγχυση του καυσίμου στον κύλινδρο, διασκορπιζόμενο στην μάζα του ήδη συμπιεσμένου αέρα, με την

βοήθεια μηχανικής έγχυσης, δηλαδή υπό την επίδραση ισχυρής πίεσης(150-2500bar)που δημιουργείται από το σύστημα αντλίας καυσίμου-εγχυτήρα-σωλήνα καταθλίψεως. Η έναυση και ο ρυθμός καύσης ελέγχονται κατά κύριο λόγο, από τη στιγμή της έγχυσης του καυσίμου, το ρυθμό έγχυσης και το επίπεδο τύρβης του συμπιεσμένου αέρα, αλλά και από την πίεση και θερμοκρασία. Επειδή, ο χρόνος σχηματισμού του μείγματος είναι μικρός, απαιτείται η ύπαρξη περίσσειας αέρα(λόγος αέρα καυσίμου (25:1-50:1))για την πραγματοποίηση τέλει καύση. Το γεγονός αυτό επιφέρει μείωση της ισχύος, που καταπολεμάται με την εφαρμογή κατάλληλης υπερπλήρωσης. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία αναφλέξεως του καυσίμου που εγχύεται πρέπει να είναι μικρή, ώστε να μην δημιουργείται συσσώρευση του, που θα οδηγούσε στην εμφάνιση κρουστικής καύσης(από την στιγμιαία καύση μεγάλης ποσότητας καυσίμου).

Η ρύθμιση της ισχύος στους κινητήρες Diesel είναι ποιοτική καθώς η αυξομείωση του έργου και της ισχύος επιτυγχάνεται με την μεταβολή της “ποιότητας” του ετερογενούς μείγματος(λόγο καυσίμου-αέρα) που προκαλείται με τη μεταβολή της ανά κύκλο εγχυόμενης ποσότητας καυσίμου, ενώ η ποσότητα του αναρροφώμενου αέρα, και επομένως ουσιαστικά και του μείγματος, παραμένει πρακτικά ίδια για όλα τα φορτία, εφόσον τηρείται σταθερή η ταχύτητα περιστροφής(με την βοήθεια ρυθμιστή στροφών). Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι το μέγιστο φορτίο στο κινητήρα Diesel, καθορίζεται είτε από την εμφάνιση υψηλού καπνού στην εξαγωγή των καυσαερίων, είτε από την θερμοκρασία καυσαερίου.

Στον κινητήρα Diesel οι συνθήκες καύσης είναι δυσμενείς, καθώς ο διατιθέμενος χρόνος για τον σχηματισμό του ετερογενούς μείγματος στον κύλινδρο είναι πολύ μικρός, αντιστοιχώντας σε λίγες μοίρες γωνίας στροφάλου. Επιπλέον, η καύση γίνεται με περίσσεια αέρα για την επίτευξη περιορισμού των προϊόντων ατελούς καύσης(αιθάλη & υδρογονάνθρακες).Οι παραπάνω λόγοι επιβάλλουν δύο λειτουργικούς περιορισμούς: Ο πρώτος αφορά την ταχύτητα περιστροφής που δεν ξεπερνά τις 5000-5500 περιστροφές και ο δεύτερος την λειτουργία του κινητήρα με περίσσεια αέρα($\lambda > 1.5$),με αποτέλεσμα τη μειωμένη συγκέντρωση ισχύος.

1.2.3 Η Επικράτηση του Κινητήρα Diesel

Ο κινητήρας Diesel έχει επικρατήσει ολοκληρωτικά έναντι του Otto, στην πλειονότητα των εφαρμογών MEK βαρέως τύπου. Στην ναυτιλία και σε κάθε άλλη εφαρμογή που απαιτείται βαρέως τύπου κινητήρας, ο κινητήρας Diesel είναι η πλέον αξιόπιστη λύση. Ο ντιζελοκινητήρας έχει κάποια συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι του βενζινοκινητήρα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

- Βαθμός απόδοσης : Στον κινητήρα Diesel καθώς δεν υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης κρουστικής καύσης, επιτυγχάνεται υψηλός λόγος συμπίεσης, βελτιώνοντας τον βαθμό απόδοσης και μειώνοντας την ειδική κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον, ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα Diesel εξαρτάται λιγότερο από το φορτίο στο οποίο λειτουργεί, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ικανοποιητικούς βαθμούς απόδοσης σε όλα σχεδόν τα φορτία.
- Αξιοπιστία/Οικονομία : Τόσο η στιβαρή κατασκευή του κινητήρα όσο και η χρήση καυσίμου με λιπαντικές ιδιότητες (ντίζελ), συντελούν στην ομαλότερη λειτουργία του κινητήρα για περισσότερο χρόνο, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για το μικρότερο κόστος συντήρησης. Επιπλέον, η χρήση καυσίμου ντίζελ και άλλων φθηνών παραγώγων του ως καύσιμο (λιγότερο πτητικό της βενζίνης άρα και φθηνότερο), καθιστά την λειτουργία του κινητήρα οικονομικότερη.
- Αέριοι Ρύποι : Ο κινητήρας Diesel, επειδή λειτουργεί με μεγάλη περίσσεια αέρα (οι τιμές της οποίας είναι υψηλές ακόμα και στα υψηλά φορτία), έχει χαμηλότερες εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO), ενώ τα επίπεδα οξειδίων του αζώτου (NOx) παραμένουν στα ίδια επίπεδα με τον Otto. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς ο ρύπος αυτός (CO) είναι εξαιρετικά τοξικός ακόμα και σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο κινητήρας Diesel εκπέμπει σημαντικές ποσότητες αιθάλης και σωματιδίων, οι οποίες και επηρεάζουν την λειτουργία του, καθώς η λειτουργία σε πολύ μεγάλα φορτία για μεγάλο χρονικό διάστημα εγκυμονεί κινδύνους.

1.3 Εφαρμογή Κινητήρων Diesel στην Ναυτιλία

Μέχρι την δεκαετία 1950-1960 στην πρόωση των πλοίων εμπορικού ναυτικού, υπερτερούσε ο ατμοστρόβιλος σε σύγκριση με την μηχανή diesel, όπως φαίνεται στον Πίνακα (1.1).

Πίνακας 1.1 Σύγκριση αριθμών ατμοστρόβιλου - Diesel για την πρόωση πλοίων (έτη 1950 – 1980)

ΕΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΛΟΙΩΝ		ΟΛΙΚΟ ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ(10⁶ tn)	
	<i>Ατμοστρόβιλος</i>	<i>Diesel</i>	<i>Ατμοστρόβιλος</i>	<i>Diesel</i>
1950	20000	11500	60	12
1955	17000	16000	70	30
1960	15500	15500	75	50
1965	10000	30000	85	80
1970	8000	43000	90	125
1975	6000	55000	120	225
1980	5000	65000	140	250

Οι ατμοστρόβιλοι για πολλά χρόνια κυριαρχούσαν στην ναυτιλία και αυτό γιατί η κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση τους ήταν ευκολότερη και φθηνότερη σε σχέση με της πετρελαιομηχανές. Η αντικατάστασή τους από τους κινητήρες Diesel, οφείλεται σε διάφορα χαρακτηριστικά τους, που τους καθιστούν καταλληλότερους για θαλάσσιες μεταφορές. Τα προωστήρια συστήματα πλοίου με Diesel κινητήρες πλεονεκτούν σε σχέση με τους ατμοστρόβιλους καθώς έχουν:

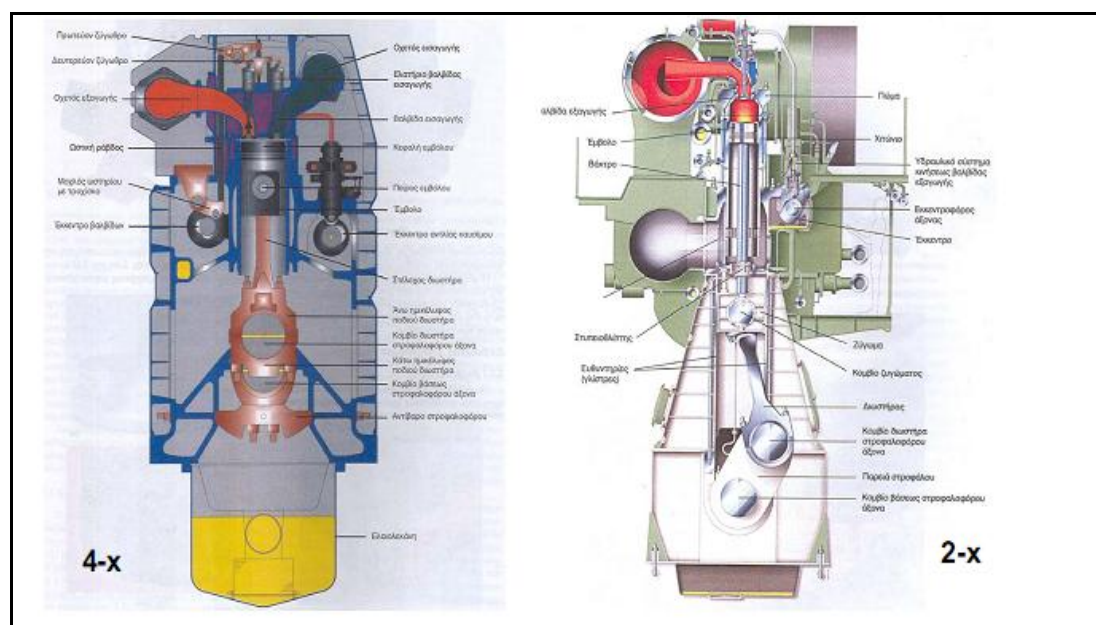
- *Καλύτερο βαθμό απόδοσης.*
- *Καλύτερη σχέση βάρους – ισχύος.*
- *Μικρότερο όγκο προωστήριας εγκατάστασης.*
- *Άμεση ετοιμότητα λειτουργίας.*

Ένας από του λόγους για τους οποίους ο ατμοστρόβιλος παρέμεινε πολλά χρόνια το σπουδαιότερο προωστήριο σύστημα των εμπορικών πλοίων ήταν και το γεγονός ότι χρησιμοποιούσε φθηνά καύσιμα (μαζούτ) ενώ η μηχανή diesel απαιτούσε καύσιμα υψηλής ποιότητας τα οποία επιβάρυναν σημαντικά το κόστος των θαλάσσιων μεταφορών. Από τις αρχές της δεκαετίας 1950-1960 άρχισε να δοκιμάζεται η λειτουργία των πετρελαιομηχανών με μαζούτ και γενικά με καύσιμα που ήταν μείγμα μαζούτ και gasoil, των οποίων το κόστος ήταν πολύ χαμηλότερο από το κόστος του μέχρι τότε χρησιμοποιημένου πετρελαίου diesel. Οι δοκιμές ήταν ενθαρρυντικές, γιατί οι ποιοτικές απαιτήσεις σε καύσιμο για τις βαριές και αργόστροφες μηχανές του εμπορικού ναυτικού μπορούσαν να ικανοποιηθούν και με τα υπολείμματα αποστάξεως, δηλαδή με μαζούτ, που έγινε το κύριο καύσιμο για τις ναυτικές

πετρελαιομηχανές. Υπάρχουν εντούτοις περιπτώσεις όπου το μαζούτ δεν μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις απαιτήσεις καύσεως όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις χειρισμού του πλοίου το λιμάνι, όπου απαιτείται γρήγορη προσαρμογή της καύσεως στο φορτίο της μηχανής στις οποίες μόνο το diesel μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά. Επίσης ορισμένοι τύποι μηχανών diesel απαιτούν καύσιμο με ορισμένες προδιαγραφές τις οποίες καθορίζει ο κατασκευαστής. Έτσι σήμερα υπάρχει μια πολύ μεγάλη ποικιλία καυσίμων για ναυτικούς κινητήρες.

1.3.1 Κατηγοριοποίηση Ναυτικών Κινητήρων Diesel

Οι κατηγοριοποίηση των ναυτικών κινητήρων Diesel, δεν διαφέρει από τις υπόλοιπες νηξελομηχανές. Εντούτοις, αξίζει να παρουσιαστούν οι δύο κύριες κατηγορίες ναυτικών κινητήρων ως προς την ταχύτητα περιστροφής, οι βραδύστροφοι(54~250 rpm) και οι μεσόστροφοι.(400~750 rpm).



Εικόνα1.3. Τετράχρονος μεσόστροφος ναυτικός κινητήρας(αριστερά) και Δίχρονος βραδύστροφος ναυτικός κινητήρες(δεξιά).

a) Οι βραδύστροφοι κινητήρες Diesel μεγάλης ισχύος(1100-80000kW) έχουν μελετηθεί, σχεδιαστεί και κατασκευαστεί ειδικά ως ναυτικές μηχανές πρόωσης καθώς συνδυάζουν απλότητα κατασκευής με υψηλή απόδοση και αξιοπιστία.

Παρακάτω παρουσιάζονται κύρια χαρακτηριστικά τους:

- 1100-80000 kW (1480-110000 HP), 55-250 rpm, BMEP έως 20 bar, βαθμός απόδοσης έως 53%, BSFC 165g/kWh, ειδική μάζα 25-40 kg/kW
- Διάμετροι εμβόλου από 260 έως 1080 mm, διαδρομή από 980-3188 mm Αριθμός κυλίνδρων έως 12 σε σειρά.

- Ζύγωμα -βάκτρο (Απομόνωση στροφαλοθαλάμου από θαλάμους καύσης)
- Μεγάλος λόγος διαμέτρου /διαδρομή εμβόλου
- Ευθείας απόπλυσης με βαλβίδα εξαγωγής στην κεφαλή του κυλίνδρου
- Απευθείας σύνδεση με την έλικα
- Υπερπλήρωση με σύστημα σταθερής πίεσης
- Ψύξη αέρα σε ψυγείο μετά κάθε συμπιεστή
- Ηλεκτρικοί φυσητήρες (ενεργοποιούνται σε φορτία μικρότερα 40%)
- Μπορεί να λειτουργήσουν με χαμηλής ποιότητας (φθηνά) καύσιμα
- Χρήση σε πλοία με περιορισμό σε βύθισμα ,διάμετρο έλικας ή ύψος μηχανοστασίου.
- Χρήση σε bulk carriers & μεγάλα tanker
- Χρήση σε containerships (μηχανές με $s/D=2.8$ και $N=100$ rpm)

b) Οι μεσόστροφοι κινητήρες(όπως και οι ταχύστροφοι), έχουν υποστεί κατάλληλες μετατροπές ώστε να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις μιας ναυτικής μηχανής. Τέτοιες μετατροπές είναι η προσθήκη διάταξης για την μείωση στροφών(μειωτήρας),η δυνατότητα αναστροφής της φοράς περιστροφής (μειωτήρας και συμπλέκτης ή αναστροφή της μηχανής), αντικατάσταση του ψυγείου με ψυγείο θάλασσας, αναπροσαρμογή της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα για αυξημένη αξιοπιστία σε ναυτικές εφαρμογές. Εφαρμόζονται σε ρυμουλκά, μεγάλα αλιευτικά, μεσαίου μεγέθους εμπορικά καθώς και σε επιβατηγά, κρουαζιερόπλοια και μεγάλα εμπορικά με απαιτήσεις χαμηλού μηχανοστασίου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά τους:

- Μεσόστροφοι 400 έως 1000 rpm – ταχύστροφοι πάνω από 1000 rpm.
- 100-23850 kW (32000 HP), BMEP έως 25 bar, Βαθμός απόδοσης έως 50%, BSFC έως 185 g/kWh, Διάμετρος εμβόλου 160-640 mm.
- Σε σειρά: 5-9 κύλινδροι , σε διάταξη V: 8-20 κύλινδροι
- Ελαφρύτεροι και μικρότεροι από αντίστοιχης ισχύος αργόστροφων μηχανών (10-15 kg/kW σε σύγκριση με 35-40kg/kW των αργόστροφων για ισχύ στην περιοχή των 10000kW). Ακόμα και αν συνυπολογιστούν μειωτήρας -συμπλέκτης -ψυγεία κλπ. προκύπτει 20-30% μικρότερο βάρος).
- Μικρότερο αρχικό κόστος.
- Σύνδεση με την έλικα με μειωτήρα (Αν χρησιμοποιηθεί έλικα μεταβλητού βήματος δεν απαιτείται αναπόδοση του κινητήρα .
- Υπερπλήρωση με σύστημα σταθερής πίεσης ή σύστημα παλμών και ψύξη αέρα (σε V ένας υπερπληρωτής για κάθε σειρά κυλίνδρων).
- Χρήση σε επιβατηγά (Ferry type vessels) και όπου απαιτείται χαμηλό ύψος μηχανοστασίου , σε ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη.
- Χρήση 2 ή περισσότερων κινητήρων (ευχέρεια στη συντήρηση και στην ασφάλεια)
- Χρειάζονται καλής ποιότητας καύσιμα (πιο ακριβά)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΚΑΥΣΗ – ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

2.1 Εισαγωγή στην Καύση

Καύση μπορούμε να ονομάσουμε, κάθε εξώθερμη χημική αντίδραση ενός υλικού καυσίμου με το οξυγόνο, που όμως, συντελείται με αρκετά υψηλό ρυθμό απόδοσης θερμότητας, έτσι ώστε, η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη διάρκειά της, να είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμη. Έτσι π.χ. η οξειδωση του σιδήρου στο περιβάλλον, η οποία είναι εξώθερμη χημική αντίδραση του σιδήρου με το οξυγόνο του αέρα, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως καύση, επειδή ο ρυθμός παροχής θερμότητας κατά την διάρκειά της, είναι πρακτικά μηδενικός. Κατά την καύση, μετατρέπεται η χημική ενέργεια του καυσίμου, σε θερμική. Το οξυγόνο που απαιτείται για την διεξαγωγή της, λαμβάνεται από τον αέρα του περιβάλλοντος ή συνυπάρχει με το καύσιμο, όπως στα εκρηκτικά υλικά. Μερικές φορές οι καύση γίνεται με καθαρό οξυγόνο. Όπως σε κάθε χημική αντίδραση, έτσι και στην καύση, η έρευνα του φαινομένου, περιλαμβάνει δύο βασικούς τομείς :

- I. Την παρακολούθηση των ουσιών που παίρνουν μέρος στην καύση, από ποιοτική και ποσοτική σκοπιά, δηλαδή τη μελέτη του μετασχηματισμού τους κατά την καύση και τη διατύπωση των σχέσεων μεταξύ των ποσοτήτων των αρχικών υλών και των προϊόντων καύση. Τα θέματα αυτά εξετάζει η Στοιχειομετρία.
- II. Τον προσδιορισμό της ταχύτητας αντίδρασης. Η γνώση του παράγοντα αυτού, έχει βασική σημασία για την εκλογή του μεγέθους της μηχανής ή συστήματος για τη λήψη προκαθορισμένης ισχύος.

2.1.1 Χημεία της Καύσης

Όπως αναφέρθηκε, η καύση είναι μια χημική διαδικασία, κατά την οποία τα συστατικά του καυσίμου οξειδώνονται ταχύτατα από το οξυγόνο που περιέχει ο αέρας καύσης. Τα περισσότερα καύσιμα περιέχουν κυρίως άνθρακα (C), υδρογόνο(H), άζωτο(N), οξυγόνο(O) και θείο(S). Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, μπορούν να απεικονισθούν με την χρήση χημικών εξισώσεων, οι οποίες δίνουν πληροφορίες τόσο για τις σχετικές ποσότητες των ατόμων που

αντιδρούν, όσο και για τα προϊόντα της καύσης. Για τα παραπάνω στοιχεία, οι βασικές χημικές εξισώσεις οξείδωσης για την πλήρη καύση τους έχουν ως εξής :

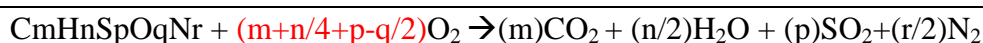


Στις παραπάνω χημικές εξισώσεις, εκτός των αναλογιών των μοριακών ποσοτήτων που απαιτούνται από κάθε ουσία ώστε να επιτευχθεί πλήρης καύση, δίνονται και τα ποσά ενέργειας που εκλύονται κατά την διάρκεια της οξείδωσης(ανηγμένα ανά μονάδα μάζας της οξειδωμένης ουσίας). Έτσι για την εξίσωση (1), ισχύει ότι 1 kmol C ισούται με 12.011 kg C, 32 kg O₂ και 44.011 kg CO₂ αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, η καύση των καυσίμων αποτελείται από δεκάδες ενδιάμεσες αντιδράσεις(ενδόθερμες), το μακροσκοπικό αποτέλεσμα των οποίων είναι αναλογίες αντιδρώντων και προϊόντων των απλών αυτών σχέσεων. Τα ενδιάμεσα προϊόντα μπορεί να είναι ελεύθερα άτομα(H,O,N) στοιχείων, ενώσεις οι οποίες είναι σταθερές μόνο στη θερμοκρασία της φλόγας κ.ά.

Για την αρχική έναρξη της ανάφλεξης του μείγματος καυσίμου-αέρα, απαιτείται η πρόσδοση κάποιου ποσού θερμότητας, που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία υψηλότερη της θερμοκρασίας αναφλέξεως. Αντίστοιχα, ποσό θερμότητας απαιτείται για την διατήρηση της καύσης. Μετά την έναρξη της καύσης, η θερμοκρασία του θαλάμου καύσης αρχίζει να αυξάνεται, μέχρι να φθάσει την θερμοκρασία (σημείο) καύσης, κατά την οποία η παραγόμενη θερμότητα από την καύση, ισούται με την απαιτούμενη θερμότητα για την διατήρησή της, οπότε το φαινόμενο της καύσης καθίσταται πλέον αυτοσυντηρούμενο. Η θερμοκρασία καύσης επηρεάζεται κύρια από το λόγο αέρα καύσης - καυσίμου(AF). Κατά την διάρκεια της καύσης, ένα ποσό της ελκυσόμενης θερμότητας, χάνεται μέσω διαφόρων μηχανισμών. Το ποσό αυτό ελαττώνεται με την ταχεία καύση του καυσίμου, που συνδέεται άμεσα με την θερμοκρασία

αυτανάφλεξης(θz) του καυσίμου και το ρυθμό έκλυσης θερμότητας. Εάν το σύστημα λειτουργούσε σε ιδανικές συνθήκες, αδιαβατι –κά μονωμένο, με μηδενικές θερμικές απώλειες, τότε η θερμοκρασία του θα ήταν η αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας, που είναι η θεωρητικά μέγιστη τιμή.

Η χημική εξίσωση της στοιχειομετρικής καύσης ενός τυχαίου καυσίμου (υδρογονάνθρακα $C_nH_mSpO_qNr$) δίνεται από την εξίσωση



Η στοιχειομετρική καύση, είναι η καύση κατά την οποία χρησιμοποιείται για την οξείδωση των στοιχείων του καυσίμου, μόνο **η θεωρητικά απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου** (και αντίστοιχα του αέρα), η οποία προσδιορίζεται από τις χημικές εξισώσεις της καύσης. Στα προϊόντα της στοιχειομετρικής καύσης δεν υπάρχει οξυγόνο καθώς το καύσιμο μετατρέπεται σε πλήρως οξειδωμένα προϊόντα. Δεδομένου, ότι στην συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών, ως πηγή οξυγόνου λαμβάνεται ο αέρας, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί και η θεωρητικά απαιτούμενη ποσότητα αέρα, αφού η περιεκτικότητα του αέρα σε οξυγόνο, είναι σταθερή και ίση με 23.21% kg O_2 / kg αέρα. Ο λόγος της θεωρητικά απαιτούμενης ποσότητας αέρα προς την ποσότητα του καυσίμου που καίγεται, λέγεται **στοιχειομετρικός λόγος αέρας-καυσίμου (AFst)** και εκφράζεται σαν λόγος ποσοτήτων (**kmoles αέρα /kmoles καυσίμου**), όγκων (**m³ αέρα/m³ καυσίμου**), μάζας (**kg αέρα/kg καυσίμου**).

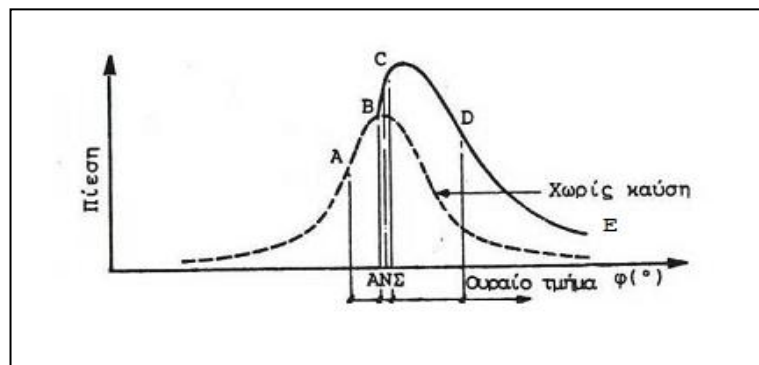
Στην πράξη βέβαια, όπως και στις εμβολοφόρες μηχανές ντήζελ, είναι αδύνατη η πλήρης και η τέλεια ανάμειξη του καυσίμου και του οξειδωτικού, οπότε για την επίτευξη της πλήρους καύσης του καυσίμου, απαιτείται περίσσεια οξυγόνου(αέρα καύσης), η οποία είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο δυσμενέστερες είναι οι συνθήκες ανάμειξης αέρα και καυσίμου. Για το λόγο αυτό, οι κινητήρες Diesel, λειτουργούν με μεγάλη περίσσεια αέρα για να δημιουργήσουν συνθήκες ομοιόμορφου μείγματος καυσίμου-αέρα, με την διασκόρπιση των μορίων του καυσίμου στη μάζα του αέρα. Ο λόγος της πραγματικά χρησιμοποιούμενης ποσότητας αέρα προς εκείνη που θεωρητικά απαιτείται ή αντίστοιχα του πραγματικού λόγου αέρα-καυσίμου(AF), προς τον στοιχειομετρικό(AFst), ονομάζεται λόγος ισοδυναμίας αέρα καύσης(λα). Η τιμή

του λόγου αέρα, ποικίλει ανάλογα με το είδος του καυσίμου και τον τύπο του εγχυτήρα. Για στοιχειομετρική καύση η τιμή του (λ) είναι “1”, για ατελή καύση είναι μικρότερη του ενός ($\lambda < 1$) και για καύση με περίσσεια είναι μεγαλύτερη του ενός ($\lambda > 1$).

2.2 Μηχανισμός της Καύσης Κινητήρα Diesel

Στους κινητήρες Diesel, η καύση είναι ανομοιογενής και η περιγραφή της, λόγω της πολυπλοκότητάς του φαινομένου, απαιτεί την πολυδιάστατη θεώρηση της κίνησης του ρευστού μέσα στον κύλινδρο. Η κυρίαρχη μέθοδος προσέγγισης του φαινομένου, που μελετήθηκε από τον Lyn, είναι η προσομοίωση της καύσης απλά σαν μια διαδικασία έκλυσης θερμότητας. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, ο σχηματισμός του μείγματος, η ανάφλεξη και η περαιτέρω καύση δεν αποτελούν σαφώς ξεχωριστές λειτουργίες, αλλά οργανικώς αλληλένδετες και χρονικά επικαλυπτόμενες. Διακρίνονται τέσσερα στάδια της καύσης, όπως αυτά φαίνονται στην Εικόνα (2.1):

1. AB : Καθυστέρηση αναφλέξεως : Η περίοδος μεταξύ της δυναμικής έγχυσης του καυσίμου και της αρχής της καύσεως λόγω φυσικής καθυστέρησης(ανάμιξη) και χημικής καθυστέρησης (κινητική αντιδράσεων).
2. BC : Ανεξέλεγκτη καύση : Στην φάση αυτή έχουμε την απότομη καύση του μείγματος αέρα-καυσίμου, το οποίο έχει προετοιμαστεί κατά την περίοδο AB
3. CD: Καύση μέσω διάχυσης ή Ελεγχόμενη Καύση : Στη φάση αυτή ο ρυθμός της καύσης εξαρτάται από την ταχύτητα δημιουργίας νέου μείγματος του εγχυόμενου καυσίμου με τον αέρα του θαλάμου καύσης. Με τον τρόπο αυτό η καύση είναι δυνατό να ελέγχεται μέσω επίδρασης στο ρυθμό έγχυσης
4. DE: Τελευταίο τμήμα της καύσης : Περίοδος καθυστερημένης καύσης προς το τέλος της φάσης της εκτόνωσης. Η φάση αυτή παραλείπεται στα περισσότερα μοντέλα.



Εικόνα 2.1. Στάδια της καύσης σε δυναμοδεικτικό διάγραμμα κινητήρα Diesel.

2.2.1 Θεμελιώδεις Εξισώσεις Καύσης στις Εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ

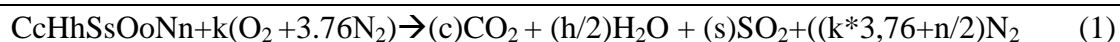
2.2.1.1 Εξισώσεις Καύσης Τυχαίου Υγρού Καυσίμου

Τα κυριότερα συνήθη καύσιμα στις εμβολοφόρες Μ.Ε.Κ (βενζίνη, μαζούτ, ελαφρύ πετρέλαιο, κηροζίνη κ.α), χαρακτηρίζονται από την περιεκτικότητα αυτών σε διάφορα στοιχεία άνθρακα(C), υδρογόνου(H₂), οξυγόνου(O₂), θείου(S), αζώτου(N₂), υγρασία(H₂O) κ.ά. και σε λοιπά άκαυστα συστατικά(άκαυστοι υδρογονάνθρακες). Ευλόγως ισχύει ότι το άθροισμα των συγκεντρώσεων των στοιχείων ισούται με την μονάδα [c+h+o+s+n+.....+w+a=1].

Έστω το καύσιμο χημικής σύστασης C_c , H_h , S_s , O_o , N_n , όπου c , h , s , o , n , η επί τοις % κατά βάρος περιεκτικότητα στο καύσιμο(kg_{στοιχείων}/kg_{καυσίμου}) των αντίστοιχων χημικών στοιχείων. Ο αέρας της καύσης είναι ξηρός δηλαδή δεν περιέχει υδρατμό, ενώ όλα τα συστατικά των καυσαερίων βρίσκονται σε αέρια κατάσταση. Έτσι για το άθροισμα των περιεκτικότητων του καυσίμου ισχύει c+h+s+o+n+a=1, όπου α(%) είναι η περιεκτικότητα των άκαυστων υδρογονανθράκων.

I. Στοιχειομετρική καύση(πλήρης)

Η χημική αντίδραση για την στοιχειομετρική καύση του καυσίμου C_nH_mS_pO_qN_r με τον αέρα είναι η ακόλουθη:



Όπου $k=(c+h/4+s - o/2)$ και 3,76 είναι τα kmole N₂ συνοδεύουν 1 kmole O₂.

Η στοιχειομετρική ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται κατά την στοιχειομετρική καύση 1 kg καυσίμου δίνεται από τις σχέσεις (5.1) ,(5.2).

$$N(O_2)_{st} = c/12 + h/8 + s/32. - o/64 \quad (\text{kmole } O_2 / \text{kg καύσιμο ως έχει}) \quad (1.1)$$

$$m(O_2)_{st} = 32 * N(O_2)_{st} \quad (\text{kg } O_2 / \text{kg κτ.}) \quad (1.2)$$

Η αντίστοιχη ποσότητα αέρα δίνεται από τις σχέσεις (1.3),(1.4)

$$N(\text{αέρα})_{st} = N(O_2)_{st} * (100/21) \quad (\text{kmole.αέρα/ kg κ.}) \quad (1.3)$$

$$m((\text{αέρα})_{st} = 28.96 * N(\text{αέρα})_{st} \quad (\text{kg.αέρα/ kg κ.}) \quad (1.4)$$

Η κατά kmole σύνθεση του καυσαερίου δίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις καύσης.

$$N_{CO_2} = c/12 \quad (\text{kmole CO}_2 / \text{kg κ.}) \quad (1.5)$$

$$N_{H_2O} = h/4 \quad (\text{kmole H}_2\text{O} / \text{kg κ.}) \quad (1.6)$$

$$N_{SO_2} = s/32 \quad (\text{kmole SO}_2 / \text{kg κ.}) \quad (1.7)$$

$$N_{N_2} = k \cdot 3,76 + n/2 = 0,79 \cdot N_{(αέρα)_{st}} \quad (\text{kmole H}_2\text{O} / \text{kg καυσί.}) \quad (1.8)$$

Η ποσότητα του καυσαερίου δίνεται από το άθροισμα των σχέσεων (1.5),(1.6),(1.7),(1.8).

$$N_r = c/12 + h/4 + s/32 + k \cdot 3,76 + n/2 \quad (\text{kmole καυσαερίου} / \text{kg κ.}) \quad (1.9)$$

$$m_r = m_a + 1 - \alpha \quad (\text{συνήθως πολύ μικρή ποσότητα}) \quad (\text{kg καυσαερίου} / \text{kg κ.}) \quad (1.10)$$

$$M_r = m_r / N_r \quad \text{Μοριακή μάζα καυσαερίου} \quad (\text{kg καυσαερίου} / \text{kmole}) \quad (1.11)$$

II. Πλήρης καύση με περίσσεια αέρα(λα)

Η συνθήκη $\lambda_a > 1$ αποτελεί αναγκαία, και ικανή συνθήκη για τέλεια(πλήρη) καύση.

Η ποσότητα του αέρα για την πραγματοποίηση πλήρους καύσης με περίσσεια αέρα δίνεται από τις σχέσεις (1.8),(1.9).

$$N_{(αέρα)} = N_{(αέρα)_{st}} \cdot \lambda_a \quad (\text{k mole.αέρα} / \text{kg κ.}) \quad (1.12)$$

$$m_{((αέρα)_{st})} = m_{((αέρα)_{st})} \cdot \lambda_a \quad (\text{kg.αέρα} / \text{kg κ.}) \quad (1.13)$$

Η κατά kmole σύνθεση του θεωρητικού καυσαερίου δίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις καύσης.

$$N_{CO_2} = c/12 \quad (\text{kmole CO}_2 / \text{kg κ.}) \quad (1.14)$$

$$N_{H_2O} = h/4 \quad (\text{kmole H}_2\text{O} / \text{kg κ.}) \quad (1.15)$$

$$N_{SO_2} = s/32 \quad (\text{kmole SO}_2 / \text{kg κ.}) \quad (1.16)$$

$$N_{O_2} = 0,21 N_{(O_2)_{st}} (\lambda_a - 1) \quad (\text{kmole O}_2 / \text{kg κ.}) \quad (1.17)$$

$$N_{N_2} = 0,79 N_{(O_2)_{st}} (\lambda_a) \quad (\text{kmole N}_2 / \text{kg κ.}) \quad (1.18)$$

Η ποσότητα του καυσαερίου δίνεται από το άθροισμα των σχέσεων (1.5),(1.6),(1.7),(1.8)

$$NR = N_{co2} + N_{h2o} + N_{so2} + N_{n2} \quad (\text{kmole καυσαερίου / kg κ.}) \quad (1.19)$$

$$mR = m_a + 1 - \alpha (\text{συνήθως πολύ μικρή ποσότητα}) \quad (\text{kg καυσαερίου / kg κ.}) \quad (1.20)$$

$$MR = mR/NR, \text{ Μοριακή μάζα καυσαερίου} \quad (\text{kg καυσαερίου / kmole}) \quad (1.21)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε είτε να υπολογίσουμε την κατ'όγκο (ή kmole) σύνθεση του καυσαερίου για δεδομένο καύσιμο και λόγο ισοδυναμίας αέρα ($\lambda > 1$) πλήρους καύσης, είτε να υπολογίσουμε το λόγο αέρα για δεδομένο καύσιμο και κατ'όγκο σύνθεση του καυσαερίου. Συγκεκριμένα ισχύει για την συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα και του οξυγόνου:

$$\bullet \quad (1.12) \quad X_{co2} = \frac{N_{co2}}{NR} = \frac{(c/12)}{(c/12)+(h/4) + (s/32) + (0.21 N(O_2)_{st}(\lambda\alpha-1))+(0.79 N(O_2)_{st}(\lambda\alpha))}$$

$$\bullet \quad (1.13) \quad X_{o2} = \frac{No2}{NR} = \frac{0.21 N(O_2)_{st}(\lambda\alpha-1)}{(c/12)+(h/4) + (s/32) + (0.21 N(O_2)_{st}(\lambda\alpha-1))+(0.79 N(O_2)_{st}(\lambda\alpha))}$$

Η λύση των εξισώσεων (5.12) και (5.13) ως προς λ είναι πολύ σημαντική καθώς μας δίνεται η δυνατότητα να έχουμε δύο ανεξάρτητες συναρτήσεις του λόγου ισοδυναμίας αέρα(λ), $\lambda_{(co2)}$ και $\lambda_{(o2)}$ αντίστοιχα. Έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε το λόγο ισοδυναμίας καύσης για οποιοδήποτε δεδομένο καύσιμο, γνωρίζοντας μόνο την κατ'όγκο(ή kmole) σύνθεση του καυσαερίου. Γνωρίζοντας την κατανάλωση καυσίμου(kg καυσίμου /h) και το λόγο ισοδυναμίας αέρα καύσης, μπορούμε να βρούμε την παροχή αέρα καύσης(kg αέρα/h), χρησιμοποιώντας τον ορισμό του (λ).

2.2.1.2 «Τυπικό Καύσιμο»

Τα συνήθη καύσιμα χαρακτηρίζονται μέσω της στοιχειομετρικής ανάλυσης η οποία δίνεται με τα μικρά γράμματα c , h , o , s , n , ... , w , a , που παριστούν την κατά μάζα περιεκτικότητα του καυσίμου στα διάφορα στοιχεία C , H₂ , O₂ ,S ,N₂ , ... , H₂O και λοιπά άκαυστα συστατικά(τέφρα).

Κατά κανόνα τα στοιχεία αυτά δεν περιλαμβάνονται στο καύσιμο μεμονωμένα, αλλά κατά το πλείστον υπό μορφή χημικών ενώσεων μεταξύ τους, ιδιαιτέρως τα κύρια καύσιμα στοιχεία C και H₂, που περιλαμβάνονται σε πληθώρα χημικών ενώσεων, τους υδρογονάνθρακες. Κυρίως για τα υγρά καύσιμα (βενζίνη, κηροζίνη, ντήζελ) δεν διαφέρουν σημαντικά ως προς την στοιχειακή τους σύσταση(περιεκτικότητα στοιχείων C , H₂) αλλά ως προς το είδος των υδρογονανθράκων που περιέχουν(την μορφή που εμφανίζονται τα στοιχεία στο σύστημα). Συνεπώς, τα καύσιμα αυτά δεν εμφανίζουν σοβαρές διαφορές ούτε ως προς την ενεργειακή ούτε ως προς τη στοιχειομετρική συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα μέσο υγρό καύσιμο, μέσω του οποίου μπορούμε να εκτελέσουμε τυπικούς υπολογισμούς. Το καύσιμο αυτό ορίζεται ως «τυπικό καύσιμο». Η σύσταση του και ορισμένες ιδιότητες του παρουσιάζονται στον Πίνακα (2.1) που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1. Ιδιότητες τυπικού καυσίμου

«Τυπικό Καύσιμο»	
Χημικός Τύπος	C ₈ H ₁₇
Σύνθεση	(c)=85%, (h)=13.5%, (s)=1.0%, (a)=0.5%
Κατώτερη Θερμογόνος ικανότητα	Hu=42.500 kJ/kg (10.150 kcal/kg)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΜΗΧΑΝΕΣ DIESEL

3.1 Εισαγωγή στη Ατμοσφαιρική Ρύπανση από Μ.Ε.Κ.

Η συμβολή των μηχανών εσωτερικής καύσης στην αναβάθμιση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου είναι αδιαμφισβήτητη, όπως αδιαμφισβήτητη είναι και η συνεισφορά τους στην ρύπανση του περιβάλλοντος. Οι ενδείξεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης (φωτοχημικό νέφος, όξινη βροχή) σε τοπικό και εν γένει η κλιματική αλλαγή (φαινόμενο του θερμοκηπίου, υπερθέρμανση) σε παγκόσμιο επίπεδο, αποτελούν μείζων θέματα επιστημονικής έρευνας, τόσο σε επίπεδο πρόληψης όσο και σε επίπεδο περιορισμού του φαινομένου. Η ανεξέλεγκτη εκπομπή ρύπων αφορά όλες τις μηχανές εσωτερικής καύσης, από την ηλεκτροπαραγωγή (καύση λιθάνθρακα, πετρελαίου), την κεντρική θέρμανση κτιρίων και σαφώς τις εμβολοφόρες μηχανές (σε όλες τις εφαρμογές τους). Συγκεκριμένα στο κλάδο των μεταφορών, το ποσοστό των εκπομπών σε παγκόσμιο επίπεδο είναι 30% , με την ναυτιλία να κατέχει το 2,7% των εκπεμπόμενων ρύπων.

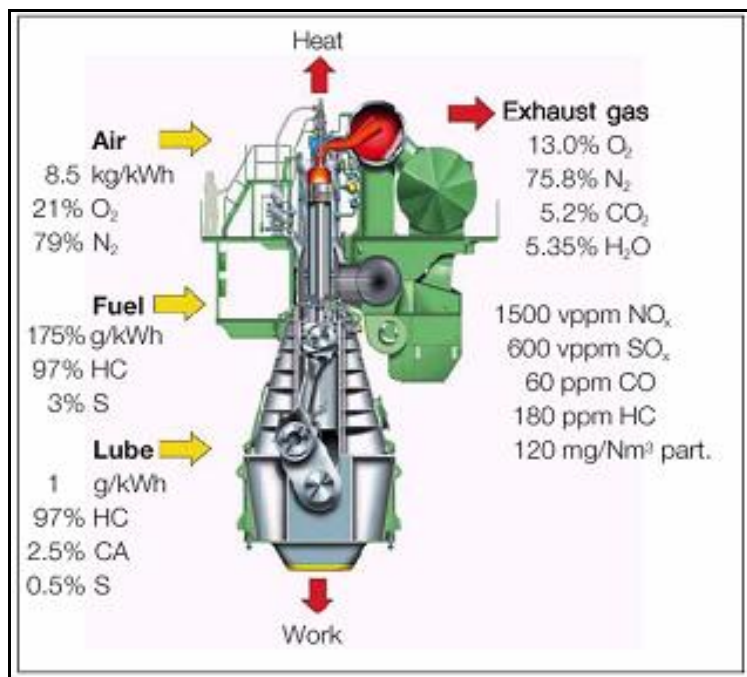
Ο σχηματισμός των ρύπων προκαλείται από την διάσπαση των προϊόντων της καύσης εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Κατά την στοιχειομετρική καύση, τα προϊόντα της αντίδρασης δεν μπορούν να οξειδωθούν άλλο, ενώ πραγματοποιείται έκλυση όλου του ποσού θερμότητας, που προέρχεται από την χημική ενέργεια του καυσίμου. Στην πραγματική καύση, η ποσότητα θερμικής ενέργειας που διατίθεται δεν είναι ακριβώς ίση με την παραπάνω, όχι μόνο λόγω των διαφορών θερμικών απωλειών αλλά διότι λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της χημικής διάσπασης των προϊόντων. Κατά το φαινόμενο αυτό, τα διάφορα χημικά στοιχεία και οι ενώσεις της αντίδρασης της καύσης συμμετέχουν σε ένα σύνολο επιμέρους αντιδράσεων, οι οποίες για την ολοκλήρωσή τους απορροφούν ενέργεια. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην δημιουργία και άλλων συστατικών, πέρα από το CO₂ και O₂ , ως προϊόντα τέλειας καύσης. Τα συστατικά αυτά (σε υπολογίσιμες ποσότητες) είναι τα: H₂ , CO , O₂ , N₂ , NO , NO₂ , H₂O , SO₂ , HC(άκαυστοι υδρογονάνθρακες)καθώς και αλδεύδες, κετόνες ,O₃(όζον), SO₃ κα. Από αυτούς τους ρυπαντές, διακρίνουμε τους πιο επικίνδυνους και τοξικούς όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα(CO₂), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου(NOx), τα οξείδια του θείου(SOx)(ανάλογα την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο), τους άκαυστους υδρογονάνθρακες(HC) και τις σωματιδιακές εκπομπές με

κυριότερη την αιθάλη(soot)(μαύρο καπνό)(μόνο στους κινητήρες Diesel όπως έχει αναφερθεί στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ(1)).

Εν κατακλείδι, λόγω της εκτεταμένης ατμοσφαιρικής μόλυνσης, οι ανεπτυγμένες βιομηχανικά χώρες, μέσω συνδιασκέψεων(πρωτόκολλο του Κιото) και ερευνητικών κέντρων καταβάλλουν προσπάθειες για την εύρεση νέων τεχνικών που θα αφορούν τόσο την πρόληψη και την δημιουργία μέτρων για την αποφυγή σχηματισμού των ρυπογόνων ουσιών, όσο και την καταστολή αυτών, με μέτρα που τις δεσμεύουν ή τις καταστρέφουν. Επιπλέον, θα πρέπει να προχωρήσει η νομοθετική πρόνοια των αρμόδιων κρατικών υπηρεσιών και άλλων διεθνών οργανισμών, όπως ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας, για την θέσπιση περιοριστικότερων ορίων για τα επιτρεπόμενα ποσοστά εκπομπής αέριων ρύπων και τον έλεγχο εφαρμογής τους.

3.2 Εκπεμπόμενοι Ρύποι από τους Κινητήρες Diesel

Οι κυριότεροι ρύποι που εκπέμπονται από τους κινητήρες Diesel είναι τα NO_x , CO , HC , σωματιδιακές εκπομπές με κύρια την αιθάλη(soot) , SO_x , CO₂ * (οι τέσσερις πρώτοι ρύποι ανήκουν στους ελεγχόμενους ρύπους, με νομοθετημένα επίπεδα συγκέντρωσης).



Εικόνα 3.1. .Συνηθεις εκπεμπόμενοι ρύποι από μηχανή Diesel.

3.2.1 Οξείδια του Αζώτου(NOx)

3.2.1.1 Τα Οξείδια του Αζώτου (NOx)

Οξείδια του αζώτου(NOx): Με τον όρο οξείδιο του αζώτου αναφερόμαστε κατά κύριο λόγο στο μονοξείδιο του αζώτου(NO) και στο διοξείδιο του αζώτου(NO₂), ενώ παρατηρούνται μικρότερες συγκεντρώσεις άλλων μορφών όπως του N₂O, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅, σημαντικότερη(για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις) των οποίων είναι το πρωτοξείδιο του αζώτου(N₂O). Σε μεσαία και μεγάλα φορτία, εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούν στο θάλαμο καύσης του Diesel, το ποσοστό του NO φθάνει το 98~99% με αποτέλεσμα να θεωρούνται συνώνυμα του NOx. Το αντίθετο συμβαίνει στα μικρά φορτία, όπου αυξάνει το ποσοστό του NO₂ και φθάνει το 10~25%. Τα NOx αποτελούν έναν από τους κυριότερους ρύπους με σημαντικές επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα.

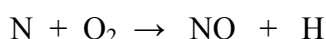
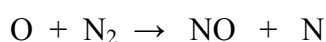
Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τα οξείδια του αζώτου υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας αντιδρούν με πτητικές οργανικές ενώσεις και σχηματίζουν το όζον, συμβάλλοντας στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Επίσης αντιδρούν με την υγρασία του αέρα σχηματίζοντας νιτρικό οξύ, συμβάλλοντας στην δημιουργία της όξινης βροχής. Δύο φαινόμενα που δημιουργούν σοβαρές επιπτώσεις στους ανθρώπους(αναπνευστικά προβλήματα, καρκίνο του δέρματος) και στο περιβάλλον(καταστροφή δασών).

3.2.1.2 Σχηματισμός Οξειδίων του Αζώτου (NOx)

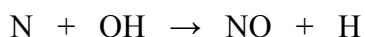
Κύρια πηγή σχηματισμού των NOx είναι η οξειδωση του αζώτου(N₂)που υπάρχει στον ατμοσφαιρικό για την καύση αέρα, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στην περιοχή αντιδράσεως, ενώ σαν μια δεύτερη πηγή θεωρείται η οξειδωση του N₂ που πιθανώς περιέχεται στο καύσιμο(σε σχετικά αμελητέες ποσότητες). Στους κινητήρες Diesel, ο τρόπος που πραγματοποιείται η καύση συνδέεται άμεσα με τον σχηματισμό NOx. Η ανομοιογένεια του μείγματος καυσίμου-αέρα, δημιουργεί ζώνες πλούσιου και φτωχού καυσίμου, σε συνδυασμό με την κατανομή της θερμοκρασίας, φέρει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου μόνο σε περιοχές που οι συνθήκες το ευνοούν. Ο σχηματισμός τους παρατηρείται έντονα κατά το δεύτερο στάδιο της καύσης, με την εμφάνιση της φλόγας προανάμειξης, όπου η θερμοκρασία και τα επίπεδα οξυγόνου είναι υψηλά. Η διαδικασία αυτή παγώνει, κατά την διάρκεια της ελεγχόμενης καύσης, κατά την οποία οι θερμές ζώνες αντίδρασης έρχονται σε

επαφή με το ψυχρό και άκαυστο μέχρι εκείνη τη στιγμή αέρα, με αποτέλεσμα την σταθεροποίηση των οξειδίων. Ο σχηματισμός NO_x, εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον χρόνο παραμονής στην ζώνη υψηλών θερμοκρασιών κατά την καύση, την διαθέσιμη ποσότητα και την μερική πίεση του οξυγόνου. Εκφράζεται συνήθως με τον μηχανισμό Zeldovich, που είναι ένα σύνολο αντιδράσεων που έχουν προκύψει από έρευνες. Οι κύριες αντιδράσεις για υψηλά και μεσαία φορτία, αφορούν άμεσα τα εκπεμπόμενα(συγκέντρωση 98~99% NO) NO_x.

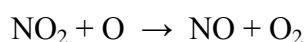
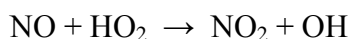
- Περίσσεια O₂



- Περίσσεια καυσίμου



Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συγκέντρωση του NO₂ στα καυσαέρια είναι σχεδόν αμελητέα με εξαίρεση, την λειτουργία του κινητήρα στα χαμηλά φορτία. Στην περίπτωση αυτή το ποσοστό του NO₂ παίρνει τιμές μεταξύ 10-25%. Αυτό συμβαίνει γιατί το NO που σχηματίζεται, οξειδώνεται σε NO₂ και έπειτα ξανά σε NO, σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:



Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι οι εμβολοφόρες μηχανές με την μεγαλύτερη εκπομπή NO_x είναι οι βραδύστροφες, που συναντώνται κυρίως σε ναυτικές εφαρμογές. Αυτό συμβαίνει γιατί λειτουργούν με μεγάλο λόγο ισοδυναμίας αέρα, άρα και περισσότερη ποσότητα οξυγόνου εισέρχεται στην καύση, ενώ και η καύση διαρκεί περισσότερο χρόνο λόγω της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής.

3.2.2 Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)

3.2.2.1 Το Μονοξείδιο του Άνθρακα(CO)

Με τον όρο μονοξείδιο του άνθρακα αναφερόμαστε στο προϊόν της πλήρους οξείδωσης του άνθρακα κατά την ατελή καύση του, μέσα σε ένα θάλαμο καύσης. Εμφανίζεται έντονα στην λειτουργία του κινητήρα με πλούσιο μείγμα($\phi > 1$, $\lambda_a < 1$) ή ακόμη (και σε μικρότερες ποσότητες εκπομπής) στην περίπτωση που ο λόγος ισοδυναμίας αέρα είναι λίγο μεγαλύτερος της μονάδας. Πρόκειται για έναν από τους σοβαρότερους και πιο τοξικούς ρύπους(η εισπνοή του μπορεί να επιφέρει

πονοκέφαλο, καρδιακές αλλοιώσεις έως και θάνατο), που όμως λόγω της λειτουργίας του κινητήρα diesel με περίσσεια αέρα ακόμα και στο πλήρες φορτίο του, εμφανίζεται σε μικρές ποσότητες στα καυσαέρια των κινητήρων diesel.

3.2.3 Άκαυστοι Υδρογονάνθρακες(HC)

3.2.3.1 Οι Άκαυστοι Υδρογονάνθρακες (HC)

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες είναι αποτέλεσμα της ατελής καύσης του καυσίμου. Εμφανίζονται στην εξαγωγή των καυσαερίων των πετρελαιοκινητήρων κυρίως ως παραφίνες, ολεφίνες, αρωματικούς υδρογονάνθρακες και σε λιγότερες συγκεντρώσεις ως ακετυλένια. Σε πολλές περιπτώσεις παρατηρείται και αρκετά μεγάλη συγκέντρωση οξυγονούχων οργανικών ενώσεων((VOCS) Volatile Organic Compounds), οι οποίες συμβάλλουν στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους(με την παρουσία ηλιακού φωτός αντιδρούν με το NO₂ και δημιουργούν τους δευτερογενούς ρύπους όζον(O₃) και νιτρικό υπεροξακυτέλιο(PAN)). Οι οξυγονούχες ενώσεις είναι συνήθως αλδεΐδες, αλκοόλες και κετόνες.

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες αποτελούν έναν από τους επικινδυνότερους ρύπους για την ανθρώπινη υγεία καθώς είναι υπαίτιοι τόσο για παθήσεις των ματιών, του πνεύμονα αλλά και την εμφάνιση καρκίνου. Όπως έχει προαναφερθεί, συμβάλλουν στο φωτοχημικό νέφος και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

3.2.3.2 Σχηματισμός Άκαυστων Υδρογονανθράκων (HC)

Ο κύριος λόγος εμφάνισης άκαυστων υδρογονανθράκων στα καυσαέρια των εμβολοφόρων κινητήρων είναι η ατελής καύση τους μέσα στο κύλινδρο. Κύρια αιτία σχηματισμού υδρογονανθράκων στους κινητήρες Diesel είναι, είτε το πάρα πολύ φτωχό μείγμα για την αυτανάφλεξη και συντήρηση της καύσης(υπεραναμειξιμότητα) είτε το πάρα πολύ πλούσιο μείγμα με αποτέλεσμα την ανικανότητα τέλειας καύσης και την διαφυγή άκαυστου μείγματος αέρα-καυσίμου από το θάλαμο καύσης (υποαναμειξιμότητα). Στις περισσότερες περιπτώσεις η ποσότητα ακαύστων υδρογονανθράκων που διαφεύγει, αναλώνεται μέσω αργών αντιδράσεων οξείδωσης στην φάση της αποτόνωσης, με ανάμειξή της με επιπλέον αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να θεωρείται το πολύ φτωχό μείγμα ως η κύρια αιτία εκπομπής HC. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως για το καύσιμο που εγχύεται κατά τη διάρκεια

καθυστερήσεως αναφλέξεως, ενώ αυτό το οποίο εγχύεται μετά από αυτό το στάδιο, οξειδώνεται πλήρως.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εκπομπή HC είναι άμεσα εξαρτημένη από τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα. Στην λειτουργία εν κενό και στα πολύ χαμηλά φορτία, οι εκπομπές είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με αυτές στο πλήρες φορτίο. Τέλος, όταν ο κινητήρας υπερφορτωθεί οι εκπομπές αυξάνονται ραγδαία.

3.2.4 Σωματιδιακές εκπομπές

3.2.4.1 Γενικά

Οι σωματιδιακές εκπομπές των κινητήρων Diesel είναι άμεσα αντιληπτές από τον άνθρωπο λόγω της ορατής χροιάς τους στα καυσαέρια. Το είδος των εκπεμπόμενων σωματιδίων προσδιορίζεται κυρίως σε αντιστοιχία με το χρώμα του καπνού. Ανάλογα με την απόχρωση έχουμε:

- Λευκό καπνό, που σύγκειται από ομίχλη υγρών άκαυστων σωματιδίων καυσίμου και εμφανίζεται κατά την εκκίνηση από ψυχρή κατάσταση ή σε πολύ χαμηλά φορτία.
- Κυανό καπνό, που σύγκειται από ομίχλη υγρών άκαυστων σωματιδίων λιπαντικού ελαίου και εμφανίζεται όταν υπάρχει πρόβλημα κατά την λίπανση(πχ. φθαρμένα ή κολλημένα ελατήρια εμβόλου).
- Μελανό καπνό ή αιθάλη, που σύγκειται από λεπτά σωματίδια στερεού άκαυστου άνθρακα.

Όλα τα είδη καπνού είναι επιβλαβή για τον άνθρωπο και το περιβάλλον ,κυρίως εξαιτίας του μικρού μεγέθους του ,που τους δίνει την δυνατότητα να εισχωρούν στον αναπνευστικό σύστημα. Στην συνέχεια θα αναπτυχθεί το σημαντικότερο είδος καπνού, η αιθάλη.

3.2.4.2 Αιθάλη(soot)

3.2.4.2.1 Η Αιθάλη(soot)

Αιθάλη(soot):Με τον όρο αιθάλη αναφερόμαστε στο ανθρακώδες υλικό το οποίο παράγεται κατά την καύση του κινητήρα Diesel ως αποτέλεσμα ατελούς καύσης. Είναι ο χαρακτηριστικός ρύπος της πετρελαιομηχανής, που εμφανίζεται ως ο χαρακτηριστικός μαύρος καπνός στα ψηλά φορτία (>90% του μεγίστου) και οφείλεται στην πυρόλυση του καυσίμου και την σχετική ανεπάρκεια οξυγόνου στις

ζώνες πλούσιου μείγματος που δημιουργούνται εξαιτίας της ανομοιογένειας του καυσίμου. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται είτε με την συνεχή λειτουργία του κινητήρα σε πολύ υψηλά φορτία είτε με τις απότομες αλλαγές φορτίου (από χαμηλά σε υψηλά) ή κατά την εκκίνηση όταν με την απότομη έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης ο διατιθέμενος αέρας δεν επαρκεί. Αποτελεί σωματιδιακή εκπομπή αποτελούμενη κατά κύριο λόγο από άτομα άνθρακα, σε αναλογία με το υδρογόνο $H/C=0,1$. Η διάμετρος κάθε σωματιδίου είναι μερικές εκατοντάδες nm (~30 nm).

Τα σωματίδια της αιθάλης συμβάλουν αρνητικά στα επίπεδα σωματιδιακών εκπομπών PM του αέρα που εισπνέουμε. Βέβαια πέρα από την αιθάλη και οι υπόλοιποι ρύποι όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και τα οξείδια του θείου (SO_x), σχηματίζουν σωματίδια μετά την εκπομπή τους, όταν αντιδρούν με διάφορα άλλα στοιχεία του ατμοσφαιρικού αέρα, όμως το πολύ μικρό μέγεθος των σωματιδίων της αιθάλης ($<0,1 \mu m$), τα καθιστούν ιδιαίτερα επικίνδυνα για τον ανθρώπινο οργανισμό, (αναπνευστικά και καρδιολογικά προβλήματα).

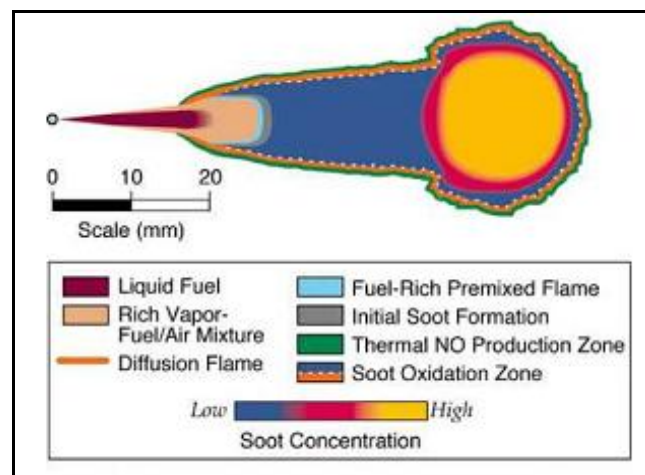
3.2.4.2.2 Σχηματισμός Αιθάλης (soot)

Οι κατασκευαστές μηχανών Diesel, υπό το βάρος του αυστηρού νομοθετικού πλαισίου προσανατολίζονται στην αναζήτηση νέων τρόπων μείωσης της εκπομπής της αιθάλης, χρησιμοποιώντας κατάλληλα, υπολογιστικά μοντέλα. Ένα τέτοιο διαδεδομένο απλοποιημένο μοντέλο, που προσεγγίζει το σχηματισμό της αιθάλης είναι αυτό του Hiroyasu. Ο σχηματισμός της αιθάλης λαμβάνει χώρα σε συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης στην περιοχή των 1000-2800 K και 50-100 atm. Το μοντέλο αυτό είναι διβηματικό (two-step) και περιλαμβάνει δύο στάδια:

- I. Το στάδιο της γέννησης των σωματιδίων : Στο στάδιο αυτό, παράγεται το πρώτο υλικό της συμπυκνωμένης φάσης το οποίο προκύπτει από τα προϊόντα της οξειδωτικής και πυρόλυσης του καυσίμου. Τα προϊόντα αυτά περιέχουν διάφορους ακόρεστους αέριους υδρογονάνθρακες, ιδιαίτερα ακετυλένιο (C_2H_2) και τα ανώτερα αυτού πολυακετυλένια ($C_{2n}H_2$) και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Τα δύο αυτά είδη μορίων θεωρούνται ως οι πιο πιθανοί πρόδρομοι αιθάλης στις φλόγες, αφού μέσω των αντιδράσεων συμπύκνωσής τους έχουμε την εμφάνιση των πρώτων σωματιδίων αιθάλης ($d < 2 \text{ nm}$).

II. Το στάδιο της μεγέθυνσης των σωματιδίων : Στο στάδιο αυτό, έχουμε αύξηση του μεγέθους των σωματιδίων, που περιλαμβάνει τόσο αύξηση της θερμοκρασίας όσο και σύμπληξη(στερεοποίηση) και συνάθροιση. Η επιφανειακή αύξηση, με την οποία παράγεται το μεγαλύτερο μέρος του στερεού υλικού, περιλαμβάνει την προσκόλληση συστατικών αέριας φάσης στην επιφάνεια των σωματιδίων και την ενσωμάτωσή τους στην σωματιδιακή φάση.

Η αιθάλη παρατηρείται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, στον πυρήνα της δέσμης του καυσίμου και στα τοιχώματα του κυλίνδρου, όπου φαίνεται ότι ο μηχανισμός σχηματισμού των σωματιδίων είναι αυτός της πυρόλυσης (διάσπαση των υδρογονανθράκων, σε άλλους μικρότερους μοριακού βάρους, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας με χαμηλή επάρκεια οξυγόνου). Οι συγκεντρώσεις αιθάλης αυξάνουν ραγδαία με την έναρξη της καύσης, ενώ μειώνονται όταν σταματήσει η έγχυση του καυσίμου και ο πλούσιος σε καύσιμο πυρήνας αναμειχθεί με αέρα προς φτωχότερες αναλογίες.



Εικόνα 3.2. Συγκέντρωση αιθάλης κατά την καύση με έγχυση σε κινητήρα Diesel.

Καθώς ο σχηματισμός της αιθάλης, συνδέεται άμεσα με το φορτίο του κινητήρα, αποτελεί ένα επιπλέον πρόβλημα για την λειτουργία της μηχανής, ανεξάρτητα της ρυπογόνου ιδιότητά της. Η λειτουργία σε υψηλά φορτία και η δημιουργία τοπικών ζωνών πλούσιου μείγματος εξαιτίας της ανομοιομορφίας του καυσίμου, επιφέρει την δημιουργία αιθάλης και έχει αρνητικά αποτελέσματα στις οπές του συστήματος έγχυσης και την βαλβίδα εξαγωγής λόγω των επικαθήσεων. Το γεγονός αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα όρια του κινητήρα να συνδέονται με την εμφάνιση της αιθάλης.

Το πρόβλημα αυτό έχει λυθεί με την εφαρμογή κατάλληλης υπερπλήρωσης, με την βοήθεια της οποίας διευρύνουμε το περιθώριο λειτουργίας τους.

3.2.5 Οξείδια του Θείου(SO₂)

3.2.5.1 Τα Οξείδια του Θείου(SO₂)

Οξείδια του θείου(SO₂):Εξαιτίας της οργανικής καταγωγής του πετρελαίου και των παραγώγων του, εμπεριέχεται ποσότητα θείου στο καύσιμο που εγχύεται στο θάλαμο καύσης. Κατά την καύση, η ποσότητα του θείου στο καύσιμο οξειδώνεται σε διάφορες χημικές ενώσεις του θείου(SO_x), αλλά κυρίως στο διοξείδιο του θείου (SO₂) και το υπεροξείδιο του θείου(SO₃) με αναλογία 15:1. Συνεπώς οι εκπομπές SO_x είναι συνώνυμη της εκπομπής SO₂. Τα οξείδια του θείου, συμβάλλουν αποφασιστικά στην δημιουργία όξινης βροχής και κατά συνέπεια στην καταστροφή του περιβάλλοντος(καταστροφή δασών), επιφέροντας σημαντικά προβλήματα στην ανθρώπινη δραστηριότητα(καταστροφή μνημείων) και στην ανθρώπινη υγεία(ερεθισμός αλλοιώσεις πνευμόνων).

3.2.6 Διοξείδιο του Άνθρακα(CO₂)^{}**

3.2.6.1 Το Διοξείδιο του Άνθρακα(CO₂)

Το CO₂ δεν αποτελεί ρύπο καθώς προέρχεται από την τέλεια καύση της συγκέντρωσης του άνθρακα. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο αποτελεί ένα από τα αέρια του Θερμοκηπίου(CO₂,CH₄,N₂O,HFCs,PFCs,SF₆). Η αναφορά του στην παράγραφο αυτή (ως εκπεμπόμενο ρύπο) γίνεται, για να αναδειχθεί η συνεισφορά του στο παγκόσμιο περιβαλλοντικό φαινόμενο του Θερμοκηπίου. Η εκπομπή του είναι συνάρτηση της αποδοτικότητας του κινητήρα. Όσο καλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης, τόσο λιγότερη η ποσότητα του καυσίμου που χρειάζεται να καεί ,άρα και η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα.

3.3 Μέθοδοι Μείωσης Εκπεμπόμενων Ρύπων

3.3.1 Εισαγωγή

Στους κινητήρες Diesel η εκπομπή CO₂ είναι αναπόφευκτη, αλλά λόγω του υψηλού βαθμού απόδοσης των κινητήρων diesel είναι σχετικά μικρή ανά μονάδα ισχύος. Παράλληλα, η εκπομπή CO είναι πολύ μικρή λόγω της λειτουργίας των diesel με περίσσεια αέρα. Έτσι από τις εκπομπές των ρύπων, οι πιο σημαντικές είναι τα οξειδία NO_x και SO_x, τα οποία προέρχονται από τις υψηλές πιέσεις καύσης και είναι χαρακτηριστικό των κινητήρων Diesel. Ενώ ο περιορισμός των SO_x, είναι δυνατόν να επιτευχθεί με μείωση της περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο (S), ο περιορισμός των NO_x, των άκαυστων υδρογονανθράκων(HC) και της αιθάλης είναι πιο περίπλοκος. Πιο δύσκολος είναι ο περιορισμός της εκπομπής NO_x που είναι αρκετά σημαντική. Π.χ. Θεωρώντας ένα επίπεδο εκπομπής NO_x 16-22 g/kWh και μία τυπική κατανάλωση καυσίμου 180 g/kWh, διαπιστώνεται ότι η εκπομπή NO_x από κινητήρες πλοίων παγκοσμίως εκτιμάται στους 15 εκατομ.τόνους NO_x τον χρόνο ,σε σχέση με την παγκόσμια έκλυση NO_x από ανθρώπινη δραστηριότητα που εκτιμάται στους 65-75 εκατομ.τόνους. Σύμφωνα με τα παραπάνω, διεθνείς οργανισμοί, όπως ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (που παρουσιάζεται εκτενώς στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5) έχουν στοχοποιήσει την εκπομπή οξειδίων του αζώτου και του θείου, βάζοντας όρια εκπομπής και στόχους μείωσης των ρύπων.

Οι τεχνικές που εφαρμόζονται για την μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων διακρίνονται στις μεθόδους που εφαρμόζονται εντός του θαλάμου καύσης(πρωτογενείς) και τις μεθόδους που έχουν να κάνουν με την επεξεργασία των καυσαερίων(δευτερογενείς). Οι πρωτογενείς μέθοδοι ή μέθοδοι πρόληψης αποτελούν ουσιαστικά επεμβάσεις στην ίδια την διαδικασία της καύσης ώστε να περιορίσουν την παραγωγή ανεπιθύμητων ρύπων. Αντίθετα, οι δευτερογενείς μέθοδοι ή μέθοδοι περιστολής, στοχεύουν στην μείωση της ποσότητας των εκπεμπόμενων ρύπων, όχι όμως στην παραγωγή τους. Πρόκειται δηλαδή για τεχνολογίες που ασκούνται εξωτερικά του κινητήρα, οι οποίες είτε παγιδεύουν, είτε μετασχηματίζουν χημικά τους ανεπιθύμητους, εκπεμπόμενους ρύπους. Οι πρωτογενείς μέθοδοι επιλύουν ουσιαστικά το πρόβλημα των ρύπων σε αντίθεση με τους δευτερογενείς μεθόδους που δημιουργούν νέα προβλήματα περί διαχείρισης του παγιδευμένου ρύπου ή του μετασχηματισμένου παραπροϊόντος τους. Τέλος πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα, ότι και

οι δύο κατηγορίες επηρεάζουν αρνητικά την ειδική κατανάλωση καυσίμου και την ισχύ του κινητήρα. Στις επόμενες παραγράφους θα περιγράψουμε συνοπτικά τις κυριότερες πρακτικές μεθόδους μείωσης εκπομπών του NO_x , του SO_x και της αιθάλης.

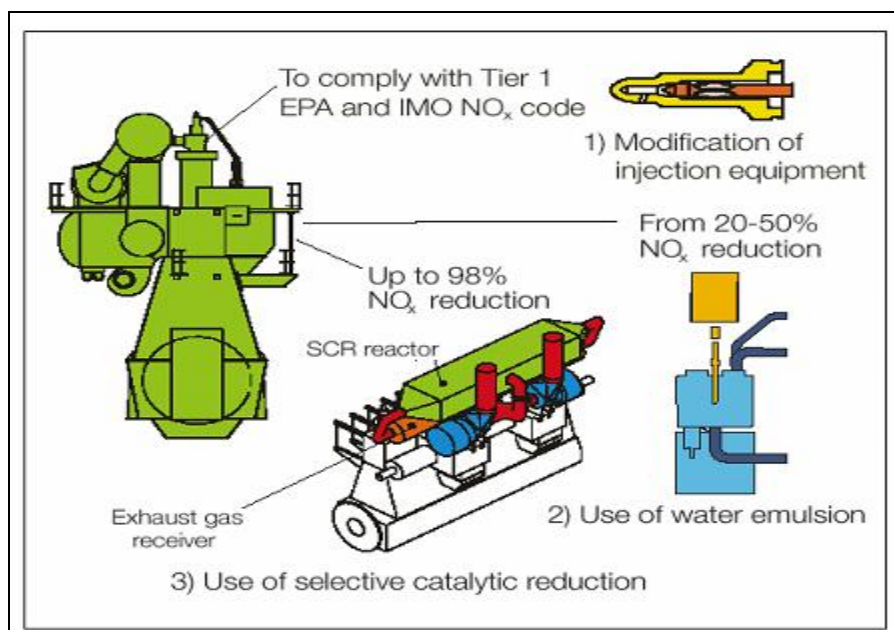
3.3.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Εκπομπή Ρύπων

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκπομπή αερίων ρύπων στους κινητήρες Diesel είναι η ποιότητα του καυσίμου , το λιπαντικό(κυλινδρέλαιο) και σχεδιαστικοί παράμετροι λειτουργίας του κινητήρα.

Πίνακας 3.1. Επίδραση μεταβολών για μείωση ρυπαντών σε μεγάλους 2-X ναυτιλιακούς κινητήρες.

	NO _x	SO _x	HC	CO	CO ₂	soot	SFOC
ΚΑΥΣΙΜΟ	***	***	**	*	**	**	*
ΛΙΠΑΝΣΗ	*	*	**	*	*	(*)	*
ΚΙΝΗΤΗΡΑ	***	*	**	*	(*)*	***	***

***Μεγάλη επίδραση **Κάποια Επίδραση *Μικρή ή καθόλου επίδραση



Εικόνα 3.3. Μέθοδοι μείωσης των NO_x.

1. Παράμετροι καυσίμου

Τα χαρακτηριστικά του παρεχόμενου στον κινητήρα καυσίμου που επηρεάζουν τις εκπομπές ρύπων είναι:

1.1. Περιεκτικότητα σε θείο (S)

Πρακτικά όλο το θείο που περιέχεται στο καύσιμο με την καύση μετατρέπεται σε διοξείδιο του θείου(SO₂) και σε ένα μικρό ποσοστό(~5%)σε SO₃ που αποβάλλονται με τα καυσαέρια. Οι εκπομπές SO_x περιορίζονται με έλεγχο των ορίων της περιεκτικότητας σε θείο των καυσίμων ανεφοδιασμού. Το γεγονός αυτό θα προκαλέσει άνοδο των τιμών των καυσίμων.

1.2. Περιεκτικότητα καυσίμου σε άζωτο(N₂)

Οι υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις του κύκλου diesel δημιουργούν κατάλληλες συνθήκες για το σχηματισμό οξειδίων του αζώτου που προέρχονται από οξείδωση τμήματος του μοριακού N₂ του αέρα καύσης και οξείδωση όλου σχεδόν του αζώτου που περιέχεται στις οργανικές ενώσεις του καυσίμου. Άτομα αζώτου που ελευθερώνονται με την καύση του πετρελαίου αντιδρούν με το οξυγόνο. Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι ορισμένα βαρέα καύσιμα μεγάλης περιεκτικότητας σε οργανικές ενώσεις αζώτου μπορεί να αυξηθούν την συγκέντρωση NO_x στα καυσαέρια έως 20 με 30 %.

1.3. Τύπος/σύνθεση καυσίμου

Χαρακτηριστικά του καυσίμου όπως ο αριθμός Conradson(CCN) έχουν σημαντική επίδραση στην ποσότητα των στερεών σωματιδίων στα καυσαέρια και πιο περιορισμένη επίδραση στην δημιουργία καπνού. Η πτητικότητα του καυσίμου έχει επίδραση στην εκπομπή άκαυστων υδρογονανθράκων (HC) που προέρχονται από τον νεκρό χώρο (sack volume) στα ακροφύσια των εγχυτήρων.

2. Παράμετροι ελαίου λίπανσης

Το λιπαντικό των κυλίνδρων επηρεάζει λιγότερο τις εκπομπές ρυπαντών (καπνού και HC) και περισσότερο την εκπομπή σωματιδίων.

3. Σχεδιαστικοί παράμετροι κινητήρα – Ρυθμίσεις και συνθήκες λειτουργίας

3.1. Σύστημα Έγχυσης Καυσίμου – Σχεδίαση Εγχυτήρα Καυσίμου

Το σύστημα έγχυσης επηρεάζει τις εκπομπές NOx μέσω της επίδρασης στην δημιουργία και καύση του μείγματος αέρα-καυσίμου σε συνδυασμό με τα τοπικά θερμοκρασιακά επίπεδα και τη συγκέντρωση οξυγόνου στην περιοχή του εγχυόμενου καυσίμου. Οι εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων (HC) εξαρτώνται από την επαφή του εγχυόμενου καυσίμου με τα τοιχώματα, τις δευτερεύουσες μετεγχύσεις και τις επιστάξεις μικρών ποσοτήτων καυσίμου από τον νεκρό όγκο των ακροφυσίων στις τελικές φάσεις του κύκλου. Πειράματα με αυξημένο αριθμό οπών στους εγχυτήρες ώστε να ρυθμίζεται η καύση έδειξαν μείωση (-10%) στην εκπομπή NOx με ελάχιστη αύξηση(+1%)στην ειδική κατανάλωση.

3.2. Γαλάκτωμα Νερού-Καυσίμου

Η οξείδωση του μοριακού N₂ του αέρα καύσης προς σχηματισμό NOx εξαρτάται από τη συγκέντρωση των στοιχείων της αντίδρασης (N₂ και O₂), την θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής σε υψηλές θερμοκρασίες. Με την εισαγωγή νερού στο θάλαμο καύσης μειώνονται τα NOx λόγω αλλαγής του ρυθμού έκλυσης θερμότητας και μείωσης της θερμοκρασίας καύσης. Ενώ το νερό ή ο ατμός είναι δυνατόν να ψεκασθούν κατευθείαν στον αέρα εισαγωγής, πολύ καλύτερα αποτελέσματα διαπιστώθηκαν με έγχυση γαλακτώματος καυσίμου-νερού με ποσοστό κατ'όγκο από 10% έως και πάνω από 40% νερού στο καύσιμο. Πρόσμιξη 10% νερού στο καύσιμο προκαλεί μείωση της NOx κατά 6~12% ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα. Πολλές φορές , γίνεται χρήση πρόσθετων για τη σταθεροποίηση του γαλακτώματος νερού-καυσίμου. Αποτελεί μια ελκυστική πρωτογενή μέθοδο μείωσης των εκπομπών NOx, λόγω της σχετικής απλότητας στην εγκατάσταση και στη λειτουργία.

3.3. Χρονισμός εγχύσεως(και μέγιστη πίεση)

Η καθυστέρηση στην έναρξη της έγχυσης και ως εκ τούτου στη μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου, χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που η μείωση των NOx πρέπει να επιτευχθεί χωρίς σχεδιαστικές αλλαγές στον κινητήρα (π.χ. σε υπάρχοντα πλοία). Οι αναφορές για τα αποτελέσματα της μεθόδου σε διάφορες εγκαταστάσεις διαφέρουν όχι τόσο στο ποσοστό μείωσης της εκπομπής NOx, όσο στην αύξηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Εφόσον παρέχεται από τον κατασκευαστή του κινητήρα η δυνατότητα ρύθμισης του χρονισμού έγχυσης, είναι δυνατόν να γίνεται

κάθε φορά η κατάλληλη επιλογή ρυθμίσεως (π.χ. ρύθμιση για λειτουργία σε περιοχές με αυστηρούς περιορισμούς εκπομπών, ή αντίθετα ρύθμιση για ελάχιστη ειδική κατανάλωση καυσίμου).

3.4. Κατάσταση αέρα πληρώσεως (και υγρασία)

Σε κινητήρες φυσικής αναπνοής η εκπομπή NO_x μειώνεται με την υγρασία του αέρα και αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Στους υπερπληρωμένους κινητήρες ενδιαφέρει η θερμοκρασία και υγρασία του αέρα μετά τα ψυγεία αέρα και τους κατακρατητές υγρασίας. Έρευνες γίνονται για μεθόδους κορεσμού του αέρα πλήρωσης (με παράλληλα μικρή αύξηση της θερμοκρασίας) ώστε να κατακρατείται περισσότερο νερό και έτσι να μειώνεται η μέγιστη θερμοκρασία καύσεως.

3.5. Ανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation)

Με την ανακυκλοφορία ενός ποσοστού των καυσαερίων μειώνεται ο ρυθμός παραγωγής NO_x λόγω της μείωσης της συγκέντρωσης O₂ στην ζώνη καύσης και σε μικρότερο βαθμό λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας H₂O και CO₂ στα καυσαέρια. Τα δύο αυτά αέρια έχουν υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα με αποτέλεσμα την μείωση των μέγιστων θερμοκρασιών καύσεως και κατ' επέκταση της δημιουργίας NO_x. Πειράματα σε διάφορα φορτία (50%,75%,90%) έδειξαν μείωση στην εκπομπή NO_x έως και 50% για ανακυκλοφορία 20% των καυσαερίων με ταυτόχρονη αύξηση της κατανάλωσης του καυσίμου κατά ~2%. Η εκπομπή NO_x μειώνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση κατ' όγκο του καυσαερίου ανακυκλοφορίας ενώ ο καπνός (αριθμός Bosch) αυξάνεται παραβολικά. Με ταυτόχρονη όμως καύση γαλακτώματος καυσίμου-νερού είναι δυνατόν να εξουδετερωθεί η επιδείνωση στις εκπομπές καπνού για ανακυκλοφορία καυσαερίων έως και 15%. Ο συνδυασμός της μεθόδου EGR με τη χρήση γαλακτώματος καυσίμου-νερού μειώνει τις εκπομπές καπνού και σωματιδίων σε αποδεκτά όρια και μπορεί να μειώσει τις εκπομπές NO_x μέχρι και 50%.

Η ανακυκλοφορία των καυσαερίων χρησιμοποιείται κυρίως στους μικρούς κινητήρες Ντήζελ. Στους μεγάλους κινητήρες Ντήζελ, όπως στους ναυτικούς κινητήρες, υπάρχουν δυσκολίες στη χρήση της μεθόδου EGR, καθώς εκτός της πολύπλοκης εγκατάστασης ανακυκλοφορίας και ψύξης καυσαερίων, προκύπτουν διάφορα

τεχνικά προβλήματα, τα οποία σχετίζονται με τις φθορές που μπορεί να προκληθούν στο σύστημα υπερπλήρωσης λόγω του καυσαερίου που ανακυκλοφορεί.

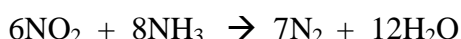
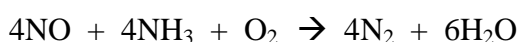
3.6. Απευθείας έγχυση διαλύματος αμμωνίας ή ουρίας στον θάλαμο καύσης.

Μείωση των NOx είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την μέθοδο της επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR) με την πρόσθεση αμμωνίας(NH₃) (2[NH₂]CO), σε θερμοκρασίες άνω των 300 °C στα καυσαέρια πριν το στρόβιλο του υπερπληρωτή, παρουσία καταλύτη. Η χρήση της μεθόδου αυτής, σε λέβητες χωρίς τη παρουσία καταλύτη, γίνεται στη θερμοκρασία των 1000°C. Στο θάλαμο καύσης των κινητήρων παρουσιάζονται τέτοιες θερμοκρασίες, σε γωνία στροφάλου περίπου 30-50°CΑ μετά το ΑΝΣ.Ο άμεσος και σωστός διασκορπισμός διαλύματος αμμωνίας ή ουρίας στον κύλινδρο πρέπει να πραγματοποιηθεί μέσα σε περιορισμένα χρονικά όρια. Πρόωρη έγχυση οδηγεί σε καύση της αμμωνίας χωρίς αντίδραση με τα NOx, ενώ καθυστερημένη έγχυση μειώνει τους ρυθμούς αντίδρασης με τα NOx. Η έγχυση της αμμωνίας ή της ουρίας την κατάλληλη χρονική στιγμή, επιφέρει μείωση των NOx κατά 50% εφόσον η ποσότητα της αμμωνίας ή της ουρίας είναι 4 φορές ή στοιχειομετρική (της αντίδρασης με τα NOx). Αυτό σημαίνει πως μόνο το 12% περίπου της αμμωνίας αντιδρά με τα NOx, ενώ η υπόλοιπη ποσότητα καίγεται σε αργότερα στάδια της καύσης με αμελητέα παραγωγή NOx.

3.7. Χρήση αντιδραστήρα αμμωνίας ή ουρίας παρουσία καταλύτη-Επιλεκτική

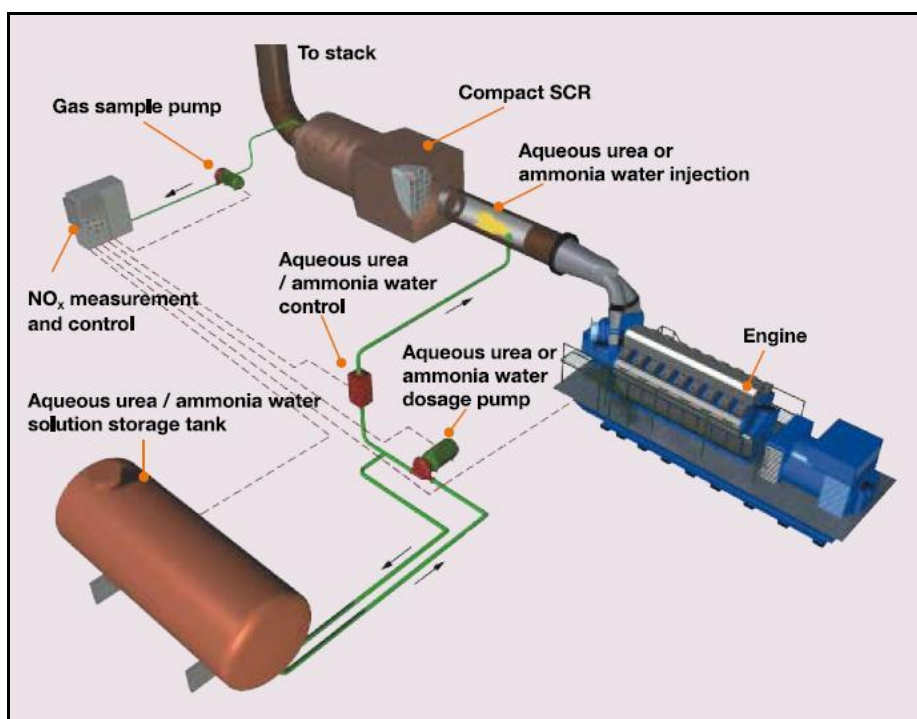
Καταλυτική Αναγωγή (SCR) καυσαερίων.

Αποτελεί δευτερογενή μέθοδο μείωσης των NOx σε κινητήρες Ντίζελ(όλες οι προαναφερθείσες είναι πρωτογενείς) και μπορεί να πετύχει έως 50% μείωση των NOx(η μείωση μπορεί να φθάσει έως το 90%). Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται απαιτούν θερμοκρασίες μεταξύ 300° C και 400° C ,οπότε πραγματοποιούνται και οι παρακάτω αντιδράσεις μεταξύ των καυσαερίων και ενός αναγωγικού μέσου(άνυδρη και ένυδρη αμμωνία ή ουρία) με την βοήθεια ενός καταλύτη:



Για θερμοκρασίες μικρότερες των 270°C πραγματοποιείται αντίδραση της αμμωνίας με τα οξείδια του θείου (εξαιτίας του θείου του καυσίμου), ενώ υψηλές θερμοκρασίες καταστρέφουν την αμμωνία, καταστάσεις που μειώνουν την απόδοση του καταλύτη. Έτσι ο αντιδραστήρας τοποθετείται πριν ή μετά το στρόβιλο του υπερπληρωτή

ανάλογα με την εγκατάσταση. Σε ναυτικούς 2-X κινητήρες ο αντιδραστήρας τοποθετείται πριν το στρόβιλο λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας καυσαερίου. Η χρήση του αντιδραστήρα γίνεται μόνο όταν απαιτούνται εξαιρετικά χαμηλές εκπομπές NO_x. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι προτιμάται η χρήση ουρίας ως αναγωγικό μέσο διότι είναι άοσμη και δεν χρειάζεται τις διατάξεις ασφαλείας της (ένυδρης ή άνυδρης) αμμωνίας που είναι τοξική. Λόγω της υψηλής ασφάλειας που παρέχει η ουρία σε σχέση με τα υπόλοιπα αναγωγικά μέσα, προτιμάται για χρήση σε επιβατικά οχήματα, σταθμούς παραγωγής ενέργειας αλλά και στις περιορισμένες εφαρμογές ναυτικών κινητήρων. Βέβαια είναι λιγότερο αποδοτική από την αμμωνία.



Εικόνα 3.4. Σχηματική απεικόνιση κινητήρα με διάταξη καταλυτικής αναγωγής καυσαερίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΑΛΥΤΩΝ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή στις Μετρήσεις και στα Μετρητικά Όργανα

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία σε ένα πρόγραμμα ενεργειακής διαχείρισης που περιλαμβάνει συστήματα καύσης είναι το σύστημα των μετρητικών διατάξεων και των οργάνων, τα οποία μετρούν και καταγράφουν τα διάφορα λειτουργικά μεγέθη της εγκατάστασης. Η διεξαγωγή ενεργειακών μετρήσεων αναφέρεται στον προσδιορισμό των παραμέτρων που σχετίζονται με τη χρήση της θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας στο μετρούμενο σύστημα. Οι ενεργειακές μετρήσεις, αποσκοπούν τόσο στον εντοπισμό και την ποσοτικοποίηση πιθανών ανωμαλιών στην λειτουργική συμπεριφορά της εγκατάστασης, όσο και στον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης και των απωλειών σε ένα σύστημα, τον καθορισμό δηλαδή του ενεργειακού του ισοζυγίου. Επίσης, επιβεβαιώνουν την ωφελιμότητα από την εφαρμογή διάφορων μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, συγκρίνοντας τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και την κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα, «πριν» και «μετά».

Πριν από την διεξαγωγή κάθε ενεργειακής μέτρησης, είναι απαραίτητο να καθορίζονται η ακρίβεια και η λεπτομέρεια της πληροφορίας που αναμένεται να αξιοποιηθεί. Είναι συνεπώς απαραίτητο, να προσδιορίζονται σαφώς η μεθοδολογία της μέτρησης, το είδος του εξοπλισμού (οργάνων μέτρησης), το πεδίο και η διάρκεια της μέτρησης. Το πλήθος, η διάρκεια και η ακρίβεια των μετρήσεων, εξαρτώνται άμεσα από το εύρος των ενεργειών ελέγχου και καταγραφής του ενεργειακού συστήματος. Τα συνηθέστερα μετρούμενα μεγέθη σε ένα ενεργειακό σύστημα είναι η παροχή, η πίεση, η ταχύτητα, η θερμοκρασία, η υγρασία, τα ηλεκτρικά μεγέθη (τάση, ένταση, ισχύς, καταναλισκόμενη ενέργεια και συντελεστής ισχύος) και η σύσταση καυσαερίων. Στη συνέχεια, αφού παρατεθούν μερικά βασικά στοιχεία για τις μετρητικές διατάξεις, θα περιγραφούν τα συνηθέστερα όργανα ανάλυσης σύστασης καυσαερίου.

4.2 Γενικά Στοιχεία Μετρητικών Διατάξεων

Ένα μετρητικό όργανο, αποτελείται συνήθως από τα εξής στοιχεία : το **μετρητικό στοιχείο**, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με το φορέα του μετρούμενου μεγέθους (π.χ. ρεύμα ρευστού), έναν **ενισχυτή** του σήματος και τη φυσική **μονάδα ένδειξης**, η

οποία «μεταφράζει» το σήμα σε κάποια ένδειξη (μηχανική ή ηλεκτρική, αναλογικά ή ψηφιακά). Το μετρητικό στοιχείο ενός οργάνου μέτρησης, έχει ως σκοπό την μέτρηση μιας λειτουργικής παραμέτρου της εγκατάστασης, όπως η θερμοκρασία, παροχή, πίεση, ταχύτητα, υγρασία, χημική σύσταση, ένταση ρεύματος, τάση ρεύματος, ταχύτητα περιστροφής κ.ά.

Κάθε όργανο συνοδεύεται από μια καμπύλη βαθμονόμησης, τη συνάρτηση δηλαδή που συνδέει το φυσικό μέγεθος με την έξοδο του οργάνου, η οποία είναι συνήθως υπό μορφή ηλεκτρικής τάσης ή ένταση ρεύματος. Γνωρίζοντας αυτή την συνάρτηση, είναι δυνατή η συσχέτιση του ηλεκτρικού σήματος που εξέρχεται από το όργανο με το μετρούμενο φυσικό μέγεθος. Συνήθως η καμπύλη βαθμονόμησης δίνεται από τον κατασκευαστή του οργάνου, αλλά σε πολλές περιπτώσεις λόγω της επίδρασης διάφορων παραμέτρων (αλλαγή συνθηκών περιβάλλοντος, αλλοιώσεις λόγω γήρανσης του οργάνου, παρουσία σκόνης κ.ά.) επιβάλλεται ο επαναπροσδιορισμός της καμπύλης από το χρήστη.

Κάθε όργανο μέτρησης διαθέτει μια περιοχή λειτουργίας η οποία ονομάζεται εύρος μέτρησης και ορίζεται ως διαφορά της ελάχιστης από την μέγιστη τιμή του φυσικού μεγέθους που μπορεί να μετρήσει το όργανο. Σε περίπτωση μέτρησης χρονικά μεταβαλλόμενων μεγεθών, ορίζεται η **ταχύτητα απόκρισης** του οργάνου, η οποία χαρακτηρίζεται από το χρόνο απόκρισης, το χρονικό διάστημα δηλαδή που απαιτείται ώστε η έξοδος του οργάνου να φτάσει στην τελική της τιμή. Η απόκριση ενός οργάνου εξαρτάται από τον τύπο του. Τα μετρητικά όργανα χαρακτηρίζονται ως όργανα μηδενικής, πρώτης και δεύτερης τάξης, ανάλογα με τη μορφή της διαφορικής εξίσωσης που συνδέει την είσοδο με την έξοδο τους.

Σε κάθε μέτρηση υπεισέρχονται διάφορων μορφών σφάλματα (τυχαία και συστηματικά), με αποτέλεσμα, η μετρούμενη τιμή στην έξοδο του οργάνου, να διαφέρει συνήθως από την πραγματική τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η **ακρίβεια** ενός οργάνου, εκφράζει το μέτρο της διαφοράς της πραγματικής από την μετρούμενη τιμή και εκφράζεται ως ποσοστό είτε του εύρους του οργάνου, είτε της ανωτάτης μετρούμενης τιμής είτε της τιμής μέτρησης (π.χ. ακρίβεια $\pm 2\%$ της ένδειξης του οργάνου.)

4.3 Όργανα Ανάλυσης Καυσαερίων

Η μέτρηση και ανάλυση των αερίων προϊόντων (καυσαερίων) ενός συστήματος καύσης, δίνει σημαντικά στοιχεία για τον προσδιορισμό τόσο του βαθμού απόδοσης της διαδικασίας της καύσης, όσο και των εκπεμπόμενων από την εγκατάσταση ρύπων. Τα συνηθέστερα μετρούμενα αέρια συστατικά των καυσαερίων είναι το οξυγόνο(O_2), το μονοξείδιο και το διοξείδιο του άνθρακα(CO, CO_2), το διοξείδιο του θείου(SO_2), τα οξείδια του αζώτου(NO_x), οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες(HC), τα στερεά σωματίδια(PM) και η αιθάλη(soot).

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι αν και το οξυγόνο δεν αποτελεί ρύπο, η μέτρηση του επιβάλλεται για τρεις λόγους:

1. Οι συγκεντρώσεις των εκπεμπόμενων ρυπαντών ανάγονται συνήθως σε μία συγκεκριμένη συγκέντρωση οξυγόνου, οπότε για την αναγωγή αυτή απαιτείται η γνώση της συγκέντρωσης του οξυγόνου.
2. Για τον υπολογισμό της πυκνότητας των καυσαερίων.
3. Για την ρύθμιση του λόγου αέρα και της παροχής του αέρα καύσης.

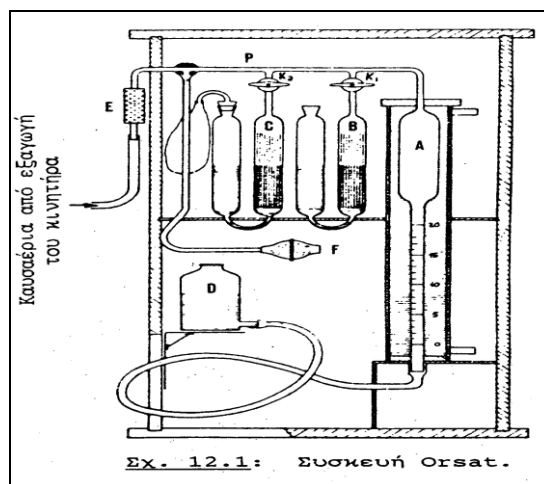
4.3.1 Μέθοδος Orsat [O_2 , CO , CO_2]

Η μέθοδος Orsat, αποτελεί την πιο παλιά και απλή μέθοδο ανάλυσης καυσαερίων, αφού δεν χρειάζεται βαθμονόμηση. Αποτελείται από μια προχοίδα Α, δύο (ή και περισσότερες) απορροφητικές πλυντρίδες Β και C, τη φιάλη στάθμης D, το φίλτρο Ε και τον ελαστικό μωζιτήρα F, όπως φαίνεται στην Εικόνα (4.1). Οι απορροφητικές πλυντρίδες συνδέονται, με την προχοίδα μέσω του γυάλινου σωλήνα Ρ, και μπορούν να απομονωθούν με τη βοήθεια των στροφίγγων K1 και K2. Η προχοίδα περιβάλλεται από υδατινό μανδύα, έτσι ώστε να επέρχεται η συμπύκνωση των υδρατμών των καυσαερίων, και η θερμοκρασία να διατηρείται σταθερή κατά την διάρκεια της δοκιμής. Έτσι η μέτρηση γίνεται επί ξηράς βάσεως.

Για την απορρόφηση του CO_2 χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα καυστικού καλίου ή νατρίου στην πλυντρίδα Β, και για την απορρόφηση του O_2 αλκαλικό διάλυμα πυρογαλόλης στην πλυντρίδα C. Στην περίπτωση κατά την οποία η συσκευή φέρει περισσότερες πλυντρίδες, χρησιμοποιείται διάλυμα χλωριούχου αμμωνίου και υποχλωριούχου χαλκού για την απορρόφηση του CO , καπνίζον θεϊκό οξύ

(20~25%SO₃) ή κεκορεσμένο βρωμιούχο ύδωρ για την απορρόφηση των ακόρεστων υδρογονανθράκων.

Ο προσδιορισμός συνίσταται στην πλήρωση της τροχοΐδας δια των καυσαερίων και μετέπειτα, δια καταλλήλων χειρισμών των στροφίγγων και της φιάλης στάθμης, στην απορρόφηση των συστατικών από τα απορροφητικά διαλύματα. Η εκάστοτε διαφορά όγκου του καυσαερίου, μετά την διαδοχική είσοδο σε κάθε πλυντρίδα, από τον αρχικό του όγκο, δίνει τον αντίστοιχο όγκο (ο οποίος ανάγεται επί τοις εκατό του αρχικού) του αερίου (δηλ. CO₂ , CO , O₂ , HC)που υπάρχει στο δείγμα καυσαερίου και που απορροφήθηκε από τον κατάλληλο αντίστοιχο διάλυμα.



Εικόνα 4.1. Τυπική συσκευή Orsat.

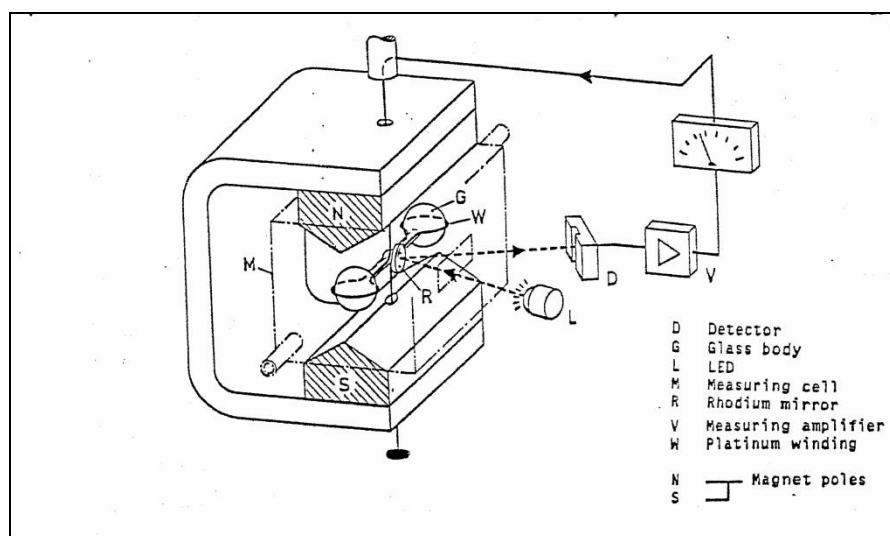
Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του οξυγόνου, του μονοξειδίου του άνθρακα, του διοξειδίου του άνθρακα και των άκαυστων υδρογονανθράκων στο ρεύμα των καυσαερίων. Συναντάται κυρίως για την μέτρηση του οξυγόνου (O₂) , με ανεπαρκή αξιοπιστία για μικρές συγκεντρώσεις (εξαιτίας της απορρόφησης του οξυγόνου) και του (CO₂), με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, εφαρμόζεται ευρέως για την βαθμονόμηση ακριβέστερων μεθόδων μέτρησης των συγκεντρώσεων των ρύπων CO₂, CO , O₂ .

4.3.2 Παραμαγνητικός Αναλυτής (ParaMagnetic Detector(PMD)) [O₂]

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια σχετικά απλή και αξιόπιστη μέθοδο συνεχούς μέτρησης της συγκέντρωσης του οξυγόνου. Ο αναλυτής λειτουργεί με την αρχή της περιστροφής ζυγού σε μαγνητικό πεδίο βασιζόμενος στο φαινόμενο του

παραμαγνητισμού. Οι αναλυτές αυτού του τύπου βασίζονται στην μέθοδο του Faraday σύμφωνα με την οποία μετράται η δύναμη που αναπτύσσεται από ένα μαγνητικό πεδίο. Αξίζει να σημειωθεί ότι παραμαγνητικά αέρια είναι το οξυγόνο(O_2) και τα οξειδία του αζώτου(NO_x), όμως εξαιτίας της μεγάλης, σε σχέση με το NO_x , περιεκτικότητας του καυσαερίου σε οξυγόνο, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται αποκλειστικά για το οξυγόνο.

Σχηματική δομή του αναλυτή οξυγόνου που βασίζεται στο φαινόμενο του παραμαγνητισμού παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.(Εικόνα (4.2))



Εικόνα 4.2. Δομή του αναλυτή οξυγόνου που βασίζεται στο φαινόμενο του παραμαγνητισμού.

Σε ένα ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο υπάρχει ζυγός, στις άκρες του οποίου οι μικρές γυάλινες σφαίρες (Glass body) είναι γεμάτες N_2 . Ο ζυγός έχει την δυνατότητα περιστροφής και συγκρατείται από πλατίνα. Ο γεμάτος αέριο ζυγός είναι διαμαγνητικός και περιστρέφεται εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου. Το παραμαγνητικό οξυγόνο τείνει να μεταφερθεί σε περιοχές του μαγνητικού πεδίου με μεγαλύτερη ένταση, στην περίπτωσή μας προς το κέντρο του μαγνητικού πεδίου όπου υπάρχουν τα δύο γυάλινα σώματα, οπότε προκαλείται περιστροφή της μπάρας. Η ταχύτητα της περιστροφής εξαρτάται από το δείγμα του αερίου(περιεκτικότητα σε O_2). Αυτή η περιστροφή μετράται από έναν κατάλληλο μηχανισμό. Η θέση μηδέν της μπάρας διατηρείται με την βοήθεια ενός οπτικού συστήματος, που αποτελείται από μια πηγή φωτός(Led), ένα κάτοπτρο(Rhodium mirror) στον άξονα της μπάρας και ένα ζεύγος ανιχνευτών (Detector). Η διαφορά μεταξύ της ισορροπίας των ρευμάτων που

χρειάζονται για να διατηρηθεί η μπάρα στην θέση μηδέν με την παρουσία O_2 και με την παρουσία δείγματος του αερίου, είναι ανάλογη προς τη μερική πίεση του οξυγόνου στο δείγμα του αερίου. Μετά την ενίσχυση το σήμα παρέχει την περιεκτικότητα σε αναλογικό όργανο (% O_2).

Η εξάρτηση της τιμής από τη βαρομετρική πίεση και τη θέση της συσκευής είναι σημαντική, επειδή η ευαισθησία του οργάνου είναι ανάλογη προς τη μερική πίεση του O_2 . Η μετρούμενη περιεκτικότητα του O_2 προκύπτει από την μερική πίεση του O_2 σε σχέση με την βαρομετρική. Έτσι, μεταβολή της βαρομετρικής κατά 1% επιφέρει μεταβολή της μετρούμενης τιμής κατά 1%. Για τη βαθμονόμηση της συσκευής χρησιμοποιούνται φιάλες προτύπων αερίων N_2 και O_2 , γνωστής περιεκτικότητας σε περιβάλλον αζώτου.

4.3.3 Καταλυτική Καύση [O_2 , CO]

Σε αυτή τη μέθοδο, το δείγμα των καυσαερίων αναμειγνύεται με ένα καύσιμο και καίγεται σε ένα θάλαμο, εφοδιασμένο με κατάλληλο θερμομέτρο, παρουσία οξειδωτικού καταλύτη. Βασίζεται στην σύνδεση του ποσού θερμότητας που εκλύεται με την περιεκτικότητα του δείγματος κυρίως σε (O_2). Το θερμομέτρο μετρά το εκλυόμενο ποσό θερμότητας και κατά συνέπεια την ποσότητα του οξυγόνου στο δείγμα. Με το ίδιο σκεπτικό, μπορεί να μετρηθεί η περιεκτικότητα του καυσαερίου σε μονοξείδιο του άνθρακα (CO) κατά την καύση του σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι πρέπει πρώτα να απομακρυνθούν όλα τα καύσιμα αέρια του μείγματος των καυσαερίων

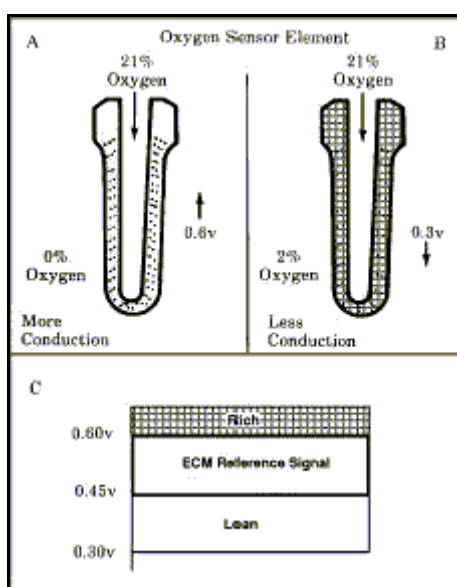
4.3.4 Αναλυτής Zirconium Dioxide(ZRDO)(Ηλεκτροχημική Ανίχνευση) [O_2]

Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται αποκλειστικά για την μέτρηση του O_2 στα καυσαέρια. Στηρίζεται στην ροή ηλεκτρικού ρεύματος λόγω της κίνησης ιόντων. Μέσα στην ροή των καυσαερίων τοποθετείται ένας αισθητήρας, ο οποίος φέρει ειδικό υλικό από κάποιον στέρεο ιοντικό αγωγό(Εικόνα (4.3)). Για την μέτρηση του οξυγόνου το υλικό αυτό είναι συνήθως το διοξείδιο του ζirkονίου(ZrO_2). Αν αέρια μείγματα με διαφορετικές συγκεντρώσεις σε οξυγόνο χωριστούν, σε υψηλές θερμοκρασίες, με μια μεμβράνη από ZrO_2 , τότε ιόντα οξυγόνου διαχέονται μέσω της μεμβράνης, φορτίζοντάς την ηλεκτρικά. Αν, επιπλέον τοποθετηθεί πλέγμα από

πλατίνα στις δύο πλευρές της μεμβράνης, τότε δημιουργείται ηλεκτρική τάση, το μέτρο της οποίας δίνεται από τη σχέση του Nernst :

$$u = \frac{R T}{n \cdot F} \ln \frac{P_{O_2}(\text{air})}{P_{O_2}(\text{gas})}$$

Όπου, R : σταθερά του αερίου, T: απόλυτος θερμοκρασία, n: ηλεκτρονικό ισοδύναμο, F: σταθερά του Faraday, $P_{O_2}(\text{air})$: μερική πίεση του αερίου αναφοράς(αέρας) και $P_{O_2}(\text{gas})$: μερική πίεση του οξυγόνου στα καυσαέρια.



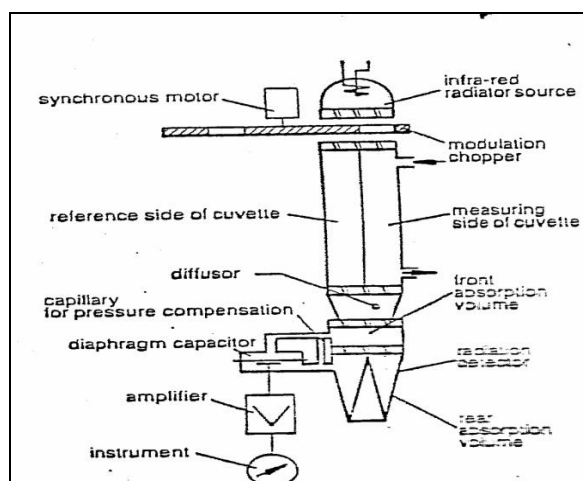
Εικόνα 4.3. Αναλυτής ZRDO.

Από τη σχέση αυτή είναι προφανές ότι για μικρές συγκεντρώσεις οξυγόνου, αυξάνεται η επαγόμενη τάση, οπότε αυξάνεται η ευαισθησία της μεθόδου. Η μέθοδος παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις μεθόδους που απαιτούν αναρρόφηση καυσαερίων. Μειονέκτημα της αποτελεί το γεγονός ότι όταν τα καυσαέρια περιέχουν CO, τότε αυτό στην υψηλή θερμοκρασία μέτρησης καίγεται σε CO₂ μειώνοντας την περιεκτικότητα σε οξυγόνο.

4.3.5 Αναλυτής Επιλεκτικής Απορρόφησης Υπέρυθρης Ακτινοβολίας (Non-Dispersive Infrared Analyser(NDIR)) [CO , CO₂ , SO₂]

Οι αναλυτές NDIR χρησιμοποιούν την αρχή της επιλεκτικής απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Σύμφωνα με την αρχή της επιλεκτικής απορρόφησης κάθε αέριο, πλην των μονατομικών και των συμμετρικών όπως O₂ , N₂ , H₂ , έχει ένα φάσμα

απορρόφησης το οποίο συνίσταται από διάφορες ζώνες απορρόφησης οι οποίες είναι χαρακτηριστικές για κάθε αέριο. Έτσι ένα αέριο θα απορροφήσει υπέρυθρη ακτινοβολία μόνο αν αυτή είναι τέτοιου μήκους κύματος ώστε να βρίσκεται εντός της ζώνης απορρόφησης του. Η υπέρυθρη ακτινοβολία οποιουδήποτε μήκους κύματος, έξω από τα όρια της απορροφητικής ζώνης, θα διαπεράσει το συγκεκριμένο αέριο κατά τον ίδιο τρόπο που για το συγκεκριμένο αέριο και μήκος κύματος, η ήδη απορροφημένη ενέργεια θα διαπεράσει κάποια άλλα αέρια (Εικόνα 4.4). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για την μέτρηση του CO , CO₂ καθώς και του SO₂ , αποτελώντας πρότυπη μέθοδο μέτρησης για τις εμβολοφόρους Μ.Ε.Κ (χρήση των οξειδίων του αζώτου αποφεύγεται σήμερα, γιατί σε μικρές συγκεντρώσεις η ακρίβεια είναι μικρή).



Εικόνα 4.4. Σχηματική δομή του υπέρυθρου αναλυτή καυσαερίων.

Ένα θερμαινόμενο πηνίο (infra-red radiator source) παράγει την απαιτούμενη υπέρυθρη ακτινοβολία η οποία, αφού διαχωριστεί σε δύο δέσμες ίσης έντασης, περνάει μέσα από το μετρητικό θάλαμο ο οποίος διαχωρίζεται στο θάλαμο δείγματος (measuring side of cuvette) μέσα από τον οποίο περνάει το δείγμα προς ανάλυση και το θάλαμο αναφοράς (reference side of cuvette) που συνήθως περιέχει N₂ ή ξηρό αέρα που είναι αδρανή και δεν απορροφούν υπέρυθρη ακτινοβολία αυτού του μήκους κύματος. Αφού η ακτινοβολία διαπεράσει τους δύο θαλάμους (δείγματος και αναφοράς) οδηγείται στον ανιχνευτή (radiation detector), ο οποίος αποτελείται από δύο θαλάμους , τον εμπρόσθιο και τον οπίσθιο (front and rear absorption volume). Οι δύο θαλάμοι επικοινωνούν μεταξύ τους και πληρούνται με εκείνο το ενεργό στην υπέρυθρη ακτινοβολία αέριο που μετρά ο αναλυτής. Η υπέρυθρη ακτινοβολία που

προσπίπτει στο αέριο του εμπρόσθιου θαλάμου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας (λόγω αύξησης των ταλαντώσεων των μορίων του αερίου) και της πίεσης του αερίου αναγκάζοντάς το να εκτονωθεί στον οπίσθιο (αντισταθμικό) θάλαμο. Αυτές οι ταλαντώσεις καταγράφονται με τη βοήθεια ενός διαφράγματος (diaphragm capacitor) και μετατρέπονται σε ηλεκτρική τάση. Η υπέρυθρη ακτινοβολία από την πηγή προς τους θαλάμους αναφοράς και δείγματος διακόπτεται περιοδικά, με τη βοήθεια ενός σύγχρονου κινητήρα (synchronous motor), από έναν ειδικά σχεδιασμένο περιστρεφόμενο δίσκο αποφεύγοντας έτσι προβλήματα από την αύξηση της θερμοκρασίας του αερίου στον ανιχνευτή.

Ο δίσκος επιτρέπει στην υπέρυθρη ακτινοβολία να προσπίπτει στον ανιχνευτή διαπερνώντας εναλλάξ το θάλαμο δείγματος και το θάλαμο αναφοράς, έτσι ώστε αν στο θάλαμο δείγματος δεν έχει προσαχθεί για ανάλυση αέριο ώστε να απορροφηθεί ανάλογη ακτινοβολία, τότε ο ανιχνευτής δέχεται εναλλάξ μέσα από τους δύο θαλάμους, υπέρυθρη ακτινοβολία της ίδιας έντασης. Έτσι δεν ενεργοποιείται το διάφραγμα και δεν υπάρχει σήμα. Μεταξύ του μετρητικού θαλάμου (θάλαμος δείγματος και αναφοράς) και του ανιχνευτή παρεμβάλλεται ένα φίλτρο (diffuser), το οποίο μειώνει την επίδραση της παρουσίας στο αέριο δείγμα άλλων αερίων, τα οποία τυχαίνει να είναι επίσης ενεργά στην υπέρυθρη ακτινοβολία στο φάσμα που είναι το CO, CO₂, SO₂. Εντούτοις πρέπει να αναφερθεί ότι ο αναλυτής επηρεάζεται πολύ λίγο από άλλα επιδρώντα αέρια, αφού το κυριότερο συστατικό που μπορεί να είναι ενεργό στην περιοχή απορρόφησης της ακτινοβολίας, το νερό, αφαιρείται από το δείγμα κατά τη διαδικασία της ψύξης.

Για την αποφυγή υγροποιήσεων μέσα στο θάλαμο δείγματος χρησιμοποιείται ειδικός ψύκτης, ο οποίος έχει την ικανότητα ψύξης του δείγματος μέχρι συνήθως του 5 °C, εξασφαλίζοντας έτσι την υγροποίηση, σε ειδικό δοχείο συλλογής, όλων των ατμών των συστατικών τα οποία έχουν σημείο υγροποίησης ακόμη και 15 έως 20 °C χαμηλότερο από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στην οποία λειτουργεί ο αναλυτής. Η αναρρόφηση του μείγματος γίνεται με τη βοήθεια ειδικής αντλίας μέσω σωληνώσεων από PVC, ενώ προστατεύεται από φίλτρα, ειδικά στους κινητήρες Diesel λόγω της υψηλής σωματιδιακής εκπομπής.

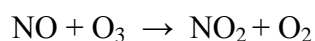
Η βαθμονόμηση του αναλυτή, όσον αφορά για την ρύθμιση του μηδενός, γίνεται με την χρήση N₂(zerogas) το οποίο μεταφέρεται στη συσκευή με τη βοήθεια της

εσωτερικής αντλίας. Για την ευαισθησία και ακρίβεια της συσκευής χρησιμοποιείται αέριο ελέγχου (testgas).

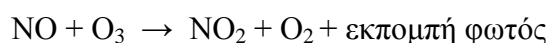
4.3.6 Αναλυτής Χημικοφωταύγειας (ChemiLuminescence Analyser(CLA)) **[NO_x]**

Ο αναλυτής χημικοφωταύγειας (CLA) χρησιμοποιείται για την μέτρηση των οξειδίων του αζώτου(NO_x), λειτουργώντας βάσει της αρχής της χημικοφωταύγειας. Είναι πολύ ακριβή μέθοδος και χρησιμοποιείται ως πρότυπη μέτρηση για τις εμβολοφόρους Μ.Ε.Κ.

Η αρχή με την οποία λειτουργεί βασίζεται στην φωτοχημική αντίδραση μεταξύ όζοντος (O₃) και του οξειδίου του αζώτου (NO) κατά την οποία παράγεται διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και οξυγόνο.



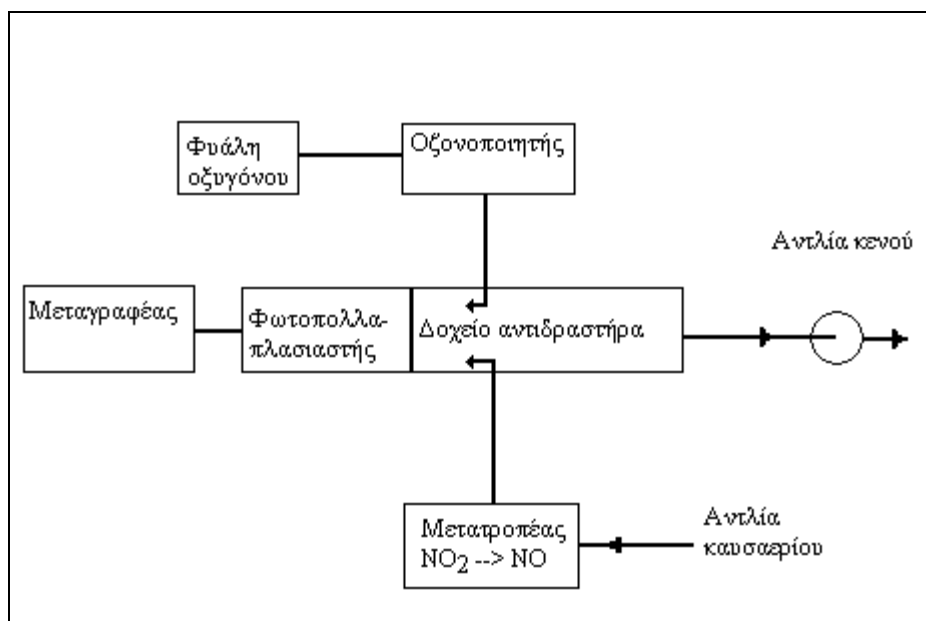
Περίπου 10% του παραγόμενου NO₂ βρίσκεται σε μια κατάσταση διέγερσης και η μετάβαση από την κατάσταση αυτή στην κανονική (καθώς τα μόρια χάνουν ενέργεια) συνοδεύεται από εκπομπή φωτός με μήκος κύματος το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 0,6~3 μm.



Η ένταση αυτής της ακτινοβολίας είναι ανάλογη της παροχής μάζας του NO₂ μέσα στο θάλαμο αντίδρασης και η εκπομπή του φωτός ανιχνεύεται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή. Στη συνέχεια το σήμα ανιχνεύεται και διοχετεύεται στο μετρητή. Μόνο ένα μικρό ποσοστό από τα διεγερμένα μόρια του NO₂ χάνουν ενέργεια εκπέμποντας φως. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας χάνεται από συγκρούσεις με άλλα μόρια. Επειδή ο αριθμός των συγκρούσεων ανά δευτερόλεπτο μεταβάλλεται ευθέως ανάλογα με τη πίεση, είναι προφανές ότι η διατήρηση υψηλής πίεσης ευνοεί την απώλεια ενέργειας με τη μορφή συγκρούσεων. Γι' αυτό το λόγο ο αναλυτής λειτουργεί σε χαμηλή πίεση (5~7mmHg απόλυτη στο χώρο αντιδράσεως) έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η εκπομπή φωτός από τη φωτοχημική αντίδραση. Επίσης η λειτουργία σε συνθήκες χαμηλής πίεσης ελαχιστοποιεί την επίδραση άλλων αερίων τα οποία ευνοούνται από την απενεργοποίηση του NO₂ (όπως το CO₂ και οι ατμοί νερού) προκαλώντας συγκρούσεις μεταξύ των μορίων μειώνοντας έτσι την

ποσότητα του εκπεμπόμενου φωτός. Αυτή η διαδικασία της απενεργοποίησης (quenching), εξαιτίας του CO₂ και των υδρατμών, όταν είναι έντονη μπορεί να προκαλέσει κάποιο ανεπαίσθητο μετρητικό σφάλμα.

Συνήθως ο αναλυτής αποτελείται από τα εξής τμήματα (Εικόνα (4.5)) :



Εικόνα 4.5. Σχηματική Διάταξη αναλυτή χημικοφωταύγειας (CLA).

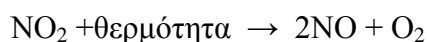
- Τη μονάδα ανιχνευτή/αντιδραστήρα
- Τη μονάδα παραγωγής όζοντος.(οξονοποιητή)
- Τη μονάδα μετατροπής NO₂ σε NO(Converter)
- Το φούρνο
- Το φωτοπολλαπλασιαστή και το λοιπό ηλεκτρονικό κύκλωμα

Το δείγμα των καυσαερίων και το όζον εισέρχεται σε προκαθορισμένες ποσότητες μέσα στον αντιδραστήρα, όπου επικρατεί υψηλή θερμοκρασία (~600 °C) και απόλυτη πίεση 5~7 mm Hg. Το δείγμα και το όζον εισέρχονται από δύο σωληνώσεις που συγκλίνουν μεταξύ τους μπροστά σε μια θυρίδα, η οποία αποτελείται από ένα (ερυθρό) φίλτρο, που επιτρέπει να το διαπερνά μόνο το φως, που εκπέμπεται από την αντίδραση της φωταύγειας (μήκος κύματος 0,3~0,6 μm). Το εκπεμπόμενο φως ανιχνεύεται από το φωτοπολλαπλασιαστή, ο οποίος τροφοδοτείται από υψηλή τάση περίπου 1000 Volt D.C. Η ευαισθησία του φωτοπολλαπλασιαστή μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, και για αυτό ο αναλυτής, πρέπει να βρίσκεται σε χώρο

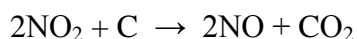
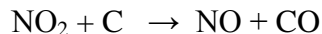
που δεν ξεπερνά τους 30 ° C . Το όζον παράγεται από οξυγόνο που υπό την επίδραση μιας υψηλής ενέργειας φωτεινής πηγής, μετατρέπεται σε όζον χαμηλής θερμοκρασίας. Αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει, ότι κατά τη διάρκεια της παραγωγής του όζοντος δεν παράγεται ταυτόχρονα και οξείδιο του αζώτου από το υπάρχον στον αέρα άζωτο.

Η τεχνική της χημικοφωταύγειας μπορεί να ανιχνεύσει μόνο μονοξείδιο του αζώτου(NO). Ο αναλυτής διαθέτει μια μονάδα μετατροπής (Converter) του NO₂ που περιέχεται στο δείγμα των καυσαερίων σε NO (το ποσοστό του NO₂ στα καυσαέρια της εξαγωγής αποτελεί περίπου το 10~20% του οξειδίου του αζώτου(NO_x)). Η μετατροπή γίνεται, περνώντας το δείγμα μέσα από ένα θερμαινόμενο σωλήνα από τιτάνιο ο οποίος περιέχει ένα ανθρακούχο υλικό σε θερμοκρασία 400° C.

Ένα μέρος μετατρέπεται θερμικά :



Το υπόλοιπο μετατρέπεται χημικά από το ανθρακούχο υλικό :



Ο μετατροπέας έχει τυπική απόδοση 95%, η οποία περιοδικά ελέγχεται από μια βοηθητική συσκευή ελέγχου. Όταν το υπό εξέταση δείγμα περνά μέσα από το μετατροπέα, τότε η ένδειξη αναφέρεται σε NO_x καθώς τα μετρούμενα οξείδια του αζώτου περιέχουν και το διοξείδιο του αζώτου που έχει ήδη μετατραπεί σε μονοξείδιο. Όταν το δείγμα παρακάμψει τον μετατροπέα, τότε η ένδειξη αναφέρεται σε NO. Η συγκέντρωση του NO₂ βρίσκεται τότε με απλή αφαίρεση της ένδειξης NO από την ένδειξη NO_x. Για την αποφυγή υγροποίησης μέσα στο κύκλωμα του δείγματος, που μπορεί να προκαλέσει σφάλμα μέτρησης, ο αναλυτής διαθέτει ένα φούρνο μέσα στον οποίο εσωκλείονται το φίλτρο προστασίας, η βαλβίδα επιλογής βαθμονόμησης και οι σωληνώσεις μεταφοράς του δείγματος. Η θερμοκρασία του φούρνου ελέγχεται από ένα αισθητήρα, ώστε να λειτουργεί συνεχώς στην προκαθορισμένη από τον κατασκευαστή θερμοκρασία των 180°C. Για την βαθμονόμηση του αναλυτή, χρησιμοποιούνται φιάλες προτύπων αερίων N₂ για το

μηδέν της κλίμακας και NO γνωστής περιεκτικότητας σε περιβάλλον αζώτου για τα άλλα σημεία του ενδεικτικού οργάνου.

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο τύπους αναλυτών χημικοφωταύγειας :

- **Τον Θερμαινόμενο Ανιχνευτή Χημικοφωταύγειας(Heated Chemiluminescent Detector (HCLD))**

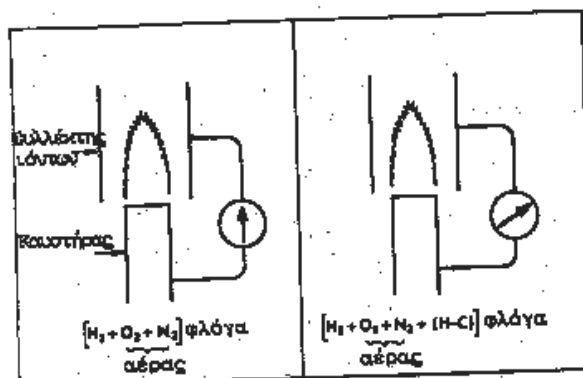
Ο τύπος αυτός απαιτεί την λήψη δείγματος ζεστού καυσαερίου, για την αποφυγή δημιουργίας συμπυκνώματος κατά την μέτρηση της συγκέντρωσης υγρών NOx (NOx.wet).

- **Τον Μη-Θερμαινόμενο Ανιχνευτή Χημικοφωταύγειας(Not-Heated Chemiluminescent Detector (CLD))**

Ο τύπος αυτός απαιτεί την λήψη δείγματος ξηρού καυσαερίου. Το δείγμα πριν αναλυθεί πρέπει να αφυγρανθεί με την βοήθεια ενός ψύκτη νερού ή άλλου αφυγραντή. Μετρά ξηρό NOx(NOx.dry)

4.3.7 Αναλυτής Ανίχνευσης Ιονισμού Φλόγας (Fammen Ionisation Detector (FID) [HC]

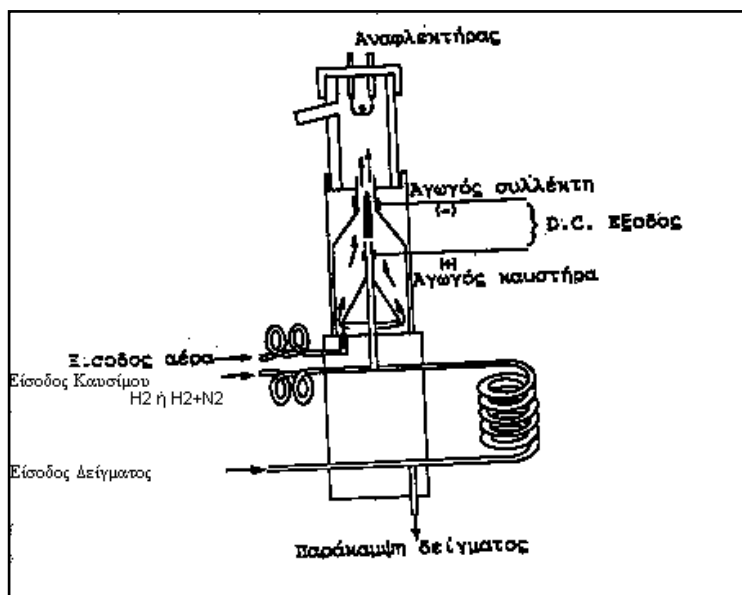
Ο αναλυτής FID, λειτουργεί με βάση την αρχή της ανίχνευσης ιονισμού φλόγας, και μετρά αποκλειστικά άκαυστους υδρογονάνθρακες(HC). Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες των καυσαερίων αποτελούνται από διακόσιες περίπου χημικές ενώσεις. Ο ακριβής υπολογισμός της συγκέντρωσης όλων των χημικών ενώσεων είναι πρακτικά αδύνατος, έτσι η συνολική συγκέντρωση των ακαύστων υδρογονανθράκων υπολογίζεται θεωρώντας την ισοδύναμη συγκέντρωση ενός πρότυπου υδρογονάνθρακα που συνήθως είναι το κανονικό εξάνιο (C₆H₁₄) ή το προπάνιο (C₃H₈) ή το μεθάνιο (CH₄).



Εικόνα 4.6. Αρχή λειτουργίας FID.

Η αρχή λειτουργίας που παρουσιάζεται στην Εικόνα (4.6,σελ.56) βασίζεται στο ότι μια φλόγα καθαρού υδρογόνου/αέρα προκαλεί ελάχιστο ιονισμό, ενώ με την παρουσία έστω και μικρού αριθμού μορίων υδρογονανθράκων προκαλεί μεγάλο ιονισμό. Ο ιονισμός είναι ανάλογος του αριθμού των ατόμων του άνθρακα που υπάρχουν στο μόριο του υδρογονάνθρακα. Όλα τα είδη των υδρογονανθράκων(παραφίνες, ολεφίνες κ.λ.π.) ανιχνεύονται με την ίδια απόκριση πλην εκείνων των υδρογονανθράκων των οποίων τα μόρια περιέχουν άτομα οξυγόνου ή αζώτου. Π.χ. 30 ppm CH₄ και 20 ppm C₃H₈ όταν αναμειχτούν στο περιβάλλον, θα προκαλέσουν μια ένδειξη 30 ppm ισοδύναμου C₃H₈.(20X1+20X3=30X3).

Οι σύγχρονοι αναλυτές μετράνε σε ισοδύναμο προπάνιο(C₃H₈) και αποτελούνται από τον καυστήρα, το σύστημα έναυσης, τον ανιχνευτή και το ηλεκτρονικό κύκλωμα.(Εικόνα 4.7)



Εικόνα 4.7. Διάταξη κεντρικής μονάδας καύσεως και ανιχνεύσεως ακαύστων υδρογονανθράκων FID.

Ο καυστήρας αποτελείται από ένα τριχοειδή σωλήνα μέσα από τον οποίο ρέουν το δείγμα του ακαύστου υδρογονάνθρακα και το απαιτούμενο καύσιμο που είναι μείγμα υδρογόνου/ηλίου(H₂/He). Το μείγμα H₂/He –HC, ρέει προς ένα θάλαμο ανάμειξης όπου αναμειγνύεται με μια σταθερή ποσότητα καθαρού αέρα, δημιουργώντας έτσι κατάλληλες συνθήκες για έναυση, προκαλώντας μια φλόγα διάχυσης στην έξοδο του καυστήρα. Ένας ηλεκτρικά πολωμένος συσσωρευτής δημιουργεί γύρω από την φλόγα ένα ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να

κατευθυνθούν προς τη δέσμη της φλόγας και τα ιόντα προς τον ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής και ο καυστήρας αποτελούν τμήμα ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η ροή των ιόντων στον ανιχνευτή και των ηλεκτρονίων στον καυστήρα «κλείνουν» το κύκλωμα. Τα παραγόμενο συνεχές ρεύμα είναι ανάλογο του αριθμού των σχηματισμένων ιόντων, τα οποία είναι ανάλογα του αριθμού των ατόμων άνθρακα στην φλόγα. Το σήμα ενισχύεται και βαθμονομείται απευθείας σε ισοδύναμο προπάνιο(C₃H₈).

Η ευαισθησία του αναλυτή επηρεάζεται από τις παροχές του δείγματος και του καυσίμου. Η συσκευή που χρησιμοποιείται διαθέτει σύστημα παράκαμψης δείγματος(Sample-Bypass), το οποίο επιτρέπει τη διατήρηση σταθερής παροχής δείγματος στον ανιχνευτή ακόμη και αν υπάρξουν μεγάλες μεταβολές στην παροχή του δείγματος. Επίσης, ο αναλυτής διαθέτει κύκλωμα αυτόματου εμπλουτισμού του μείγματος καυσίμου/αέρα, ώστε να είναι εύκολη η έναυση.

Οι αναλυτές FID μετρούν μόνο αέριους υδρογονάνθρακες και κατά συνέπεια οι υδρογονάνθρακες που μπορούν να μετρηθούν είναι αυτοί που έχουν χαμηλό σημείο ζέσης, ενώ αυτοί που υπό κανονικές συνθήκες είναι σε υγρή μορφή δεν ανιχνεύονται. Το γεγονός αυτό, οδηγεί στην χρήση κατάλληλου ελεγκτή με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία μέχρι τους 200 °C, ώστε στη γραμμή δειγματοληψίας και στον ανιχνευτή να διατηρηθούν σε αέρια μορφή οι HC (τουλάχιστον με σημείο ζέσης έως και 200° C). Ταυτόχρονα, το σύστημα αποτρέπει την υγροποίηση του H₂O μέσα στις τριχοειδείς σωληνώσεις αποφεύγοντας έτσι το φράξιμό τους και την απορρόφησή υδρογονανθράκων από το συμπύκνωμα. Προφανώς κάτω από αυτές τις συνθήκες το νερό περνάει μέσα από το κύκλωμα σαν ατμός..

Οι σύγχρονοι αναλυτές διαθέτουν για την προστασία του κυκλώματος δείγματος φίλτρο υαλοβάμβακα (εκτός των εξωτερικών φίλτρων), ενώ η αναρρόφηση του δείγματος γίνεται με την βοήθεια ενσωματωμένης αντλίας. Για την βαθμονόμηση του αναλυτή χρησιμοποιούνται φιάλες προτύπων αερίων, συγκεκριμένα ξηρός καθαρός αέρα για το μηδέν της κλίμακας, και προπανίου γνωστής περιεκτικότητας σε περιβάλλον αζώτου, για όλα τα άλλα σημεία της κλίμακας του ενδεικτικού οργάνου.

4.3.8 Μετρητής Bacharach για την Καταγραφή του Δείκτη Αιθάλης [Αιθάλη(Soot)]

Η μέτρηση της αιθάλης είναι συνήθως υποχρεωτική σε εγκαταστάσεις καύσης πετρελαίου. Ως μέτρο της περιεκτικότητας του καυσαερίου σε αιθάλη, έχει εισαχθεί ο βαθμός αμαυρώσεως κατά Bacharach. Για τη μέτρηση του βαθμού αμαυρώσεως, χρησιμοποιείται χειροκίνητη αντλία αναρρόφησης, η οποία οδηγεί το δείγμα διαμέσου ενός διηθητικού χαρτιού, το οποίο κατασκευάζεται με συγκεκριμένες προδιαγραφές. Για τον καθοριζόμενο χρόνο αναρρόφησης, μετράται ο βαθμός αμαύρωσης του χαρτιού διήθησης και συγκρίνονται με πρότυπα χαρτιά βαθμονόμησης. Η κλίμακα των οποίων κυμαίνεται από το 0(λευκό) έως το 10(μαύρο) με ενδιάμεσες γκρι διαβαθμίσεις.

4.3.9 Βαθμός Αμαυρώσεως κατά Ringelmann [Αιθάλη (Soot)]

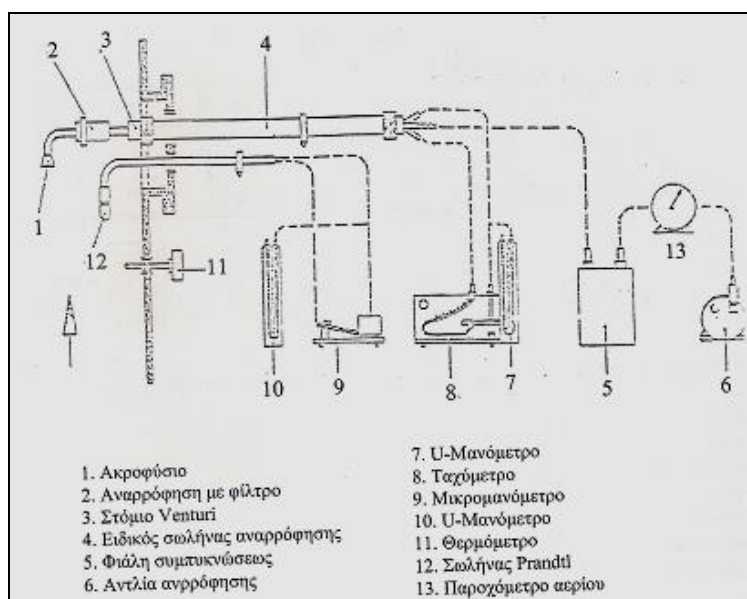
Η μέθοδος αυτή είναι καθαρά εμπειρική και βασίζεται στο διαφορετικό χρωματισμό των καυσαερίων εξαιτίας της περιεκτικότητας τους σε καπνό. Η κλίμακα του Ringelmann αποτελείται από τέσσερις(4) διαφορετικές αποχρώσεις του γκρι, αρχίζοντας από το άσπρο και καταλήγοντας στο μαύρο. Ως όργανο μέτρησης χρησιμοποιούνται κιάλια, στα οποία εκτός από κανονικό γυαλί έχουν τοποθετηθεί αντιστοιχώς και δύο σκιασμένα γυαλιά, τα οποία αντιστοιχούν στις παραπάνω αποχρώσεις. Κάθε κλίμακα αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό αμαύρωσης, δηλαδή η 1^η κλίμακα 20% , η 2^η 40% , η 3^η 60% , η 4^η 80%. Ένα καθαρό ρεύμα καυσαερίων(άσπρο χρώμα) καταγράφεται ως κλίμακα “0” με ποσοστό αμαύρωσης 0% και αντίθετα ένα “μαύρο” ρεύμα καυσαερίων καταγράφεται ως κλίμακα “5” με ποσοστό αμαύρωσης 100%. Για να περιοριστεί το ανθρώπινο σφάλμα, διεξάγονται μετρήσεις ανά τακτά χρονικά διαστήματα, οι οποίες καταγράφονται με τον αύξοντα αριθμό της μέτρησης και τον αριθμό της κλίμακας που της αντιστοιχεί(0,1,2,3,4,5). Τέλος, το ζητούμενο ποσοστό αιθάλης στα καυσαέρια δίνεται από τον εμπειρικό τύπο (4.1) που ακολουθεί:

$$\text{Ποσοστό Αιθάλης} = (\text{Άθροισμα τιμών κλίμακας} * 0.20 * 100) / (\text{Πλήθος μετρήσεων}) \quad (4.1)$$

4.3.10 Ισοκινητική αναρρόφηση [Σωματιδιακές εκπομπές (PM)]

Πρόκειται για την πλέον πολύπλοκη αλλά αποδεκτή πρότυπη μέθοδο μέτρησης του φορτίου στερεών σωματιδίων στη ροή ενός αερίου. Η εφαρμογή της μεθόδου ξεκινά

από την επιλογή της κατάλληλης θέσης μέτρησης. Αυτή πρέπει να είναι σε περιοχή ανεπτυγμένης ροής, δηλαδή μακριά από διαταραχές της ροής (γωνίες, αλλαγές διαστάσεων, τάμπερ κ.λ.π.). Ανάλογα με το πόσο ανεπτυγμένη είναι η ροή, αποφασίζεται ο αριθμός των σημείων αναρρόφησης. Αυτό σημαίνει ότι μία κάθετη στην πορεία των καυσαερίων διατομή τη χωρίζουμε (νοητά) σε ισεμβαδικές επιφάνειες και το κέντρο κάθε μίας θα είναι σημείο ισοκινητικής αναρρόφησης. Σκοπός της μεθόδου είναι σε κάθε ένα από τα σημεία που έχουν επιλεγεί, να αναρροφάται μια ποσότητα καυσαερίων (συνεπώς και σκόνης) με την ταχύτητα που αυτά έχουν στο συγκεκριμένο σημείο.



Εικόνα 4.8. Σχηματική διάταξη ισοκινητικής αναρρόφησης στερεών σωματιδίων.

Ένα μέρος των καυσαερίων αναρροφάται από τον αγωγό καυσαερίων. Η σκόνη συγκρατείται από ένα φίλτρο, ενώ η μάζα του αερίου, που διαπερνά το φίλτρο μετράται μέσω ενός παροχόμετρου αερίου. Η δυσκολία της μέτρησης έγκειται στην απαίτηση της ισοταχούς αναρρόφησης από τον αγωγό καυσαερίων. Έτσι, πρέπει να μετρηθεί η ταχύτητα των καυσαερίων σε ένα σημείο κοντά στην αναρρόφησή τους και εν συνεχεία να ρυθμιστεί η ταχύτητα αναρρόφησης. Η μέτρηση της ταχύτητας γίνεται μέσω ενός σωλήνα Prandtl μέσα στον αγωγό καυσαερίων, ο οποίος μετρά τη δυναμική πίεση.

Τα μεγέθη που μετρούνται είναι :

- Ολική πίεση(στατική και δυναμική)
- Ταχύτητα
- Θερμοκρασία
- Κατ'όγκο σύσταση σε οξυγόνο
- Ποσότητα σκόνης
- Η περιεχόμενη στο αναρροφούμενο ρεύμα καυσαερίων (με την βοήθεια αντλίας αναρρόφησης) συγκέντρωση στερεών σωματιδίων που συγκρατείται με τη βοήθεια φίλτρου.

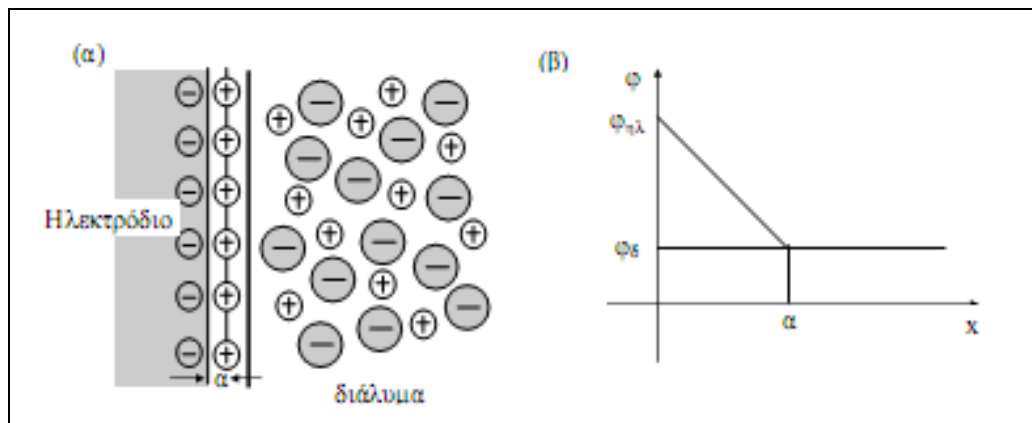
Τα αποτελέσματα της μέτρησης υπολογίζονται βάσει της ποσότητας των στερεών σωματιδίων που συγκεντρώθηκε και της ποσότητας του καυσαερίου που αναρροφήθηκε . Τα χρησιμοποιηθέντα φίλτρα ζυγίζονται πριν και μετά τη χρήση τους αφού ξηραθούν για 60 λεπτά σε φούρνο με θερμοκρασία 140°C . Το τελικό αποτέλεσμα εκφράζεται σε (mg/m³) και δηλώνει τη μάζα στερεών σωματιδίων που φέρει μαζί του (στη συγκεκριμένη θέση μέτρησης) κάθε κυβικό μέτρο καυσαερίου. Προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων και η αναγωγή τους σε κοινή βάση, το τελικό αποτέλεσμα εκφράζεται σε (mg/Nm³), όπου αντισταθμίζεται η επίδραση της θερμοκρασίας ,της στατικής πίεσης και του περιεχόμενου σε νερό.

4.3.11 Ηλεκτροχημικοί Αισθητήρες(ElectroChemical Sensors(ECSs))

4.3.11.1 Ηλεκτροχημεία

Βασικό στοιχείο κάθε ηλεκτροχημικής μελέτης είναι η αυθόρμητη (γαλβανικό στοιχείο) ή εξαναγκασμένη (ηλεκτρολυτικό στοιχείο) συμπεριφορά του ηλεκτροχημικού στοιχείου (electrochemical cell), κάτω από συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες. Κάθε ηλεκτρολυτικό στοιχείο αποτελείται από δύο τουλάχιστον ηλεκτρόδια, τα οποία βρίσκονται βυθισμένα σε διάλυμα ηλεκτρολύτη. Ως ηλεκτρόδιο μπορεί να θεωρηθεί η επιφάνεια επαφής δύο φάσεων (διεπιφάνεια , interface), που στη μία η αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται με κίνηση ηλεκτρονίων (φάση του “καθ’εαυτό” ηλεκτροδίου με ηλεκτρονική αγωγιμότητα) και στην άλλη με κίνηση ιόντων (φάση ηλεκτρολύτη με ιοντική αγωγιμότητα). Η διεπιφάνεια δεν είναι απλά μία ενδιάμεση επιφάνεια επαφής των φάσεων του

ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη, αλλά μία ετερογενής περιοχή, που αποτελείται από δύο επιμέρους περιοχές σε επαφή. Η μία περιοχή της διεπιφάνειας επεκτείνεται από το ηλεκτρόδιο (ημιστοιχείο) προς τον ηλεκτρολύτη, χωρίς να έχει τις ίδιες ιδιότητες και σύνθεση με εκείνες της κύριας μάζας του ηλεκτρολύτη και η άλλη εκτείνεται από την επιφάνεια του ηλεκτροδίου προς το εσωτερικό του, χωρίς να έχει τις ίδιες ιδιότητες και σύνθεση με εκείνες της κύριας μάζας του ηλεκτροδίου. Λόγω της συσσώρευσης ηλεκτρικών φορτίων αντιθέτου σημείου, η διεπιφάνεια αποκτά ιδιότητες πυκνωτή και γι' αυτό ονομάζεται και ηλεκτρική διπλοστιβάδα. Η διεπιφάνεια είναι εξ' ορισμού ο χώρος που πραγματοποιείται κάθε ηλεκτροδιακή ημιαντίδραση, δηλαδή μία αντίδραση στην οποία συμμετέχουν ηλεκτρόνια ως αντιδρώντα ή προϊόντα. Σύμφωνα με το πρότυπο Helmholtz το επιφανειακό φορτίο του ηλεκτροδίου έλκει ηλεκτροστατικά πάνω στην επιφάνεια του (που έρχεται σε επαφή με το ηλεκτρολυτικό διάλυμα) ένα μόνο μοριακό στρώμα ιόντων ίσου και αντιθέτου φορτίου (Εικόνα (4.9.α)). Η πτώση δυναμικού ανάμεσα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και στο διάλυμα διαμέσου του μονομοριακού στρώματος είναι γραμμική (Εικόνα (4.9.β)). Στο πρότυπο Helmholtz η διπλοστιβάδα μπορεί να θεωρηθεί σαν πυκνωτής με παράλληλους οπλισμούς.

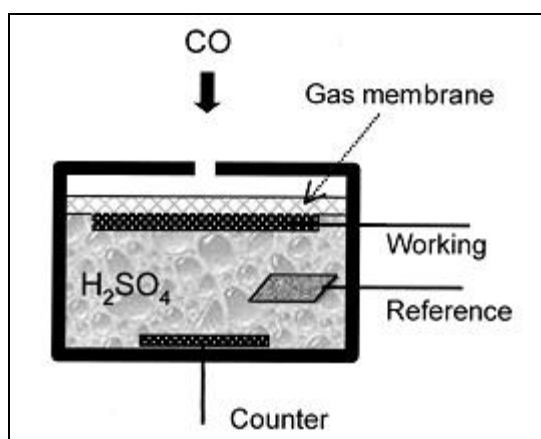


Εικόνα 4.9. α)σχηματική αναπαράσταση της διπλοστιβάδας Helmholtz.β)Πτώση του δυναμικού (ϕ)κατά μήκος της διπλοστιβάδας.

4.3.11.2 Περιγραφή ΗλεκτροΧημικών Αισθητήρων (ElectroChemical Sensors (ECSs)) [O₂, CO, NO_x, SO₂]

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες (ECS) αποτελούν για πολλούς λόγους, μια ανερχόμενη γενιά αισθητήρων. Συγκεκριμένα, ο αισθητήρας μπορεί να μετρά υδρογόνο(H₂), οξυγόνο(O₂), όζον(O₃), μονοξείδιο του άνθρακα(CO), υδρόθειο(H₂S), διοξείδιο του θείου(SO₂), οξείδια του αζώτου(NO_x), υδραζίνη(hydrazine).

Αποτελείται από μεταλλικά ηλεκτρόδια λευκόχρυσου(Pt) και χρυσού (Au), των οποίων η υψηλή αγωγιμότητα, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση χαμηλών ρευμάτων υποβάθρου (χωρητικών). Η επιφάνεια των μεταλλικών ηλεκτροδίων τροποποιείται με διάφορους τρόπους, με πιο συνηθισμένο τον ηλεκτροπολυμερισμό. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα ηλεκτρόδια μετάλλων εμφανίζουν καταλυτικές ιδιότητες. Πλεονέκτημα των ηλεκτροδίων αυτών αποτελεί επίσης η ευκολία καθαρισμού τους, που μπορεί να γίνει είτε ηλεκτροχημικά είτε μηχανικά με αιώρημα αλουμίνας ή διαμαντιού.



Εικόνα 4.10. Τυπικός αμπερομετρικός αισθητήρας αερίων με υγρό ηλεκτρολύτη.

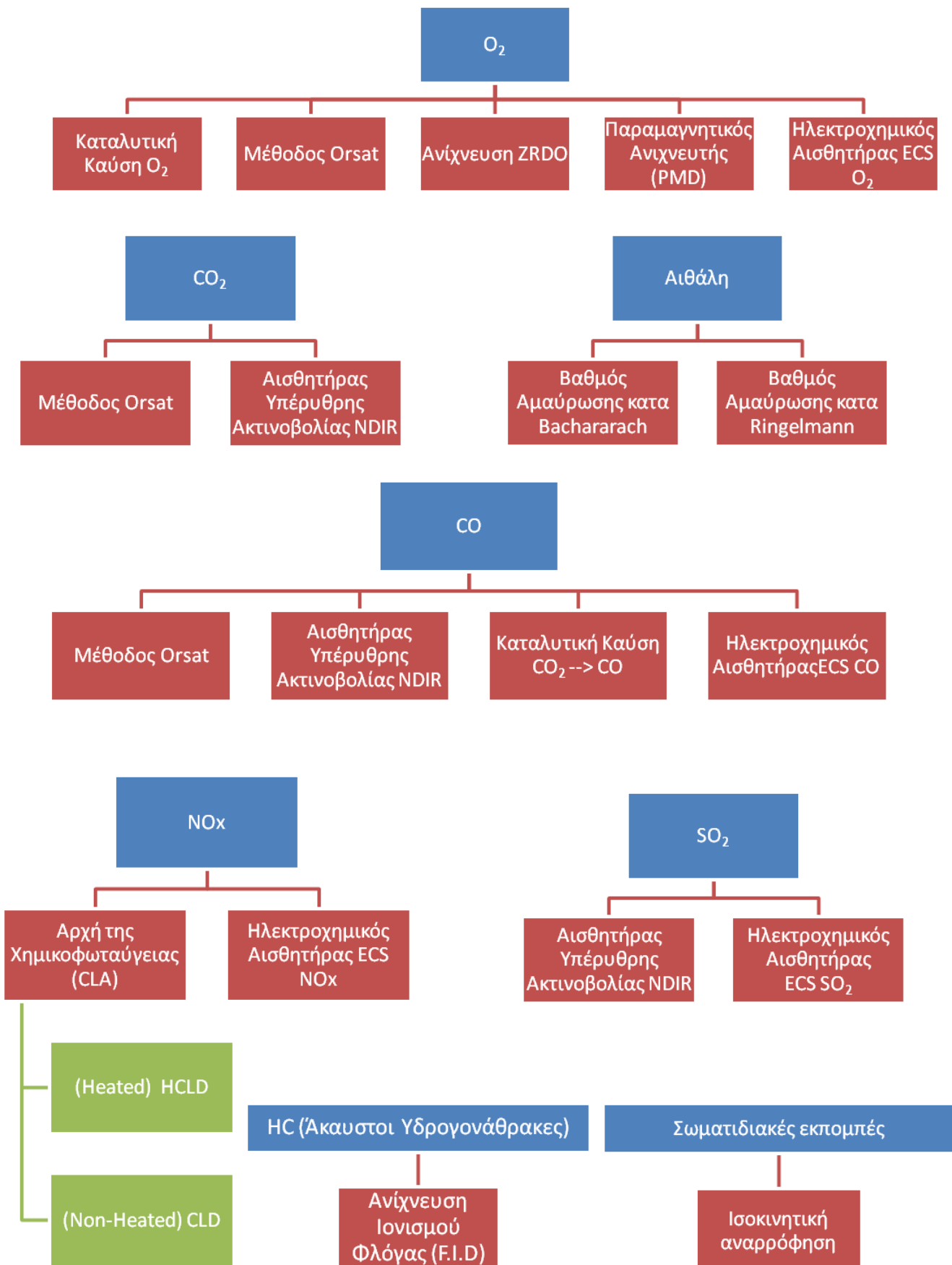
Οι ECSs χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ανάλυσης αέριων ρύπων λόγω της απλότητάς τους, των σχετικά χαμηλών ορίων ανίχνευσης, της έκτασης της γραμμικής περιοχής συγκεντρώσεων καθώς και του σχετικά χαμηλού κόστους τους. Βασικό μειονέκτημα τους, είναι η μείωση της ευαισθησίας των ηλεκτροδίων λόγω ρύπανσης ή στόμωσης (fouling) της επιφάνειάς τους και η μικρή εκλεκτικότητα λόγω παρεμποδίσεων, που παρουσιάζονται κατά τις μετρήσεις σε μεγάλες συγκεντρώσεις.

Η ρύπανση των ηλεκτροδίων προκαλείται κυρίως από ουσίες (συνήθως ηλεκτρανεργές), που προσροφούνται στην επιφάνειά τους. Αυτές μπορεί να είναι ενδιάμεσα προϊόντα αντιδράσεων υψηλής δραστηριότητας (ελεύθερες ρίζες), μόρια μεγάλου μεγέθους (όπως οι πρωτεΐνες), επιφανειοδραστικές ουσίες (τασενεργές) κ.λ.π. Αποτέλεσμα της ρύπανσης είναι η συνεχής μείωση του μετρούμενου σήματος. Τυπικές τιμές ακρίβειας για αισθητήρες ECS NO είναι $\pm 5\%$ και NO_2 $\pm 5\sim 10\%$.

Το πρόβλημα των παρεμποδίσεων παρουσιάζεται συχνά κατά τον προσδιορισμό ουσιών, που οξειδώνονται σε μεγάλα δυναμικά π.χ. +0.6 V, όπου οξειδώνονται πολλές ουσίες, όπως το H₂O₂, το ασκορβικό οξύ, η παρακεταμόλη, το ουρικό οξύ, η κυστεΐνη, οι φαινόλες κ.ά. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά με τη χρήση μεθόδων χημικής απομάκρυνσης των παρεμποδιζόντων, πολυμερικών μεμβρανών που λειτουργούν ως φράγματα για τη διέλευση ουσιών μεγάλου μοριακού βάρους, διαμεσολαβητών φορτίου κ.ά. Οι κύριοι τύποι αμπερομετρικών αισθητήρων προκύπτουν με χημική τροποποίηση της επιφάνειας τους με σκοπό την αύξηση της εκλεκτικότητας και της ευαισθησίας τους, και κατηγοριοποιούνται ως εξής :

- I. Αισθητήρες Τροποποιημένοι με Διαμεσολαβητές Μεταφοράς Φορτίου
- II. Αισθητήρες με Πολυμερικές Επικαλύψεις
 - i. Αγώγιμες Πολυμερικές Μεμβράνες(Conducting Polymer Films)
 - ii. Μη Αγώγιμες Πολυμερικές Μεμβράνες(Non-Conducting Polymer Films)
 - iii. Μεικτές ή Πολυλειτουργικές Πολυμερικές Μεμβράνες(Composite Polymer Films)
- III. Αισθητήρες πηκτής-λύματος (sol-gel)

4.4 Σχηματική Παρουσίαση Αναλυτών ανά Ρύπο



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - Ο ΔΙΕΘΝΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΣ
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ(ΙΜΟ, INTERNATIONAL MARITIME
ORGANIZATION)**

ΚΑΙ

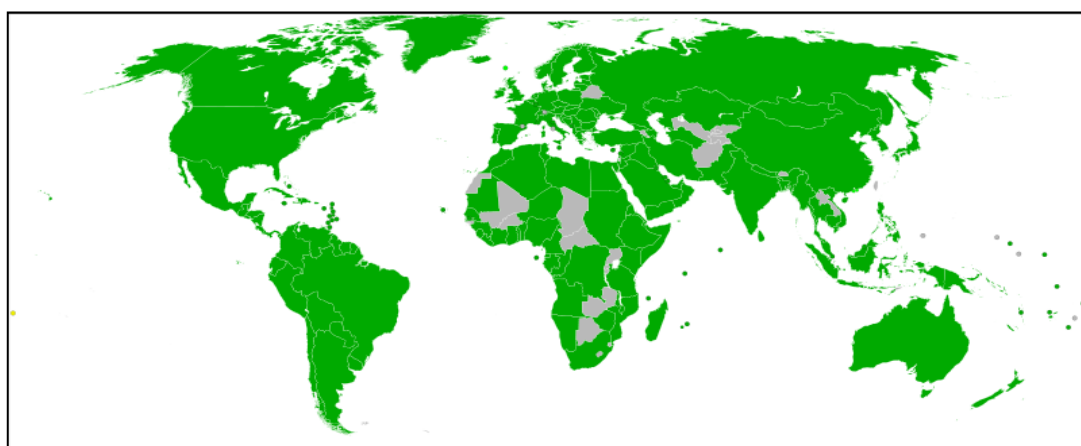
ΤΑ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΑΕΡΙΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

5.1 Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός(IMO, International Maritime Organization)

Εικόνα 5.1. Σημαία του IMO.



Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO, **International Maritime Organization**) είναι ένας εξειδικευμένος οργανισμός στα πλαίσια του ΟΗΕ, με αντικείμενο τη θέσπιση μέτρων για τη βελτίωση της ασφάλειας της διεθνούς ναυτιλίας και την αποφυγή της μόλυνσης του περιβάλλοντος από πλοία. Είναι αρμόδιος για νομικά θέματα που αφορούν στην απόδοση ευθυνών και στην καταβολή αποζημιώσεων σε περιπτώσεις ναυτιλιακών ατυχημάτων, καθώς επίσης και για τη διευκόλυνση της διεθνούς ναυτιλιακής κίνησης. Ο IMO (ονομάστηκε έτσι το 1982), με την αρχική ονομασία IMCO(Inter-Governmental Maritime Consultative Organization) συστάθηκε με διεθνή σύμβαση, που υιοθετήθηκε υπό την αιγίδα του ΟΗΕ στη Γενεύη στις 17 Μαρτίου του 1948, ενώ η πρώτη του επίσημη συνεδρίαση πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 1959. Στις μέρες μας ο IMO αποτελείται από σώμα 169 μελών-κρατών. Δύο από τις σημαντικότερες συμβάσεις, που έχουν υιοθετηθεί από τα κράτη-μέλη στα πλαίσια του IMO, είναι η σύμβαση για την ασφάλεια της διεθνούς ναυτιλίας SOLAS (Safety Of Life At Sea) του 1974, που αναθεωρήθηκε και επεκτάθηκε το 1995, καθώς και η σύμβαση για την πρόληψη της μόλυνσης του περιβάλλοντος από πλοία (MARPOL, Maritime Pollution), η οποία υιοθετήθηκε το 1973 και αναθεωρήθηκε το 1978.



Participation in the International Maritime Organization

■ Κράτη-μέλη ■ Συνεργαζόμενα μέλη ■ Υποψήφια

Εικόνα 5.2. Ο IMO σε παγκόσμιο επίπεδο.

5.2 Οργάνωση IMO

Ο οργανισμός αποτελείται από την Γενική Συνέλευση, το Συμβούλιο, πέντε κύριες επιτροπές(Επιτροπή Ασφάλειας της Ναυτιλίας, Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος, Νομική Επιτροπή , Επιτροπή Τεχνικής Συνεργασίας ,Επιτροπή Διευκόλυνσης) και από υποεπιτροπές που υποστηρίζουν το έργο των κύριων επιτροπών. Όλα τα σώματα του IMO ,λειτουργούν με βάση του απλού αλλά και περιεκτικού συνθήματος: “Αξιόπιστη, ασφαλής και αποτελεσματική ναυτιλία σε καθαρούς ωκεανούς” (“**Safe, secure and efficient shipping on clean oceans**”).

5.2.1 Γενική Συνέλευση(Assembly)

Η Γενική Συνέλευση(Assembly) είναι το ύψιστο διοικητικό όργανο του Οργανισμού και αποτελείται από όλα τα μέλη-κράτη. Συνεδριάζει μια φορά κάθε δύο χρόνια σε τακτικές συνεδρίες, ενώ συνέρχεται και σε έκτατη σύνοδο όποτε είναι απαραίτητο. Καθήκοντα της Συνέλευσης είναι η έγκριση του προγράμματος εργασιών, η ψήφιση του προϋπολογισμού, ο καθορισμός του χρηματοδοτικού μηχανισμού του Οργανισμού και τέλος η εκλογή του Συμβουλίου.

5.2.2 Συμβούλιο(Council)

Το Συμβούλιο(Council) είναι το εκτελεστικό όργανο του IMO και εκλέγεται, όπως προαναφέρθηκε κάθε δύο χρόνια από την Γενική Συνέλευση. Το συμβούλιο αποτελείται από τρεις κατηγορίες μελών (τα μέλη-κράτη ισχύουν για 2010-2011).

- Την κατηγορία (Α) οπου αποτελείται από δέκα χώρες με το μεγαλύτερο μερίδιο συμμετοχής στην παροχή διεθνών θαλάσσιων μεταφορών (Κίνα, Ελλάδα, Ιταλία, Ιαπωνία, Νορβηγία, Παναμά, Δημοκρατία της Κορέας, Ρωσία, Ηνωμένο Βασίλειο, Ηνωμένες Πολιτείες).
- Την κατηγορία (Β) οπου αποτελείται από δέκα χώρες με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στο διεθνές θαλάσσιο εμπόριο (Αργεντινή, Μπανγκλαντές, Βραζιλία, Καναδάς, Γαλλία, Γερμανία, Ινδία, Ολλανδία, Ισπανία, Σουηδία)
- Την κατηγορία (Γ) όπου αποτελούνται από είκοσι χώρες, που δεν έχουν εκλεχθεί στην Α` και Β` κατηγορία και έχουν ειδικά συμφέροντα στις ναυτιλιακές μεταφορές ή την ναυσιπλοΐα και των οποίων η εκλογή διασφαλίζει την εκπροσώπηση όλων των κύριων γεωγραφικών περιοχών (Αυστραλία, Μπαχάμες, Βέλγιο, Χιλή, Κύπρος, Δανία, Αίγυπτος, Ινδονησία, Ιαμαϊκή, Κένυα, Μαλαισία, Μάλτα, Μεξικό, Νιγηρία, Φιλιππίνες, Σαουδική Αραβία, Σιγκαπούρη, Νότια Αφρική, Ταϊλανδη, Τουρκία).

Μετά την εκλογή του, είναι υπεύθυνο για την εποπτεία όλων των εργασιών και οργάνων του Οργανισμού, ασκώντας και τις δραστηριότητες της Γενικής Συνέλευσης, στο διάστημα μεταξύ των συνόδων. Είναι υπεύθυνο για την δημιουργία προτάσεων και συστάσεων προς της κυβερνήσεις σχετικά με την ναυτιλιακή ασφάλεια και την πρόληψη της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος, όπως αυτές ορίζονται από την Γενική Συνέλευση σύμφωνα με το άρθρο 15 της σύμβασης της Γενεύης. Άλλες δραστηριότητες του Συμβουλίου είναι : η άτυπη κατάθεση του προϋπολογισμού σε μορφή προσχεδίου ώστε να εξεταστεί και εν συνεχεία ψηφιστεί από την Γενική Συνέλευση, η επεξεργασία προτάσεων των εσωτερικών επιτροπών ή άλλων οργανισμών και η αποστολή τους στην Συνέλευση και στις Κυβερνήσεις των μελών-κρατών, οι δημόσιες σχέσεις με άλλους οργανισμούς και τέλος ο ορισμός ενός Γενικού Γραμματέα που χρίζει την αποδοχή της Γενικής Συνέλευσης. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρέχων Γενικός Γραμματέας είναι ο Έλληνας, κ. Ευθύμιος Ε. Μητρόπουλος, με ότι αυτό συνεπάγεται για το μέγεθος της ελληνικής ναυτιλίας σε διεθνές επίπεδο.

5.2.3 Επιτροπές

5.2.3.1 Επιτροπή Ασφάλειας της Ναυτιλίας (Maritime Safety Committee(MSC))

Η Επιτροπή Ασφάλειας της Ναυτιλίας (Maritime Safety Committee(MSC)) είναι το ανώτατο τεχνικό όργανο του Οργανισμού και αποτελείται από όλα τα κράτη-μέλη. Καθήκον της είναι η σύλληψη, επεξεργασία, μελέτη και εφαρμογή κάθε διαδικασίας σχετικά με την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας και της ναυτιλίας γενικότερα. Το πεδίο αρμοδιοτήτων της είναι ευρύ και περιλαμβάνει κανόνες και κατευθυντήριες γραμμές για την κατασκευή πλοίων και του εξοπλισμού τους, την φόρτωση επικίνδυνων εμπορευμάτων, έρευνα και διάσωση, τη διερεύνηση ατυχημάτων, ημερολόγια πλοίου, κ.α. Τέλος, είναι υπεύθυνη για την έγκριση τροποποιήσεων συμβάσεων όπως η SOLAS (Safety of Life At Sea) ακόμα και για κράτη τα οποία δεν είναι μέλη του IMO αλλά συμβαλλόμενα μέρη στις τυχόν συμβάσεις.

5.2.3.2 Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος(Marine Environment Protection Committee(MPEC))

Η Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος(Marine Environment Protection Committee(MPEC)) αποτελείται από όλα τα κράτη μέλη και έχει ως στόχο τη θέσπιση συμβάσεων (όπως ((MARPOL 73/78)(Marine Pollution)) και αυστηρών κανονισμών που αφορούν την πρόληψη και καταπολέμηση της ρύπανσης του

περιβάλλοντος από τα πλοία Η (MPEC) αποτελούσε κομμάτι της Γενικής Συνέλευσης έως το 1985, οπότε και έγινε ανεξάρτητη.

5.2.3.3 Νομική Επιτροπή (Legal Committee(LC))

Η Νομική Επιτροπή (Legal Committee(LC)) είναι αρμόδια για κάθε νομική δραστηριότητα και απέκτησε ανεξάρτητο σώμα το 1967, εξαιτίας των νομικών διεργασιών που επέφερε η οικολογική καταστροφή, που προκάλεσε το τάνκερ Torrey (διέρρευσε πάνω από 120.000 tn πετρελαίου) στις ακτές της Αγγλίας την ίδια χρονιά. Εκτός των άλλων, το γεγονός αυτό αφύπνισε τον ΙΜΟ και τον ανάγκασε να ασχοληθεί περισσότερο με το περιβάλλον.

5.2.3.4 Επιτροπή Τεχνικής Συνεργασίας(Technical Co-operation Committee (TCC))

Η Επιτροπή Τεχνικής Συνεργασίας(Technical Co-operation Committee(TCC)) ιδρύθηκε το 1969 και λειτουργούσε υπό την αιγίδα του Συμβουλίου έως το 1984, οπότε και ανεξαρτητοποιήθηκε και έγινε προσβάσιμο στο σύνολο των μελών του ΙΜΟ. Ασχολείται με τη δημιουργία και εκπόνηση τεχνικών μελετών στο πλαίσιο συνεργασιών με άλλους φορείς, ενώ δρα και σαν ανεξάρτητος ή συνεργαζόμενος φορέας σε διεθνή τεχνικά ζητήματα

5.2.3.5 Επιτροπή Διευκόλυνσης(Facilitation Committee)

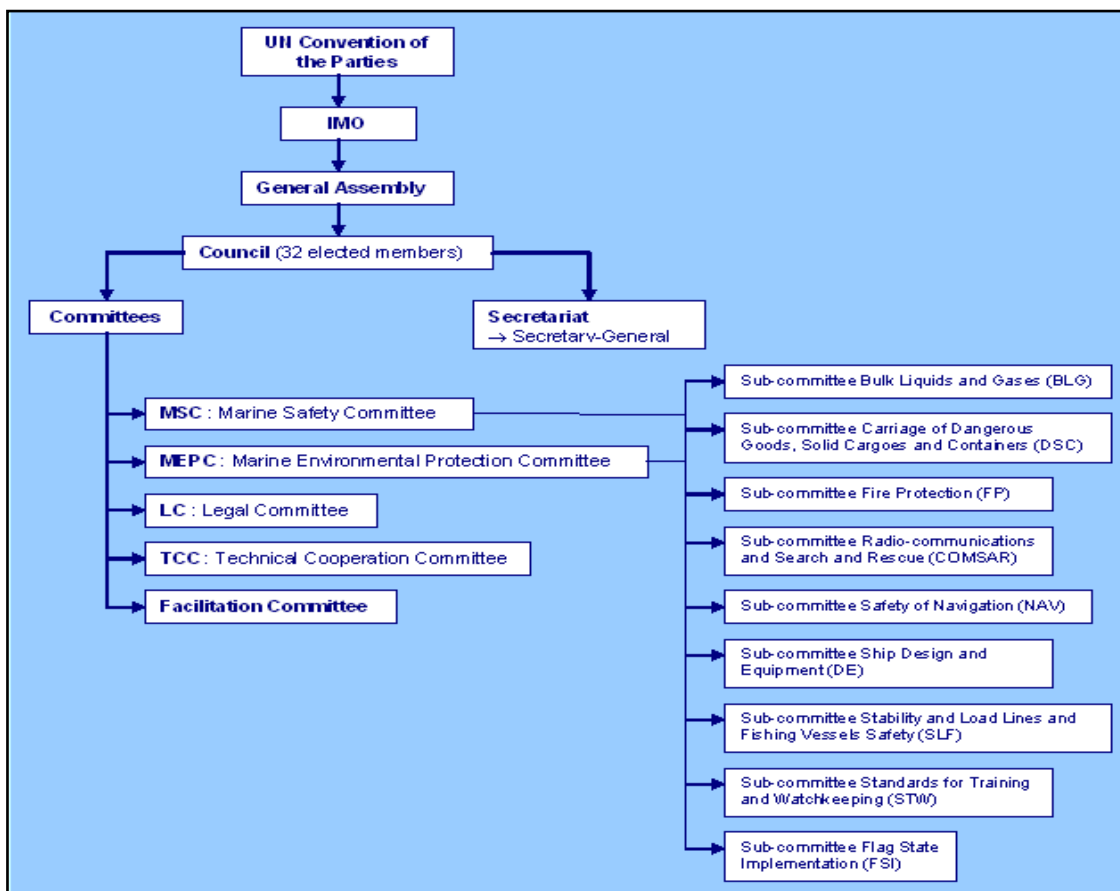
Η Επιτροπή Διευκόλυνσης(Facilitation Committee) ιδρύθηκε το Μάιο του 1972 και ανεξαρτητοποιήθηκε τον Δεκέμβριο του 2008. Σκοπός της είναι η εξάλειψη της ανεπιθύμητης γραφειοκρατίας και των πιθανών αντικρουόμενων κανονισμών στις υποθέσεις της διεθνή ναυτιλίας.

5.2.4 Υποεπιτροπές

Η επιτροπές (MSC) και (MEPC) υποβοηθούνται από εννέα υποεπιτροπές που είναι ανοικτές για όλα τα κράτη-Μέλη και αφορούν τα παρακάτω θέματα:

- Χύδην Υγρά και Αέρια (Bulk Liquids and Gases (BLG))
- Μεταφορά Επικίνδυνων Αγαθών,Στερεού Φορτίου και Κοντέϊνερ (Carriage of Dangerous Goods, Solid Cargoes and Containers(DSC))
- Πυρασφάλεια(Fire Protection (FP))
- Ραδιοεπικοινωνία και Έρευνα και Διάσωση((Radio-communications and Search and Rescue (COMSAR))

- Ασφάλεια Ναυσιπλοΐας (Safety of Navigation (NAV))
- Σχεδιασμός Πλοίου και Εξοπλισμός (Ship Design and Equipment (DE))
- Ευστάθεια ,Φορτίο Δρομολογίων και Ασφάλεια Αλιευτικών Σκαφών (Stability and Load Lines and Fishing Vessels Safety (SLF))
- Πρότυπα Εκπαίδευσης και Επιτήρησης (Standards of Training and Watchkeeping (STW))
- Εκπλήρωση διαδικασιών για ένταξη σε σημαία κράτους (a Flag State Implementation (FSI))



Εικόνα 5.3. Οργανόγραμμα οργανισμού IMO.

5.3 Προστασία του Περιβάλλοντος από τη Ρύπανση Ναυτικών Κινητήρων

5.3.1 Εισαγωγή

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός προσπάθησε από την πρώτη στιγμή της ίδρυσής του, να θεσπίσει κανόνες για την προστασία του περιβάλλοντος χωρίς όμως να επιταχύνει τις διαδικασίες σε αυτό τον τομέα. Η τάση αυτή είναι δικαιολογημένη εάν συνυπολογίσουμε τις αυξανόμενες ανάγκες εκείνης της εποχής για φθηνή και

αξιόπιστη μεταφορά προϊόντων μέσω θαλάσσης, σε συνδυασμό με την ελλιπή τεχνογνωσία και την άγνοια των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εξαιτίας των επικίνδυνων παραγώγων (στερεών, υγρών και αέριων ρυπαντών) κατά τη λειτουργία του πλοίου. Έτσι μόλις το 1954, ο IMO προωθεί μία συνθήκη για την ρύπανση της θάλασσας εξαιτίας του πετρελαίου, ενώ έπειτα από 5 χρόνια επισημοποιείται. Το γεγονός, στο οποίο οφείλεται η στροφή του Οργανισμού στην περαιτέρω προστασία του περιβάλλοντος είναι η οικολογική καταστροφή που προκάλεσε το τάνκερ Canyon στις ακτές της Αγγλίας το 1967. Η διαρροή του πετρελαίου άγγιξε τους 120.000 tn, προκαλώντας σοκ τόσο στην κοινή γνώμη όσο και στους υπεύθυνους του IMO, οι οποίοι κατανόησαν ότι η θάλασσα αξίζει το σεβασμό της ανθρώπινης δραστηριότητας. Από τότε ο Οργανισμός συνέταξε μία σειρά συμβάσεων που αφορούσαν τη πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης από πλοία, το βαθμό ετοιμότητας και ανταπόκρισης σε περιστατικά που αφορούσαν το πετρέλαιο και άλλες επικίνδυνες και επιβλαβείς ουσίες, την διαχείριση του θαλάσσιου έρματος ώστε να αποτραπεί η εξάπλωση επιβλαβών υδρόβιων οργανισμών. Ενώ βελτίωσε την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας και στράφηκε στην πληρέστερη εκπαίδευση των ναυτικών για την αποφυγή ατυχημάτων.

5.3.2 Διεθνής Σύμβαση (MARPOL)

5.3.2.1 Εισαγωγή

Με το πέρας των χρόνων και την απόκτηση της απαραίτητης τεχνογνωσίας και της περιβαλλοντικής γνώσης, η Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC), δημιούργησε κανονισμούς για την πρόληψη της ρύπανσης από το πετρέλαιο, τα λύματα, τα απορρίμματα και τους αέριους ρύπους. Η σημαντικότερη διεθνής σύμβαση για την προστασία του περιβάλλοντος από την ρύπανση που προκαλείται από την λειτουργία των πλοίων και τυχόν ναυτικών ατυχημάτων ονομάζεται “International Convention on the Prevention of Pollution from Ships”, η όπως έχει επικρατήσει να λέγεται ((MARPOL)(Marine Pollution)). Η σύμβαση αυτή αποτελείται από δύο συνθήκες που εκδόθηκαν το 1973 και το 1978 και δεκάδες τροπολογίες που προστέθηκαν με το πέρας των χρόνων.

Η οδηγία (MARPOL) εκδόθηκε από τον IMO στις 2 Νοεμβρίου 1973 και αφορούσε ρύπανση από πετρέλαιο, χημικά, επιβλαβείς ουσίες σε συσκευασία, λύματα και απορρίμματα. Το 1978, σε μία διάσκεψη για την ασφάλεια των τάνκερ (υπήρχε έξαρση

των ατυχημάτων την περίοδο 1976-1977) και την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία, εγκρίθηκε πρωτόκολλο σχετικό με τη σύμβαση του 1973. Το πρωτόκολλο αυτό ονομάστηκε (“MARPOL Protocol”). Καθώς η σύμβαση του 1973 δεν είχε μπει σε ισχύ, το πρωτόκολλο του 1978 απορρόφησε τη σύμβαση του 1973. Ο συνδυασμένος αυτός κανονισμός που αναφέρεται ως “International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 “ , ή εν συντομία “MARPOL 73/78” τέθηκε σε ισχύ από τις 2 Οκτωβρίου 1983.

5.3.2.2 Παραρτήματα (MARPOL 73/78)

Η σύμβαση (“MARPOL 73/78”) εμπεριέχει Άρθρα, Κανονισμούς, Πρωτόκολλα, Παραρτήματα και Προσαρτήματα που στοχεύουν στην αποφυγή και μείωση της μόλυνσης από τα πλοία, είτε από τη λειτουργία τους, είτε από ατυχήματα. Περιλαμβάνει 6 παραρτήματα (μόνο τα δύο πρώτα είναι υποχρεωτικά για όλα τα μέλη-κράτη, ενώ τα υπόλοιπα τηρούνται εθελοντικά), το καθένα από τα οποία παρουσιάζει τους κανονισμούς του αντίστοιχου είδους ρύπανσης, ως εξής :

- Παράρτημα I (Annex I) : Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από το πετρέλαιο. Τέθηκε σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου 1983.
- Παράρτημα II (Annex II) : Κανονισμοί για τον έλεγχο της ρύπανσης υγρών επιβλαβών ουσιών χύμα. Τέθηκε σε ισχύ στις Απριλίου 1987.
- Παράρτημα III (Annex III) : Πρόληψη της ρύπανσης από επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονται σε συσκευασίες, κιβώτια, φορητές δεξαμενές ή βυτιοφόρα οχήματα. Τέθηκε σε ισχύ την 1 Ιουλίου 1992.
- Παράρτημα IV (Annex IV) : Πρόληψη της ρύπανσης από λύματα των πλοίων. Τέθηκε σε ισχύ στις 27 Σεπτεμβρίου 2003.
- Παράρτημα V(Annex V) : Πρόληψη της ρύπανσης από απορρίμματα των πλοίων. Τέθηκε σε ισχύ στις 31 Δεκεμβρίου 1988.
- Παράρτημα VI(Annex VI) : Πρόληψη της ρύπανσης του αέρα από τα πλοία. Τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005.

5.3.2.2.1 Παράρτημα VI(Annex VI)

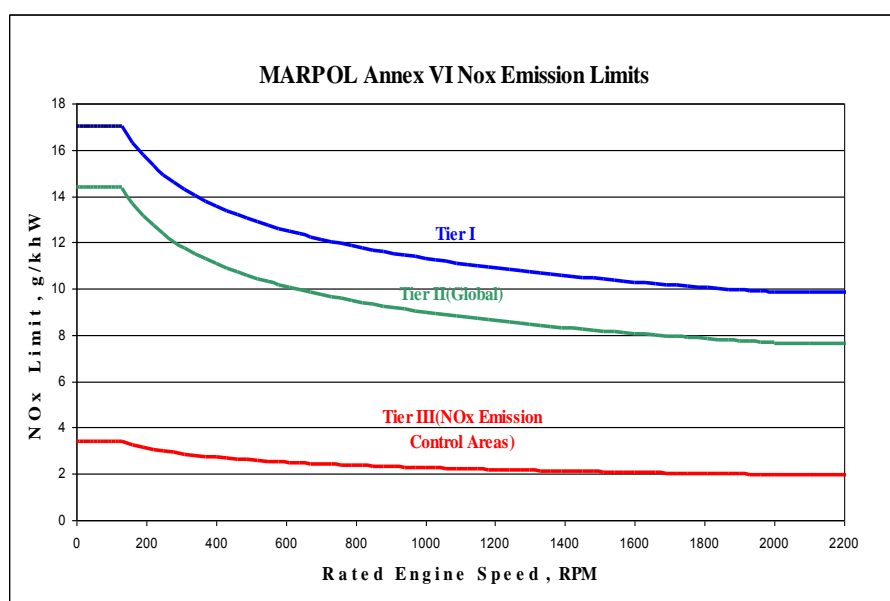
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε στο Παράρτημα VI(Annex VI) της διεθνούς σύμβασης (MARPOL 73/78), καθώς αυτό προωθεί κανονισμούς σχετικά με την πρόληψη της ρύπανσης από επικίνδυνους αέριους ρύπους. Το Παράρτημα αυτό προστέθηκε στην κύρια σύμβαση , τον Σεπτέμβριο του 1997 με την

αρχική ονομασία “1997 Protocol “. Το παράρτημα VI θέτει όρια για εκπομπές NOx και Sox στα καυσαέρια των πλοίων και περιορίζει την χρήση ουσιών που καταστρέφουν το όζον.

5.3.3 Πρότυπα (όρια) Εκπομπών NOx και SOx

5.3.3.1 Εισαγωγή

Τα όρια εκπομπών που έχει ορίσει ο IMO συνήθως αναφέρονται ως “Tier I”, ”Tier II”, “Tier III” και παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.1.



Διάγραμμα 5.1. Όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NOx(g/kWh)) συναρτήσει των στροφών του κινητήρα.

Το πρότυπο “Tier I” καθορίστηκε στην αρχική έκδοση του Παραρτήματος VI το 1997, ενώ τα πρότυπα ”Tier II” και ”Tier III” εισήχθησαν στο Παράρτημα το 2008 με τροπολογίες που συνοπτικά παρουσιάζονται παρακάτω:

- (“Tier I” (“1997 Protocol “)) : Το πρωτόκολλο του 1997 εγκρίθηκε μέσα σε ένα χρόνο εφόσον και υιοθετήθηκε από 15 χώρες και τυτόχρονα από το 54,57% της παγκόσμιας εμπορικής χωρητικότητας (Μπαχάμες, Μπαγκλαντές, Μπαρμπάντος ,Δανία, Γερμανία ,Ελλάδα, Λιβύη, Νήσοι Μαρσαλ, Νορβηγία, Παναμά ,Σιγκαπούρη ,Ισπανία, Σουηδία, Βανουάτου).

Όπως προαναφέρθηκε το “Tier I” ,τέθηκε σε ισχύ το Μάιο του 2005.Αφορά νέους κινητήρες άνω των 130 kW που είτε έχουν εγκατασταθεί

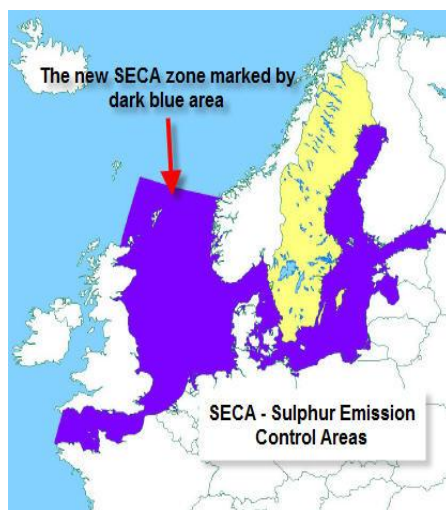
σε πλοία μετά την 1^η Ιανουαρίου 2000, είτε έχουν υποστεί τροποποιήσεις από τότε. Επιπλέον, ο κανονισμός αφορά σταθερές και πλωτές εξέδρες και εξέδρες γεώτρησης πετρελαίου (οι εκπομπές που συνδέονται από την εξερεύνηση και εκμετάλλευση των υποθαλάσσιων ορυκτών).

- (“Tier II”, “Tier III”) : Οι τροπολογίες του 2008, έγιναν αποδεκτές από 53 χώρες και το 81,88% της εμπορικής χωρητικότητας, ενώ τέθηκαν σε ισχύ την 1^η Ιουλίου του 2010. Οι τροπολογίες εισήγαγαν νέους κανονισμούς σχετικά με:
 1. Απαίτηση για πιο ποιοτικά καύσιμα (με κύριο χαρακτηριστικό την μείωση της περιεκτικότητας του σε θείο) από τον Ιούλιο του 2010.
 2. Δημιουργία πρότυπων “Tier II”, “Tier III” για εκπομπές NO_x σε νέες μηχανές.
 3. Αναθεώρηση πρότυπου “Tier I”, για εκπομπές NO_x σε μηχανές πριν το 2000.

5.3.3.2 Διάκριση Ορίων Εκπομπής Ρύπων

Ο IMO προχωράει στην δημιουργία δύο ξεχωριστών ορίων εκπομπών ρύπων και ποιότητας καυσίμων ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή και την αναγκαιότητα για λήψη μέτρων προστασίας, τα οποία καθορίζονται από Παράρτημα VI. Τα όρια αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

1. Διεθνείς απαιτήσεις (global requirement) σύμφωνα με το “Tier II” .
2. Πιο αυστηρές απαιτήσεις σε συγκεκριμένες ελεγχόμενες περιοχές (Emission Control Areas(ECA)) σύμφωνα με το “Tier III” . Μια τέτοια περιοχή μπορεί να ορισθεί για προστασία από οξειδία του θείου (SO_x), αιωρούμενα σωματίδια (PM), οξειδία του αζώτου (NO_x) ή και συνδυασμό τους. Οι υπάρχουσες ECA εμπεριέχουν την Βαλτική θάλασσα (εκδόθηκε το 1997/ίσχυσε το 2005) και την Βόρεια Θάλασσα (2005/2006) και φαίνονται στην Εικόνα (5.4) που ακολουθεί.



Εικόνα 5.4. Περιοχές της Ευρώπης που ισχύουν αυστηρές απαιτήσεις για τα όρια εκπομπών οξειδίων του θείου (SECA).

5.3.3.3 Πρότυπα (όρια) Εκπομπών NO_x

Τα όρια των εκπομπών NO_x καθορίζονται για τις μηχανές Diesel συναρτήσει της μέγιστης ταχύτητας λειτουργίας (n, rpm), όπως αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 (Βλέπε : Διάγραμμα 5.1, σελ.74). Τα όρια που ορίζουν τα “Tier I, II” εφαρμόζονται σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ το “Tier III” σε ελεγχόμενες περιοχές (NO_x Emission Control Areas).

Πίνακας 5.1. Όρια εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x(g/kWh)) συναρτήσει των στροφών του κινητήρα.

MARPOL Annex VI NO _x Emission Limits				
Tier	Date	Nox Limit,g/kWh		
		n<130	130≤n≤2000	n≥2000
Tier I	2000	17,0	45*n ^(-0,2)	9,8
Tier II	2010	14,4	44*n ^(-0,23)	7,7
Tier III	2010 †	3,4	9*n ^(-0,2)	1,96

† in NO_x Emission Control Areas(Tier II standards apply outside ECAs)

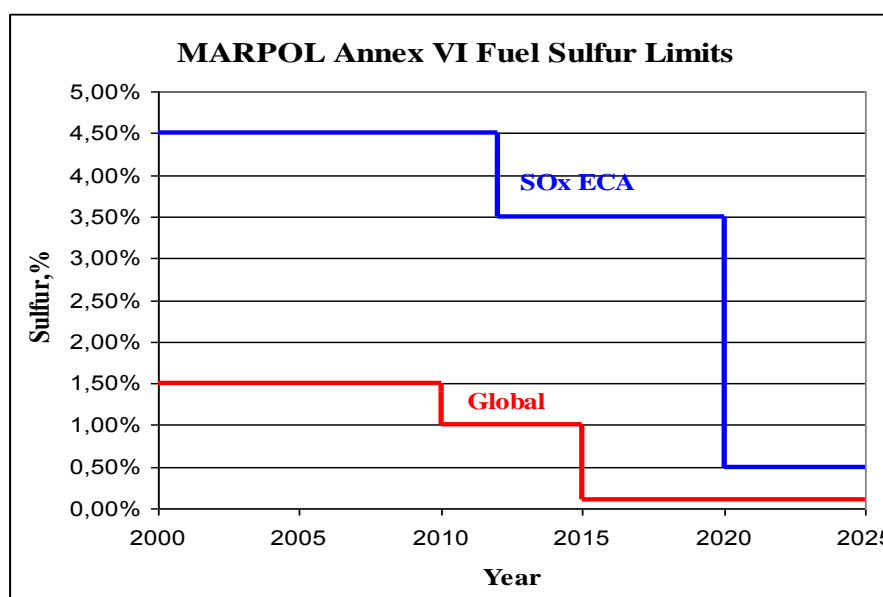
Τα όρια εκπομπών που θέτει ο IMO με το “Tier I” (για μηχανές εγκατεστημένες μετά την 1^η Ιανουαρίου 2000) και το “Tier II” για τους ναυτικούς κινητήρες αναμένεται να καλυφθούν με την βελτίωση των συνθηκών καύσης. Αυτό συνεπάγεται εκτενή μελέτη των παραμέτρων της καύσης, όπως χρονισμός και πίεση έγχυσης, ρυθμός (διαμόρφωσης) έγχυσης καυσίμου, ακροφύσιο έγχυσης, χρονισμός βαλβίδων εξαγωγής και λόγος συμπίεσης. Αντίθετα τα πρότυπα “Tier III” απαιτούν ξεχωριστές

τεχνολογίες περιορισμού των NO_x, όπως ανακυκλοφορία καυσαερίων, έγχυση νερού στο κύλινδρο κατά την καύση και χρήση καταλυτών απορρόφησης NO_x.

Το “Tier I”, όπως αυτό αναθεωρήθηκε με την τροπολογία του 2008 (Παράρτημα VI) αναφέρεται σε μηχανές που εγκαθίστανται σε πλοία ναυπηγημένα πριν την 1^η Ιανουαρίου 2000, στις οποίες έχουν γίνει τροποποιήσεις.

5.3.3.4 Πρότυπα (όρια) Εκπομπής SO_x

Το Παράρτημα VI της σύμβασης (MARPOL73/78) περιλαμβάνει και όρια για την περιεκτικότητα του καυσίμου (πετρελαίου) σε θείο, με το σκεπτικό ότι έτσι ελέγχεται η εκπομπή οξειδίων του θείου και άμεσα η εκπομπή αιωρούμενων σωματιδίων (PM) για τα οποία δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη οδηγία. Στο Διάγραμμα (5.2, σελ.77) που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα όρια για την περιεκτικότητα του θείου και την ημερομηνία εφαρμογή των οδηγιών, τόσο για τις ελεγχόμενες για SO_x περιοχές (SECA) όσο και παγκόσμια. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο IMO προτείνει εναλλακτικά μέτρα για την μείωση των εκπομπών του θείου, όπως η χρήση ειδικών πλυντιδίων στην έξοδο των καυσαερίων.



Διάγραμμα 5.2. Όρια εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x(g/kWh)) συναρτήσει των στρωφών του κινητήρα.

5.3.3.5 Παράρτημα VI - Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα

Τα αέρια του θερμοκηπίου, όπως αυτά ορίζονται από το πρωτόκολλο του Κιότο (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆) δεν αναφέρονται στη σύμβαση (MARPOL).

Συγκεκριμένα, το Νοέμβριο του 2003, ο ΙΜΟ ενέκρινε το ψήφισμα Α.963(23) σχετικά με την πολιτική που πρέπει να ακολουθηθεί για την μείωση των ρύπων που δημιουργούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και παράγονται από τα πλοία. Η Επιτροπή Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος αποφάσισε την δημιουργία πιλοτικών προγραμμάτων περιορισμού του CO₂ που θα ήταν εύκολα στην εφαρμογή τους και χωρίς μεγάλο κόστος εφαρμογής και λειτουργίας. Τα προγράμματα αυτά ήταν εθελοντικά, όπως και εξακολουθούν ακόμα και σήμερα.

5.3.3.6 Παράρτημα VI και άλλοι ρύποι

Ο ΙΜΟ προβαίνει στην απαγόρευση κάθε εσκεμμένης εκπομπής ουσίας που είναι επιβλαβής για το όζον, όπως οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) και τα Halon (χρησιμοποιείται στην πυρόσβεση). Απαγορεύει την περαιτέρω χρήση τους, ενώ επιτρέπει έως την 1^η Ιανουαρίου 2020 τη χρήση υδροχλωροφθορανθράκων (HCFCs).

5.3.4 Εφαρμογή Ορίων Εκπομπών

5.3.4.1 Εισαγωγή

Ένα από τα κρισιμότερα σημεία, στο εγχείρημα του ΙΜΟ για να περιορίσει τους ρύπους, είναι ο τρόπος με τον οποίο θα ελέγχεται η εφαρμογή των κανονισμών που έχει επιβάλλει. Η συμμόρφωση με τους κανόνες ελέγχεται σε περιοδικές επιθεωρήσεις και έρευνες και την αποκλειστική ευθύνη για την τήρηση τους έχει το πλήρωμα και η εταιρία που χρησιμοποιεί τον κινητήρα. Ο Οργανισμός έχει εκδώσει μια σειρά τεχνικών κανόνων, με την ονομασία “NO_x Technical Code” (“Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Diesel Engines”), ο οποίος ανανεώνεται κατά περιόδους (ο τρέχων κώδικας ανανεώθηκε το 2008). Αυτός ο Τεχνικός Κώδικας καθορίζει όλες τις τεχνικές προδιαγραφές (προετοιμασίας, μέτρησης, επεξεργασίας) σχετικά με τον τρόπο, με τον οποίο θα πραγματοποιείται η μέτρηση των συγκεντρώσεων(ppm) και ο υπολογισμός της ειδικής εκπομπής (g/kWh) των ρύπων, με βαρύνουσα σημασία στα NO_x. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (Βλέπε : ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3, παράγραφος 3.3.2), ο περιορισμός και η παρακολούθηση των οξειδίων του θείου είναι πιο εύκολη καθώς συνδέεται άμεσα με την συγκέντρωση του θείου στο καύσιμο, αντίθετα ο περιορισμός και η παρακολούθηση των NO_x είναι πιο πολύπλοκη. Όταν το πλοίο περάσει επιτυχώς τους ελέγχους, τότε εκδίδεται ένα διεθνές πιστοποιητικό προστασίας του περιβάλλοντος

από αέριους ρύπους (“International Air Pollution Prevention Certificate”(IAPP)), το οποίο έχει πενταετή ισχύ.

5.3.4.2 Υπολογισμός Ειδικής Εκπομπής NO_x(g/kWh)

5.3.4.2.1 Ανάλυση Καυσαερίου –Αναλυτές Καυσαερίου-Δειγματοληψία

Ο υπολογισμός της ειδικής εκπομπής NO_x(g/kWh) σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα εμπεριέχει και μετρήσεις των συστατικών CO , HC , CO₂ και O₂ , ενώ δεν εξετάζονται οι υδρογονάνθρακες. Σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα το συνολικό σφάλμα δεν μπορεί να υπερβαίνει το ±5% της μέτρησης ή το ±3,5% της μέγιστης κλίμακας, ανάλογα με ποιο είναι μικρότερο. Για συγκεντρώσεις κάτω των 100 ppm το σφάλμα δεν πρέπει να ξεπερνά το ±4%.

Η ανάλυση καυσαερίων γίνεται με αναλυτές που καθορίζονται από τον Τεχνικό Κώδικα και βασίζονται σε πρότυπες αρχές λειτουργίας που έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (Βλέπε : ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4). Όλοι οι αναλυτές πρέπει να ανταποκρίνονται στην απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης, να επιτρέπουν την συνεχή δειγματοληψία απευθείας από το ρεύμα καυσαερίου καθώς και να δίνουν τη δυνατότητα καταγραφής αυτών των δειγμάτων. Οι προτεινόμενοι αναλυτές ανά εκπεμπόμενο ρύπο είναι οι εξής :

- Συγκέντρωση Οξειδίων του Αζώτου (NO_x)

Ο IMO προτείνει ως κύρια μέθοδο μέτρησης των οξειδίων του αζώτου την αρχή της ΧημικοΦωταύγειας (CLA) και τους αναλυτές (HCLD) και (CLD). Επιπλέον, επιτρέπει και τη χρήση ΗλεκτροΧημικών Αισθητήρων(ECS) εφόσον αποδειχθεί ότι έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια.

- Συγκέντρωση Μονοξειδίου του Άνθρακα(CO) και Διοξειδίου του Άνθρακα(CO₂)

Ο Τεχνικός Κώδικας περιγράφει την αρχή της Επιλεκτικής Απορρόφησης της Υπέρυθρης Ακτινοβολίας(NDIR) ως την προτεινόμενη μέθοδο για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του CO και CO₂. Επιπλέον, αναφέρει ότι η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) μπορεί να μετρηθεί και με ηλεκτροχημικούς αισθητήρες (ECS), εφόσον αποδειχθεί ότι έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια.

- Συγκέντρωση Οξυγόνου (O₂)

Για την μέτρηση του O₂ επιτρέπεται η χρήση ΠαραΜαγνητικού Αναλυτή(PMD), ηλεκτροχημικής ανίχνευσης (ZRDO) και ηλεκτροχημικού αισθητήρα (ECS) εφόσον αποδειχθεί ότι έχει την απαιτούμενη ακρίβεια.

- Συγκέντρωση Ακαυστων Υδρογονανθράκων(HC)

Χρησιμοποιείται η μέθοδος της Ανίχνευσης Ιονισμού Φλόγας (F.I.D) .

Το δείγμα λαμβάνεται σε περιοχές του αγωγού καυσαερίων με ανεπτυγμένη ροή, δηλαδή μακριά από διαταραχές (γωνίες αλλαγές διαστάσεων, τάμπερ κ.ά.). Πριν από την δειγματοληψία πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά εάν το όργανο μέτρησης έχει σε κάποιο σημείο του διαρροή και να βαθμονομείται σύμφωνα με το Τεχν.Κωδ. Το ακροφύσιο δειγματοληψίας πρέπει να τοποθετείται τουλάχιστον 0,5 m ή τρεις διαμέτρους του αγωγού καυσαερίων (εξαρτάται πιο είναι μεγαλύτερο). Οι μετρήσεις ανάλυσης καυσαερίων και μηχανικής ροπής πρέπει να πραγματοποιούνται όταν η μηχανή σταθεροποιηθεί σε ένα φορτίο και η ροή των καυσαερίων παραμείνει σταθερή. Η διαδικασία της δειγματοληψίας, σε ένα συγκεκριμένο φορτίο, διαρκεί συνήθως 10 min. Κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας καταγράφουμε δείγματα ανά 60 sec. Το αποτέλεσμα της δειγματοληψίας στο συγκεκριμένο φορτίο είναι ο μέσος όρος των δειγμάτων.

Εκτός από τους τυπικούς αναλυτές που καθορίζονται από τον IMO, εταιρίες κατασκευής μετρητικών οργάνων ανάλυσης έχουν δημιουργήσει ευκίνητους πολυαναλυτές ,τηρώντας τους κανονισμούς του Τεχν.Κωδ. Αυτοί οι αναλυτές έχουν συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι του παραδοσιακού εξοπλισμού, κυρίως λόγω κόστους και ευελιξίας (μικρότερου όγκου, βάρους).

5.3.4.2.2 Προσδιορισμός των Απαιτούμενων Τεχνικών Παραμέτρων του Κινητήρα

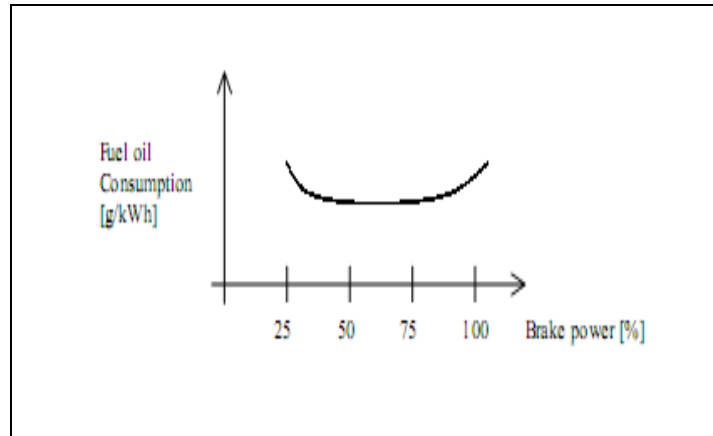
Ο προσδιορισμός κάποιων κύριων παραμέτρων είναι αναγκαίος για τον υπολογισμό των NO_x, καθώς οι τεχνικές μελέτες που έχουν ορισθεί από τον Τεχν.Κώδ, ιδιαιτέρως για νέες μηχανές, απαιτούν τον υπολογισμό τους. Οι παράμετροι αυτές φαίνονται στον Πίνακα (5.2, σελ.81) που ακολουθεί.

Πίνακας 5.2. Κύριοι παράμετροι μηχανής σύμφωνα με τον IMO ,για την σκιαγράφηση του προφίλ της ειδικής εκπομπής NOx της μηχανής.

<i>Ειδική κατανάλωση καυσίμου</i>
<i>Ισχύς Κινητήρα</i>
<i>Θερμοκρασία αέρα</i>
<i>Θερμοκρασία αέρα πριν τον εναλλάκτη</i>
<i>Ταχύτητα περιστροφής υπερπληρωτή (σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή τους)</i>
<i>Θερμοκρασία καυσαερίου στο σημείο δειγματοληψίας</i>
<i>Θερμοκρασία λαδιού λιπάνσεως στην είσοδο και στην έξοδο</i>
<i>Πίεση αέρα μετά το ψυγείο αέρα</i>
<i>Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου στην είσοδο και στην έξοδο</i>
<i>Θερμοκρασία καυσίμου πριν την είσοδο στον κινητήρα</i>

Η εύρεση όλων των κύριων παραμέτρων είναι εξαιρετικά δύσκολο και δαπανηρό εγχείρημα, ιδιαίτερα σε κινητήρες που λειτουργούν στο πεδίο , καθώς η ανάκτηση, όλων των απαραίτητων στοιχείων από κινητήρες που λειτουργούν στο πεδίο είναι δύσκολη και συνεπάγεται υψηλό κόστος μέτρησης. Ο IMO δεν έχει καθορίσει τα όργανα μέτρησης των παραμέτρων αλλά μόνο την ακρίβεια που πρέπει να έχουν. Εκτός της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και της ισχύος της μηχανής που απαιτούν ειδικά όργανα μέτρησης, οι άλλες παράμετροι (πίεση, θερμοκρασία) μετρούνται με κλασικές μεθόδους.

Συγκεκριμένα, η ειδική κατανάλωση καυσίμου (g/kWh) προσδιορίζεται μόνο από τη μέτρηση της παροχής όγκου του καυσίμου (μέθοδος coriolis, μέθοδος υπερήχων, μέθοδος ωσειδούς κιβωτίου) και της ισχύος ταυτόχρονα. Η ισχύς του κινητήρα (kW) μετράται με διάφορες τεχνικές οι οποίες όμως παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες για εφαρμογές στο πεδίο λειτουργίας, π.χ. σε ναυτικές εφαρμογές η χρήση Stain Gauge. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι περισσότερες τεχνικές παράμετροι μετρούνται με την χρήση μετρητικών οργάνων και εξοπλισμού, που υπάρχουν στο πλοίο από την κατασκευή του. Πρέπει ωστόσο κάθε τρίτο μήνα να βαθμονομούνται εκ νέου σύμφωνα με τον Τεχ.Κωδ.



Εικόνα 5.5. Τυπική καμπύλη κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου.

5.3.4.2.3 Προσδιορισμός των Συνθηκών Περιβάλλοντος

Εκτός από τις τεχνικές παραμέτρους, πρέπει να μετρούνται και κάποια στοιχεία από το περιβάλλον κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Οι παράμετροι που πρέπει να μετρούνται είναι :

- Σχετική Πυκνότητα
- Απόλυτη βαρομετρική πίεση
- Θερμοκρασία εισερχόμενου αέρα
- Θερμοκρασία Θάλασσας

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι όλες αυτές οι παράμετροι μετρούνται με τη χρήση φορητών μετρητικών οργάνων και εξοπλισμού. Επιπλέον, τα όργανα για την μέτρηση της υγρασίας, πρέπει να βαθμονομούνται κάθε μήνα, ενώ τα βαρόμετρα και τα θεرمόμετρα κάθε τρίτο μήνα, σύμφωνα με τον Τεχ.Κωδ.

5.3.4.2.4 Δοκιμές Κύκλων-Φορτία Δοκιμών

Η ειδική εκπομπή NO_x υπολογίζεται σύμφωνα με την αρχή βαροκεντρικής λειτουργίας, ως ακολούθως :

$$NO_x \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Gas_i \times W_{Fi}}{\sum_{i=1}^{i=n} P_i \times W_{Fi}} \quad (5.1)$$

Όπου,

- Gas_i = μάζα των NO_x στο καυσαέριο στο πραγματικό φορτίο (g/h)
- P_i = ισχύς κινητήρα (kW)
- W_{Fi} = συντελεστής βαρύτητας (διάρκεια μέτρησης)
- NO_x = ειδική εκπομπή NO_x (g/kWh)

Για τους ναυτικούς κινητήρες πρόωσης, ο Τεχ.Κωδ απαιτεί οι μετρήσεις να διεξαχθούν σε τέσσερα διαφορετικά φορτία, ήτοι 25%, 50%, 75% και 100%. Οι συντελεστές βαρύτητας είναι 20% στο πλήρες φορτίο, 50% στο 75% του φορτίου, 15% στο 50% και 25% του φορτίου. Για της βοηθητικές μηχανές η διανομή είναι 5% στο πλήρες φορτίο, 25% στο 75% του φορτίου, 30% στο 50 % και 25% του φορτίου και 10% στο 10% του φορτίου.

Όπως είναι αναμενόμενο, αντίθετα από τις μηχανές σε εργαστηριακή κλίση, στα επιχειρησιακά πλοία είναι συνήθως τεχνικώς αδύνατη η μέτρηση στο 100% του φορτίου της μηχανής. Ακόμα είναι πολύ δύσκολο, η μηχανή (κύρια και βοηθητική) να συντηρείται σε σταθερό φορτίο και σε σταθερό χρόνο ανά φορτίο, λόγω των κυμάτων, των ανέμων και της εσωτερικής κατανάλωσης. Έτσι, οι μετρήσεις στα επιχειρησιακά πλοία πραγματοποιούνται σε φορτία που πλησιάζουν (όσο το δυνατό) τα φορτία που ορίζει ο IMO.

5.3.4.2.5 Απλοποιημένες μέθοδοι υπολογισμού της ειδικής εκπομπής NOx(g/kwh) (Simplified measurement method)

Ο Τεχνικός Κώδικας αφήνει παράθυρο για χρήση απλοποιημένων μεθόδων υπολογισμού της ειδικής εκπομπής NOx (“Simplified measurement method”) για επί τόπου (“on board”) δοκιμαστικές μετρήσεις στο πλοίο και περιοδικές ή σπασμωδικές επιθεωρήσεις. Σύμφωνα με τον IMO, η χρήση απλοποιημένων μεθόδων απαιτεί την στοιχειομετρική σύνθεση του καυσίμου, την κατανάλωση του καυσίμου και τις συγκεντρώσεις των επιμέρους συστατικών του καυσαερίου(CO ή CO₂ και O₂).

Σύμφωνα με τον Τεχν. Κωδ δύο είναι οι επικρατέστερες μέθοδοι απλοποίησης :

- **Μέθοδος 1,Ισορροπίας άνθρακα(Carbon balance)**

Με εφαρμογή σε περιπτώσεις που έχω καύσιμο χωρίς συγκεντρώσεις οξυγόνου και αζώτου.

- **Μέθοδος 2,Ισορροπίας οξυγόνου και άνθρακα (Universalcarbon/ oxygen balance)**

Με εφαρμογή σε περιπτώσεις που έχω καύσιμο με υδρογόνο, άνθρακα, θείο, οξυγόνο, άζωτο στην σύνθεσή του.

Από τις δύο μεθόδους ,μόνο η Μέθοδος 2 παρέχει μια κατανοήσιμη και διεθνώς διαδεδομένη τεχνική μελέτη. Το δυναμικό αυτής της μεθόδου βασίζεται στην δυνατότητα απλοποίησης κάποιων παραμέτρων ,με μηδαμινή επίδραση στα τελικά αποτελέσματα και στην δυνατότητα εφαρμογής της σε συνθήκες αποκλίνουσες από τις κανονικές. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι απλοποιημένες εξισώσεις της δεύτερης μεθόδου, δίνοντας βάρος στις απαιτούμενες διορθώσεις για την υγρασία του καυσαερίου ή τις συνθήκες περιβάλλοντος. Και οι δύο μεθοδολογίες δίνονται στο **παράρτημα(2)** όπως ορίζονται από τον Τεχν.Κωδ.

5.3.4.2.6 Μέθοδος 2, Ισορροπίας οξυγόνου /άνθρακα σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα

5.3.4.2.6.1 Υπολογισμός της Παροχής Όγκου του Ξηρού Καυσαερίου ($m^3_{dry\ gas}/h$)

Ο υπολογισμός της παροχής όγκου(VEXHD') βασίζεται στην σύσταση του καυσαερίου, στην κατανάλωση καυσίμου και στην μέτρηση της συγκέντρωσης ξηρού διοξειδίου του άνθρακα (CO2D).

$$\boxed{VEXHD' = \frac{GFUEL \cdot BET \cdot 22.4}{12 \cdot CO2D}} \quad (5.2)$$

Όπου,

- $GFUEL[kg/h]$ = παροχή μάζας καυσίμου.
- $BET[\%]$ = επί τοις % κατά μάζα περιεκτικότητα άνθρακα(C) στο καύσιμο.
- $CO2D [\%]$ = επί τοις % κατ' όγκο περιεκτικότητα CO_2 στο «ξηρό» καυσαέριο.

5.3.4.2.6.2 Διόρθωση Συγκέντρωσης των NOx για μετατροπή τους σε Ξηρή από Υγρή Βάση(Kw,r'/ wet to dry correction)

Καθώς η Μέθοδος 2, αναφέρεται σε ανάλυση ξηρού καυσαερίου, εάν δοθεί η συγκέντρωση του NOx σε υγρή βάση, πρέπει να διορθωθεί κατάλληλα σε ξηρή βάση.Αυτό συμβαίνει με διόρθωση (5.6) που δίνεται στις κάτωθι εξισώσεις:

- Υπολογισμός του λόγου υδρογόνου προς άνθρακα, HTCRAΤ:

$$\boxed{HTCRAT = \frac{ALF \cdot 12.011}{1.00794 \cdot BET}} \quad (5.3)$$

Όπου,

- $ALF[\%]$ = επί τοις % κατ'όγκο περιεκτικότητα υδρογόνου(H) στο καύσιμο
- $BET[\%]$ = επί τοις % κατά μάζα περιεκτικότητα άνθρακα(C) στο καύσιμο

- Υπολογισμός της απόλυτης υγρασίας του αέρα περιβάλλοντος, $H_a [g_{water}/kg_{dry_air}]$:

$$H_a = \frac{6.220 \cdot Ra \cdot p_a}{p_a - (p_a \cdot Ra \cdot \frac{1}{100})} \quad (5.4)$$

Όπου,

- $Ra[\%]$ = σχετική υγρασία αέρα περιβάλλοντος
- $p_a[kPa]$ = πίεση κορεσμού του εισερχόμενου αέρα περιβάλλοντος

- Διορθωτικός παράγοντας, K_{w2} :

$$K_{w2} = \frac{1.608 \cdot H_a}{1000 + (1.608 \cdot H_a)} \quad (5.5)$$

Όπου,

- $H_a [g_{water}/kg_{dry_air}]$ = απόλυτη υγρασία του αέρα περιβάλλοντος

- Διορθωτικός παράγοντας ξηρής σε υγρή βάση για τα καυσαέρια, $K_{w,r'}$:

$$K_{w,r'} = \frac{1}{1 + HTC_{RAT} \cdot 0.005 \cdot CO_2D} - K_{w2} \quad (5.6)$$

Όπου,

- HTC_{RAT} = αναλογία υδρογόνου σε άνθρακα
- $CO_2D [\%]$ = επί τοις % κατ' όγκο περιεκτικότητα CO_2 στο «ξηρό» καυσαέριο
- K_{w2} = διορθωτικός παράγοντας

- Υπολογισμός της ξηρής συγκέντρωσης NO_x , $Conc(dry)[ppm]$:

$$Conc(dry) = (Conc(wet)) / (K_{w,r'}) \quad (5.7)$$

Όπου,

- $Conc(wet)[ppm]$ = συγκέντρωση NO_x στο «υγρό» καυσαέριο
- $K_{w,r'}$ = διορθωτικός παράγοντας

5.3.4.2.6.3 Διόρθωση της Επίδρασης της Θερμοκρασίας και της Υγρασίας στο Ξηρό Ρεύμα των NOx(KHDIES)

Η διόρθωση για κινητήρες με ψυγείο αέρα δίνονται (φόρμουλα(14), της παραγράφου 5.12.3.6 του Τεχν.Κώδ.) από την κάτωθι σχέση (5.8). Εάν η τιμή $[Hsc(Hsc=(6.220 \cdot Psc \cdot 100)/(PC-Psc))] < [Ha(2.2)]$ τότε στην σχέση (5.8) θέτω αντί H_a το H_{sc} (Τα μεγέθη H_{sc}, T_{sc} αναφέρονται στον αέρα εισαγωγής μετά τον εναλλάκτη ,ενώ το T_{scref} δίνεται από την εταιρία κατασκευής του εναλλάκτη).

$$KHDIES = \frac{1}{1 - 0.012 \cdot (H_a - 10.71) - 0.00275 \cdot (T_a - 298) + 0.00285 \cdot (T_{sc} - T_{scref})} \quad (5.8)$$

Όπου ,

- $H_a [g_{water}/kg_{dry_air}]$ = απόλυτη υγρασία του αέρα περιβάλλοντος
- $T_a [K]$ = θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος
- $T_{sc} [K]$ = θερμοκρασία αέρα μετά το ψυγείο
- $T_{scref} [K]$ = θερμοκρασία σάρωσης αναφοράς

5.3.4.2.6.4 Υπολογισμός Παροχής Μάζας της εκπομπής NOx του καυσαερίου $[g_{NOx}/h]$

$$M_{gas} = Conc(dry) \cdot KHDIES \cdot 0.002053 \cdot VEXHD \quad (5.9)$$

Όπου,

- $Conc(dry) [ppm]$ = συγκέντρωση NOx στο ξηρό καυσαέριο
- $KHDIES$ = διορθωτικός παράγοντας για την υγρασία και την θερμοκρασία. στο ξηρό ρεύμα των NOx
- $VEXHD [m^3/h]$ = παροχή όγκου του ξηρού καυσαερίου

5.3.4.2.6.5 Υπολογισμός Ειδικής Εκπομπής NOx $[g/kWh]$

$$GaSx = \frac{M_{gas}}{P} \quad (5.10)$$

Όπου,

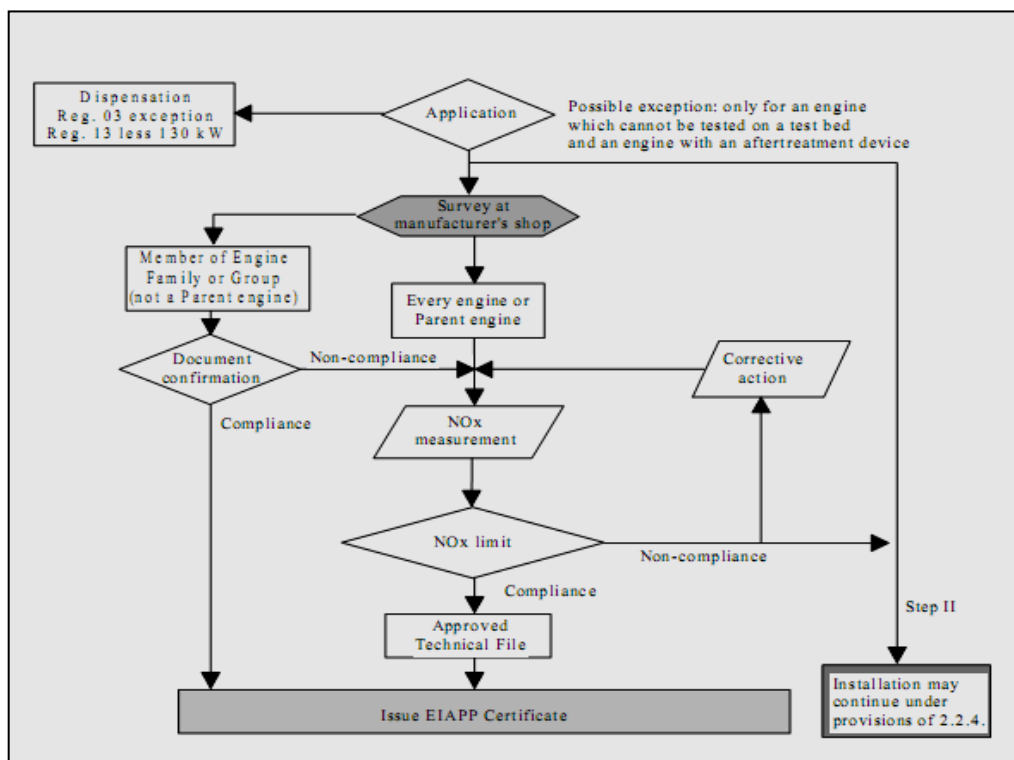
- $M_{gas} [g_{NOx}/h]$ = παροχή μάζας της εκπομπής NOx του καυσαερίου
- $P [kW]$ = Ισχύς κινητήρα κατά την μέτρηση

Μετά τον προσδιορισμό της ειδικής εκπομπής NOx στα διαφορετικά φορτία, χρησιμοποιούμε τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο (5.3.4.2.4) για να

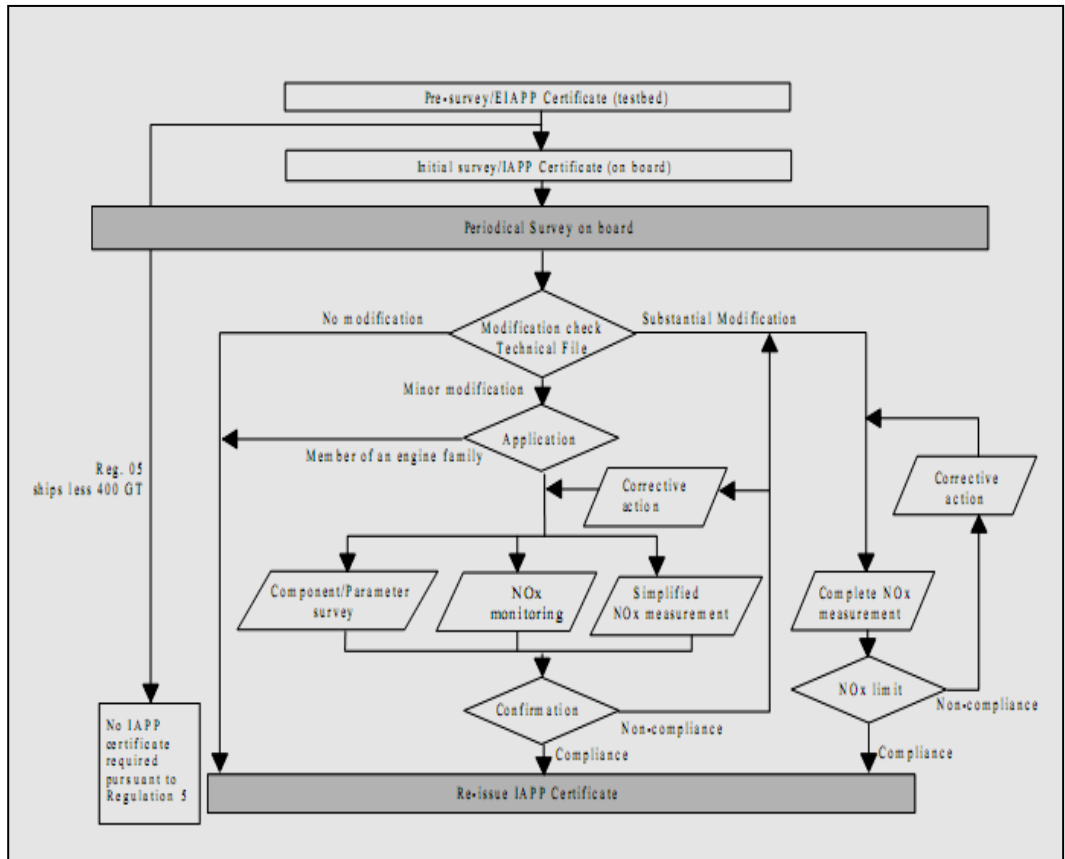
βρούμε τη σταθμισμένη ειδική εκπομπή NOx που αντιπροσωπεύει την μηχανή. Αυτή η τιμή, συγκρίνεται με τα πρότυπα όρια εκπομπών που παρουσιάζονται στο σχήμα, και αποφασίζεται αν η λειτουργία της μηχανής είναι σύμφωνη με τον κανονισμό(13) του Παραρτήματος VI της “MARPOL”.

5.3.5 Σηματική Αναπαράσταση Διαδικασιών για την Επιθεώρηση και την Πιστοποίηση Ναυτικών Κινητήρων Diesel

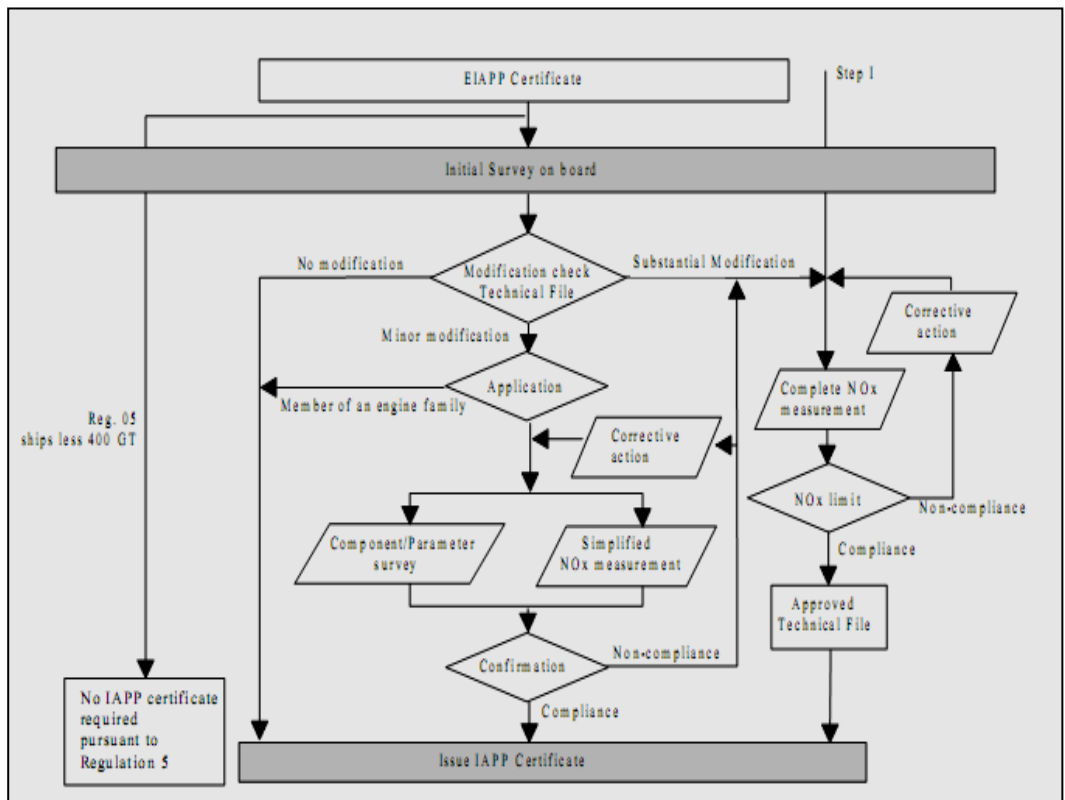
- I. Διαδικασίες ελέγχου κατά την διάρκεια κατασκευής της μηχανής.
- II. Διαδικασίες αρχικής επιθεώρησης και πιστοποίησης στο πλοίο.
- III. Διαδικασίες περιοδικών επιθεωρήσεων στο πλοίο.



Εικόνα 5.6. Διάγραμμα ροής I , Πρωτογενής πιστοποίηση της μηχανής κατά την διάρκεια κατασκευής.



Εικόνα 5.7. Διάγραμμα ροής II, Πρώτη επιθεώρηση της μηχανής στο πλοίο.



Εικόνα 5.8. Διάγραμμα ροής III, Περιοδικές επιθεωρήσεις στο πλοίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΗΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΗ

6.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και της πειραματικής δραστηριότητας του Εργαστηρίου Μηχανών Εσωτερικής Καύσης(M.E.K), του Τομέα Θερμότητας, εκπονήθηκε εκτενής πειραματική διερεύνηση υπό την ευθύνη το Καθηγητή κ. Δημητρίου Χουντάλα, για να αξιολογηθεί η χρήση ηλεκτροχημικών αισθητηρίων στους φορητούς αναλυτές καυσαερίων, ως εναλλακτική λύση έναντι της χρήσης πρότυπων μεθόδων ανάλυσης, που παρουσιάζουν πρακτικές δυσκολίες για μετρήσεις εν πλω. Η εξέταση βασίσθηκε στην ταυτόχρονη μέτρηση των εκπεμπόμενων ρύπων πρότυπου εργαστηριακού κινητήρα, τόσο με τον φορητό αναλυτή όσο και με πρότυπους αναλυτές καυσαερίων του εργαστηρίου, που είναι σύμφωνοι με τις οδηγίες του Παραρτήματος VI της σύμβασης “MARPOL”.

Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα περιγραφθούν συνοπτικά η πειραματική εγκατάσταση, η πειραματική διαδικασία, ενώ θα δοθεί ειδικό βάρος στην επεξεργασία και σύγκριση των μετρήσεων (φορητού και πρότυπων αναλυτών), για να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του φορητού αναλυτή για χρήση σε ναυτικές εφαρμογές.

6.2 Περιγραφή της Πειραματικής Εγκατάστασης

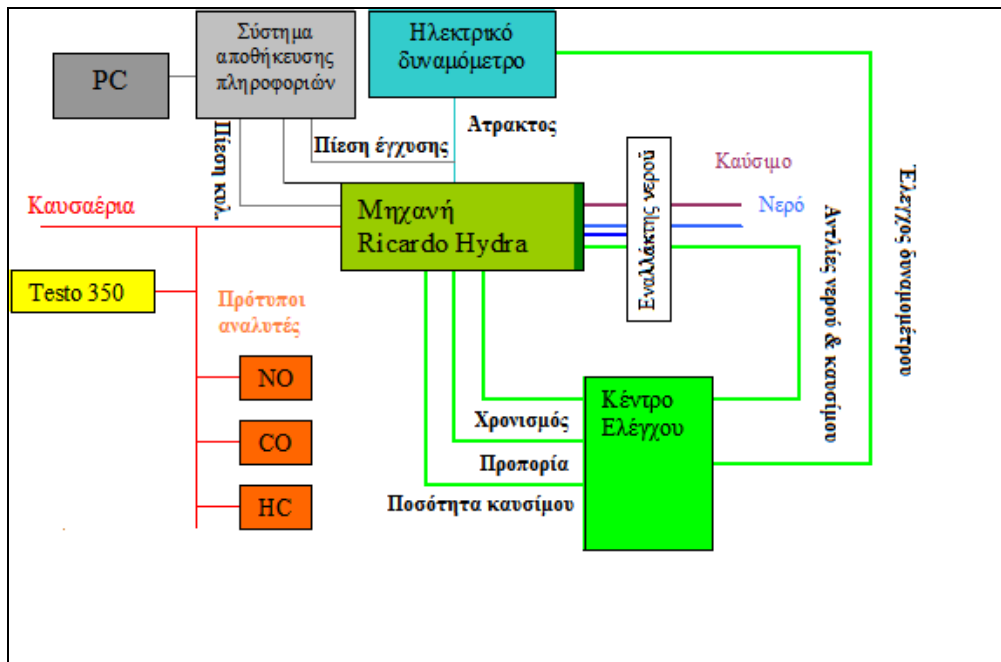
6.2.1 Εργαστηριακή Κλίνη

Για την εργαστηριακή δοκιμή, ο κινητήρας εγκαθίσταται σε ειδική κλίνη. Ο κινητήρας στο σύνδεσμο ισχύος (μετά το στρόφαλο) συνδέεται με ηλεκτρική πέδη(brake), η οποία αφενός απορροφά την ισχύ του κινητήρα (επιβάλλοντας μια αντίσταση στην περιστροφή του), μετατρέποντας την σε θερμική ή ηλεκτρική, και αφετέρου μετρά τη στρεπτική του ροπή(δυναμόμετρο). Ο κινητήρας φέρει πρόσθετες διατάξεις για την παροχή του καυσίμου, του ψυκτικού και του αέρα καθώς και για την απαγωγή των καυσαερίων, έτσι ώστε να είναι δυνατή η υπό φορτίο λειτουργία για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επιπλέον, εγκαταστάθηκαν και πρόσθετα μετρητικά όργανα για την καταγραφή πρόσθετων παραμέτρων.

Στη πειραματική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε σύγχρονη, πλήρως αυτοματοποιημένη κλίνη δοκιμής. Η πέδη (η μηχανή είναι συνδεδεμένη με δυναμόμετρο τύπου “ Mc Clure” DC) είναι εφοδιασμένη με ηλεκτρικούς αισθητήρες, για την παρακολούθηση και τον έλεγχο μια σειράς παραμέτρων, όπως μέτρηση ταχύτητας περιστροφής, στρεπτικής ροπής, που τροφοδοτούν ενδεικτικά όργανα στον πίνακα ελέγχου(control panel), καθώς και ένα ελεγκτή(controller). Με τη βοήθεια του ελεγκτή, η πέδη διατηρεί σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, στην μηχανή συνδέθηκαν και τα πρόσθετα πρότυπα όργανα ανάλυσης καυσαερίων.

Στην Εικόνα (6.1, σελ.92) που ακολουθεί παρουσιάζεται σχηματική διάταξη της πειραματικής εγκατάστασης ,που αποτελείται από:

- Τον πρότυπο μονοκύλινδρο κινητήρα δοκίμων Ricardo/Hydra.
- Το δυναμόμετρο.
- Το όργανο μέτρησης παροχής όγκου καυσίμου.
- Το όργανο παρακολούθησης και καταγραφής της πίεσης κυλίνδρου και έγχυσης.
- Το σύστημα αποθήκευσης πληροφοριών.
- Τον φορητό αναλυτή.
- Τους πρότυπους αναλυτές των συγκεντρώσεων του καυσαερίου.



Εικόνα 6.1. Σχηματική διάταξη της πειραματικής εγκατάστασης.

6.2.2 Περιγραφή του Κινητήρα

Η πειραματική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε σε πειραματική μηχανή, τύπου “Hydra”, της εταιρίας Ricardo-Cussons. Πρόκειται για έναν μονοκύλινδρο, τετράχρονο, φυσικής αναπνοής και υδρόψυκτο κινητήρα που λειτουργεί είτε με σπινθηριστή (ως βενζινοκινητήρας) είτε με άμεση(DI) έγχυση (ως πετρελαιοκινητήρας).

Η χρήση μονοκύλινδρου κινητήρα είναι συνήθη στις εργαστηριακές κλίνες MEK καθώς παρουσιάζει συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των πολυκύλινδρων (όσον αφορά την έρευνα), ως ακολούθως :

- Αποφεύγονται οι διαφορές επιδόσεων (βαθμός συμπίεσεως, χρονισμό βαλβίδων κ.ά.)μεταξύ των κυλίνδρων που οφείλονται σε αναπόφευκτες ανοχές κατασκευής και συναρμολόγησης .
- Αποφεύγεται η ανομοιομορφία του μείγματος καθώς στους πολυκύλινδρους κινητήρες, τόσο στα συστήματα με έγχυση καυσίμου, όσο και στα συστήματα με εξαεριοτή είναι πολύ δύσκολη η σχεδίαση πολλαπλών εισαγωγής που αποδίδουν τον ίδιο λόγο αέρα-καυσίμου σε όλους τους κυλίνδρους (αφορά κυρίως κινητήρες Otto).

- Αποφεύγεται η χρήση μεγαλύτερης άρα και ακριβότερης πέδης για την μελέτη πολυκύλινδρων κινητήρων.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα συνοψίζονται στον Πίνακα (6.1) που ακολουθεί:

Πίνακας 6.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά εργαστηριακής μηχανής.

Τύπος Μηχανής	4-stroke
Διάμετρος κυλίνδρου(mm)	80.26
Διαδρομή εμβόλου (mm)	88.90
Μήκος συνδετικού βάρκρου (mm)	160.0
Βαθμός συμπίεσης	19.81:1
Ανοίγμα βαλβίδας εισαγωγής(IVO)	8 deg – BTDC
Κλείσιμο βαλβίδας εισαγωγής (IVC)	42 deg – ABDC
Ανοίγμα βαλβίδας εξαγωγής (EVO)	60 deg – BBDC
Κλείσιμο βαλβίδας εξαγωγής(EVC)	12 deg – ATDC
Μέγιστη ισχύς	8 kW (3750 rpm)
Μέγιστη ροπή	24 Nm (2400 rpm)
Τύπος αντλίας καυσίμου	Bosch - VE 1/11 F2250 RV12750
Τύπος εγχυτήρα	Bosch - KBEL 88 PV 1 870 005 546

6.2.3 Περιγραφή των Πρότυπων Εργαστηριακών Αναλυτών Καυσαερίου

Το Εργαστήριο Μηχανών Εσωτερικής Καύσης είναι εξοπλισμένο με πρότυπους αναλυτές για την μέτρηση των συγκεντρώσεων του καυσαερίου, που βασίζονται σε πρότυπες αρχές ανάλυσης καυσαερίων, συμβατές με τις οδηγίες του Παραρτήματος VI της σύμβασης “MARPOL 73/78”, οι οποίες έχουν παρουσιαστεί εκτενώς σε άλλο κεφάλαιο(Βλέπε : ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4). Κατά το πείραμα, χρησιμοποιήθηκαν αναλυτές για την μέτρηση οξειδίων του αζώτου (NO_x), άκαυστων υδρογονανθράκων (HC), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Οι αναλυτές παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα (6.2).

Πίνακας 6.2. Συνοπτική παρουσίαση πρότυπων αναλυτών του εργαστηρίου.

Ρύπος	Κατασκευαστής	Τύπος	Αρχή Λειτουργίας
NO _x	Signal	4000 Series	Χημικοφωταύγειας(CLA)
HC	Ratfish	RS55	Ανίχνευση Ιονισμού Φλόγας(F.I.D)
CO	Signal	7200 Series	Επιλεκτικής Απορρόφησης της Υπέρυθρης Ακτινοβολίας(NDIR)
CO/CO ₂	SICK/ΜΑΙΗΑΚ	S710	Επιλεκτικής Απορρόφησης της Υπέρυθρης Ακτινοβολίας(NDIR)

6.3 Περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας

6.3.1 Σημεία Λειτουργίας κατά την μέτρηση

Κατά την πειραματική διερεύνηση, οι μετρήσεις διεξάχθηκαν σε διάφορα σημεία λειτουργίας της μηχανής, για να αξιολογηθεί η ακρίβεια του φορητού αναλυτή σε όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής. Έτσι πραγματοποιήθηκαν δώδεκα (12) μετρήσεις σε δύο (2) διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, που αντιστοιχούν σε υψηλό (~9.0 Nm) και χαμηλό (~17.5 Nm) φορτίο για την ίδια ταχύτητα περιστροφής (Βλέπε : Πίνακα 6.3). Συγκεκριμένα, το χαμηλό φορτίο αντιστοιχεί στο 40% του πλήρους φορτίου, ενώ το υψηλό στο 80% αντίστοιχα.

Πίνακας 6.3. Σημεία λειτουργίας πειραματικής διαδικασίας.

Αριθμός Μετρήσεων No.	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Ροπή (Nm)
M1	1000	8.90
M2	1000	17.2
M3	1250	8.95
M4	1250	17.50
M5	1500	9.30
M6	1500	17.50
M7	1750	9.30
M8	1750	17.50
M9	2000	9.50
M10	2000	17.50
M11	2500	9.50
M12	2500	17.60

6.3.2 Μετρήσεις των Παραμέτρων του Κινητήρα

Κατά την διάρκεια των μετρήσεων, μετρήθηκαν οι ακόλουθες παράμετροι (Βλέπε : Πίνακα 6.4, σελ.95) :

- Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα (rpm)
- Ροπή κινητήρα (Nm)
- Κατανάλωση καυσίμου(kg/h)
- Θερμοκρασία αέρα εισόδου(°C)
- Θερμοκρασία ψυκτικού ύδατος(°C)
- Θερμοκρασία λιπαντικού λαδιού(°C)
- Ογκομετρική παροχή αέρα(m³/h)

Πίνακας 6.4. Παράμετροι μηχανής κατά την πειραματική διαδικασία.

No.	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Ροπή (Nm)	Χρόνος* κατανάλωσης	Κατανάλωση καυσίμου (kg/h)	Θερμοκρασία (°C)			
					Αέρα	Λαδιού	Νερού	Καυσαερίου
M1	1000	8.90	8'6''	0,31	31.5	80	77	184.0
M2	1000	17.20	5'2''	0,50	32.9	83	81	275.0
M3	1250	8.95	6'50''	0,37	32.2	83	78	200.4
M4	1250	17.50	4'14''	0,59	31.5	83	79	296.0
M5	1500	9.30	5'50''	0,43	30.8	82	80	207.5
M6	1500	17.50	3'42''	0,68	30.6	82	80	297.0
M7	1750	9.30	5'3''	0,50	30.2	82	80	213.0
M8	1750	17.50	3'11''	0,79	30.1	82	79	299.0
M9	2000	9.50	4'18''	0,58	30.1	83	80	221.0
M10	2000	17.50	2'47''	0,90	30.4	83	80	184.0
M11	2500	9.50	3'29	0,72	30	82	82	275.0
M12	2500	17.60	2'9''	1,17	30.2	83	82	200.0

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η κατανάλωση του καυσίμου (kg/h) προσδιορίστηκε με την ογκομετρική μέθοδο. Η ογκομετρική μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του χρόνου* που κάνει η μηχανή να καταναλώσει συγκεκριμένο όγκο καυσίμου, το οποίο βρίσκεται σε σωλήνα συγκεκριμένου όγκου. Έτσι διαιρώντας τον όγκο του μετρητικού σωλήνα με το χρόνο που χρειάστηκε να καταναλωθεί, προσδιορίζεται η παροχή όγκου της κατανάλωσης (lt/m³). Αν στην συνέχεια πολλαπλασιαστεί η παροχή όγκου με την πυκνότητα του καυσίμου, προκύπτει η ζητούμενη παροχή μάζας του καυσίμου.

6.3.3 Μετρήσεις Συγκεντρώσεων Καυσαερίου

Όπως αναφέρθηκε, ο φορητός αναλυτής και οι πρότυποι αναλυτές καυσαερίου που είναι εγκατεστημένοι στο εργαστήριο, πραγματοποίησαν παράλληλες μετρήσεις για την συλλογή πληροφοριών, σχετικά με τις συγκεντρώσεις των συστατικών του καυσαερίου. Με τους αναλυτές μετρήθηκαν οι ακόλουθοι ρύποι (Βλέπε: Πίνακα 6.5, σελ 96 & Πίνακα 6.6, σελ.96).

Πίνακας 6.5. Αέριοι Ρύποι και Αναλυτές.

Φορητός Αναλυτής	NO(wet)	CO ₂	CO	O ₂
Πρότυποι Αναλυτές	NO(wet)	CO ₂	CO	-

Πίνακας 6.6. Συγκεντρώσεις αέριων εκπομπών κατά την πειραματική διαδικασία.

No.	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	Ροπή (Nm)	Μέτρηση Εκπομπών					
			NO (ppm)		CO (ppm)		CO ₂ (%)	O ₂ (%)
			Signal	Φορ.Αν.	Signal	Φορ.Αν.	Φορ.Αν.	Φορ.Αν.
M1	1000	8.90	1320	1230	298	297	5.14	14.22
M2	1000	17.20	1885	1797	510	573	8.34	9.8
M3	1250	8.95	1075	1048	220	205	4.78	14.66
M4	1250	17.50	1795	1745	480	494	7.9	10.36
M5	1500	9.30	912	874	170	150	4.7	14.88
M6	1500	17.50	1670	1620	198	165	7.38	11.15
M7	1750	9.30	705	668	220	152	4.49	15.15
M8	1750	17.50	1345	1312	183	157	7.27	11.27
M9	2000	9.50	575	551	185	173	4.58	15.04
M10	2000	17.50	980	938	212	198	7.13	11.48
M11	2500	9.50	330	303	260	232	4.46	15.13
M12	2500	17.6	560	542	290	306	7.32	11.2

6.4 Ανάλυση αξιολόγησης μετρήσεων

6.4.1 Εισαγωγή

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν με το φορητό αναλυτή συγκρίνονται με τις μετρήσεις των πρότυπων αναλυτών, που περιγράφηκαν στην παράγραφο (4.3). Η αξιολόγηση όσον αφορά στο μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) γίνεται με απευθείας σύγκριση των δύο μετρούμενων τιμών. Για την αξιολόγηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και οξυγόνου (O₂), αυτές συγκρίνονται με τις τιμές που προσδιορίζονται από τη χημεία της καύσης. Συγκεκριμένα, αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες τιμές της παροχής καυσίμου και του εισερχόμενου αέρα. Η λύση αυτή προτιμήθηκε διότι θεωρήθηκε ότι έχει υψηλότερη ακρίβεια

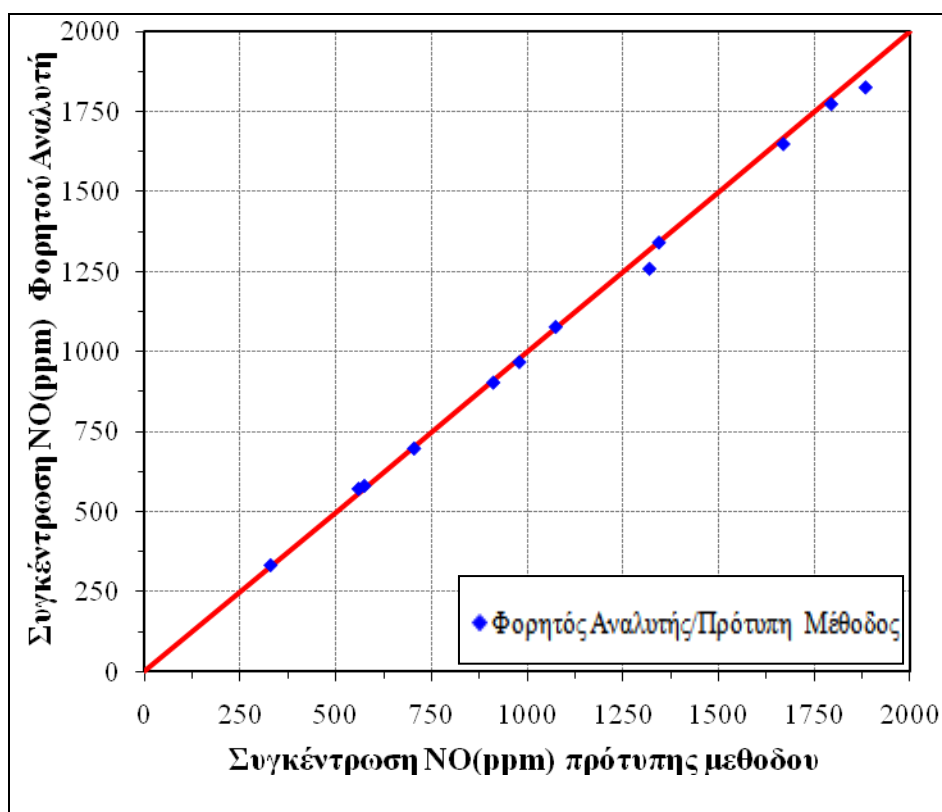
Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των δύο διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης (πρότυπης και φορητού αναλυτή), θα υπολογισθεί το σφάλμα (απόλυτο και σχετικό) και θα αξιολογηθούν οι μετρήσεις. Επιπρόσθετα, θα αξιολογήσουμε την επίδραση του σφάλματος σε μία σειρά σημαντικών παραμέτρων,

όπως είναι η παροχή αέρα($ma[kg/s]$), ο λόγος ισοδυναμίας αέρα (λ_a) και η ειδική εκπομπή οξειδίων του αζώτου (g_{NOx}/kWh).

6.4.2 Εκπομπές Μονοξειδίου του Αζώτου (NO)

6.4.2.1 Σύγκριση Τιμών Συγκεντρώσεων NO

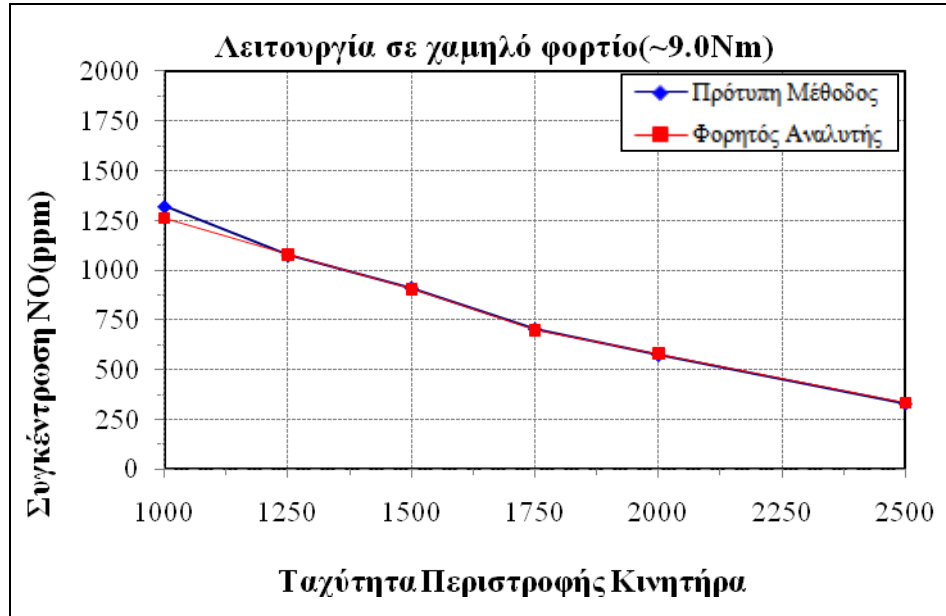
Στο Διάγραμμα (6.1), παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του φορητού αναλυτή και του πρότυπου αναλυτή NO(μέθοδος της χημικοφωταύγειας (CLA)). Κατά την ιδανική περίπτωση, οι τιμές του διαγράμματος θα έπρεπε να ανήκουν στην ευθεία που διχοτομεί τους άξονες, δηλαδή όταν οι τιμές θα ήταν ίσες. Στην πράξη, αυτές εκφράζονται με την ευθεία $y=0.9684x+21.013$, με υψηλή γραμμική συσχέτιση $R^2=0.999$, γεγονός που μας δείχνει ότι οι διαφορετικές μετρήσεις έχουν μια στενή σχέση, φανερώνοντας πολύ καλή σύμπτωση.



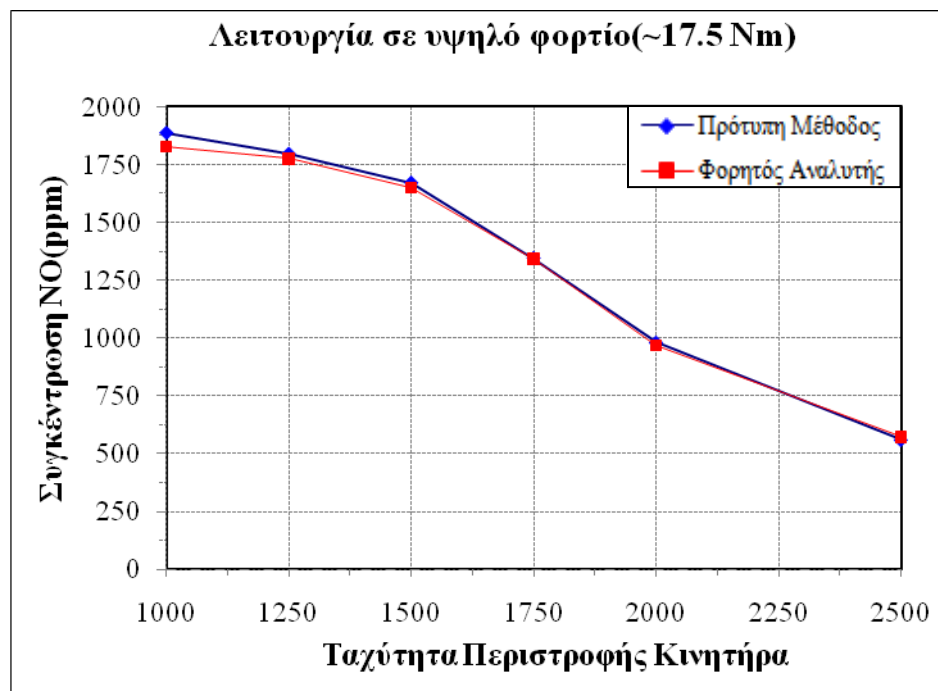
Διάγραμμα 6.1 Σύγκριση συγκεντρώσεων NO από τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων.

Στα Διαγράμματα (6.2, σελ.98) και (6.3, σελ.98) δίνεται η σύγκριση για τις τιμές των συγκεντρώσεων των δύο μεθόδων, συναρτήσει των στροφών και στις δύο συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή στο χαμηλό και στο υψηλό φορτίο αντίστοιχα. Στόχος αυτής της γραμμικής απεικόνισης είναι να διαπιστώσουμε κατά πόσο οι μετρήσεις των δύο

μεθόδων συσχετίζονται και εάν η συσχέτισή τους επηρεάζεται από το σημείο λειτουργίας. Όπως βλέπουμε και στα διαγράμματα που ακολουθούν, η σύμπτωση μεταξύ των δύο μετρήσεων είναι πολύ καλή και δεν παρουσιάζει κάποια διαφοροποίηση με το φορτίο και τη ταχύτητα περιστροφής.



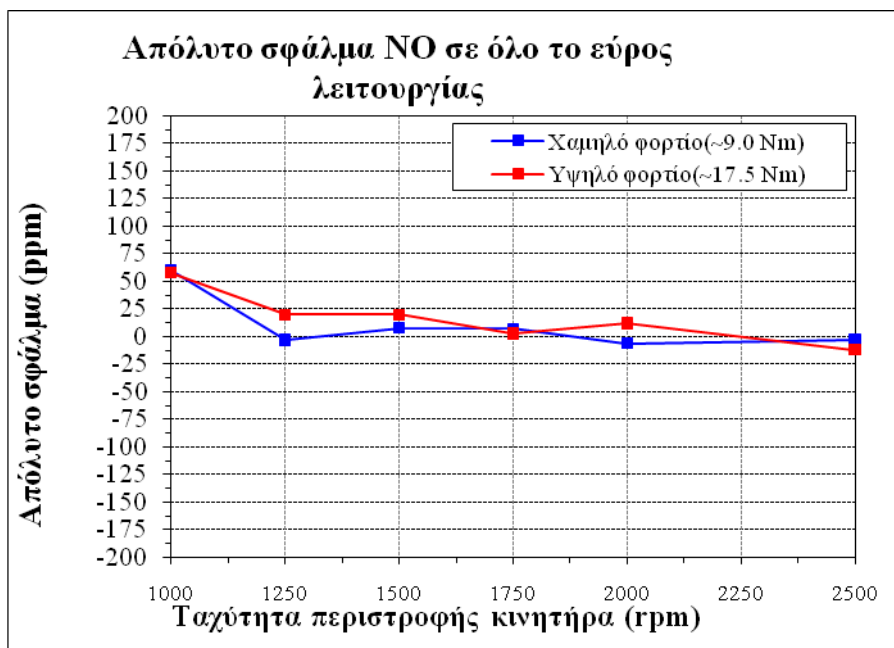
Διάγραμμα 6.2. Σύγκριση των συγκεντρώσεων NO από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε χαμηλό φορτίο.



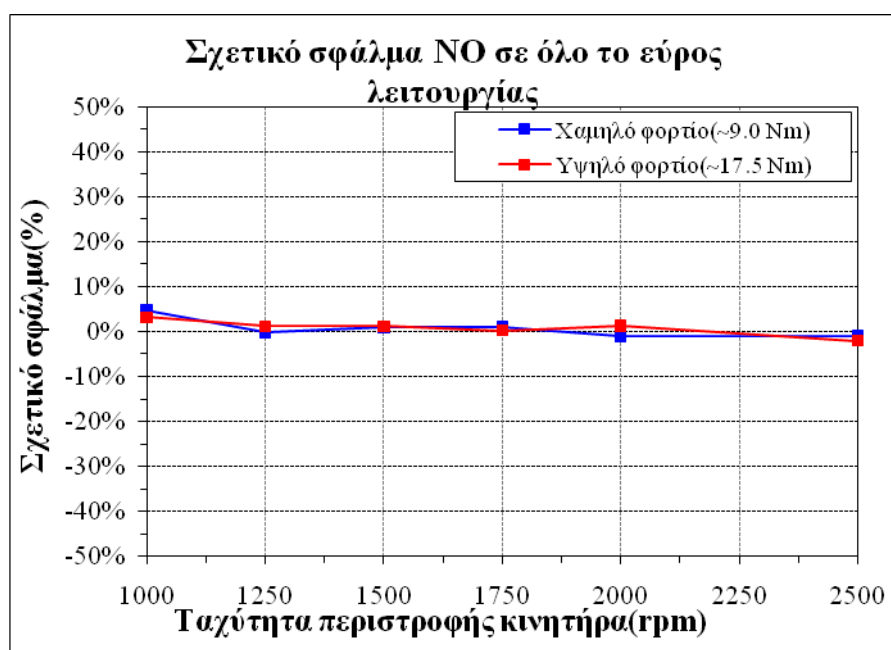
Διάγραμμα 6.3. Σύγκριση των συγκεντρώσεων NO από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή στο υψηλό φορτίο.

6.4.2.2 Απόλυτο και Σχετικό Σφάλμα Συγκεντρώσεων NO

Στα Διαγράμματα (6.4) , (6.5) παρουσιάζονται το απόλυτο και σχετικό σφάλμα των δύο διαφορετικών μετρήσεων της συγκέντρωσης NO (πρότυπη μέθοδος και φορητού αναλυτή). Παρατηρούμε ότι και τα δύο σφάλματα είναι μικρά για όλο το εύρος της λειτουργίας του κινητήρα, ενώ εύκολα προκύπτει ότι η μέση τιμή του απόλυτου σφάλματος είναι +9.5ppm, ενώ του σχετικού σφάλματος +1.11%.



Διάγραμμα 6.4. Απόλυτο σφάλμα μετρήσεων NO μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.

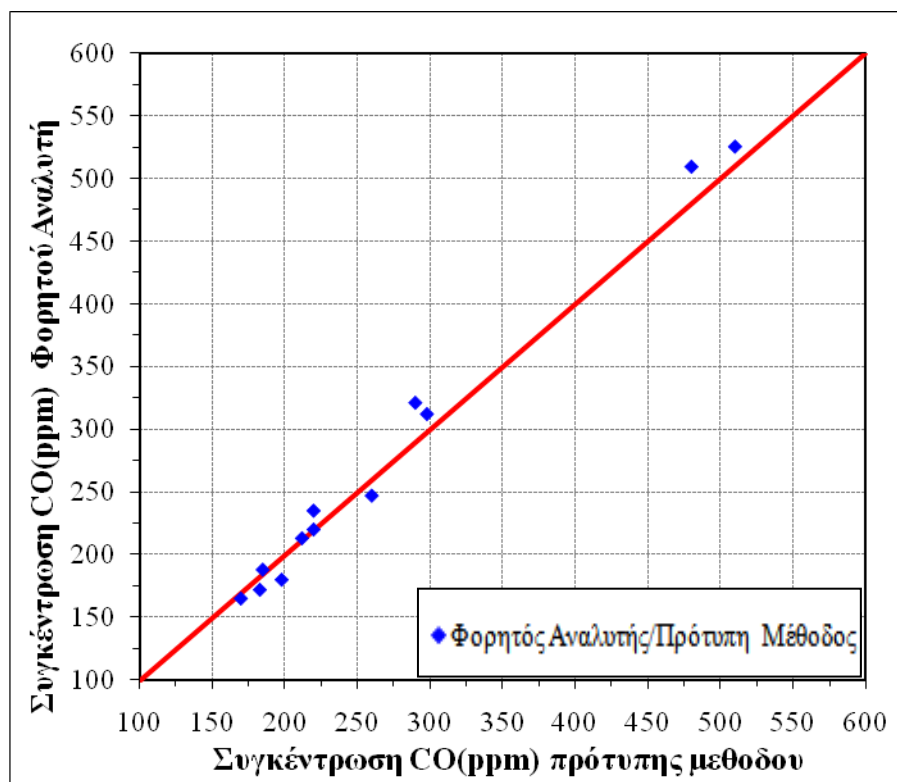


Διάγραμμα 6.5. Σχετικό σφάλμα μετρήσεων NO μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.

6.4.3 Εκπομπή Μονοξειδίου του Άνθρακα (CO)

6.4.3.1 Σύγκριση Τιμών Συγκεντρώσεων CO

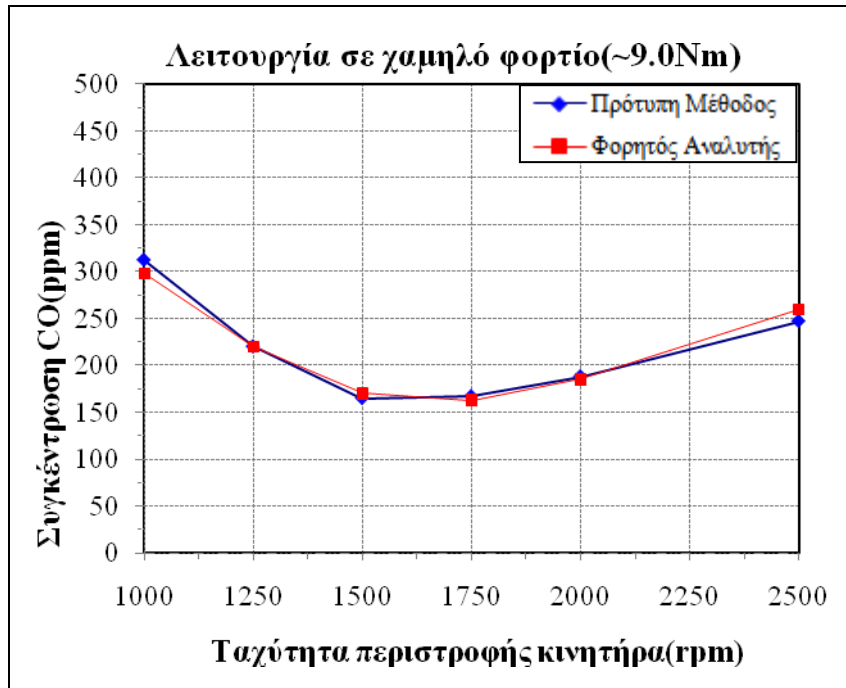
Στο Διάγραμμα (6.6), παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του φορητού αναλυτή και του πρότυπου αναλυτή CO (μέθοδος της επιλεκτικής αναρρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας(NDIR). Κατά την ιδανική περίπτωση, οι τιμές του διαγράμματος θα έπρεπε να ανήκουν στην ευθεία που διχοτομεί τους άξονες, δηλαδή όταν οι τιμές θα ήταν ίσες. Στην πράξη, αυτές εκφράζονται με την ευθεία $y=1.0891x-18.874$, με υψηλή γραμμική συσχέτιση $R^2=0.990$, γεγονός που φανερώνει πολύ καλή σύμπτωση.



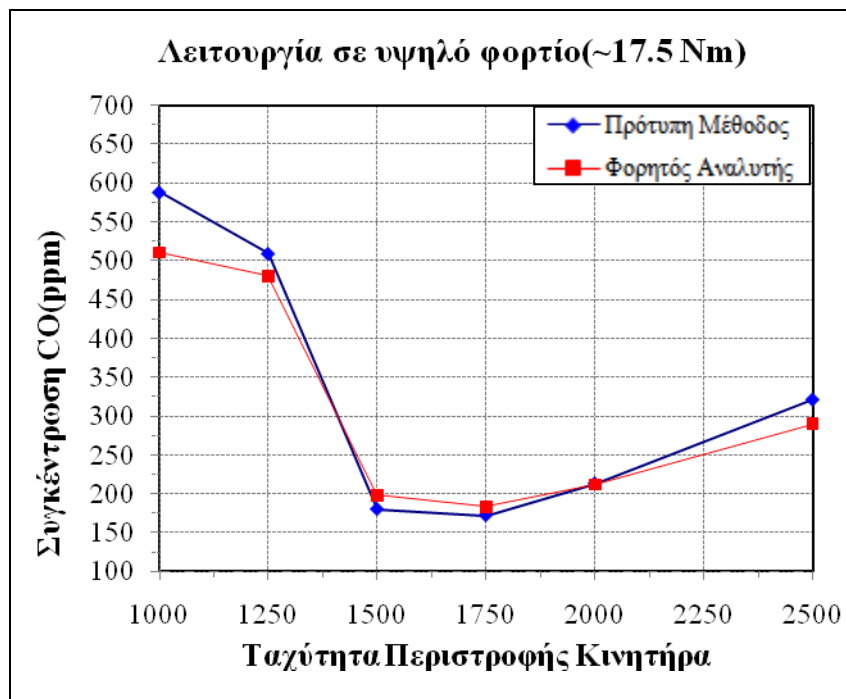
Διάγραμμα 6.6. Σύγκριση συγκεντρώσεων CO από τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων.

Στα Διαγράμματα (6.7, σελ.101) , (6.8, σελ.101) δίνεται η σύγκριση για τις τιμές των συγκεντρώσεων των δύο μεθόδων συναρτήσει των στροφών και στις δύο συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή στο χαμηλό και υψηλό φορτίο αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα (6.7) διαπιστώνεται ότι οι τιμές των δύο μετρήσεων στο χαμηλό φορτίο λειτουργίας δε διαφοροποιούνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Παρόμοια τάση παρουσιάζουν και οι μετρήσεις στο υψηλό φορτίο λειτουργίας (Βλέπε : Διάγραμμα 6.8, σελ.101), εκτός των μετρήσεων στις χαμηλές και υψηλές στροφές (1000rpm και

2500rpm αντίστοιχα), στις οποίες διαπιστώνεται μετρητικό σφάλμα. Κύρια πιθανή πηγή του σφάλματος είναι η διακύμανση των μετρούμενων τιμών στις χαμηλές και υψηλές ταχύτητες περιστροφής στο υψηλό φορτίο επειδή ο κινητήρας είναι μονοκύλινδρος.



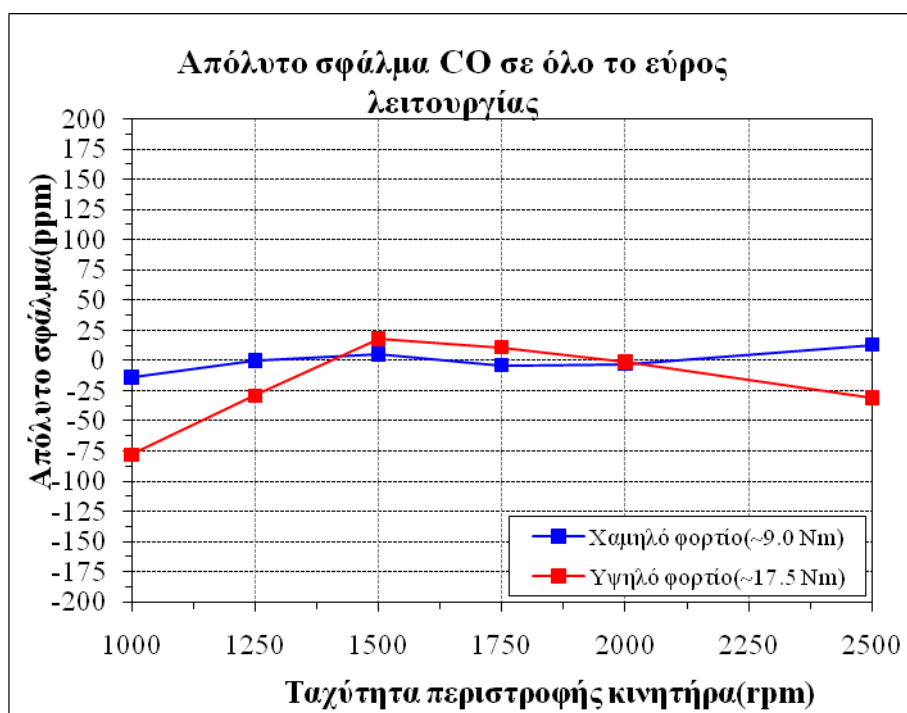
Διάγραμμα 6.7. Σύγκριση των συγκεντρώσεων CO από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε χαμηλό φορτίο.



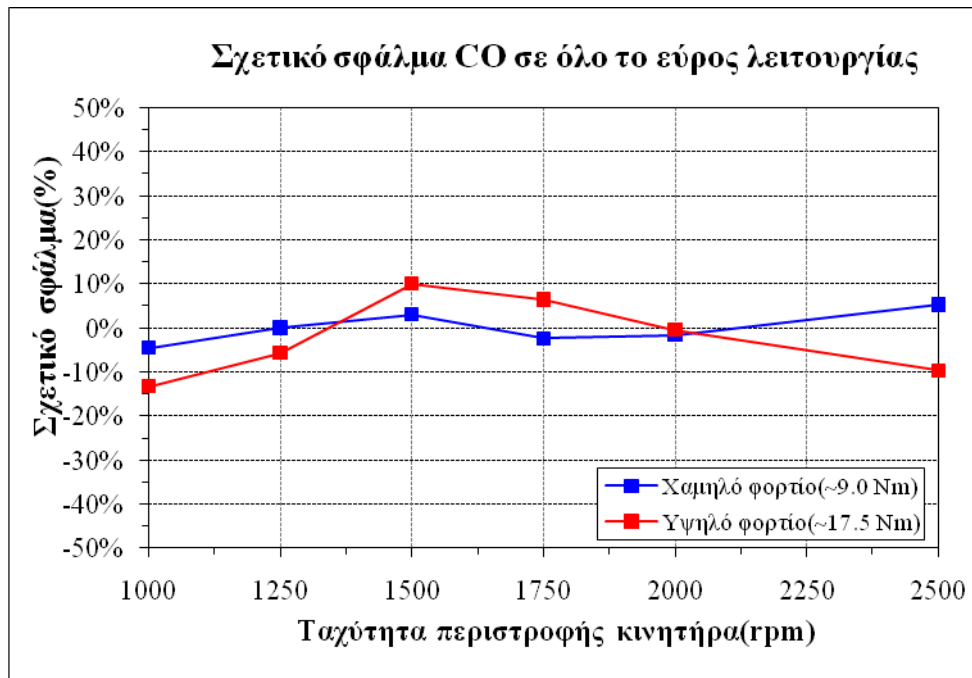
Διάγραμμα 6.8. Σύγκριση των συγκεντρώσεων CO από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή στο υψηλό φορτίο.

6.4.3.2 Απόλυτο και Σχετικό Σφάλμα Συγκεντρώσεων CO

Στα Διαγράμματα (6.9) , (6.10, σελ.103) παρουσιάζονται το απόλυτο και σχετικό σφάλμα των δύο διαφορετικών μετρήσεων της συγκέντρωσης CO (πρότυπη μέθοδος και φορητού αναλυτή). Παρατηρείται ότι στο χαμηλό φορτίο λειτουργίας (μπλέ γραμμή), το απόλυτο και σχετικό σφάλμα των μετρήσεων είναι μικρό, σε όλες τις ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα. Αντίθετα, ενώ το σφάλμα (απόλυτο και σχετικό) στο υψηλό φορτίο λειτουργίας (κόκκινη γραμμή) παρουσιάζει πολύ μικρές διακυμάνσεις στις μεσαίες ταχύτητες περιστροφής(1250-2250rpm), διαπιστώνεται σημαντικό σφάλμα στην χαμηλή και υψηλή ταχύτητα περιστροφής (1000 rpm και 2500 rpm αντίστοιχα), που δικαιολογείται από τη χρήση μονοκύλινδρου κινητήρα. Η μέση τιμή του απόλυτου σφάλματος και του σχετικού σφάλματος υπολογίζεται στα +10ppm και +3.55% αντίστοιχα.



Διάγραμμα 6.9. Απόλυτο σφάλμα μετρήσεων CO μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.



Διάγραμμα 6.10. Σχετικό σφάλμα μετρήσεων CO μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.

6.4.4 Εκτίμηση Συγκεντρώσεων O₂ και CO₂ με την Υπολογιστική Μέθοδο

6.4.4.1 Γενική Περιγραφή της Υπολογιστικής Μεθόδου για την Εκτίμηση του O₂ και του CO₂

Όπως έχει αναφερθεί, οι συγκεντρώσεις οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των ενδείξεων του αναλυτή, εκτιμήθηκαν από την χημεία της καύσης, μέθοδος που είναι πολύ ακριβής. Αυτή η εκτίμηση αναφέρεται ως πρότυπη μέθοδος για την σύγκριση με τον φορητό αναλυτή, όσον αφορά το οξυγόνο(O₂) και το διοξείδιο του άνθρακα(CO₂).

Η εκτίμηση των συγκεντρώσεων του O₂ και του CO₂ βασίζεται σε αξιόπιστη και διαδεδομένη υπολογιστική. Συγκεκριμένα, μετρώντας την κατανάλωση του καυσίμου(kg/h) και την παροχή αέρα καύσης(kg/h), υπολογίζεται ο λόγος ισοδυναμίας αέρα($\lambda = AF/AF_{st}$ =πραγματικός λόγος αέρα-καυσίμου /στοιχειομετρικό). Έτσι, γνωρίζοντας το λόγο ισοδυναμίας αέρα(λ), τη στοιχειομετρική σύνθεση του καυσίμου και χρησιμοποιώντας την σύνθεση του καυσίμου (βλέπε παράγραφο 2.2), εκτιμούνται οι συγκεντρώσεις CO₂ και O₂ της πρότυπης μεθόδου.

6.4.4.2 Εκπομπή Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

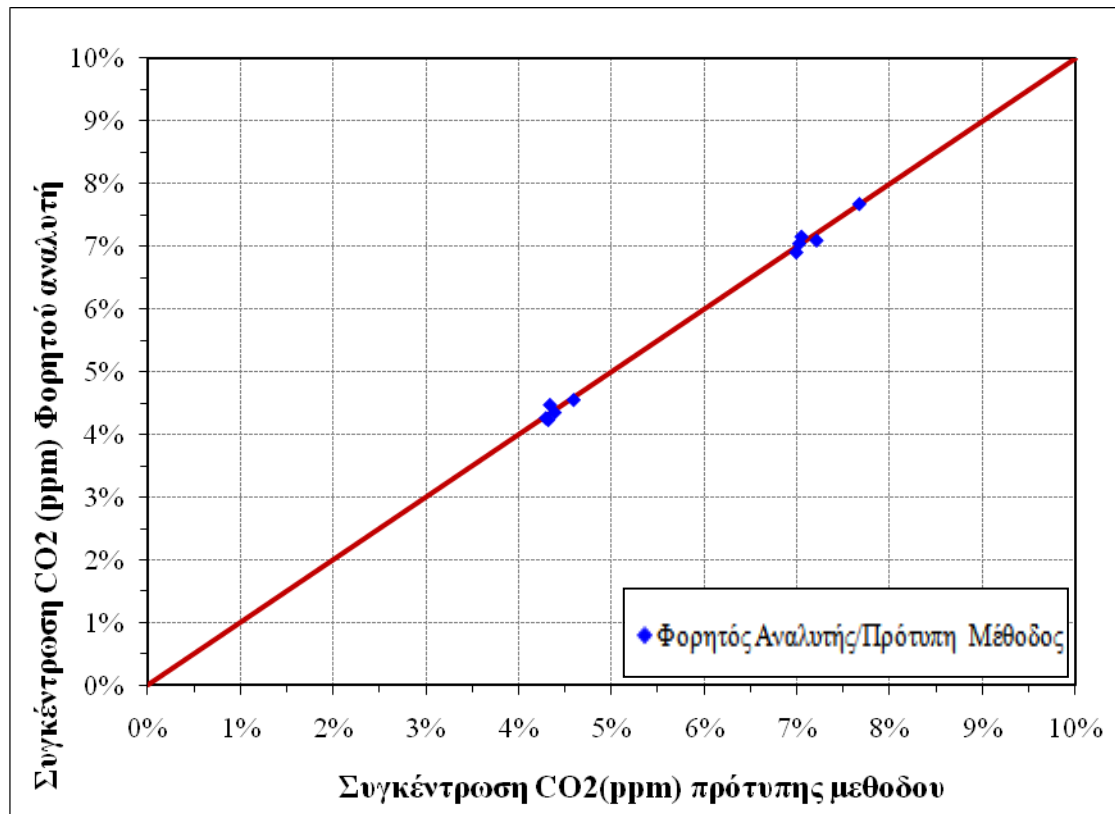
6.4.4.2.1 Σύγκριση Τιμών Συγκεντρώσεων CO₂

Σύμφωνα με την χημεία της καύσης, εκτιμούμε τις παρακάτω τιμές για την συγκέντρωση του CO₂ (Βλέπε : Πίνακα 6.7).

Πίνακας 6.7. Συγκεντρωτικός πίνακας εκτιμήσεων πρότυπης μεθόδου και μετρήσεων φορητού αναλυτή για CO₂.

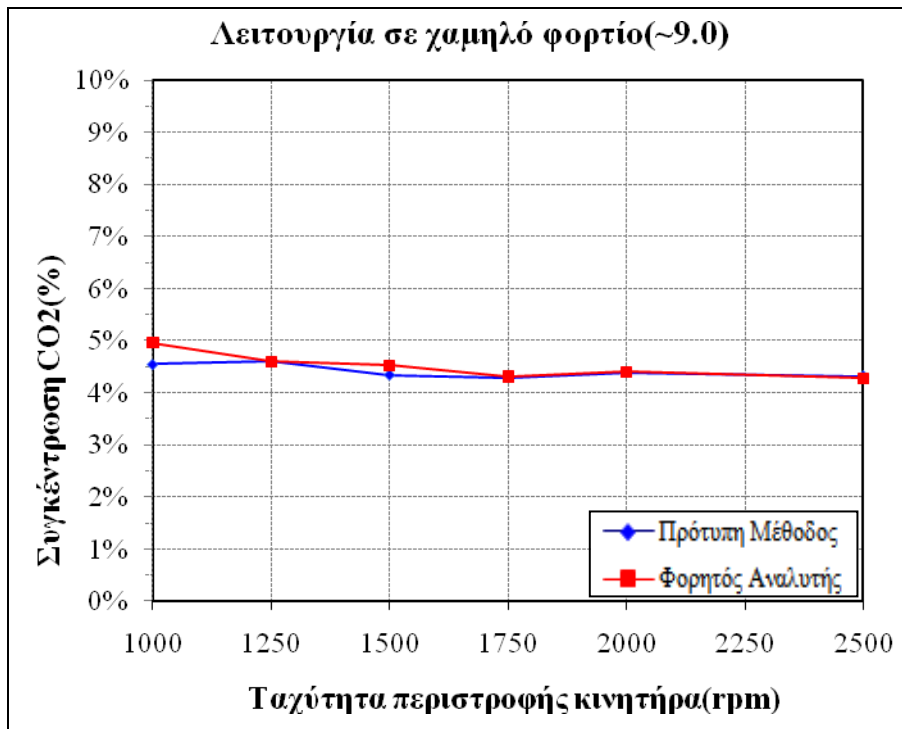
No.	Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα(rpm)	Πρότυπη μέθοδος CO₂(%)	Φορητός Αναλυτής CO₂(%)
M1	1000	4.54	5.14
M2	1000	8.58	8.34
M3	1250	4.60	4.78
M4	1250	7.68	7.90
M5	1500	4.34	4.70
M6	1500	7.05	7.38
M7	1750	4.30	4.49
M8	1750	7.03	7.27
M9	2000	4.39	4.58
M10	2000	7.00	7.13
M11	2500	4.32	4.46
M12	2500	7.21	7.32

Στο Διάγραμμα (6.11, σελ.105), παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του φορητού αναλυτή και της πρότυπης μεθόδου (χημεία της καύσης). Κατά την ιδανική περίπτωση, οι τιμές του διαγράμματος θα έπρεπε να ανήκουν στην ευθεία που διχοτομεί τους άξονες, δηλαδή όταν οι τιμές θα ήταν ίσες. Στην πράξη, αυτές εκφράζονται με την ευθεία $y=1.022x-0.0007$, με υψηλή γραμμική συσχέτιση $R^2=0.997$, γεγονός που δείχνει μια πολύ καλή σύμπτωση. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι η απόκλιση της μέτρησης M1 πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι ο κινητήρας είναι μονοκύλινδρος.

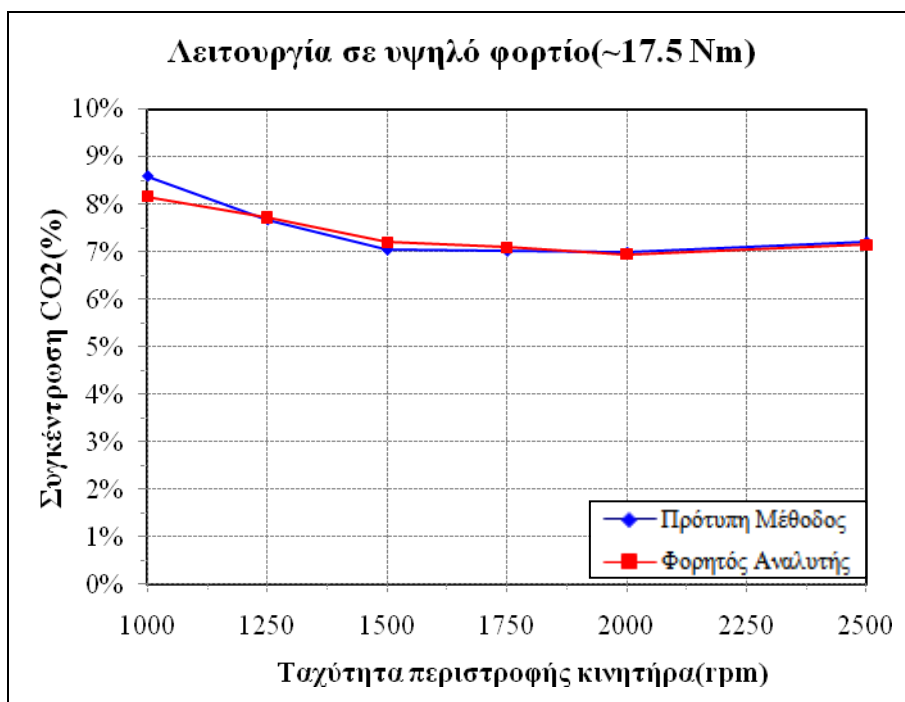


Διάγραμμα 6.11. Σύγκριση συγκεντρώσεων CO₂ από τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων

Στα Διαγράμματα (6.12, σελ.106) και (6.13, σελ.106) δίνεται η σύγκριση για τις τιμές των συγκεντρώσεων του CO₂ των δύο μεθόδων, συναρτήσει των στροφών και στις δύο συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή στο χαμηλό και στο υψηλό φορτίο αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι, η σύμπτωση μεταξύ των δύο μετρήσεων είναι πολύ καλή και εν γένει, δεν παρουσιάζει κάποια διαφοροποίηση με το φορτίο και τη ταχύτητα περιστροφής. Εξαιρέση αποτελούν οι μετρήσεις που αντιστοιχούν στην χαμηλή ταχύτητα περιστροφής(1000rpm), οι οποίες παρουσιάζουν διακύμανση εξαιτίας της μονοκύλινδρης φύσης του κινητήρα.



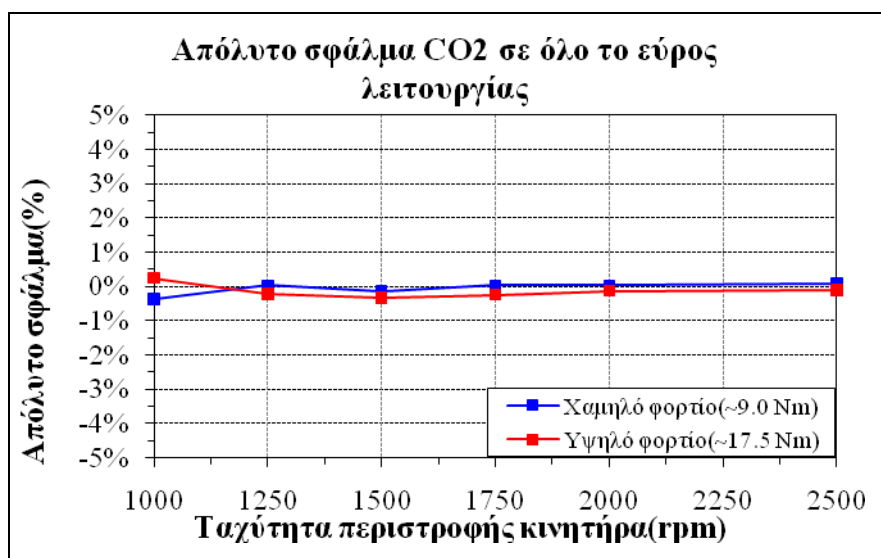
Διάγραμμα 6.12. Σύγκριση των συγκεντρώσεων CO₂ από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή.



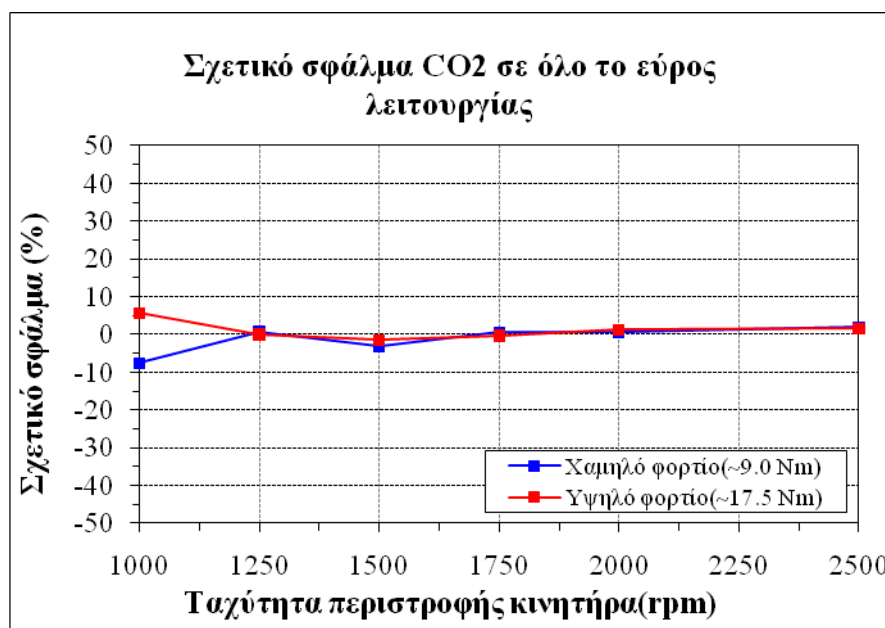
Διάγραμμα 6.13. Σύγκριση των συγκεντρώσεων CO₂ από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε υψηλό φορτίο.

6.4.4.2 Απόλυτο και Σχετικό σφάλμα συγκεντρώσεων CO₂

Στα Διαγράμματα (6.14), (6.15) παρουσιάζονται το απόλυτο και σχετικό σφάλμα των δύο διαφορετικών εκτιμήσεων της συγκέντρωσης CO₂ (πρότυπη μέθοδος και φορητό αναλυτή). Παρατηρούμε ότι και τα δύο σφάλματα είναι πολύ μικρά (κοντά στο μηδέν) για όλο το εύρος της λειτουργίας του κινητήρα, εντούτοις εντοπίζεται (και στα δύο διαγράμματα) μετρητικό σφάλμα στην χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, το οποίο οφείλεται στη διακύμανση της συγκέντρωσης λόγω της μονοκύλινδρης φύσης του κινητήρα που είναι πιο μεγάλη στο υψηλό φορτίο. Τέλος, υπολογίζεται ότι η μέση τιμή του απόλυτου σφάλματος είναι +0.06% και του σχετικού σφάλματος +1.19%.



Διάγραμμα 6.14. Απόλυτο σφάλμα μετρήσεων CO₂ μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.



Διάγραμμα 6.15. Σχετικό σφάλμα μετρήσεων CO₂ μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.

6.4.4.3 Εκπομπή Οξυγόνου (O₂)

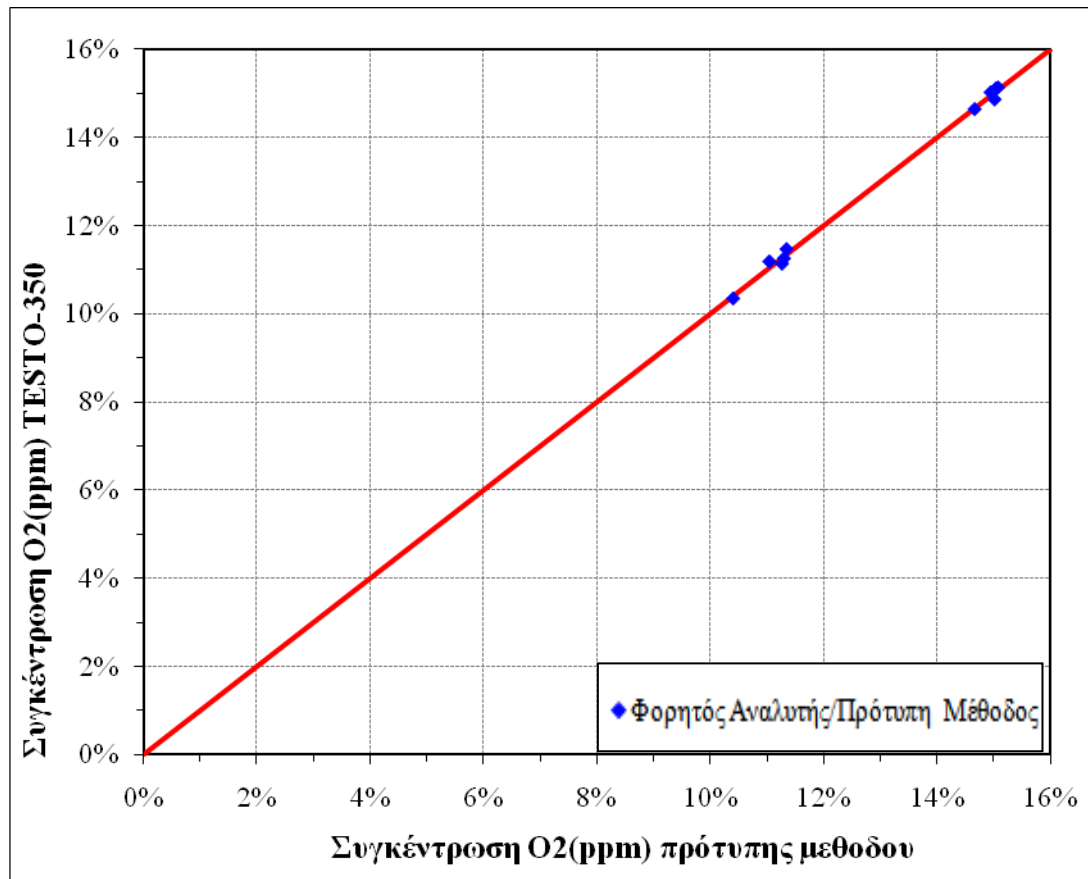
6.4.4.3.1 Σύγκριση Τιμών Συγκεντρώσεων O₂

Σύμφωνα με την χημεία της καύσης, εκτιμούμε τις παρακάτω τιμές για την συγκέντρωση του O₂ (Βλέπε : Πίνακα 6.8).

Πίνακας 6.8. Συγκεντρωτικός πίνακας εκτιμήσεων πρότυπης μεθόδου και μετρήσεων φορητού αναλυτή για O₂

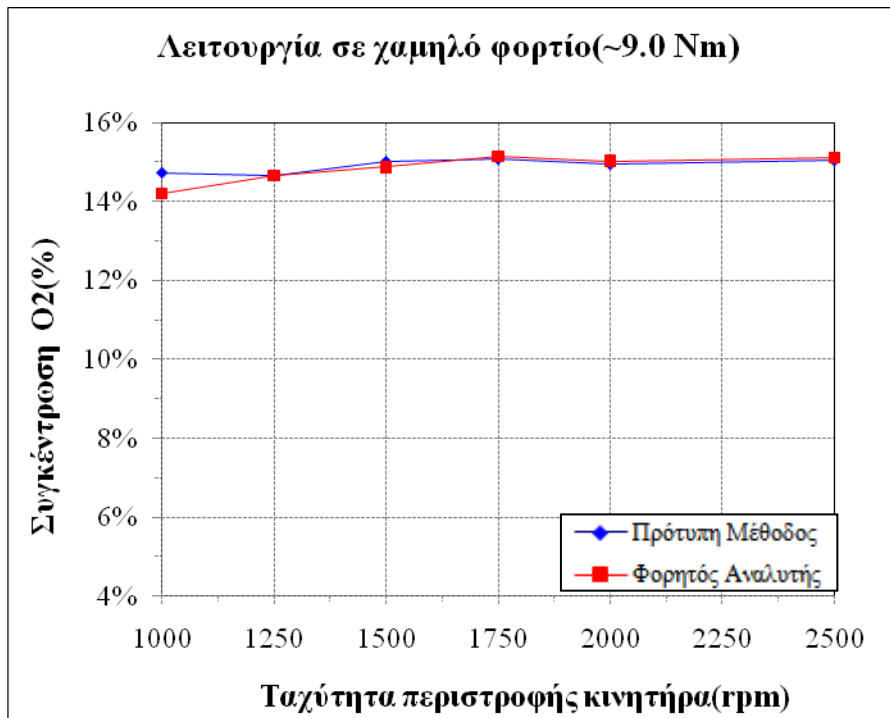
No.	Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα(gpm)	Πρότυπη μέθοδος CO ₂ (%)	Φορητός αναλυτής CO ₂ (%)
M1	1000	14.72	14.22
M2	1000	9.14	9.8
M3	1250	14.65	14.66
M4	1250	10.40	10.36
M5	1500	15.01	14.88
M6	1500	11.26	11.15
M7	1750	15.07	15.15
M8	1750	11.29	11.27
M9	2000	14.94	15.04
M10	2000	11.34	11.48
M11	2500	15.03	15.13
M12	2500	11.04	11.2

Στο Διάγραμμα (6.16, σελ.109) παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του φορητού αναλυτή και της πρότυπης μεθόδου (χημεία της καύσης). Κατά την ιδανική περίπτωση, οι τιμές του διαγράμματος θα έπρεπε να ανήκουν στην ευθεία που διχοτομεί τους άξονες, δηλαδή όταν οι τιμές θα ήταν ίσες. Στην πράξη, αυτές εκφράζονται με την ευθεία $y=1.022x-0.0007$, με υψηλή γραμμική συσχέτιση $R^2=0.997$, γεγονός που φανερώνει καλή σύμπτωση.

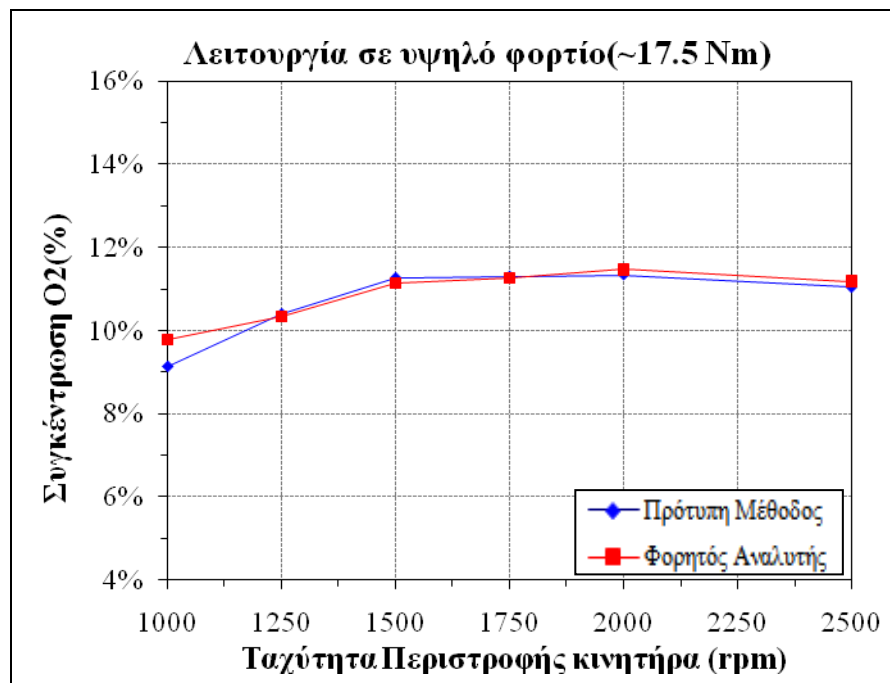


Διάγραμμα 6.16. Σύγκριση συγκεντρώσεων O₂ από τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων.

Στα Διαγράμματα (6.17, σελ.110), (6.18, σελ.110) δίνεται η σύγκριση για τις τιμές των συγκεντρώσεων των δύο μεθόδων εκτίμησης του O₂, συναρτήσει των στροφών και στις δύο συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή στο χαμηλό και υψηλό φορτίο. Παρατηρείται ότι, η σύμπτωση μεταξύ των δύο μετρήσεων είναι πολύ καλή και εν γένει δεν παρουσιάζει κάποια διαφοροποίηση με το φορτίο και τη ταχύτητα περιστροφής. Εξαιρέση αποτελούν οι μετρήσεις που αντιστοιχούν στην χαμηλή ταχύτητα περιστροφής (1000rpm), οι οποίες παρουσιάζουν διακύμανση εξαιτίας της μονοκύλινδρης φύσης του κινητήρα.



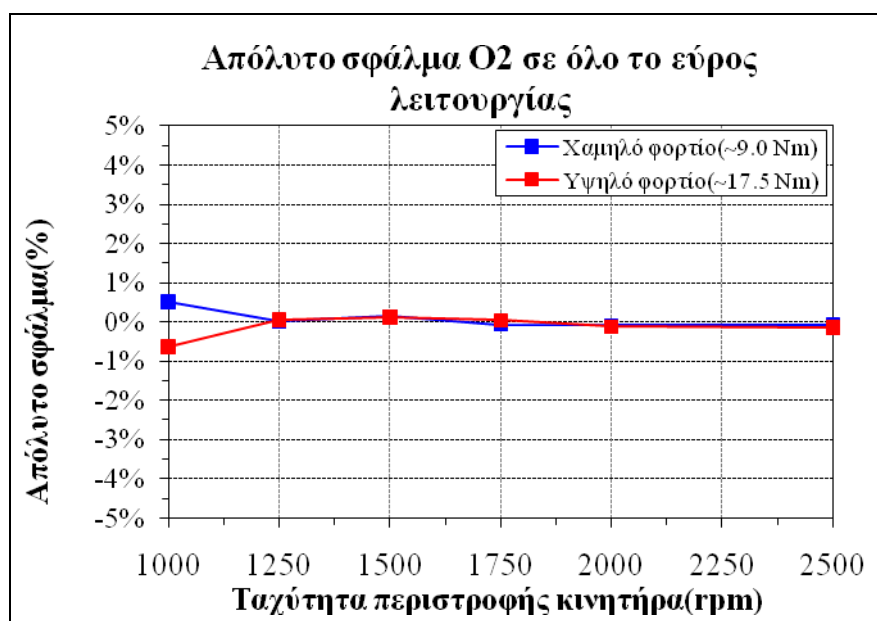
Διάγραμμα 6.17. Σύγκριση των συγκεντρώσεων O₂ από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε χαμηλό φορτίο



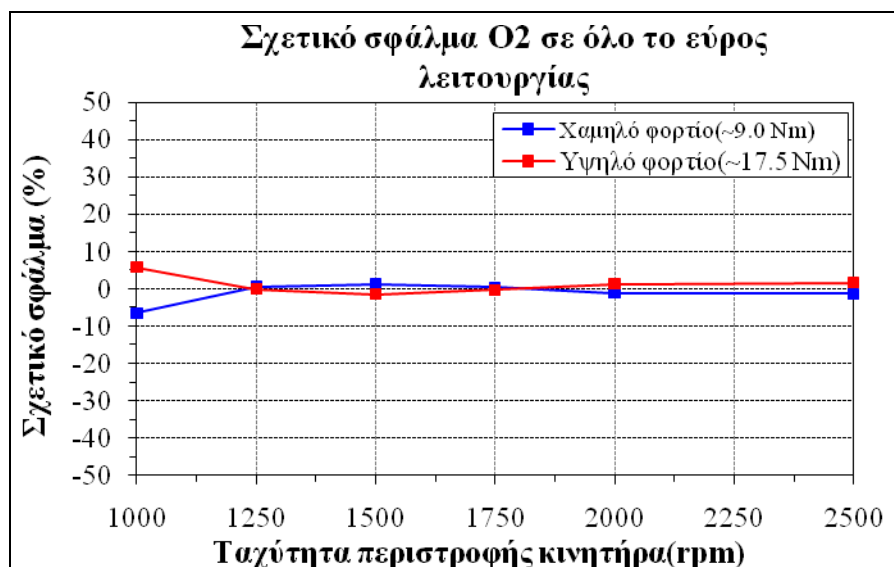
Διάγραμμα 6.18. Σύγκριση των συγκεντρώσεων O₂ από τον πρότυπο αναλυτή και το φορητό αναλυτή σε υψηλό φορτίο

6.4.4.3.2 Απόλυτο και Σχετικό σφάλμα συγκεντρώσεων O₂

Στα Διαγράμματα (6.19), (6.20) παρουσιάζονται το απόλυτο και σχετικό σφάλμα των δύο διαφορετικών μετρήσεων της συγκέντρωσης O₂ (πρότυπη μέθοδος και φορητού αναλυτή). Παρατηρούμε ότι και τα δύο σφάλματα είναι πολύ μικρά για όλο το εύρος της λειτουργίας του κινητήρα. Εντούτοις, εντοπίζεται (και στα δύο διαγράμματα) μετρητικό σφάλμα στην χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, το οποίο οφείλεται στη διακύμανση της συγκέντρωσης λόγω της μονοκύλινδρης φύσης του κινητήρα που είναι πιο μεγάλη στο υψηλό φορτίο. Τέλος, υπολογίζεται ότι η μέση τιμή του απόλυτου σφάλματος είναι +0.09% και του σχετικού σφάλματος +0.71%.



Διάγραμμα 6.19. Απόλυτο σφάλμα μετρήσεων O₂ μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.



Διάγραμμα 6.20. Σχετικό σφάλμα μετρήσεων O₂ μεταξύ της πρότυπης μεθόδου και του φορητού αναλυτή.

6.4.5 Επίδραση του Σφάλματος Μέτρησης των Συγκεντρώσεων (O_2 , CO_2 , NO , CO) στην Εκτίμηση του Λόγου Ισοδυναμίας Αέρα, της Παροχής Αέρα Καύσης και της Ειδικής Εκπομπή NO_x .

Στο πλαίσιο της εκτενούς αξιολόγησης του φορητού αναλυτή, υπολογίσθηκαν τα ακόλουθα σημαντικά μεγέθη, τα οποία είναι :

- ο λόγος ισοδυναμίας αέρα(λα)
- η παροχή αέρα καύσης(kg/h)
- η ειδική εκπομπή NO_x (g/kWh)

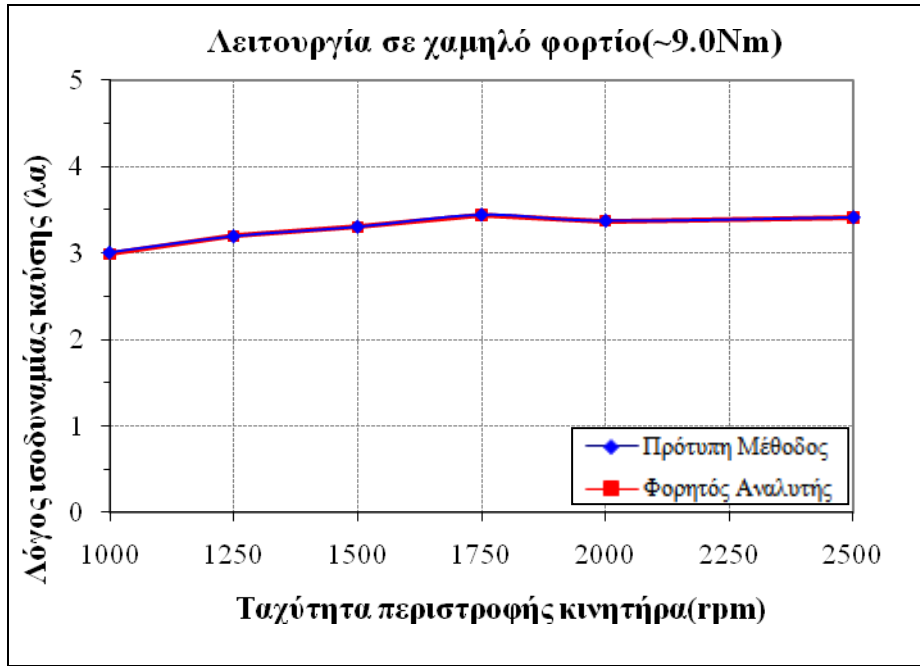
Για τον υπολογισμό των τριών αυτών μεγεθών χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία της υποενότητας (2.2.1) για το προσδιορισμό του λόγου αέρα καύσης και συνεπώς της παροχής αέρα καύσης (για δεδομένη σύνθεση και κατανάλωση καυσίμου και συγκέντρωση καυσαερίου) καθώς και η Μέθοδος 2, Ισορροπίας Άνθρακα/οξυγόνου, όπως αυτή αναπτύχθηκε στην παράγραφο (5.3.4.2.5.1), για τον υπολογισμό της ειδικής εκπομπής οξειδίων του αζώτου. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι η τιμή της ειδικής εκπομπής NO_x , που αντιστοιχεί στην πρότυπη μέθοδο, εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας τις τιμές των συγκεντρώσεων (NO , CO , CO_2 , O_2) της πρότυπης μεθοδολογίας, ενώ η αντίστοιχη τιμή του φορητού αναλυτή εκτιμήθηκε από τις μετρήσεις του. Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτουν για κάθε μέγεθος δύο τιμές, οι οποίες αντιστοιχούν στις μετρήσεις του φορητού αναλυτή και σ' αυτές των πρότυπων αναλυτών για το NO , CO και της πρότυπης μεθοδολογίας για το O_2 , CO_2 όπως έχει αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους. Οι τιμές των μεγεθών παρουσιάζονται στο κάτωθι πίνακα (Βλέπε : Πίνακα 6.9, σελ.113), ενώ στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται σχετικά διαγράμματα .

Πίνακας 6.9. Συγκεντρωτικός πίνακας των τεσσάρων μεγεθών όπως υπολογίσθηκαν στα σημεία λειτουργίας του κινητήρα.

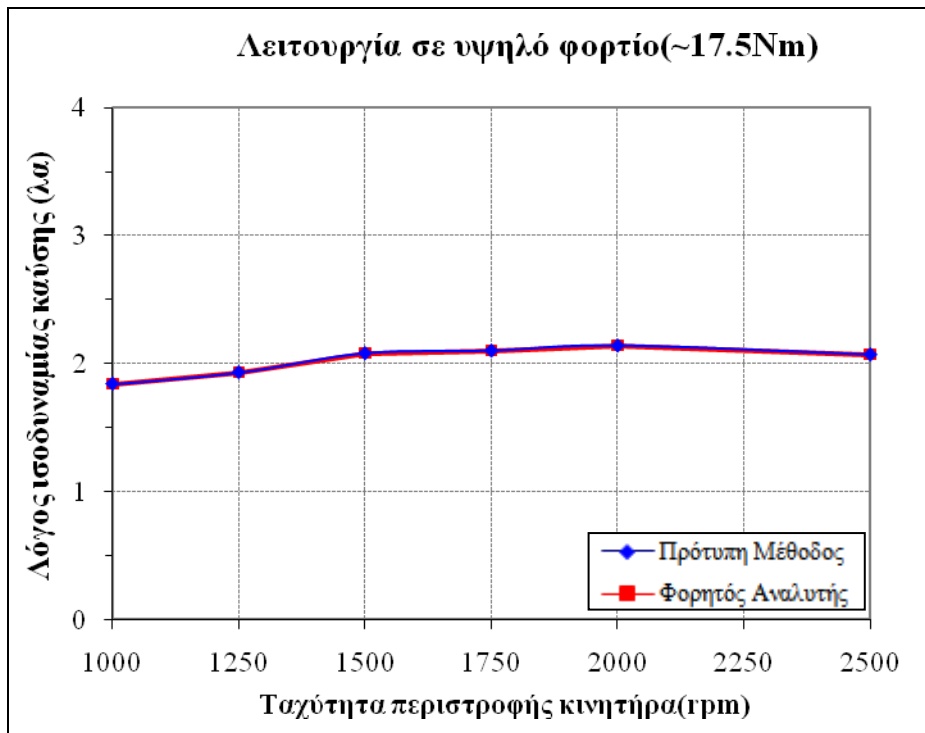
No.	ΠΡΟΤΥΠΗ ΜΕΘΟΔΟΣ			ΦΟΡΗΤΟΣ ΑΝΑΛΥΤΗΣ		
	Λόγος αέρα (λα)	Παροχή αέρα καύσης (kg/h)	Ειδική εκπομπή NOx (g/kWh)	Λόγος αέρα (λα)	Παροχή αέρα καύσης (kg/h)	Ειδική εκπομπή NOx (g/kWh)
M1	3.01	13.38	28.34	2.99	13.39	29.36
M2	1.84	13.19	19.41	1.84	13.21	20.09
M3	3.20	16.91	23.53	3.20	16.92	25.01
M4	1.93	16.49	18.61	1.93	16.50	19.10
M5	3.31	20.48	19.46	3.30	20.48	20.99
M6	2.08	20.35	17.75	2.08	20.36	18.12
M7	3.45	24.66	15.40	3.44	24.64	16.53
M8	2.10	23.87	14.42	2.10	23.88	15.40
M9	3.38	28.38	12.64	3.37	28.36	13.50
M10	2.14	27.79	10.57	2.14	27.79	11.08
M11	3.42	35.42	7.39	3.41	35.39	7.74
M12	2.07	34.82	5.95	2.07	34.82	6.03

6.4.5.1 Λόγος Ισοδυναμίας Αέρα [λα]

Στα Διαγράμματα (6.21, σελ.114) και (6.22, σελ.114) που ακολουθούν απεικονίζεται ο λόγος ισοδυναμίας που υπολογίζεται με βάση είτε με τις μετρήσεις του φορητού αναλυτή, είτε με τις εκτιμήσεις της πρότυπης μεθόδου. Παρατηρείται ότι οι τιμές του (λα) και στις δύο περιπτώσεις συσχετίζονται πολύ καλά σε όλα τα σημεία λειτουργίας του κινητήρα που εξετάστηκαν, παρουσιάζοντας πολύ καλή ακρίβεια.



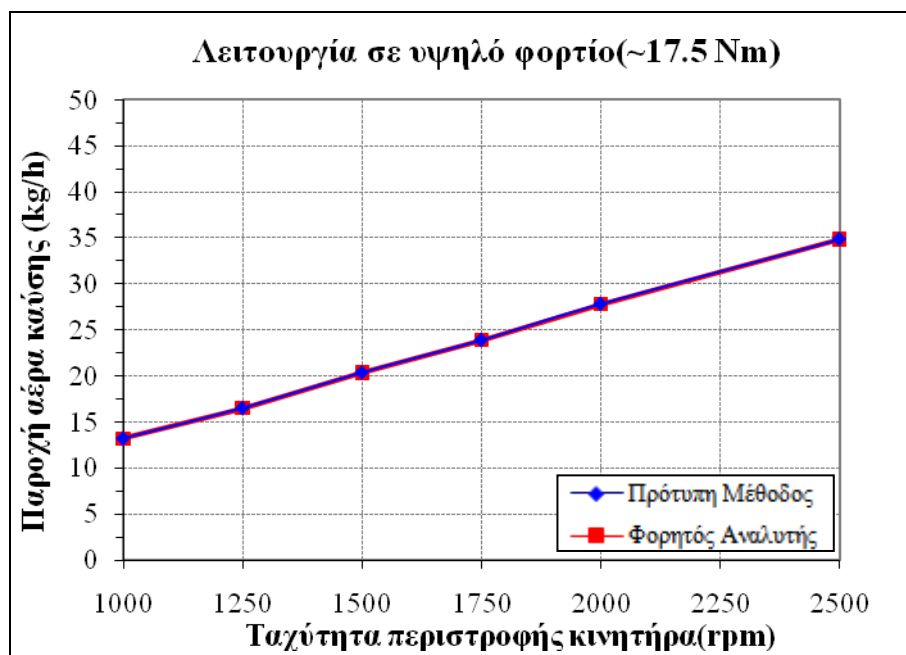
Διάγραμμα 6.21. Λόγος ισοδυναμίας αέρα(λa) για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε χαμηλό φορτίο.



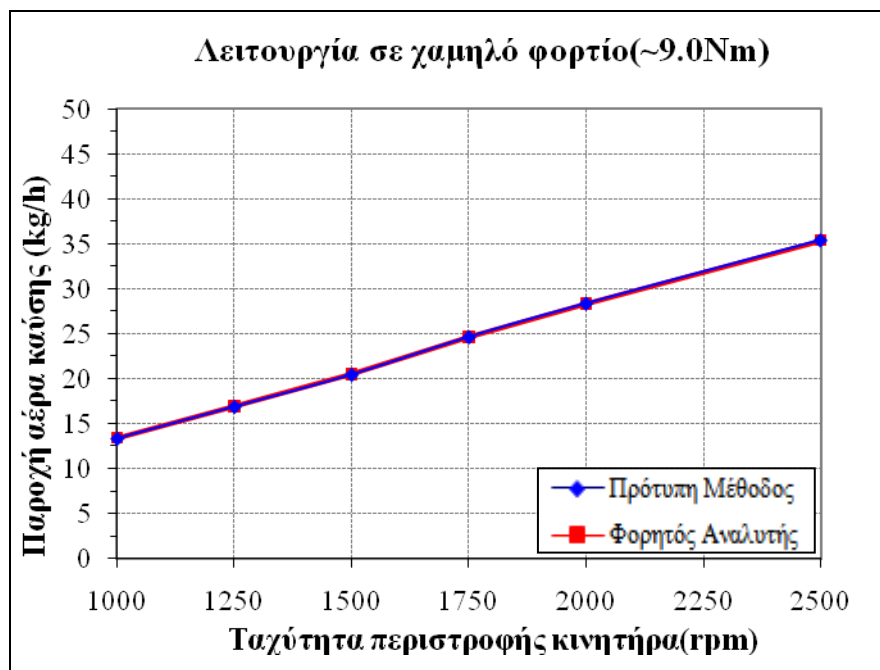
Διάγραμμα 6.22. Λόγος ισοδυναμίας αέρα(λa) για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε υψηλό φορτίο.

6.4.5.2 Παροχή Αέρα Καύσης [kg / h]

Στα Διαγράμματα (6.23) και (6.24) που ακολουθούν απεικονίζεται η παροχή αέρα καύσης που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του αναλυτή και αυτές της πρότυπης μεθόδου. Παρατηρείται ότι οι τιμές της παροχής και στις δύο περιπτώσεις συσχετίζονται πολύ καλά σε όλα τα σημεία λειτουργίας του κινητήρα που εξετάστηκαν, παρουσιάζοντας και πολύ καλή ακρίβεια.



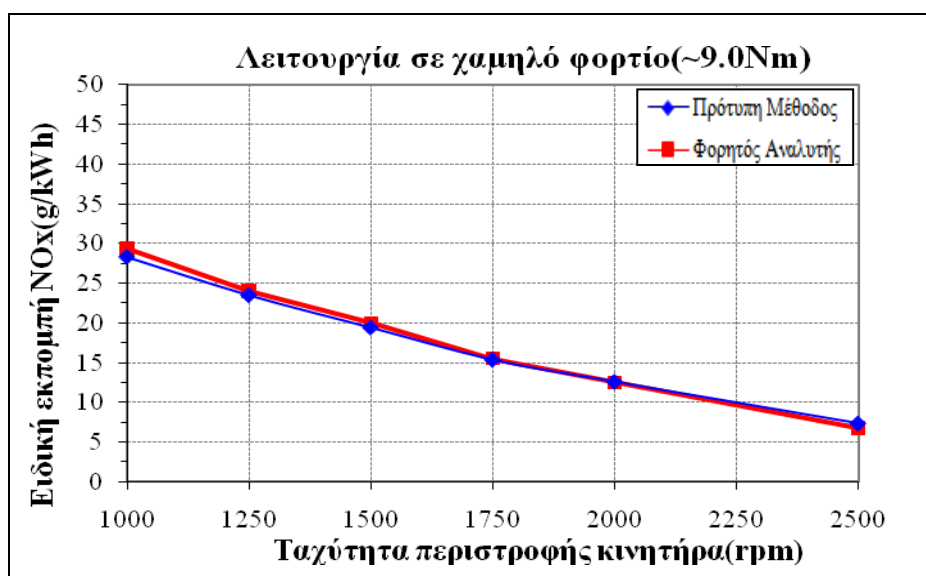
Διάγραμμα 6.23. Η παροχή αέρα καύσης (kg/h) για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε χαμηλό φορτίο.



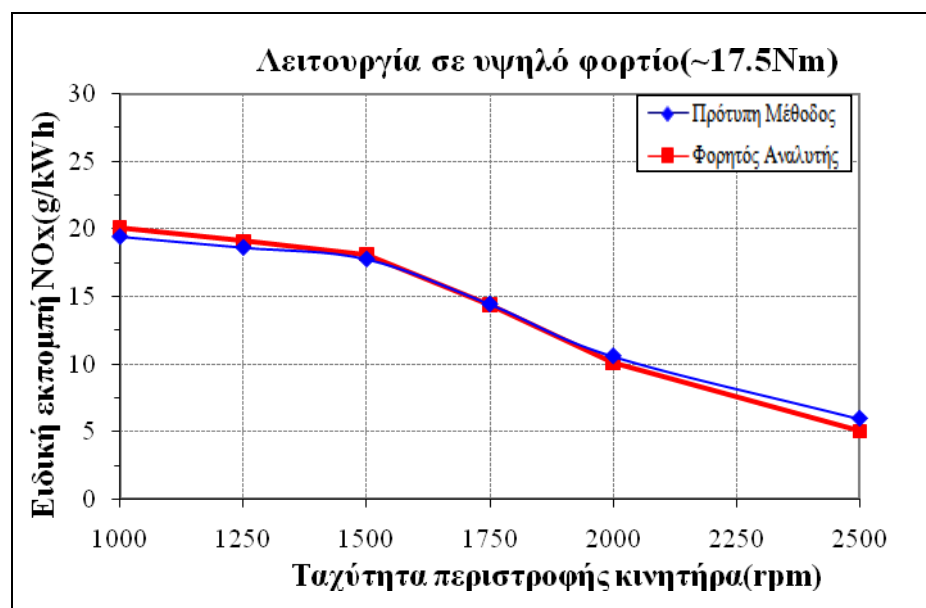
Διάγραμμα 6.24. Η παροχή αέρα καύσης (kg/h) για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε υψηλό φορτίο.

6.4.5.3 Ειδική Εκπομπή NO_x [g/kWh]

Στα Διαγράμματα (6.25) και (6.26) που ακολουθούν απεικονίζεται η ειδική εκπομπή NO_x που υπολογίζεται με βάση τις μετρήσεις του αναλυτή και τις εκτιμήσεις της πρότυπης μεθόδου. Παρατηρείται ότι οι τιμές της ειδικής εκπομπής και στις δύο περιπτώσεις συσχετίζονται ικανοποιητικά σε όλα τα σημεία λειτουργίας του κινητήρα που εξετάστηκαν. Οι μικρές διαφορές που παρουσιάζονται στις τιμές της ειδικής εκπομπής NO_x οφείλονται πιθανότατα στην μονοκύλινδρη φύση του κινητήρα, όπως έχει προαναφερθεί.



Διάγραμμα 6.25. Η ειδική εκπομπή NO_x (g/kWh) για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε χαμηλό φορτίο.



Διάγραμμα 6.26. Η ειδική εκπομπή NO_x (g/kWh) για τις δύο διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης καυσαερίων σε υψηλό φορτίο.

6.4.6 Συμπεράσματα

Μετά το πέρας της επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων και την ενδελεχή σύγκριση των μετρήσεων των συγκεντρώσεων (NO , CO , CO_2 , O_2) του φορητού αναλυτή, με τις αντίστοιχες μετρήσεις της πρότυπης μεθόδου, εξάγεται ένα κατ' αρχήν θετικό συμπέρασμα ως προς τη δυνατότητα εκτίμησης των εκπομπών NO_x με χρήση ηλεκτροχημικών αισθητηρίων.

Όπως προκύπτει από την πειραματική διερεύνηση, οι μετρήσεις του φορητού αναλυτή όσον αφορά στις συγκεντρώσεις μονοξειδίου του αζώτου (NO) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO) παρουσιάζουν απόλυτο και σχετικό σφάλμα, της τάξεως (+9.5ppm, +1.11%) και (+10ppm, +3.55%) αντίστοιχα. Ομοίως, οι εκτιμήσεις των συγκεντρώσεων διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και οξυγόνου (O_2) παρουσιάζουν απόλυτο και σχετικό σφάλμα (+0.06%, +1.19%) και (+0.09%, +0.71%) αντίστοιχα. Κατά την πειραματική διαδικασία, διαπιστώθηκε ότι οι τιμές των μετρούμενων συγκεντρώσεων με τις δύο μεθόδους (πρότυπη και φορητού αναλυτή) παρουσίασαν πολύ καλή συσχέτιση σε όλα τα σημεία λειτουργίας, ανεξαρτήτως του φορτίου και της ταχύτητας περιστροφής. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η παρατηρηθείσα διακύμανση των μετρούμενων συγκεντρώσεων στις χαμηλές και υψηλές ταχύτητες περιστροφής στο υψηλό φορτίο οφείλεται πιθανότατα στη μονοκύλινδρη φύση του κινητήρα και όχι σε σφάλμα του φορητού αναλυτή.

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΦΟΡΗΤΟΥ
ΑΝΑΛΥΤΗ ΣΕ ΝΑΥΤΙΚΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΝ ΠΛΩ.**

7.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και προς την κατεύθυνση αξιολόγησης του φορητού αναλυτή, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή, σε εν λειτουργία πλοίο της ναυτιλιακής εταιρίας “TSAKOS SHIPPING & TRADING S.A” υπό την ευθύνη του Καθηγητή κ.Δ.Χουντάλα. Κύριος στόχος της προαναφερθείσας μελέτης ήταν η χρήση του αναλυτή για τη μέτρηση της σύστασης του καυσαερίου, τον προσδιορισμό της ειδικής εκπομπής οξειδίων του αζώτου (NO_x(g/kWh)) και τον έλεγχο συμμόρφωσης του κινητήρα με τον Κανονισμό (13) του “Παραρτήματος VI” της σύμβασης “MARPOL 73/78” σχετικά με τα πρότυπα όρια εκπομπών.

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων των συγκεντρώσεων του καυσαερίου που συλλέχθηκαν από τον φορητό αναλυτή, με χρήση παραμέτρων μιας παράλληλης μέτρησης λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα. Στο σημείο αυτό, θεωρείται απαραίτητη η παραπομπή στις σχετικές παραγράφους με τα όρια πρότυπων εκπομπών και την απαραίτητη μεθοδολογία για τον υπολογισμό ειδικών εκπομπών NO_x (Βλέπε : ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5, παράγραφος 5.3.3 και 5.3.4).

7.2 Ανάλυση του Καυσαερίου

7.2.1 Μετρημένες Συγκεντρώσεις

Οι μετρήσεις του αναλυτή πραγματοποιήθηκαν σε πέντε διαφορετικά σημεία λειτουργίας που αντιστοιχούν σε φορτία 45% , 50% , 65% , 75% και 85%. Κατά την δειγματοληψία μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις σε οξυγόνο(O₂), διοξείδιο του άνθρακα(CO₂), μονοξείδιο του άνθρακα(CO), οξείδια του αζώτου σε υγρή και ξηρή βάση (NO_x.dry ,NO_x wet)και διοξείδιο του θείου σε υγρή βάση (SO₂dry). Οι μετρημένες τιμές δίνονται στον Πίνακα (7.1) που ακολουθεί.

Πίνακας 7.1. Συγκεντρώσεις συστατικών καυσαερίου στα σημεία λειτουργίας

No.	Στροφές (rpm)	Φορτίο (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x .d (ppm)	NO _x .w (ppm)	SO ₂ . w (ppm)
M1	83.1	45	15.06	4.46	337	870	835	268
M2	87	50	15.15	4.38	218	870	835	267
M3	93.9	65	15.29	4.32	120	913	878	263
M4	88.5	75	15.23	4.300	170	898	862	246
M5	103..5	85	15.03	4.440	198	912	876	265

7.2.2 Εκπομπή Οξυγόνου (O₂) και Διοξειδίου του Άνθρακα(CO₂)

Σύμφωνα με την καύση βαρέος καυσίμου (δεδομένης σύνθεσης), εκτιμούνται οι συγκεντρώσεις οξυγόνου (O₂[%]) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂[%]) εκ νέου, χρησιμοποιώντας υπολογισμένες τιμές της κατανάλωσης καυσίμου και παροχής αέρα από παράλληλη ειδική μετρητική και υπολογιστική διαδικασία.

Στα Διαγράμματα (7.1, σελ.120) και (7.2, σελ.120) παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του O₂ και του CO₂ σε όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής. Παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι σχεδόν ίδιες, γεγονός που επιβεβαιώνει και τα ευρήματα των εργαστηριακών δοκιμών.

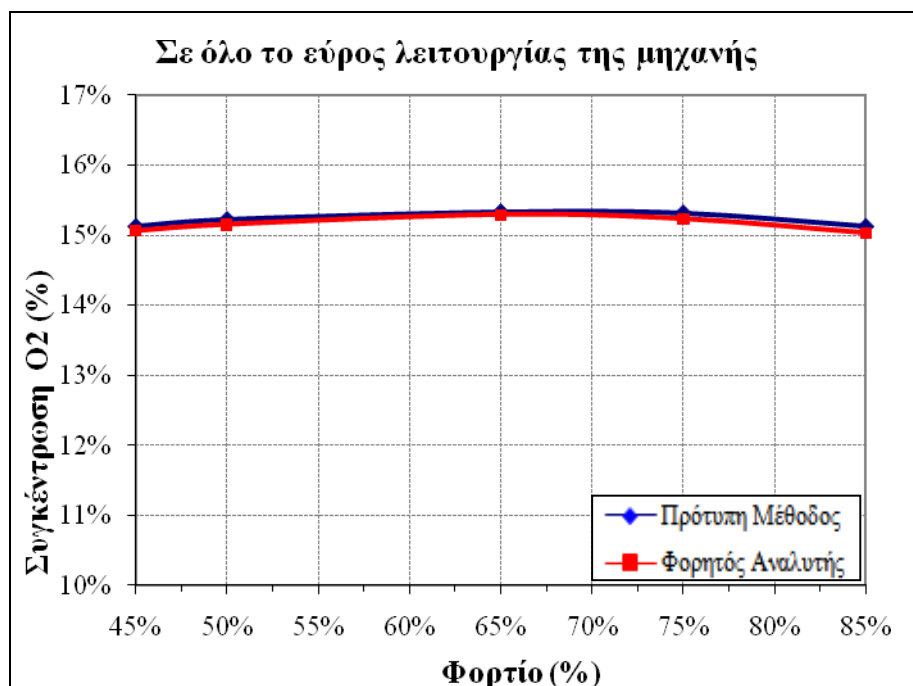
7.2.2.1 Σύγκριση Τιμών Συγκεντρώσεων Οξυγόνου (O₂)

Στον Πίνακα (7.2) δίνεται η σύγκριση των τιμών της συγκέντρωσης του οξυγόνου που μετρήθηκαν από το φορητό αναλυτή, με αυτές που εκτιμήθηκαν από ειδική υπολογιστική διαδικασία.

Πίνακας 7.2. Συγκεντρωτικός πίνακας εκτιμήσεων πρότυπης μεθόδου και μετρήσεων φορητού αναλυτή για O₂

No.	Φορτίο (%)	Πρότυπη μέθοδος O ₂ (%)	Φορητός Αναλυτής O ₂ (%)
M1	45	15.13	15.06
M2	50	15.23	15.15
M3	65	15.33	15.29
M4	75	15.32	15.23
M5	85	15.13	15.03

Στο Διάγραμμα (7.1) δίνεται η σύγκριση των συγκεντρώσεων των δύο μεθόδων συναρτήσει των στροφών. Στόχος της γραφικής απεικόνισης είναι να διαπιστωθεί ο βαθμός σύγκλισης των δύο μεθόδων και εάν η συσχέτισή τους επηρεάζεται από το σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Όπως διαπιστώνεται και στο Διάγραμμα (7.1), η καλή σύμπτωση μεταξύ των μετρήσεων επιβεβαιώνεται σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα. Συγκεκριμένα το απόλυτο και σχετικό σφάλμα των τιμών είναι πολύ μικρό, της τάξης +0.075% και +0.50% αντίστοιχα.



Διάγραμμα 7.1 .Συγκέντρωση οξυγόνου(%) στα καυσάερια σε όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής.

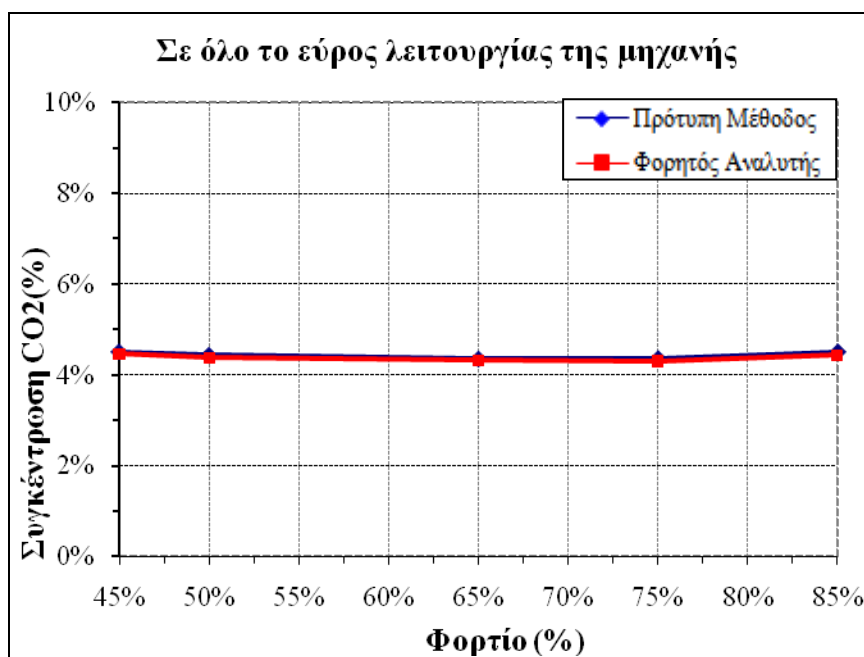
7.2.2.2 Σύγκριση τιμών συγκεντρώσεων Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂)

Στον Πίνακα (7.3) δίνεται σύγκριση των τιμών της συγκέντρωσης του οξυγόνου όπως αυτές μετρήθηκαν από τον φορητό αναλυτή, καθώς και όπως αυτές εκτιμήθηκαν παράλληλα από ειδική υπολογιστική διαδικασία.

Πίνακας 7.3. Συγκεντρωτικός πίνακας εκτιμήσεων πρότυπης μεθόδου και μετρήσεων φορητού αναλυτή για CO₂

No.	Φορτίο (%)	Πρότυπη μέθοδος CO ₂ (%)	Φορητός Αναλυτής CO ₂ (%)
M1	45	15.13	15.06
M2	50	15.23	15.15
M3	65	15.33	15.29
M4	75	15.32	15.23
M5	85	15.13	15.03

Στο Διάγραμμα (7.2) δίνεται η σύγκριση των συγκεντρώσεων των δύο μεθόδων συναρτήσει των στροφών. Στόχος της γραφικής απεικόνισης είναι να διαπιστωθεί ο βαθμός σύγκλισης των δύο μεθόδων και εάν η συσχέτισή τους επηρεάζεται από το σημείο λειτουργίας του κινητήρα. Όπως διαπιστώνεται και στο Διάγραμμα (7.2) που ακολουθεί, η καλή σύμπτωση μεταξύ των μετρήσεων επιβεβαιώνεται σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα. Συγκεκριμένα το απόλυτο και σχετικό σφάλμα των τιμών είναι πολύ μικρό, της τάξης +0.056%, +1.28% αντίστοιχα.



Διάγραμμα 7.2. Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα(%)στα καυσαέρια σε όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής.

7.3 Εκτίμηση Εκπομπών NOx(g/kWh) Εν Πλω

Για τον υπολογισμό σε NOx(g/kWh) χρησιμοποιούμε την Μέθοδο 2,Ισορροπίας Άνθρακα/Οξυγόνου ,όπως αυτή αναπτύχθηκε στην παράγραφο (5.3.4.2).

7.3.1 Παράμετροι Κινητήρα

7.3.1.1 Ισχύς

Ο κινητήρας του πλοίου ήταν δίχρονος με μέγιστη ισχύ 16,630 kW σε ταχύτητα περιστροφής 105 RPM και μέγιστη πίεση καύσης 160 bar. Η διάμετρος του εμβόλου είναι 600mm και η διαδρομή του 2,400mm .

Εξετάστηκαν πέντε διαφορετικά σημεία λειτουργίας όπως περιγράφεται στον ακόλουθο Πίνακα (7.4) :

Πίνακας 7.4. Χαρακτηρισμός σημείων λειτουργίας μηχανής μέσω του φορτίου(%),της ταχύτητας περιστροφής(rpm) και τις ισχύς(kW)

No.	Φορτίο(%)	Ταχύτητα (rpm)	Ισχύς(kW)
M1	45	83.1	7,450
M2	50	87	8,098
M3	65	93.9	10,605
M4	75	88.5	12,464
M5	85	103.5	14,611

7.3.1.2 Χρησιμοποιούμενο Καύσιμο

Στην διάρκεια της δοκιμής, ο κινητήρας κατανάλωσε καύσιμο μαζούτ με την ακόλουθη σύνθεση : άνθρακας (c=86%), υδρογόνο (h=10.5%), θείο(s=3%), άζωτο(n=0.05%), οξυγόνου (o=0.05%) και υγρασία(w=0.02%). Η παροχή του καυσίμου σε κάθε σημείο λειτουργίας εκτιμήθηκε με ειδική τεχνική του Ε.Μ.Π και δίνεται στον ακόλουθο Πίνακα (7.5).

Πίνακας 7.5. Κατανάλωση καυσίμου(kg/h) στα σημεία λειτουργίας

No.	M1	M2	M3	M4	M5
Κατανάλωση Καυσίμου(kg/h)	1,498	1,605	2,046	2,467	2,858

7.3.1.3 Συνθήκες Περιβάλλοντος

Κατά την μελέτη, μετρήθηκαν οι συνθήκες περιβάλλοντος, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα (7.6).

Πίνακας 7.6. Συνθήκες περιβάλλοντος στα σημεία λειτουργίας

No.	Φορτίο(%)	Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C)	Σχετική υγρασία RH(%)	Απόλυτη Βαρομετρική Πίεση(bar)	Θερμοκρασία Θάλασσας (°C)
M1	45	20	50	1.01	8
M2	50	20	50	1.01	8
M3	65	20	50	1.009	8
M4	75	20	50	1.009	8
M5	85	20	50	1.009	8

7.3.2 Διόρθωση Συγκέντρωσης NOx για Μετατροπή τους σε Ξηρή από Υγρή Βάση (Kw.r`)

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η Μέθοδος 2, Ισορροπίας Άνθρακα/Οξυγόνου χρησιμοποιεί την ξηρή συνιστώσα του καυσαερίου. Έτσι τα μεγέθη των συγκεντρώσεων που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις πρέπει να είναι και αυτά σε ξηρή βάση. Η διόρθωση Kw.r` μετατρέπει την υγρή συγκέντρωση NOx(ppm), σε ξηρά NOx(ppm). Είναι σαφές ότι όταν μας δίνεται η ξηρή συγκέντρωση NOx, όπως στην περίπτωση που εξετάζουμε, δεν χρειάζεται διόρθωση.

Όπως προαναφέρθηκε, η μέτρηση της συγκέντρωσης των NOx γίνεται σε ξηρή βάση συνεπώς δεν χρειάζεται η διόρθωση Kw,r`. Εντούτοις κρίνεται σκόπιμη η εκτίμηση του διορθωτικού παράγοντα στα πλαίσια της εκτενούς διερεύνησης. Σύμφωνα με μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο (5.4.3.2.5) και συγκεκριμένα στις σχέσεις (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), υπολογίζεται το μέγεθος ((Kw.r`)/wet to dry correction) σε όλα τα σημεία λειτουργίας (Βλέπε : Πίνακα 7.7).

Πίνακας 7.7. Διόρθωση Kw,r` (wet to dry correction) για την συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου NOx.

No.	M1	M2	M3	M4	M5
Kw.r`	0.9667	0.9672	0.9675	0.9676	0.9669

7.3.3 Διόρθωση της Επίδρασης της Θερμοκρασίας και της Υγρασίας στο Ξηρό ρεύμα των NOx(KHDIES)

Το ξηρό ρεύμα του καυσαερίου πρέπει να διορθωθεί για την υγρασία και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο διορθωτικός παράγοντας KHDIES, όπως έχει ορισθεί στην παράγραφο (5.3.4.2.6.3) για κινητήρα ντήζελ με ψυγείο αέρα στην είσοδο του. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα (7.8) που ακολουθεί.

Πίνακας 7.8. Διόρθωση(KHDIES) για την επίδραση της θερμοκρασίας και τις υγρασίας στο ξηρό ρεύμα

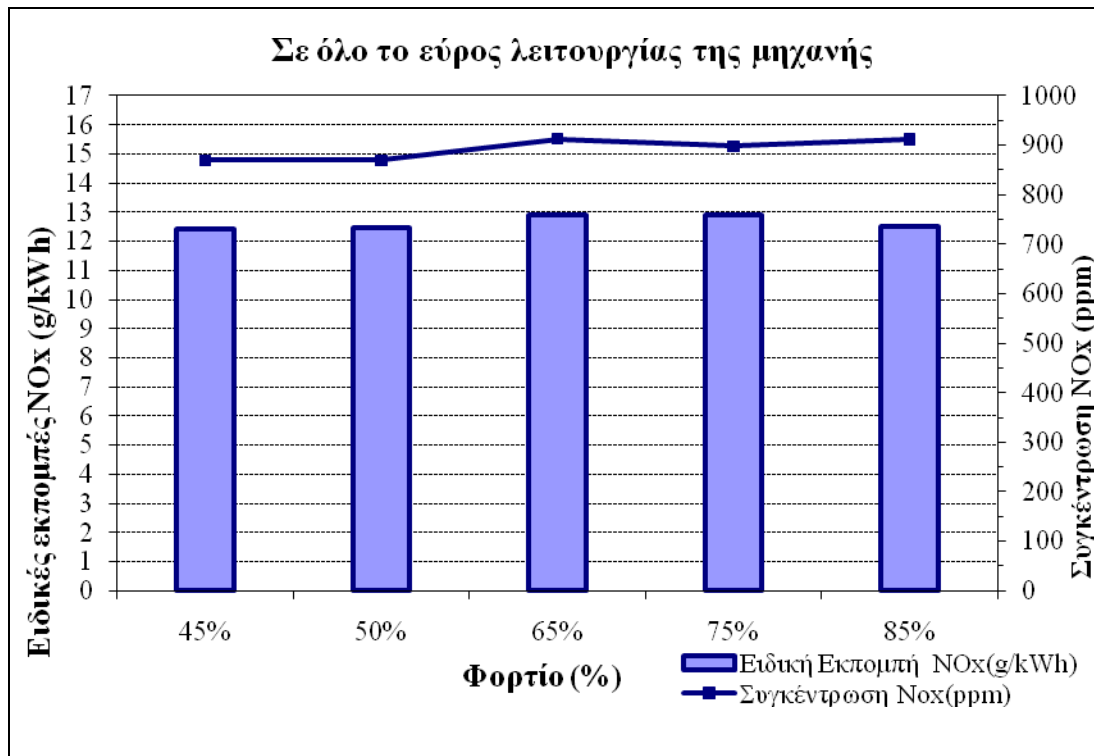
No.	Θερμοκρασία αέρα μετά τον εναλλάκτη Tsc (°C)	Θερμοκρασία αναφοράς μετά τον εναλλάκτη Tscref (°C)	KHDIES
M1	31	40	0.9719
M2	31	40	0.9719
M3	34	41	0.9667
M4	37	42	0.9613
M5	40	44	0.9587

7.3.4 Υπολογισμός Ειδικής Εκπομπής Οξειδίων του Αζώτου NOx(g/kWh)

Στον Πίνακα (7.9) παρουσιάζονται η ειδική εκπομπή NOx(g/kWh) ανά φορτίο καθώς και η συνολική εκπομπή NOx(g/kWh)(του κύκλου). Το όριο εκπομπής οξειδίων του αζώτου, του συγκεκριμένου κινητήρα, είναι στα 17 g/kWh. Είναι φανερό ότι σε όλο το εύρος λειτουργίας, η μηχανή λειτουργεί κάτω από το όριο εκπομπών IMO (Βλέπε : Διάγραμμα 7.3, σελ.126).

Πίνακας 7.9. Ειδική εκπομπή NOx(g/kWh) ανά φορτίο και συνολικά του κύκλου.

Φορτίο (%)	Διορθωτικός παράγοντας Kw,r'	Διορθωτικός παράγοντας KHDIES	Ειδική εκπομπή NOx (g/kWh)
45	0.9669	0.9719	12.42
50	0.9672	0.9719	12.45
65	0.9675	0.9666	12.89
75	0.9676	0.9613	12.90
85	0.9669	0.9587	12.49



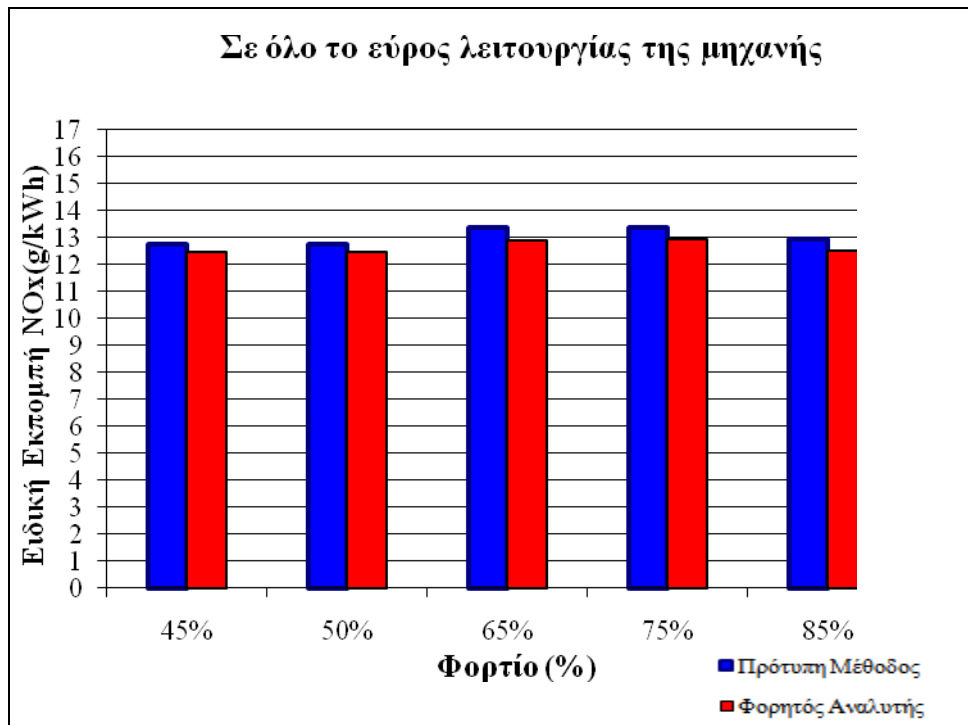
Διάγραμμα 7.3. Ειδική εκπομπή(kg/kWh) και συγκέντρωση NOx (ppm) σε όλο το εύρος λειτουργίας της μηχανής.

7.3.6 Επίδραση του Σφάλματος Μέτρησης του O₂ και του CO₂ στο Υπολογισμό της Ειδικής Εκπομπής NOx

Για να διερευνήσουμε την επίδραση του σφάλματος μέτρησης της συγκέντρωσης O₂ & CO₂ στο μέγεθος της ειδικής εκπομπής NOx[g/kWh], συγκρίνουμε τις τιμές της ειδικής εκπομπής NOx που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις μετρημένες (από τον αναλυτή) τιμές O₂ και CO₂ για την εκτίμηση της παροχής καυσαερίου και αυτές που προκύπτουν από ειδική υπολογιστική διαδικασία που έχει αναπτυχθεί στο Ε.Μ.Π. Οι προαναφερθείσες τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα (7.10) και στο Διάγραμμα (7.4, σελ.127) που ακολουθούν. Τέλος, διαπιστώνεται καλή συσχέτιση μεταξύ των συγκρίσιμων τιμών σε όλα τα σημεία λειτουργίας, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το μικρό σχετικό και απόλυτο σφάλμα, της τάξης των +0.22ppm και +1.70% αντίστοιχα.

Πίνακας 7.10. Τιμές ειδικής εκπομπής NOx(g/kWh)σε όλο το εύρος του κινητήρα

Ειδική εκπομπή NOx(g/kWh)	M1	M2	M3	M4	M5
Φορητός Αναλυτής	12.42	12.45	12.89	12.90	12.49
Υπολογιστική μέθοδος	12.64	12.64	13.38	13.00	12.56



Διάγραμμα 7.4 .Ειδική εκπομπή NOx με τις μετρήσεις του φορητού αναλυτή και τις εκτιμήσεις της πρότυπης μεθόδου

7.4 Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή εξετάστηκε η δυνατότητα χρήσης φορητού αναλυτή για τον προσδιορισμό της εκπομπής NOx σε ναυτικούς κινητήρες εν πλω και κατά συνέπεια για τον έλεγχο συμμόρφωσης τους με τον Κανονισμό (13) του “Παραρτήματος VI” της σύμβασης “MARPOL 73/78”, σχετικά με τα πρότυπα όρια εκπομπών. Πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη εκτίμηση των τιμών της ειδικής εκπομπής NOx χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες από το φορητό αναλυτή τιμές των συγκεντρώσεων O₂ και CO₂ για την εκτίμηση της παροχής καυσαερίου και των αντίστοιχων τιμών από νέα μετρητική και υπολογιστική διαδικασία που αναπτύσσεται από το Ε.Μ.Π. Οι δύο τιμές της ειδικής εκπομπής παρουσίασαν πολύ μεγάλη σύμπτωση σε όλα τα υπό εξέταση σημεία λειτουργίας (ανεξαρτήτως του φορτίου και της ταχύτητας περιστροφής). Επιπροσθέτως, διαπιστώθηκε ότι οι εκτιμώμενες εκπομπές NOx του κινητήρα ήταν κατά πολύ μικρότερες των ορίων εκπομπής (<17g/kWh) του συγκεκριμένου κινητήρα Ντήζελ, σύμφωνα με της οδηγίες του IMO.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο -ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η εύρεση του κατάλληλου τεχνολογικού εξοπλισμού για τη μέτρηση των καυσαερίων σε ναυτικούς κινητήρες εν πλω αποτελεί μια πρόκληση, εξαιτίας των πρακτικών δυσκολιών που αντιμετωπίζουν οι διαδεδομένοι εργαστηριακοί αναλυτές καυσαερίων σε ναυτικούς κινητήρες Ντήζελ εν πλω. Το γεγονός αυτό, ώθησε εταιρίες μετρητικών συστημάτων να επικεντρωθούν και στην κατασκευή ελαφριών, ευκίνητων και οικονομικών πολυαναλυτών, που θα προσαρμόζονται εύκολα στο αφιλόξενο ναυτικό περιβάλλον, διεξάγοντας δειγματοληψίες και αναλύσεις καυσαερίων με χρήση ηλεκτροχημικών αισθητήρων. Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως κύριο στόχο την αξιολόγηση της δυνατότητας χρήσης ηλεκτροχημικών αισθητήρων και εν γένει φορητών αναλυτών, ως εναλλακτική λύση έναντι της χρήσης πρότυπων μεθόδων για μετρήσεις συγκεντρώσεων καυσαερίων εν πλω, σε συμμόρφωση με τις οδηγίες του “Παραρτήματος VI” της σύμβασης “MARPOL 73/78” .

Σε πρώτο στάδιο, έγινε πειραματική διερεύνηση στο Εργαστήριο Μ.Ε.Κ της Σχολής Μηχανολόγων, στην οποία πραγματοποιήθηκε παράλληλη μέτρηση των συστατικών του καυσαερίου : μονοξείδιο του αζώτου (NO), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οξυγόνο (O₂) με χρήση φορητού αναλυτή και προτύπων αναλυτών καυσαερίων (CLA,NDIR,χημεία της καύσης, κ.α.).

Κατά την πειραματική διαδικασία ελήφθησαν δώδεκα (12) μετρήσεις που αντιστοιχούν σε διάφορα σημεία λειτουργίας του κινητήρα (με διαφορετικές τιμές στροφών και ροπής), για να διαπιστωθεί η ακρίβεια μέτρησης σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα. Όπως προκύπτει, ο φορητός αναλυτής παρέχει με την απαιτούμενη ακρίβεια τις αέριες εκπομπές όπως απαιτούνται από τους κανονισμούς του “Παραρτήματος VI” της διεθνούς σύμβασης “MARPOL 73/78”. Το απόλυτο και σχετικό σφάλματα για καθένα από τα μετρούμενα αέρια NO, CO, CO₂, O₂ ήταν (+9.5ppm, +1.11%), (+10ppm, +3.55%), (+0.06%, +1.19 %), (+0.09%,+0.71%) αντίστοιχα. Επιπλέον, υπολογίσθηκαν ο λόγος αέρας (λα), η παροχή αέρα καύσης (ma(kg/h)) και η ειδική εκπομπή οξειδίων του αζώτου (NO_x(g/kWh) για να μελετηθεί η επίδραση του σφάλματος μέτρησης των συγκεντρώσεων σε αυτά. Οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν εκτενώς, χρησιμοποιώντας την πραγματική σύνθεση του καυσίμου και διαπιστώθηκε ότι ο φορητός αναλυτής παρέχει με καλή ακρίβεια τη σύνθεση των καυσαερίων σε όλο το εύρος λειτουργίας του εργαστηριακού κινητήρα.

Σε δεύτερο στάδιο, εξετάστηκε η δυνατότητα χρήσης του φορητού αναλυτή για την εκτέλεση μετρήσεων σε ναυτικό κινητήρα εν πλω. Κατά την μέτρηση συλλέχθηκαν επιπρόσθετα στοιχεία για την ισχύ, την κατανάλωση και τη σύσταση του καυσίμου, τις συνθήκες περιβάλλοντος και τη σύσταση του καυσαερίου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πέντε σημεία λειτουργίας στο 45%, 50%, 65%, 75% και 85% του μέγιστου φορτίου αντίστοιχα. Στη διάρκεια της δειγματοληψίας μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις σε οξυγόνο (O_2), διοξείδιο του άνθρακα(CO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), ενώ δόθηκαν και οι συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου σε ξηρή και υγρή βάση ($NO_x.dry$, $NO_x.wet$) και του διοξειδίου του θείου σε υγρή βάση($SO_2.dry$).

Επιβεβαιώθηκαν τα ευρήματα στη μέτρηση των συγκεντρώσεων O_2 και CO_2 σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα, καθώς το σφάλμα μέτρησης (απόλυτο και σχετικό) εκτιμήθηκε (+0.056%, +1.28%) και (+0.075%, +0.50%) αντίστοιχα. Επιπλέον, υπολογίστηκε η τιμή της ειδικής εκπομπής NO_x χρησιμοποιώντας τόσο τις μετρούμενες από το φορητό αναλυτή τιμές συγκέντρωσης O_2 και CO_2 για την εκτίμηση της παροχής του καυσαερίου, όσο και τις τιμές που προκύπτουν από αξιόπιστη μετρητική και υπολογιστική διαδικασία που έχει αναπτυχθεί από το Ε.Μ.Π. Διαπιστώθηκε, ότι οι τιμές της ειδικής εκπομπής παρουσίασαν πολύ καλή σύμπτωση σε όλα τα υπό εξέταση σημεία λειτουργίας του κινητήρα, γεγονός που φανερώνει την δυνατότητα χρήσης φορητού αναλυτή για τον προσδιορισμό της εκπομπής NO_x σε ναυτικούς κινητήρες εν πλω και κατά συνέπεια για τον έλεγχο συμμόρφωσης τους με τον Κανονισμό(13) του “Παραρτήματος VI” της σύμβασης “MARPOL 73/78” σχετικά με τα πρότυπα όρια εκπομπών. Αναφέρεται ότι κατά την συγκεκριμένη εφαρμογή, ο ναυτικός κινητήρας που εξετάστηκε έχει εκπομπές NO_x αρκετά μικρότερες από τα όρια εκπομπών NO_x που έχουν ορισθεί από τον Κανονισμό.

Τέλος, τονίζεται ότι η όλη διαδικασία μέτρησης επί του πλοίου ήταν πολύ απλή και γρήγορη. Παράλληλα, λόγω του μικρού σχετικά βάρους του αναλυτή (<25kg), η χρήση γενικότερα των φορητών αναλυτών μπορεί να αποτελέσει εργαλείο για την ανάλυση των καυσαερίων ναυτικών κινητήρων συμβάλλοντας ουσιαστικά στην προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος καθώς ο προσδιορισμός, ο έλεγχος και ο περιορισμός της ειδικής εκπομπής οξειδίων του αζώτου(NO_x), βρίσκεται στο

επίκεντρο της αρμόδιας Επιτροπής Προστασίας του Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MPEC) του IMO.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Charles F.Taylor, «*The Internal Combustion Engine in Theory and Practice, (Combustion, Fuels, Materials, Designed)* »,Vol.2, London, 1984
2. Aage Bjorn Andersen,Margrethe Lund,Dag Borgnes & Alvar Mjelde, «*NT TECHN REPORT 472 NORDTEST-Simplified NO_x Emission Procedures(no.99-3580)*», Det Norske Veritas, 2001
3. Annex VI of MARPOL 73/78, «*Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships and NO_x Tehnical Code*», International Maritime Organization(IMO) ,1997
4. Annex VI of MARPOL 73/78, «*Amendments to the Annex of the Protocol of 1997 to Amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships(Revised MARPOL 73/78 Annex VI)*», International Maritime Organization(IMO), 2008
5. Joseph R. Stetter, William R. Penrose, ShengYao , « **Sensors, Chemical Sensors, Electrochemical Sensors, and ECS**», *Journal of The Electrochemical Society*,150(2) S11-S16, Illinois, USA,2003
6. Testo inc. , «*Testo 350 MARITIME – Instruction Manual*», New Jersey, 2009

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Κ.Ρακόπουλος, «*Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ*», Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα 2001
2. Κ.Ρακόπουλος, «*Μ.Ε.Κ ΙΙ-Εμβάθυνση στην Κατασκευή και Λειτουργία των Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ*», Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα 2001
3. Κ.Ρακόπουλος & Δ.Χουντάλας, «*Καύση – Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ*», Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα 2005
4. Κ.Ρακόπουλος, «*Εργαστηριακές Δοκιμές & Μετρήσεις Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ*», Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα 1994
5. Ν.Κυρτάτος, «*Ναυτικοί Κινητήρες Diesel - Θέματα Σχεδίασης και Λειτουργίας*», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1993

6. Μ.Φούντη, «*Θεωρία Καύσης & Συστήματα Καύσης*», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π, Αθήνα 2005
7. Γ.Μπεργελές, «*Πηγές, Διασπορά & Έλεγχος Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης*», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2006
8. Ε.Κακαράς & Δ.Γιαννακόπουλος & Σ.Καρέλλας, «*Αντιρροπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών(Σημειώσεις)*», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π, Αθήνα 2008

Διαδικτυακή Βιβλιογραφία

1. Electrochemical gas sensors, http://en.wikipedia.org/wiki/Electrochemical_gas_sensor
2. Hydra Engine, <http://www.ricardo.com/Engineering-Consulting/Large-and-Other-Engines/Advanced-Research-Engines/Hydra/>
3. Hydra Engine, Cussons co. , <http://www.cussons.co.uk/en/contents/hydra.html>
4. Internal Combustion, http://en.wikipedia.org/wiki/Internal_combustion,
5. International Maritime Organization, <http://www.imo.org/>
6. Marine Diesel Engines, <http://marinediesels.co.uk/>
7. Marine Diesel Engines, Hyundai co. , http://www.hyundai-engine.com/engine/products/images/S60MC-C_MK8.jpg

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα 1

Πιστοποιητικά του φορητού αναλυτή που χρησιμοποιήθηκε στην διερεύνηση.



Εικόνα Π.1. Πιστοποιητικό Germanischer Lloyd (GL)(certificate no.59488-08HH)



Εικόνα Π.2. Πιστοποιητικό DET NORSKE VERITAS(DNV)(certificate No.A-11316)

Παράρτημα 2

Παρουσιάζονται οι Μέθοδοι 1 και 2 για τον υπολογισμό των οξειδίων του αζώτου NO_x, όπως αναλυτικά δίνεται στο Τεχνικό Κώδικα. (“NO_x Technical Code”)

APPENDIX 6

CALCULATION OF EXHAUST GAS MASS FLOW (CARBON BALANCE METHOD)

(Refer to chapter 5 of the NO_x Technical Code)

1 INTRODUCTION

1.1 This appendix addresses the calculation of the exhaust gas mass flow and/or of the combustion air consumption. Both methods given in the following are based on exhaust gas concentration measurement, and on the knowledge of the fuel consumption. Symbols and descriptions of terms and variables used in the formulae for the carbon balance measurement method are summarized in table 4 of the Abbreviations, Subscripts, and Symbols of this Code.

1.2 This appendix includes two methods for calculating the exhaust gas mass flow as follows: Method 1 (Carbon balance) is only valid using fuels without oxygen and nitrogen content; and, Method 2 (Universal, carbon/oxygen-balance) is applicable for fuels containing H, C, S, O, N in known composition.

1.3 Method 2 provides an easy understandable but universal derivation of all formulae including all constants. This method is provided because there are many cases where the present available constants, neglecting essential parameters, may lead to results with avoidable errors. Using the formulae within Method 2, it may also be possible to calculate the essential parameters under conditions deviating from standard conditions.

1.4 Examples of parameters for some selected fuels are offered in table 1. The values for fuel composition are for reference purposes only and shall not be used in place of the composition values of the oil fuel actually used.

Table 1. Parameters for some selected fuels (examples)

Fuel	C %	H %	S %	O %	I	FFH	FFW	FFD	EXH DENS
Diesel	86.2	13.6	0.17	0	1	1.835	0.749	-0.767	1.294
					1.35	1.865		1.293	
					3.5	1.920		1.292	
RME	77.2	12.0		10.8	1	1.600	0.734	-0.599	1.296
					1.35	1.63		1.295	
					3.5	1.685		1.292	
Methanol	37.5	12.6	0	50.0	1	1.495	1.046	-0.354	1.233
					1.35	1.565		1.246	
					3.5	1.705		1.272	
Ethanol	52.1	13.1	0	34.7	1	1.65	0.965	-0.49	1.26
					1.35	1.704		1.265	
					3.5	1.807		1.281	
Natural Gas *	60.6	19.3	0	1.9	1	2.509	1.078	-1.065	1.257
					1.35	2.572		1.265	
					3.5	2.689		1.28	

$$FFH \cdot \frac{\text{Fuel consumption}}{\text{Dry air consumption}} = \frac{\text{Volume of water of the combustion process}}{\text{Total wet exhaust volume}} \quad (1-8)$$

Total wet exhaust volume = Nitrogen of combustion air +
 excess oxygen +
 argon of the combustion air +
 water of the combustion air +
 water of the combustion process +
 CO₂ of the combustion process +
 SO₂ of the combustion process

$$(1-9)$$

$$\begin{aligned} \tau_{FH} \cdot \frac{GFUEL}{GAIRD} &= (10 \cdot ALF \cdot MVH2O / (2 \cdot 1.0079 \cdot 1000)) \cdot GFUEL / ((0.7551 \\ &/ 1.2505 \cdot (GAIRD / (GFUEL \cdot STOIAR)) \cdot STOIAR + 0.2315 \\ &/ 1.42895 \cdot ((GAIRD / (GFUEL \cdot STOIAR)) - 1) \cdot STOIAR + 0.0129 \\ &/ 1.7840 \cdot (GAIRD / (GFUEL \cdot STOIAR)) \cdot STOIAR + 0.0005 \\ &/ 1.9769 \cdot (GAIRD / (GFUEL \cdot STOIAR)) \cdot STOIAR + (ALF \cdot 10 \cdot MVCO2 \\ &/ (2 \cdot 1.0079 \cdot 1000)) + (BET \cdot 10 \cdot MVCO2 / (12.001 \cdot 1000)) + (GAM \cdot 10 \cdot MVSO2 \\ &/ (32.060 \cdot 1000)) \cdot GFUEL) \end{aligned} \quad (1-10)$$

where:

$$\begin{aligned} MVH2O &= 22.401 \text{ dm}^3/\text{mol} \\ MVCO &= 22.262 \text{ dm}^3/\text{mol} \\ MVSO2 &= 21.891 \text{ dm}^3/\text{mol} \end{aligned}$$

2.6.2 The formula results:

$$\begin{aligned} \tau_{FH} \cdot \frac{GFUEL}{GAIRD} &= (0.111127 \cdot ALF) / (0.0555583 \cdot ALF - 0.000109 \cdot BET - 0.000157 \cdot GAM \\ &+ 0.773329 \cdot (GAIRD / GFUEL)) \end{aligned} \quad (1-11)$$

and

$$FFH = (0.111127 \cdot ALF) / (0.773329 + (0.0555583 \cdot ALF - 0.000109 \cdot BET - 0.000157 \cdot GAM) \cdot (GFUEL / GAIRD)) \quad (1-12)$$

2.6.3 The excess air factor is defined as:

$$l_v = \text{air consumption} / (\text{fuel consumption} \cdot \text{stoichiometric air demand}) \quad (1-13)$$

$$EAFCD0 = GAIRD / (GFUEL \cdot STOIAR) \quad (1-14)$$

$$GAIRD = EAFCD0 \cdot GFUEL \cdot STOIAR \quad (1-15)$$

$$\begin{aligned} CWET &= CDRY \cdot (1 - FFH \cdot GFUEL / GAIRD) \\ &= CDRY \cdot (1 - FFH \cdot GFUEL / (EAFCD0 \cdot GFUEL \cdot STOIAR)) \\ &= CDRY \cdot (1 - FFH / (EAFCD0 \cdot STOIAR)) \end{aligned} \quad (1-16)$$

$$\begin{aligned} CDRY &= CWET \cdot (1 - FFH / (EAFCD0 \cdot STOIAR)) \\ &= CWET \cdot EAFCD0 \cdot STOIAR / (EAFCD0 \cdot STOIAR - FFH) \end{aligned} \quad (1-17)$$

$$HCD = HCW \cdot EAFCD0 \cdot STOJAR / (EAFCD0 \cdot STOJAR - FFH) \quad (1-18)$$

2.7 **Fifth step:** Calculation of the excess air factor based on the procedures specified in Title 40, United States Code of Federal Regulations (40CFR86.345-79).

$$EXHCPN = (CO2D / 100) + (COD / 10^6) + (HCD / 10^6) \quad (1-19)$$

$$i_v = EAFEXH = (1 / EXHCPN - COD / (10^6 \cdot 2 \cdot EXHCPN) - HCD / (10^6 \cdot EXHCPN) + HTCRAT / 4 \cdot (1 - HCD / (10^6 \cdot EXHCPN))) - 0.75 \cdot HTCRAT / (3.5 / (COD / (10^6 \cdot EXHCPN)) + ((1 - 3.5) / (1 - HCD / (10^6 \cdot EXHCPN)))) / (4.77 \cdot (1 + HTCRAT / 4)) \quad (1-20)$$

2.8 **Sixth step:** Calculation of the exhaust mass

$$\text{Exhaust mass flow} = \text{Fuel consumption} + \text{combustion air consumption} \quad (1-21)$$

(with the excess air factor defined in step four)

$$\text{air consumption} = i_v \cdot \text{fuel consumption} \cdot \text{stoichiometric air demand} \quad (1-22)$$

$$\text{Exhaust mass flow} = \text{Fuel consumption} \cdot (1 + i_v \cdot \text{stoichiometric air demand}) \quad (1-23)$$

$$GEXHW = GFUEL \cdot (1 + EAFEXH \cdot STOJAR) \quad (1-24)$$

3 METHOD 2, UNIVERSAL, CARBON / OXYGEN-BALANCE

3.1 Introduction

The described method gives an easily understandable description of the carbon and oxygen balance method. It may be used when the fuel consumption is measurable and when the fuel composition and the concentrations of the exhaust components are known.

3.2 Calculation of the exhaust mass flow on the basis of the carbon balance

$$GEXHW = \frac{GFUEL \cdot BET \cdot EXHDENS \cdot 10^4}{AWC} \cdot \frac{1}{\left(\frac{CO2W \cdot 10^4}{MVCO2} - \frac{COW}{MVCO} - \frac{HCW}{MVHC} - \frac{CW}{AWC} \right)} \quad (2-1)$$

3.2.1 Simplification with complete combustion:

$$GEXHW = \frac{GFUEL \cdot BET \cdot EXHDENS \cdot MVCO2}{AWC \cdot (CO2W - CO2AIR)} \quad (2-2)$$

3.3 Calculation of exhaust mass flow on the basis of oxygen balance

$$GEXHW = GFUEL \cdot \left(\frac{\frac{Factor1}{1000 \cdot EXHDENS} - 10 \cdot Factor2 - 10 \cdot EPS}{10 \cdot TAU - \frac{Factor1}{1000 \cdot EXDENS}} + 1 \right) \quad (2-3)$$

where:

$$\begin{aligned} \text{Factor1} = & 10^4 \cdot \frac{MWO2 \cdot O2W}{MVO2} - \frac{AWO}{MYCO} \cdot COW - \frac{AWO}{MVNO} \cdot NOW - \\ & + \frac{2 \cdot AWO}{MVNO2} \cdot NO2W - \frac{3 \cdot AWO}{MVHC} \cdot HCW - \frac{2 \cdot AWO}{AWC} \cdot CW \end{aligned} \quad (2-4)$$

and

$$\text{Factor2} = ALF \cdot \frac{AWO}{2 \cdot AWH} - BET \cdot \frac{2 \cdot AWO}{AWC} - GAM \cdot \frac{AWO}{AWS} \quad (2-5)$$

3.3.1 Simplification with complete combustion:

$$\text{Factor1}_{\text{compl.}} = 10^4 \cdot \frac{MWO2}{MVO2} \cdot O2W \quad (2-6)$$

3.4 Derivation of the oxygen balance for incomplete combustion

3.4.1 The oxygen input in g/h is:

$$GAIRW \cdot \tau \cdot 10 + GFUEL \cdot EPS \cdot 10 \quad (2-7)$$

3.4.2 The oxygen output in g/h is:

$$\begin{aligned} GO2 = & GCO2 \cdot \frac{2 \cdot AWO}{MWCO \cdot 2} + GCO \cdot \frac{AWO}{MWCO} + GNO \cdot \frac{AWO}{MWNc} \\ & + GNO2 \cdot \frac{2 \cdot AWO}{MVNO2 \cdot 2} + GSO2 \cdot \frac{2 \cdot AWO}{MWSO2 \cdot 2} + GH2O \cdot \frac{AWO}{MWH2O} \end{aligned} \quad (2-8)$$

based on the following definitions and formulae, the individual gas components are calculated in g/h related on wet exhaust gas (GC is the soot in g/h).

$$GO2 = \frac{MWO2 \cdot 10}{MVO2 \cdot EXHDENS} \cdot O2W \cdot GEXHW \quad (2-9)$$

$$GCO = \frac{MWCO}{MYCO \cdot EXHDENS \cdot 1000} \cdot COW \cdot GEXHW \quad (2-10)$$

$$GNO = \frac{MWCO}{MVNO \cdot EXHDENS \cdot 1000} \cdot NOW \cdot GEXHW \quad (2-11)$$

$$GNO2 = \frac{MVNO2}{MVNO2 \cdot EXHDENS \cdot 1000} \cdot NO2W \cdot GEXHW \quad (2-12)$$

$$GCO2 = \frac{MWCO2}{AWC} \cdot GFUEL \cdot BET \cdot 10 - GCO \cdot \frac{MWCO2}{MWCO} - GHC \cdot \frac{MWCO2}{MWHC} - GC \cdot \frac{MWCO2}{AWC} \quad (2-13)$$

$$GH2O = \frac{MWH2O}{2 \cdot AWH} \cdot GFUEL \cdot ALF \cdot 10 - GHC \cdot \frac{MWH2O}{MWHC} \quad (2-14)$$

$$GSO2 = \frac{MWSO2}{AWS} \cdot GFUEL \cdot GAM \cdot 10 \quad (2-15)$$

$$GHC = \frac{MWHC}{MVHC \cdot EXHDENS \cdot 1000} \cdot HCW \cdot GEXHW \quad (2-16)$$

$$GC = \frac{1}{EXHDENS \cdot 1000} \cdot CW \cdot GEXHW \quad (2-17)$$

3.4.3 EXHDENS is calculated using formula (2-42) in 3.6 of this section.

$$\begin{aligned} & GAIRW \cdot TAU \cdot 10 + GFUEL \cdot EPS \cdot 10 = \\ & = \frac{GEXHW}{10^3 \cdot EXHDENS} \left(\frac{MWO2 \cdot 02W \cdot 10^4}{MVO2} + \frac{AWO \cdot COW}{MVCO} + \frac{AWO \cdot NOW}{MVNO} + \frac{2 \cdot AWO \cdot NO2W}{MVNO2} + \frac{3 \cdot AWO \cdot HCW}{MVHC} + \frac{2 \cdot AWO \cdot H2W}{MVH2} \right) \\ & + 10 \cdot GFUEL \left(\frac{ALF \cdot AWO}{2 \cdot AWH} + \frac{BET \cdot 2 \cdot AWO}{AWC} + \frac{GAM \cdot AWO}{AWS} \right) \end{aligned} \quad (2-18)$$

3.4.4 The first bracket is defined as Factor 1, the second one as Factor 2 (see also formulae (2-4) and (2-5)).

where:

$$GEXHW = GAIR + GFUEL \quad (2-19)$$

3.4.5 The consumed air mass and the exhaust gas mass may be calculated using the following formulae:

$$GAIRW = GFUEL \cdot \left(\frac{\frac{Factor1}{1000 \cdot EXHDENS} + 10 \cdot Factor2 + 10 \cdot EPS}{TAU \cdot 10 - \frac{Factor1}{1000 \cdot EXHDENS}} \right) \quad (2-20)$$

and accordingly:

$$GEXHW = GFUEL \cdot \left(\frac{\frac{Factor1}{1000 \cdot EXHDENS} + 10 \cdot Factor2 + 10 \cdot EPS}{TAU \cdot 10 - \frac{Factor1}{1000 \cdot EXHDENS}} + 1 \right) \quad (2-21)$$

3.5 Derivation of the carbon balance for the incomplete combustion

3.5.1 Carbon input in g/h:

$$GFUEL \cdot BET \cdot 10 \quad (2-22)$$

3.5.2 Carbon output in g/h:

$$GCO2 \cdot \frac{AWC}{MWCO2} + GCO \cdot \frac{AWC}{MWCO} + GHC \cdot \frac{AWC}{MWHC} + GC \cdot \frac{AWC}{AWC} \quad (2-23)$$

3.5.3 Based on the following definitions and formulae, the individual gas components are calculated in g/h related on wet exhaust gas (GC is the soot in g/h).

$$G_{CO_2} = \frac{M_{WCO_2} \cdot 10}{M_{VCO_2} \cdot EXHDENS} \cdot CO_2W \cdot GEXHW \quad (2-24)$$

$$G_{CO} = \frac{M_{WCO}}{M_{VCO} \cdot EXHDENS \cdot 1000} \cdot COW \cdot GEXHW \quad (2-25)$$

$$G_{HC} = \frac{M_{WHC}}{M_{VHC} \cdot EXHDENS \cdot 1000} \cdot HCW \cdot GEXHW \quad (2-26)$$

$$G_C = \frac{1}{EXHDENS} \cdot CW \cdot GEXHW \quad (2-27)$$

3.5.4 For the balance condition:

Carbon input = Carbon output

$$G_{FUEL} \cdot BET \cdot 10 = \frac{GEXHW \cdot AWC}{EXHDENS \cdot 1000} \left(\frac{CO_2W}{M_{VCO_2}} \cdot 10^4 + \frac{COW}{M_{VCO}} + \frac{HCW}{M_{VHC}} + \frac{CW}{AWC} \right) \quad (2-28)$$

3.5.5 Calculation of the exhaust mass flow on the basis of the carbon balance:

$$GEXHW = \frac{G_{FUEL} \cdot BET \cdot EXHDENS \cdot 10^4}{AWC} \cdot \frac{1}{\left(\frac{CO_2W \cdot 10^4}{M_{VCO_2}} + \frac{COW}{M_{VCO}} + \frac{HCW}{M_{VHC}} + \frac{CW}{AWC} \right)} \quad (2-29)$$

3.6 Calculation of the volumetric exhaust composition and exhaust density with incomplete combustion

$$V_{CO} = COW \cdot 10^{-6} \cdot VEXHW \quad (2-30)$$

$$V_{NO} = NOW \cdot 10^{-6} \cdot VEXHW \quad (2-31)$$

$$V_{NO_2} = NO_2W \cdot 10^{-6} \cdot VEXHW \quad (2-32)$$

$$V_{HC} = HCW \cdot 10^{-6} \cdot VEXHW \quad (2-33)$$

$$V_{H_2O} = \frac{\left(\frac{G_{AIRW} \cdot N_{UE} \cdot M_{VH_2O}}{M_{WH_2O}} + \frac{G_{FUEL} \cdot ALF \cdot M_{VH_2O}}{2 \cdot AWH} \right)}{100} - V_{HC} \quad (2-34)$$

$$V_{CO_2} = \left(\frac{G_{AIRW} \cdot CO_2AIR}{1.293} + G_{FUEL} \cdot BET \cdot \frac{M_{VCO_2}}{AWC} \right) \cdot \frac{1}{100} - V_{CO} - V_{HC} \quad (2-35)$$

with $CO_2AIR = CO_2$ - concentration in the combustion air (vol %).

$$TAU_2 = \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRW}} \cdot \left(ALF \cdot \frac{AWO}{2 \cdot AWH} + BET \cdot \frac{2 \cdot AWO}{AWC} + GAM \cdot \frac{2 \cdot AWO}{AWS} - 1 \right) \quad (2-36)$$

$$VO_2 = \frac{GAIRW \cdot (T - TAU2)}{100} \cdot \frac{MVO_2}{MWO_2} + (1/2) \cdot (VHC - VCO) - (1/2) \cdot (VNO + VNO_2) - \frac{CW \cdot GEXHW}{EXHDENS} \cdot \frac{2 \cdot AWO \cdot MVO_2}{AWC \cdot MWO_2} \quad (2-37)$$

$$VN_2 = \frac{GAIRW \cdot ETA \cdot \frac{MVN_2}{MWN_2} + GFUEL \cdot DEL \cdot \frac{MVN_2}{MWN_2}}{100} - (1/2) \cdot VNO - (1/2) \cdot VNO_2 \quad (2-38)$$

$$VSO_2 = \frac{GFUEL \cdot GAM \cdot \frac{MVS_2}{AWS}}{100} \quad (2-39)$$

$$VEXHW = VH_{20} + VCO_2 + VO_2 + VN_2 + VSO_2 + VCO + VNO + VNO_2 + VHC \quad (2-40)$$

$$VEXHD = VEXHW - VH_{20} \quad (2-41)$$

$$EXHDENS = GEXHW / VEXHW \quad (2-42)$$

$$KEXH = VEXHD / VEXHW \quad (2-43)$$

3.7 Program for the calculation of the exhaust mass flow

3.7.1 The results of both stoichiometric calculations for carbon and oxygen calculations give the total exhaust composition and the exhaust mass flow including the water content.

3.7.2 The formulae in the program are mainly based on wet exhaust.

3.7.3 If dry concentrations (O_2 and CO_2) are measured, the dry to wet correction factor KWEXH ($= K_{w,c}$) shall be used.

3.7.4 The program calculates the exhaust mass flow with known KWEXH and calculates the KWEXH with known exhaust gas flow. When both values are unknown, the program takes a preliminary value for KWEXH ($= K_{w,c}$) and performs iterative calculation, until both values fit together and do not change any more.

3.7.5 If the mass balance formula is used without the program, the following dry to wet correction factor shall be used:

$$K_{w,c} = \left(\frac{100}{\frac{ALF \cdot MVH_{20} \cdot AWC \cdot (CO_2D)}{BET \cdot MVCO_2 \cdot 2 \cdot AWH} + NUE \cdot 1.608 \cdot 100} \right) \quad (2-44)$$

3.7.6 The formula in another prepared form:

$$K_{w,c} = \left(\frac{100}{\frac{ALF \cdot 5.995 \cdot (CO_2D)}{BET} + NUE \cdot 1.608 \cdot 100} \right) \quad (2-44a)$$

3.7.7 The general formula for dry / wet correction $K_{WEXH} = K_{wet}$, different versions are possible.

3.7.8 Formulae (2-44) and (2-44a) and also formula (12) from 5.12.2.3 of this Code are not absolutely exact, because the correction for the combustion water and for the air intake water are not additive.

3.7.9 The exact formula is:

$$K_{wet} = \frac{GFUEL + GAIRD - \frac{GFUEL \cdot ALF \cdot MWH2O}{200 \cdot AWH} \cdot \frac{RhoEXH \cdot DAC}{Rho \cdot H2O}}{GFUEL + GAIRD - \frac{Ha \cdot GAIRD}{1000} \cdot \frac{RhoEXH \cdot DAC}{Rho \cdot H2O}} \quad (2-45)$$