



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ Δ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ
ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ
ΣΥΝΘΗΚΗ MARPOL 73/78 ANNEX VI»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΑΘΗΝΑ 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ
ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΘΗΚΗ
MARPOL 73/78 ANNEX VI»**

ΕΥΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Του Δημητρίου

Επιβλέπων:

Δρ. Δ. Θ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2011

*"We must free ourselves of the hope that the sea will ever rest.
We must learn to sail in high winds..."*

Aristotle Onassis

(Υπογραφή)

.....

Ευαγγελόπουλος Νικόλαος

Copyright © ΕΥΑΓΓΕΛΟΠΟΥΛΟΣ Δ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αντί προλόγου...

Αυτή η διπλωματική εργασία αποτελεί το επιστέγασμα των σπουδών μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η ανάπτυξη και αξιολόγηση απλοποιημένων μεθοδολογιών για την εκτίμηση εκπομπών ρύπων από ναυτικούς κινητήρες diesel, με έμφαση στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Το θέμα που αναπτύσσεται φαντάζει άκρως επίκαιρο λόγω των όλο και αυστηρότερων κανονισμών που επιβάλλονται για τις εκπομπές ρύπων στη ναυτιλία από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό αλλά και από άλλους εθνικούς οργανισμούς και από την γενικότερη σύγχρονη τάση για φιλικότερες προς το περιβάλλον τεχνολογικές λύσεις.

Η συμβολή ορισμένων ανθρώπων στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, αλλά και των σπουδών μου συνολικότερα, ήταν καταλυτική. Για τον λόγο αυτό, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Χουντάλα Δημήτριο, ο οποίος μου έδωσε την δυνατότητα να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον Διδακτορικό φοιτητή Νικόλαο Σάββα για την πολύτιμη υποστήριξη που μου παρείχε και για την καθοριστική συνεισφορά του στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τα χρόνια των σπουδών μου στην Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών δεν θα ήταν σίγουρα ίδια χωρίς εκείνους με τους οποίους μοιράστηκα κοινές στιγμές, χαρές και αγωνίες. Έτσι λοιπόν πρέπει να ευχαριστήσω όλους τους φίλους, εντός ή εκτός σχολής, οι οποίοι με στήριξαν και ήταν δίπλα μου σε ότι κι αν έκανα. Ξεχωριστή αναφορά θα ήθελα να κάνω, στους φίλους και συνάδελφους Θοδωρή Λάππα και Βασίλη Κρασσά καθώς και στην κοπέλα μου Ρωζάνη.

Τέλος, τις θερμότερες ευχαριστίες μου θα ήθελα να τις εκφράσω προς τους γονείς μου, την αδερφή μου και την υπόλοιπη οικογένειά μου, για την αμέριστη ηθική και υλική στήριξη που μου προσφέρουν μέχρι σήμερα.

Ηλιούπολη, Φεβρουάριος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|----------|---|----|
| | Σύνοψη..... | 9 |
| | Summary..... | 10 |
| | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 12 |
| 1 | Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ) | 12 |
| 1.1 | Γενικά..... | 12 |
| 1.2 | Περιγραφή της Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα Diesel..... | 14 |
| 1.3 | Περιγραφή της Λειτουργίας Τετράχρονου Κινητήρα Diesel..... | 17 |
| 1.4 | Πλεονεκτήματα του Δίχρονου Έναντι του Τετράχρονου κινητήρα..... | 18 |
| 1.5 | Πλεονεκτήματα του Τετράχρονου Κινητήρα Έναντι του Δίχρονου..... | 18 |
| 1.6 | Υπερπλήρωση Κινητήρων Diesel..... | 19 |
| 1.7 | Εκπεμπόμενοι Ρύποι από τους Κινητήρες Diesel..... | 20 |
| 2 | Περιγραφή Οξειδίων του Αζώτου (NOx) | 22 |
| 2.1 | Τύποι NOx και Παράγοντες που Επηρεάζουν την Παραγωγή τους..... | 22 |
| 2.2 | Θερμικά NOx (thermal NOx)..... | 23 |
| 2.3 | NOx λόγω του καυσίμου (fuel NOx)..... | 24 |
| 2.4 | Άμεσα NOx (prompt NOx)..... | 24 |
| 2.5 | Επιπτώσεις των Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου (NOx)..... | 25 |
| 3 | Διεθνής Συνθήκη για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τη Ναυτιλία (MARPOL 73/78) | 26 |
| 3.1 | Ιστορικό MARPOL 73/78..... | 26 |
| 3.2 | Η Συνθήκη του 1973..... | 26 |
| 3.3 | Η Διάσκεψη του 1978..... | 27 |
| 3.4 | Το πρωτόκολλο του 1997 (παράρτημα VI - κανονισμοί για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα σκάφη)..... | 28 |
| 3.5 | Τεχνικός Κώδικας NOx - Κύκλοι Δοκιμών Κινητήρων Diesel..... | 30 |
| 3.6 | Αναθεώρηση της MARPOL 73/78..... | 32 |
| 4 | Κανονισμοί για τις εκπομπές ρύπων Ναυτικών Κινητήρων Diesel από άλλους οργανισμούς | 33 |
| 4.1 | ΗΠΑ - Οργάνωση Προστασίας του Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency, EPA)..... | 33 |
| 4.2 | Ευρωπαϊκή Ένωση..... | 36 |
| 4.3 | Σουηδία..... | 36 |
| | ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ | 37 |
| 5 | Μεθοδολογία εκτίμησης εκπομπών ρύπων βασιζόμενη στον Τεχνικό Κώδικά NOx 2008 | 37 |
| 5.1 | Δεδομένα Εισόδου..... | 38 |
| 5.2 | Επιπλέον μεταβλητές που εμφανίζονται στους υπολογισμούς..... | 39 |
| 5.3 | Μετατροπή σχετικής υγρασίας σε απόλυτη..... | 40 |
| 5.4 | Διόρθωση συγκεντρώσεων ξηρού/υγρού καυσαερίου..... | 40 |
| 5.5 | Υπολογισμός παροχής καυσαερίου..... | 41 |
| 5.6 | Διόρθωση εκπομπών NOx για την υγρασία και τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής..... | 42 |
| 5.7 | Υπολογισμός παροχής ρύπων σε (kg/h)..... | 42 |
| 5.8 | Υπολογισμός πυκνότητας παραγόμενου ξηρού καυσαερίου σε πρότυπες συνθήκες..... | 43 |
| 5.9 | Υπολογισμός ειδικής εκπομπής ρύπων..... | 43 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.10 | Διάγραμμα Ροής του λογισμικού εκτίμησης εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικά NOx 2008 | 44 |
| 6 | Εκτίμηση Ειδικών Εκπομπών Ρύπων με χρήση της Στοιχειομετρικής και Πραγματικής καύσης..... | 47 |
| 6.1 | Δεδομένα Εισόδου..... | 47 |
| 6.2 | Επιπλέον μεταβλητές που εμφανίζονται στους υπολογισμούς..... | 48 |
| 6.3 | Υπολογισμός σύστασης του καυσίμου σε <i>Kmol kg fuel</i> | 50 |
| 6.4 | Στοιχειομετρική Καύση | 50 |
| 6.5 | Καύση με περίσσεια αέρα- Πραγματική Καύση | 51 |
| 6.6 | Υπολογισμός παροχής καυσαερίου..... | 52 |
| 6.7 | Διόρθωση συγκεντρώσεων ξηρού/υγρού καυσαερίου..... | 53 |
| 6.8 | Διάγραμμα Ροής του λογισμικού εκτίμησης εκπομπών ρύπων βάσει της στοιχειομετρικής και πραγματικής καύσης..... | 54 |
| 7 | Εφαρμογή των λογισμικών εκτίμησης ρύπων σε μετρήσεις ναυτικών κινητήρων diesel | 56 |
| 7.1 | Εφαρμογή στον Κινητήρα A..... | 57 |
| 7.1.1 | Έλεγχος εναρμόνισης ειδικών εκπομπών NOx με τα όρια της Marpol 73/78 – Καμπύλη φόρτισης Κινητήρα A..... | 59 |
| 7.1.2 | Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου | 60 |
| 7.1.3 | Αξιολόγηση εκπομπών NOx..... | 62 |
| 7.1.4 | Αξιολόγηση εκπομπών CO ₂ | 64 |
| 7.1.5 | Εκπομπές CO | 66 |
| 7.1.6 | Εκπομπές Υδρογονανθράκων (HC) | 67 |
| 7.2 | Εφαρμογή στον Κινητήρα B..... | 69 |
| 7.2.1 | Έλεγχος εναρμόνισης ειδικών εκπομπών NOx με τα όρια της Marpol 73/78 – Καμπύλη φόρτισης Κινητήρα B..... | 71 |
| 7.2.2 | Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου | 72 |
| 7.2.3 | 22Εκπομπές NOx..... | 74 |
| 7.2.4 | Εκπομπές CO ₂ | 76 |
| 7.2.5 | Εκπομπές CO | 77 |
| 7.2.6 | Εκπομπές Υδρογονανθράκων (HC) | 78 |
| 7.3 | Εφαρμογή στη Μηχανή C..... | 79 |
| 7.3.1 | Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου | 81 |
| 7.3.2 | Εκπομπές NOx..... | 82 |
| 7.3.3 | Εκπομπές CO ₂ | 83 |
| 7.3.4 | Εκπομπές CO | 84 |
| 7.3.5 | Εκπομπές Υδρογονανθράκων (HC) | 85 |
| 7.4 | Εφαρμογή στον Κινητήρα D | 86 |
| 7.4.1 | Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου | 88 |
| 7.4.2 | Εκπομπές NOx..... | 89 |
| 7.4.3 | Εκπομπές CO ₂ | 90 |
| 7.4.4 | Εκπομπές CO | 91 |
| 7.4.5 | Εκπομπές Υδρογονανθράκων (HC) | 92 |
| 8 | Ανάλυση Ευαισθησίας του λογισμικού εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008..... | 93 |
| 8.1 | Ανάλυση Ευαισθησίας για τη μετρημένη συγκέντρωση CO ₂ στο καυσαέριο..... | 93 |
| 8.1.1 | Ανάλυση Ευαισθησίας CO ₂ στο NOx file του Κινητήρα A..... | 93 |

| | | |
|---|---|------------|
| 8.1.2 | Ανάλυση Ευαισθησίας CO ₂ στο NO _x file του Κινητήρα C..... | 96 |
| 9 | Ανάλυση Ευαισθησίας του λογισμικού εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση.. | 98 |
| 9.1 | Ανάλυση Ευαισθησίας στο CO ₂ | 98 |
| 9.1.1 | Ανάλυση Ευαισθησίας CO ₂ στο NO _x file του Κινητήρα A..... | 99 |
| 9.1.2 | Ανάλυση Ευαισθησίας CO ₂ στο NO _x file του Κινητήρα C..... | 101 |
| 9.2 | Ανάλυση Ευαισθησίας στο O ₂ | 103 |
| 9.2.1 | Ανάλυση Ευαισθησίας O ₂ στο NO _x file του Κινητήρα A..... | 103 |
| 9.2.2 | Ανάλυση Ευαισθησίας O ₂ στο NO _x file του Κινητήρα C..... | 106 |
| 10 | Εφαρμογή των λογισμικών εκτίμησης ρύπων σε πειραματικές μετρήσεις κινητήρα diesel..... | 108 |
| 10.1 | Εφαρμογή των λογισμικών εκτίμησης ρύπων στις πειραματικές μετρήσεις του Κινητήρα E..... | 108 |
| 10.2 | Έλεγχος εναρμόνισης ειδικών εκπομπών NO _x με τα όρια της Marpol 73/78 – Καμπύλη φόρτισης Κινητήρα E..... | 111 |
| 10.3 | Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου | 112 |
| 10.4 | Εκπομπές NO _x | 114 |
| 10.5 | Εκπομπές CO ₂ | 116 |
| 10.6 | Εκπομπές CO | 118 |
| 11 | Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα | 120 |
| 11.1 | Συμπεράσματα | 120 |
| 11.2 | Προτάσεις για μελλοντική μελέτη | 121 |
| 12 | Βιβλιογραφία | 122 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I..... | | 124 |
| ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ A – NO _x file | | 124 |
| ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ B – NO _x file | | 125 |
| ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ C – NO _x file | | 126 |
| ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ D – NO _x file | | 127 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II..... | | 128 |
| ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ E – Δεδομένα Πειραματικών Μετρήσεων | | 128 |

Σύνοψη

Στόχος της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη και αξιολόγηση απλοποιημένων μεθοδολογιών για την εκτίμηση εκπομπών ρύπων από ναυτικούς κινητήρες diesel, με έμφαση στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Το θέμα που μελετάται και αναλύεται στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε λόγω των όλο και αυστηρότερων κανονισμών που επιβάλλονται για τις εκπομπές ρύπων στη ναυτιλία από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό μέσω της συνθήκης MARPOL 73/78 αλλά και από άλλους εθνικούς οργανισμούς και από την γενικότερη σύγχρονη τάση για φιλικότερες προς το περιβάλλον τεχνολογικές λύσεις στη ναυτιλία. Η εργασία αποτελείται από έντεκα κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικές αρχές εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης εστιάζοντας στους ναυτικούς κινητήρες diesel και στις εκπομπές ρύπων τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των οξειδίων του αζώτου, των μηχανισμών σχηματισμού τους στους κινητήρες diesel καθώς και των επιπτώσεων της εκπομπής τους στο περιβάλλον και στον άνθρωπο.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή των περιορισμών που έχουν τεθεί για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου αλλά και άλλων ρύπων μέσω της Διεθνούς Συνθήκης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τη Ναυτιλία. (MARPOL 73/78).

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι κανονισμοί περιορισμών εκπομπών ρύπων ναυτικών κινητήρων που θέτουν εθνικοί οργανισμοί.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται μεθοδολογία εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων χρησιμοποιώντας μετρημένες συγκεντρώσεις, βασιζόμενη στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού και αναπτύσσεται λογισμικό βάσει αυτής.

Στο έκτο κεφάλαιο αναπτύσσεται λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων χρησιμοποιώντας μετρημένες συγκεντρώσεις που βασίζεται στη χημεία της στοιχειομετρικής και πραγματικής καύσης.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των λογισμικών που παρουσιάζονται στα κεφάλαια έξι και επτά, σε τέσσερα NOx file ναυτικών κινητήρων diesel και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Στο όγδοο κεφάλαιο εξετάζεται η επίπτωση σφάλματος μέτρησης στη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, στην εκτίμηση της παροχής καυσαερίου και των ειδικών εκπομπών οξειδίων του αζώτου όπως υπολογίζονται από το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008.

Στο ένατο κεφάλαιο μελετάται η επίπτωση σφάλματος μέτρησης στη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου, στην εκτίμηση της παροχής καυσαερίου και των ειδικών εκπομπών οξειδίων του αζώτου όπως υπολογίζονται από το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη χημεία της στοιχειομετρικής και πραγματικής καύσης.

Στο δέκατο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή των λογισμικών που παρουσιάζονται στα κεφάλαια έξι και επτά, σε πειραματικές μετρήσεις από ναυτικούς κινητήρες diesel και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Τέλος, στο ενδέκατο κεφάλαιο γίνεται μία συνολική καταγραφή των συμπερασμάτων που προέκυψαν και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

Summary

The main purpose of this diploma thesis is the development and evaluation of methodologies for the processing of measured marine diesel engine gaseous emissions and derivation of values, emphasizing on nitrogen oxide (NO_x) emissions. The subject of this thesis was chosen due to the stricter and stricter regulations which the International Maritime Organisation (IMO) through the Protocol of 1997 (MARPOL Annex VI) and other national organisations imply and the general recent growing tendency over environmentally friendly technological solutions for maritime applications.

The content of the study has been divided into eleven chapters. The first chapter provides the main principles of Internal Combustion Engine and focuses on marine diesel engine gaseous emissions.

The second chapter is dedicated to the detailed description of nitrogen oxides (NO_x), the mechanism that internal combustion diesel engines form them and the effects of their emissions to the environment.

The third chapter describes analytically the NO_x and other emission regulations, the International Maritime Organisation has implied through The Protocol of 1997 (MARPOL Annex VI).

The fourth chapter presents the most important national level marine diesel engine gaseous emissions regulations.

The fifth chapter describes a methodology for the processing of measured marine diesel engine gaseous emissions according to the Marpol NO_x Technical Code 2008 and presents the developed software for these calculations.

The sixth chapter is dedicated to a methodology for the processing of marine diesel engine gaseous emissions based on stoichiometric and real combustion chemical equations and presents the developed software for these calculations.

The seventh chapter is dedicated to the application of both softwares for the processing of marine diesel engine gaseous emissions to four NO_x files of marine diesel engines and the evaluation of the results.

The eighth chapter contains a response analysis to carbon dioxide concentration of the software for the processing of measured marine diesel engine gaseous emissions according to the Marpol NO_x Technical Code 2008.

The ninth chapter presents a response analysis to carbon and oxygen concentration of the software for the processing of marine diesel engine gaseous emissions based on stoichiometric and real combustion chemical equations

The tenth chapter is dedicated to the application of both softwares for the processing of marine diesel engine gaseous emissions to experimental data from a marine diesel engines and the evaluation of the results.

Finally, the eleventh chapter concludes with an overall synopsis of the results from all the aforementioned topics and provides some recommendations for further research in the field of marine engine gaseous emissions.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1 Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ).

1.1 Γενικά

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης διακρίνονται σε εμβολοφόρες και περιστροφικές και έχουν εκτεταμένη χρήση στους τομείς παραγωγής ενέργειας και ισχύος. Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στις επίγειες μεταφορές, στη ναυσιπλοΐα και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες ως προς την αρχή λειτουργίας τους:

- στους κινητήρες Otto
- στους κινητήρες Diesel

Η βασική διαφορά των δυο τύπων κινητήρων είναι ότι ενώ στους κινητήρες Otto η ανάφλεξη του καυσίμου πραγματοποιείται με τη βοήθεια εξωτερικού μέσου (ηλεκτρικού σπινθήρα) στους κινητήρες diesel υπάρχει αυτανάφλεξη μέσω της κατάλληλης έγχυσης του καυσίμου εντός του θαλάμου καύσης.

Όπως αναφέρθηκε το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου από ναυτικούς κινητήρες οι οποίοι στο σύνολο τους είναι κινητήρες diesel για αυτό το λόγο η περιγραφή επικεντρώνεται στους κινητήρες diesel.

Στους κινητήρες diesel εισάγεται ατμοσφαιρικός αέρας και χρησιμοποιούνται ως καύσιμα τα βαρύτερα της βενζίνης υγρά καύσιμα της κατηγορίας των πετρελαίων. Για το σχηματισμό του μίγματος καύσης το καύσιμο εισάγεται στο κύλινδρο διασκορπισμένο στον ήδη συμπιεσμένο αέρα με την βοήθεια μηχανικής έγχυσης υπό την επίδραση υψηλής πίεσης που δημιουργείται από το σύστημα παροχής καυσίμου. Η έναυση και ο ρυθμός καύσης ελέγχονται από τον χρόνο και το ρυθμό εγχύσεως του καυσίμου σε συνδυασμό κυρίως με το επίπεδο τύρβης (αναταραχής κινήσεως) του συμπιεσμένου αέρα. Επειδή ο διατιθέμενος χρόνος για το σχηματισμό του μίγματος είναι σχετικά μικρός είναι αναγκαία η ύπαρξη μιας περίσσειας αέρα (ελάχιστος λόγος μαζών αέρα-καυσίμου 18:1 έως 25:1) για την επίτευξη τελείας καύσης, πράγμα όμως που οδηγεί σε μειωμένη συγκέντρωση ισχύος. Στους συγχρόνους κινητήρες diesel το πρόβλημα αυτό ξεπερνιέται με την χρήση της υπερπλήρωσης.

Σε κινητήρες μέσων και μεγάλων διαστάσεων χρησιμοποιείται συνήθως μια ανεξάρτητη αντλία για κάθε κύλινδρο που κινείται κατευθείαν από τον εκκεντροφόρο άξονα του κινητήρα. Στους κινητήρες μικρών ή και μέσων διαστάσεων χρησιμοποιείται πολυκύλινδρη αντλία όπου κάθε κύλινδρος της τροφοδοτεί ένα κύλινδρο κινητήρα.

Η ρύθμιση της ισχύος του κινητήρα diesel είναι “ποιοτική” δηλαδή η αυξομείωση του έργου και της ισχύος επιτυγχάνεται με την μεταβολή της “ποιότητας” του μίγματος καυσίμου-αέρα, που προκαλείται με την μεταβολή της ανά κύκλο εγχεόμενης ποσότητας καυσίμου (ρύθμιση της αντλίας καυσίμου) ενώ η ποσότητα του αναρροφώμενου αέρα και επομένως ουσιαστικά και του μίγματος παραμένει πρακτικά η ίδια για όλα τα φορτία εφόσον η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα παραμένει σταθερή και ο κινητήρας είναι φυσικής αναπνοής. Το μέγιστο φορτίο στους κινητήρες diesel που χρησιμοποιούνται σε οχήματα τίθεται από την καύση και είναι το φορτίο πέραν του οποίου γίνεται εμφάνιση απαράδεκτου καπνού (άκαυστος άνθρακας) στην εξαγωγή των καυσαερίων. Σε κινητήρες μεγάλου μεγέθους όπως των πλοίων και της ηλεκτροπαραγωγής το όριο του φορτίου τίθεται συνήθως από τις θερμικές ή μηχανικές καταπονήσεις του κινητήρα.

Οι κινητήρες diesel παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των κινητήρων Otto και γι’ αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σε εφαρμογές όπου απαιτούνται κινητήρες μεγάλου μεγέθους όπως η ηλεκτροπαραγωγή και η ναυτιλία. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτά είναι τα πιο κάτω:

- Καλύτερος βαθμός απόδοσης. Ο κινητήρας diesel παρουσιάζει ψηλό βαθμό συμπίεσης ο οποίος βελτιώνει το βαθμό απόδοσης και μειώνει την ειδική κατανάλωση καυσίμου.
- Χρήση φθηνών καυσίμων βαρύτερων της βενζίνης. Ο κινητήρας diesel χρησιμοποιεί καύσιμα βαρύτερα της βενζίνης που έχουν χαμηλότερο κόστος.

Οι εμβολοφόροι κινητήρες εσωτερικής καύσης ως προς τη λειτουργία τους χωρίζονται σε δίχρονους (2-Χ) και τετράχρονους (4-Χ). Η διαφορά τους έγκειται στο ότι στους δίχρονους κινητήρες κάθε κύλινδρος παράγει έργο σε κάθε δυο διαδρομές του εμβόλου (μια πλήρης περιστροφή του στροφαλοφόρου) ενώ στους τετράχρονους σε κάθε τέσσερις διαδρομές (δυο πλήρεις περιστροφές του στροφαλοφόρου).

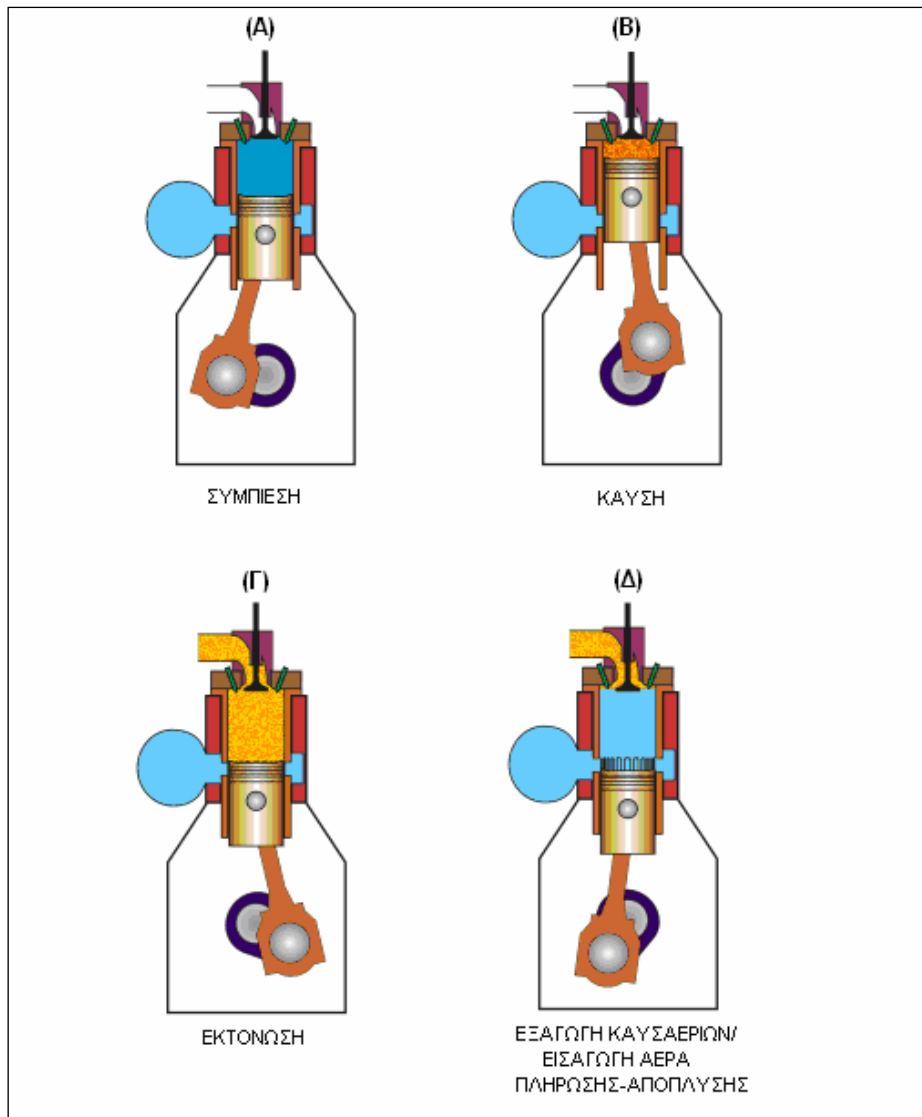
1.2 Περιγραφή της Λειτουργίας Δίχρονου Κινητήρα Diesel

α) Συμπίεση: Κατά τη φάση της συμπίεσης το έμβολο κινείται ανοδικά συμπιέζοντας τον αέρα που εισέρχεται από τις θυρίδες εισαγωγής αυξάνοντας έτσι την πίεση και τη θερμοκρασία του (Σχήμα 1.1-A). Όταν το έμβολο φτάσει κοντά στο Άνω Νεκρό Σημείο (Α.Ν.Σ) η θερμοκρασία του αέρα υπερβαίνει τη θερμοκρασία αναφλέξεως του καυσίμου.

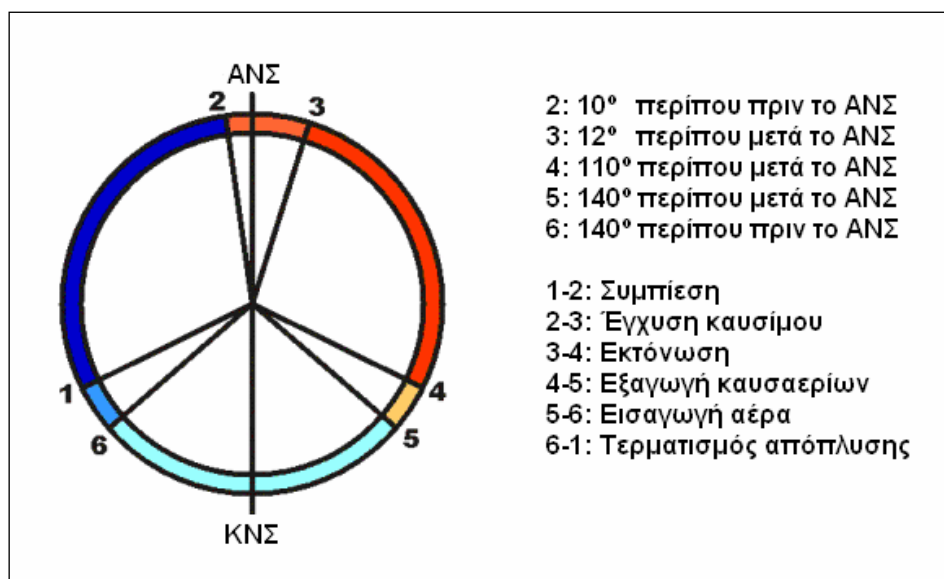
β) Έγχυση καυσίμου και καύση: Λίγες μοίρες γύρω από το Α.Ν.Σ εγχέεται το καύσιμο εντός του θαλάμου καύσης υπό μορφή μικροσκοπικών σταγονιδίων μέσω κατάλληλα διαμορφωμένου εγχυτήρα. Το εγχεόμενο καύσιμο αναμιγνύεται με τον αέρα ενώ ο διασκορπισμός του μέσα στον κύλινδρο συμβάλλει στη γρηγορότερη ατμοποίηση του και στην καλύτερη ανάμιξη του με τον αέρα ώστε όταν δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες να αρχίσει η έναυση του μείγματος και να ξεκινήσει το φαινόμενο της καύσης (Σχήμα 1.1-B).

γ) Εκτόνωση: Σε 12° μοίρες περίπου μετά το Α.Ν.Σ ξεκινάει η φάση της εκτόνωσης η οποία περατώνεται με την αποκάλυψη των θυρίδων εξαγωγής από το έμβολο (110° μοίρες περίπου μετά το Α.Ν.Σ) ή με το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής για να ξεκινήσει η φάση της εξαγωγής των καυσαερίων (Σχήμα 1.1-Γ). Κατά τη φάση της εκτόνωσης επιτυγχάνεται η παραγωγή της ισχύος από τον κινητήρα.

δ) Εξαγωγή καυσαερίων και νέα πλήρωση αέρα: Μετά την εκτόνωση και σε 140° από το Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) περίπου αποκαλύπτονται οι θυρίδες του αέρα εισαγωγής. Οι θυρίδες αυτές αποκαλύπτονται μετά από το άνοιγμα της βαλβίδας εξαγωγής καυσαερίων (ή των θυρίδων εξαγωγής) όταν η πίεση εντός του κυλίνδρου μειωθεί στα επίπεδα της πίεσης αέρα στον οχετό εισαγωγής, ώστε να είναι δυνατή η διαφυγή των καυσαερίων προς τον οχετό εξαγωγής. Η διαδικασία αυτή λέγεται «απόπλυση». Μέσω των θυρίδων του αέρα εισαγωγής εισάγεται στον κύλινδρο ο απαραίτητος αέρας για την καύση, ενώ μέρος του αέρα αυτού χρησιμοποιείται και για να οδηγήσει τα εναπομείναντα καυσαέρια στην εξαγωγή (αέρας καθαρισμού) ολοκληρώνοντας τη διαδικασία της «απόπλυσης» (Σχήμα 1.1-Δ). Οι τυπικές μέθοδοι απόπλυσης οι οποίοι εφαρμόζονται στους δίχρονους κινητήρες φαίνονται στο Σχήμα 1. Έπειτα, το έμβολο συνεχίζει τη καθοδική του πορεία εντός του κυλίνδρου μέχρι το Κάτω Νεκρό Σημείο (ή ΚΝΣ), σε εκείνο ακριβώς το σημείο έχει περιστραφεί ο στροφαλοφόρος άξονας από τη θέση του ΑΝΣ μέχρι το ΚΝΣ του εμβόλου, 180° . Ακολούθως, το έμβολο αρχίζει και πάλι υπό την επίδραση του στροφαλοφόρου άξονα την ανοδική του πορεία κλείνοντας σταδιακά και πάλι τις θυρίδες αέρα εισαγωγής. Τέλος, κλείνει η βαλβίδα (ή θυρίδα) εξαγωγής καυσαερίου, ολοκληρώνοντας έτσι ένα κύκλο λειτουργίας και ξεκινώντας τη νέα συμπίεση. Στα σχήματα 1-1 και 1-2 φαίνεται ο κύκλος λειτουργίας ενός δίχρονου κινητήρα και οι τέσσερις διεργασίες του.



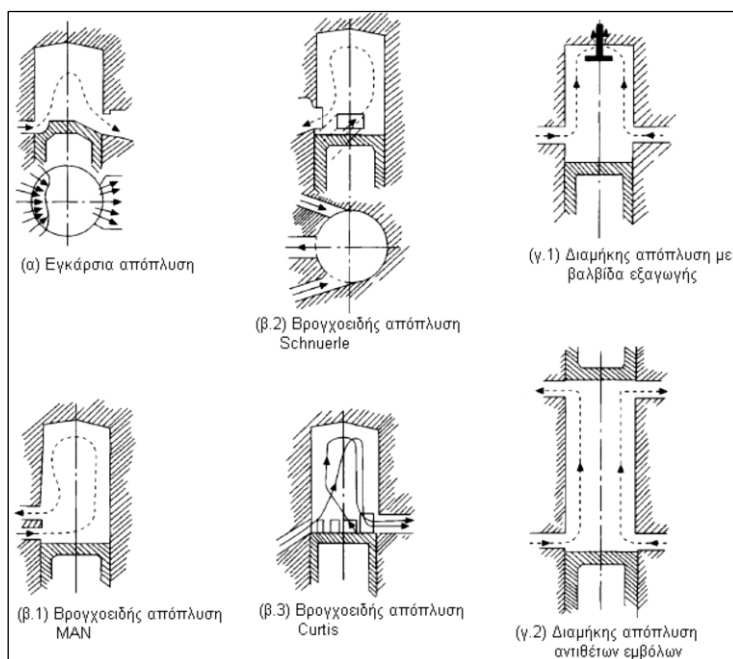
Σχήμα 1.1 Κύκλος λειτουργίας δίχρονου κινητήρα



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα διανομής δίχρονου κινητήρα

Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται συνήθεις διατάξεις αποπλύσεως δίχρονων κινητήρων καθώς και οι διαδρομές αποπλύσεως που ακολουθούνται σε αυτές. Όλες οι μέθοδοι απόπλυσης που χρησιμοποιούνται στους δίχρονους εμβολοφόρους κινητήρες έχουν ως στόχο τη μείωση του χρόνου καθαρισμού του θαλάμου καύσης από τα καυσαέρια αφήνοντας την ελάχιστη δυνατή ποσότητα καυσαερίων εγκλωβισμένων στο θάλαμο καύσεως μετά την έναρξη του νέου κύκλου λειτουργίας. Η απόπλυση που λαμβάνει χώρα σε δίχρονους κινητήρες που διαθέτουν βαλβίδα (ή βαλβίδες) εξαγωγής καυσαερίου επί της κυλινδροκεφαλής τους, ονομάζεται διαμήκης απόπλυση, λόγω της διαδρομής του αέρα σαρώσεως εντός του κυλίνδρου (Σχήμα 1.3-γ). Ωστόσο άλλοι δίχρονοι κινητήρες δε διαθέτουν βαλβίδες, αλλά θυρίδες εξαγωγής καυσαερίων κατ' αντιστοιχία με τις θυρίδες εισαγωγής. Καθώς το έμβολο ξεκινά να αποκαλύπτει τις θυρίδες εξαγωγής κατά τη φάση της εκτόνωσης, το καυσαέριο ξεκινά να απομακρύνεται από τον κύλινδρο. Όταν δε αποκαλύπτονται οι θυρίδες εισαγωγής, σχηματίζονται «βρόγχοι» αέρα στο εσωτερικό του κυλίνδρου που οδηγούν το παραμένον καυσαέριο έξω από αυτόν. Η διαδικασία απόπλυσης αυτή ονομάζεται βρογχοειδής απόπλυση (Σχήμα 1.3-β).

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι στους κινητήρες με βρογχοειδή απόπλυση το μήκος του εμβόλου είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τους κινητήρες διαμήκους αποπλύσεως, διότι πρέπει οι θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής να είναι καλυμμένες όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΑΝΣ. Αν και απλούστεροι στην κατασκευή και με λιγότερα κινούμενα μέρη, οι κινητήρες με βρογχοειδή απόπλυση υπολείπονται των κινητήρων διαμήκους αποπλύσεως, τόσο από πλευράς αποδοτικότητας, όσο και από πλευράς ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι η βρογχοειδής απόπλυση δεν απομακρύνει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα καυσαερίου με αποτέλεσμα λιγότερο καύσιμο να μπορεί να καεί σε κάθε κύκλο λειτουργίας. Έτσι οι σύγχρονοι, μεγάλων διαστάσεων, δίχρονοι κινητήρες που κατασκευάζονται σήμερα είναι κινητήρες διαμήκους αποπλύσεως.



Σχήμα 1.3 Συνήθεις διατάξεις αποπλύσεως δίχρονων κινητήρων

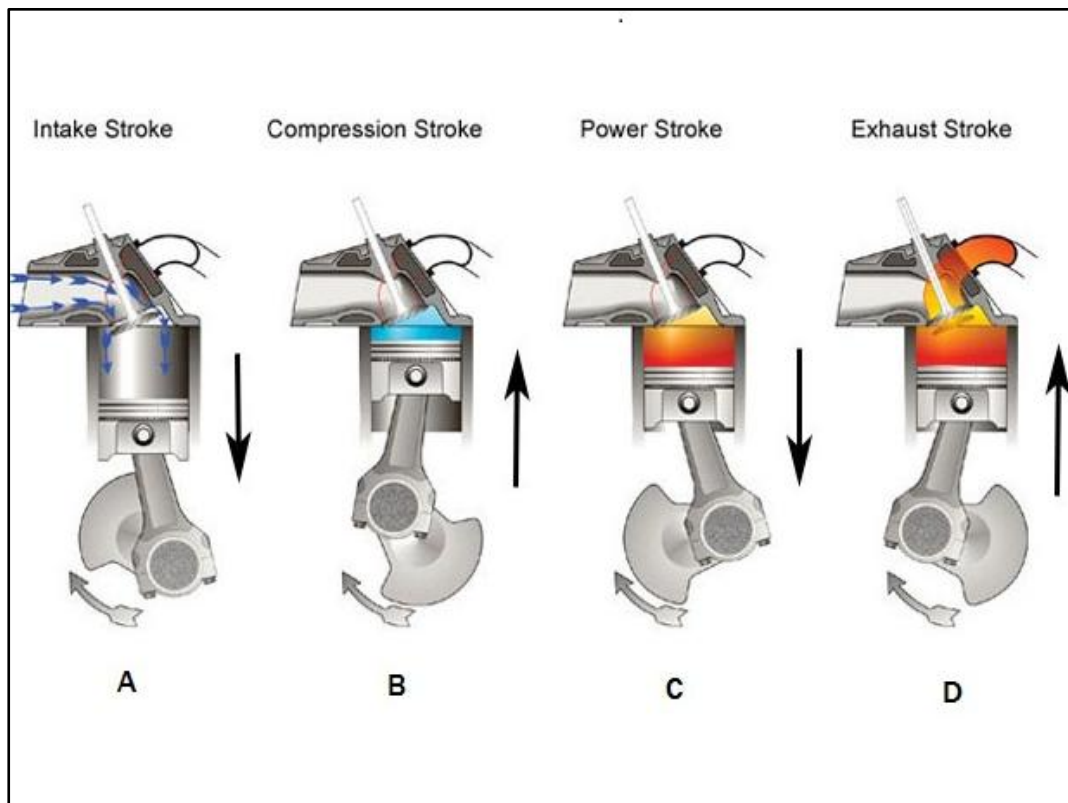
1.3 Περιγραφή της Λειτουργίας Τετράχρονου Κινητήρα Diesel

α) Εισαγωγή: Η εισαγωγή αρχίζει όταν το έμβολο βρίσκεται στο Α.Ν.Σ και κατεβεί προς το Κ.Ν.Σ εισάγοντας στο κύλινδρο τον αέρα. Για να αυξηθεί η μάζα του μίγματος που εισάγεται, οι βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει ελαφρά πρώτου αρχίσει ο χρόνος εισαγωγής και κλείνει ελαφρά μετά το πέρας του (Σχήμα 1-4-A).

β) Συμπίεση: Όταν και οι δυο βαλβίδες είναι κλειστές ο αέρας που ευρίσκεται μέσα στο κύλινδρο συμπιέζεται σε ένα μικρό κλάσμα του αρχικού του όγκου. Προς το πέρας του χρόνου συμπίεσης εγχέεται το καύσιμο και προκαλείται η έναυση και η πίεση αυξάνει με γρήγορο ρυθμό (Σχήμα 1-4-B) .

γ) Εκτόνωση: Ο χρόνος εκτόνωσης αρχίζει με το έμβολο στο Α.Ν.Σ καθώς τα υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης καυσαέρια ωθούν το έμβολο προς τα κάτω (Σχήμα 1-4-C). Ο χρόνος της εκτόνωσης ολοκληρώνεται όταν το έμβολο φτάσει στο Κ.Ν.Σ. Καθώς το έμβολο πλησιάζει το Κ.Ν.Σ η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει για να αρχίσει η διαδικασία εξαγωγής.

δ) Εξαγωγή: Κατά το χρόνο εξαγωγής τα καυσαέρια εξέρχονται του κυλίνδρου διότι η πίεση τους είναι πολύ πιο υψηλή από την πίεση του οχετού εξαγωγής και λόγω της κίνησης του εμβόλου προς το Α.Ν.Σ. Καθώς το έμβολο πλησιάζει το Α.Ν.Σ ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής και λίγο μετά το Α.Ν.Σ η βαλβίδα εξαγωγής κλείνει για να αρχίσει ξανά ο κύκλος λειτουργίας (Σχήμα 1-4-D).



Σχήμα 1.4 Κύκλος Λειτουργίας Τετράχρονου Κινητήρα

1.4 ***Πλεονεκτήματα του Δίχρονου Έναντι του Τετράχρονου κινητήρα***

- Σε έναν δίχρονο κινητήρα Diesel το αποδιδόμενο ανά κύκλο ωφέλιμο έργο, συγκριτικά με έναν τετράχρονο κινητήρα, είναι μεγαλύτερο (θεωρητικά το διπλάσιο από το ωφέλιμο έργο που αποδίδεται από μια τετράχρονη μηχανή με τις ίδιες διαστάσεις). Αυτό οφείλεται, κυρίως, στο ότι κάθε κύλινδρος μιας τετράχρονης μηχανής παράγει ωφέλιμο έργο σε κάθε τέσσερις διαδρομές του εμβόλου, ενώ κάθε κύλινδρος μιας δίχρονης παράγει έργο σε κάθε δύο διαδρομές του εμβόλου. Όμως στην πράξη είναι μειωμένη κατά 20-30% τουλάχιστον λόγω του τμήματος της διαδρομής που χρησιμοποιείται για την απόπλυση, της κακής εναλλαγής αερίων και το έργο που αποδίδεται στην αντλία σάρωσης εφόσον αυτή λειτουργεί.
- Ο δίχρονος κινητήρας έχει λιγότερες βαλβίδες από τον τετράχρονο ή και καθόλου (ο τύπος με θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής) άρα και απλούστερο μηχανισμό εναλλαγής αερίων σε αντίθεση με τον Σχήμα 1.1 τετράχρονο ο οποίος έχει βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής κάτι που τον κάνει πιο πολύπλοκο στην λειτουργία.
- Ο δίχρονος κινητήρας έχει πιο ομοιόμορφο διάγραμμα ροπής στρέψης γιατί έχει παραγωγή έργου σε κάθε περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα ενώ στο τετράχρονο η παραγωγή έργου γίνεται σε κάθε δυο περιστροφές.

1.5 ***Πλεονεκτήματα του Τετράχρονου Κινητήρα Έναντι του Δίχρονου***

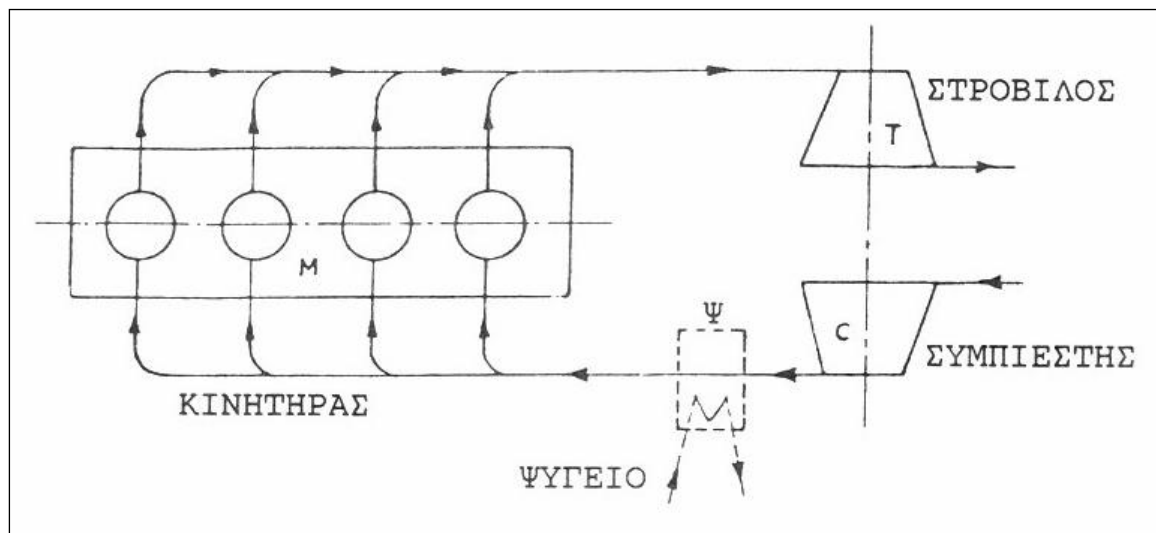
- Ο τετράχρονος κινητήρας παρουσιάζει σχετική άνεση χρόνου (περίπου δυο διαδρομές) για την εναλλαγή των αερίων οπότε επιτρέπει πληρέστερη απόπλυση των κυλίνδρων και εκ νέου πλήρωση τους.
- Η χρονικά ανετότερη εναλλαγή αερίων στον τετράχρονο κινητήρα (για την ίδια ταχύτητα περιστροφής) επιτρέπει την αποτελεσματικότερη απαγωγή της θερμότητας και έτσι επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερων ταχυτήτων περιστροφής και βαθμού υπερπληρώσεως έναντι των δίχρονων κινητήρων.
- Ο τετράχρονος κινητήρας παρουσιάζει μεγαλύτερη ευχέρεια μεταβολής των στοιχείων διανομής με μεταβολή της γωνιάς των έκκεντρων στον εκκεντροφόρο άξονα.

1.6 Υπερπλήρωση Κινητήρων Diesel

Η συνήθης μέθοδος αύξησης της ισχύος στους κινητήρες diesel είναι η μέθοδος της υπερπλήρωσης. Η υπερπλήρωση συνίσταται στην αντικατάσταση της φυσικής αναπνοής (αμέσου αναρροφήσεως αέρος από το περιβάλλον) του κινητήρα από εξαναγκασμένη πλήρωση του κυλίνδρου με αέρα υπό πίεση που παρέχεται από συμπιεστή. Στη περίπτωση των δίχρονων κινητήρων, η υπερπλήρωση συμβάλει και στο μηχανισμό της απόπλυσης.

Η υπερπλήρωση εκτός από την αύξηση της ισχύος του κινητήρα που είναι ο βασικός σκοπός εφαρμογής της έχει αποδειχθεί ότι συμβάλει και στην βελτίωση του βαθμού απόδοσης του κινητήρα.

Υπάρχουν διάφορα συστήματα υπερπλήρωσης όμως σήμερα βρίσκει σχεδόν καθολική εφαρμογή το σύστημα υπερπλήρωσης με ζεύγος στροβίλου-συμπιεστή, όπου ο συμπιεστής κινείται σε κοινό άξονα με ένα στρόβιλο ο οποίος περιστρέφεται εκμεταλλευόμενος την ενεργεία των καυσαερίων στην έξοδο από τους κυλίνδρους. Τυπική διάταξη στροβιλουπερπληρωτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-5.



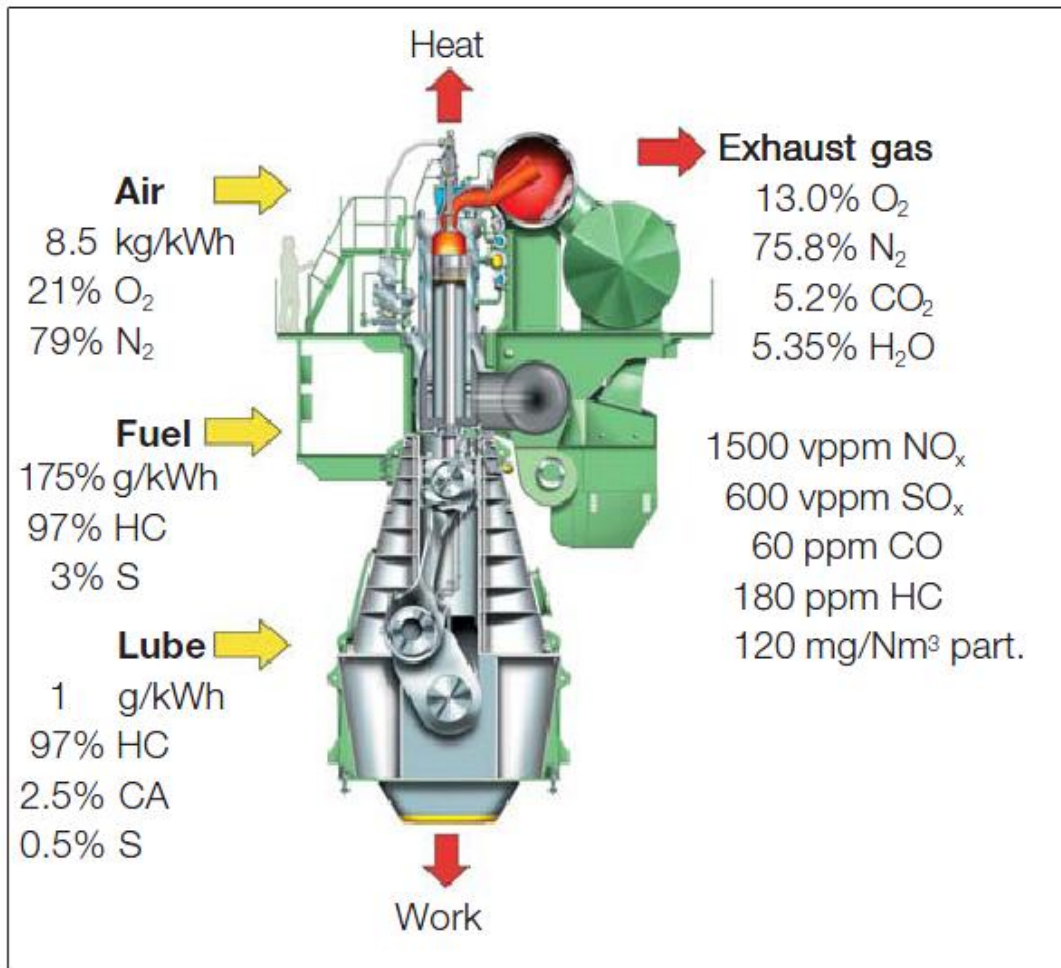
Σχήμα 1.5 Διάταξη Συστήματος Στροβιλουπερπληρωτή

1.7 Εκπεμπόμενοι Ρύποι από τους Κινητήρες Diesel

Οι εκπεμπόμενοι ρύποι από τους κινητήρες diesel είναι τα οξείδια του αζώτου (NO_x), η αιθάλη (soot), οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και τα οξείδια του θείου (SO_x).

- **Οξείδια του αζώτου (NO_x):** Τα οξείδια του αζώτου που παράγονται στο θάλαμο καύσης αποτελούνται κυρίως από μονοξείδιο του αζώτου (NO) και δευτερογενώς από διοξείδιο του αζώτου (NO₂) καθώς και άλλες μορφές όπως N₂O₅ και όλα αποδίδονται με τον ορό NO_x.
- **Αιθάλη (soot):** η αιθάλη είναι ανθρακώδες υλικό που αποτελείται από λεπτά σωματίδια στερεού ακαύστου άνθρακα τα οποία δημιουργούνται από την πυρόλυση του καυσίμου στο θάλαμο καύσης σε ζώνες όπου υπάρχει μικρή συγκέντρωση οξυγόνου. Η αιθάλη εμφανίζεται χαρακτηριστικά ως μαύρος καπνός. Η αιθάλη εκπέμπεται σε μεγάλες ποσότητες κατά τις απότομες αυξήσεις του φορτίου όπου με την απότομη έγχυση καυσίμου στο θάλαμο καύσης ο διατιθέμενος αέρας δεν επαρκεί τυπικά για την καύση ή κατά την συνεχή λειτουργία του κινητήρα σε πολύ υψηλά φορτία. Η αιθάλη εκτός από ρυπογόνος παράγοντας για το περιβάλλον προκαλεί προβλήματα και στην λειτουργία του κινητήρα με την μορφή επικαθήσεων σε διαφορά λειτουργικά μέρη.
- **Άκαυστοι υδρογονάνθρακες (HC):** οι εκπομπές των ακαύστων υδρογονανθράκων από τους κινητήρες diesel οφείλονται όπως και στην περίπτωση του μονοξειδίου του άνθρακα στην ατελή καύση. Οι κυριότερες ενώσεις των ακαύστων υδρογονανθράκων που παρουσιάζονται στις εκπομπές κινητήρων diesel είναι παραφίνες, αρωματικοί υδρογονάνθρακες, αλδεΐδες, κετόνες κλπ.
- **Μονοξείδιο του άνθρακα (CO):** Ο σχηματισμός του μονοξειδίου του άνθρακα οφείλεται στην ατελή καύση που λαμβάνει χώρα στο θάλαμο καύσης και έχει ως αποτέλεσμα την μη πλήρη οξείδωση του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Στο σχηματισμό του μονοξειδίου του άνθρακα βασικό ρόλο έχει ο λόγος ισοδυναμίας αέρα (λ) ο οποίος στους κινητήρες diesel κυμαίνεται μεταξύ 1,2-1,8, δηλαδή υπάρχει μεγάλη περίσσεια αέρα. Λόγω αυτής της περίσσειας αέρα οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα από τους κινητήρες diesel ευρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα.
- **Οξείδια του θείου (SO_x):** Τα οξείδια του θείου (SO_x), είναι ανόργανες χημικές ενώσεις. Όταν το καύσιμο περιέχει ενώσεις του θείου, αναπόφευκτα η καύση τους στους κινητήρες diesel, δηλαδή η ένωση τους με το οξυγόνο, εκλύει οξείδια του θείου. Με την παρουσία υγρασίας και περισσότερο κάποιου καταλύτη όπως το διοξείδιο του αζώτου, τα οξείδια του θείου οξειδώνονται περαιτέρω σε θειικό οξύ. Τα οξείδια του θείου μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα στον άνθρωπο αλλά και αλλοιώσεις στη βλάστηση και τα μέταλλα. Επιπλέον, η εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα μειώνει την ορατότητα και αυξάνει την οξύτητα των επιφανειακών υδάτων (λιμνών και ποταμών). Τέλος, μια από τις σημαντικότερες επιπτώσεις της εκπομπής SO₂ είναι η συνεισφορά του στο φαινόμενο της όξινης βροχής.

Στο σχήμα 1.6 απεικονίζονται οι τυπικές εκπομπές ρύπων από έναν δίχρονο αργόστροφο ναυτικό κινητήρα Diesel

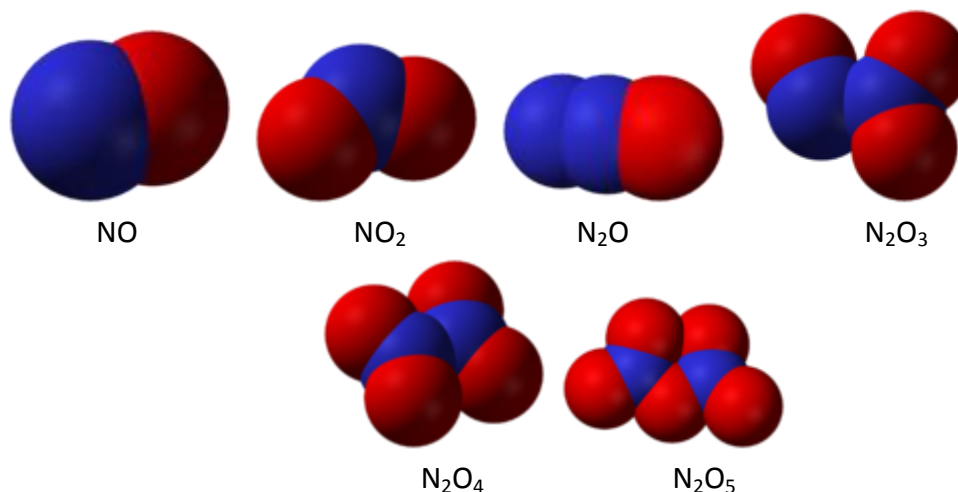


Σχήμα 1.6 Τυπικές εκπομπές ρύπων δίχρονου αργόστροφου ναυτικού κινητήρα Diesel

2 Περιγραφή Οξειδίων του Αζώτου (NO_x)

2.1 Τύποι NO_x και Παράγοντες που Επηρεάζουν την Παραγωγή τους

Τα οξείδια του αζώτου είναι ενώσεις αζώτου και οξυγόνου. Συνολικά υπάρχουν οχτώ οξείδια του αζώτου (σύμβολο που χρησιμοποιείται στη χημεία για το άζωτο: N και του οξυγόνου O) και συμβολίζονται N_γO_χ όπου χ=1,2...6 και γ=1 ή 2. Τα μόρια των οξειδίων του αζώτου ξεκινούν από τα σε χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνο δι-νιτρικό οξείδιο του αζώτου N₂O και καταλήγουν στο ασταθές δι-νιτρικό εξα-οξείδιο του αζώτου N₂O₆.



Σχήμα 2.1 Οξείδια του αζώτου

Ωστόσο, τα πιο σημαντικά οξείδια του αζώτου είναι το δι-νιτρικό οξείδιο του αζώτου N₂O, το μονοξείδιο του αζώτου NO και το διοξείδιο του αζώτου NO₂. Τα κύρια οξείδια του αζώτου που παράγονται κατά τη διαδικασία της εσωτερικής καύσης (και χαρακτηρίζονται ως NO_x) είναι τα NO και NO₂ και παράγονται με διαφορετικούς μηχανισμούς το καθένα, μερικοί από τους οποίους θα αναπτυχθούν σε επόμενες παραγράφους.

Οι ρύποι αυτοί παράγονται και στους κινητήρες Diesel αλλά και στους Otto σε παρόμοιες ποσότητες. Συγκριτικά με τους άλλους ρύπους που παράγουν οι κινητήρες εσωτερικής καύσεως τα οξείδια του αζώτου προσδιορίζονται δυσκολότερα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό τους δεν μπορούν να προβλεφθούν με ικανοποιητική ακρίβεια και να μελετηθούν με λεπτομέρεια. Αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι απόλυτα γνωστός ο μηχανισμός σχηματισμού των NO_x και επιπλέον γιατί οι παράγοντες που τον επηρεάζουν είναι πολλοί και κάποιιοι από αυτούς δύσκολα μπορούν να μοντελοποιηθούν. Στους κινητήρες Otto έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στον τομέα της πρόβλεψης σε αντίθεση με τους Diesel όπου ο τομέας αυτός είναι σε εξέλιξη (υπάρχουν ακόμα πολλά προβλήματα και δυσκολίες) και η βιομηχανία επενδύει μεγάλα κεφάλαια για την ανάπτυξή του. Η μοντελοποίηση σε ένα κινητήρα Diesel παρουσιάζει αυτές τις δυσκολίες λόγω, κυρίως, της ανομοιομορφίας των φαινομένων που συμβαίνουν στους κυλίνδρους του. Ένα πλήρες υπολογιστικό μοντέλο για την πρόβλεψη των NO_x πρέπει να περιέχει όλους τους μέχρι σήμερα γνωστούς μηχανισμούς σχηματισμού του.

Οι τύποι NO_x έχουν χωριστεί σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους: τα θερμικά, τα προερχόμενα από το καύσιμο και τα άμεσα NO_x. Οι τρεις αυτές κατηγορίες αναλύονται στις παραγράφους 2.2,2.3,2.4. Γενικά, οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχηματισμό NO_x είναι:

1. Η τοπική πίεση και θερμοκρασία σε περιοχές του θάλαμο καύσης
2. Η μοριακή συγκέντρωση των κατάλληλων μορίων και ριζών που ευνοούν τον σχηματισμό τους όπως: N₂, N, O₂, O, OH και H. Η αύξηση των συγκεντρώσεων αυτών εξαρτάται από την τοπική θερμοκρασία αλλά και από τον τοπικό λόγο αέρα – καυσίμου.
3. Ο χρόνος παραμονής των μορίων αυτών στην ζώνη αντίδρασης.

2.2 Θερμικά NO_x (*thermal NO_x*)

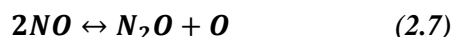
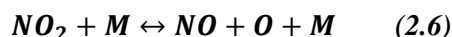
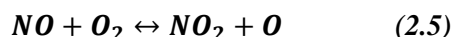
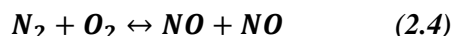
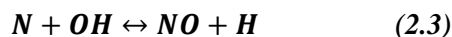
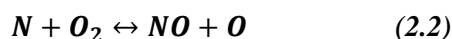
Παράγονται όταν το άζωτο, που περιέχεται στα θερμά προϊόντα καύσεως (μέσα στον κύλινδρο) που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της καύσης, αντιδράσει με το οξυγόνο που περιέχεται (αυτό που περίσσεψε ή δεν κάηκε) σε αυτά. Αυτός ο μηχανισμός είναι ευρέως γνωστός. Ο μηχανισμός απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες και η εξάρτηση της παραγωγής NO_x από την θερμοκρασία είναι εκθετική.

Η κατανομή της θερμοκρασίας στον κύλινδρο δεν είναι ομοιόμορφη και τα NO_x παράγονται στις περιοχές εκείνες όπου η τοπική θερμοκρασία είναι υψηλότερη (μεγαλύτερη από την μέση). Λόγω αυτής της ανομοιομορφίας (κυρίως στους κινητήρες Diesel) είναι δύσκολη η μοντελοποίηση του μηχανισμού σχηματισμού των NO_x.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή θερμικών NO_x, εκτός από την θερμοκρασία, είναι κυρίως η περίσσεια οξυγόνου μέσα στο θάλαμο καύσης, ο χρόνος παραμονής σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες και η τύρβη μέσα στο θάλαμο.

Για να σπάσει ο τριπλός δεσμός του μορίου του N₂ απαιτούνται θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1800 K. Το μέγεθος τις θερμοκρασίας καθορίζει κατά ένα μεγάλο βαθμό τον ρυθμό σχηματισμού των NO_x. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι ο σχηματισμός αυξάνεται εκθετικά για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 2200K.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές από τις χημικές εξισώσεις που περιγράφουν το μηχανισμό σχηματισμού θερμικών NO_x¹:

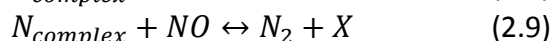
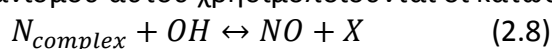


¹ Οι σχέσεις 2.1-7 δίνονται σε μορφή χημικής ισορροπίας αλλά γενικά οι αντιδράσεις σχηματισμού NO_x δεν χαρακτηρίζονται από χημική ισορροπία αλλά από χημική κινητική και εξαρτώνται από τους συντελεστές ταχύτητας της αντίδρασης αλλά και τις σταθερές ισορροπίας.

2.3 NOx λόγω του καυσίμου (fuel NOx)

Παράγονται όταν το άζωτο που περιέχεται στο καύσιμο αντιδρά (οξειδώνεται) με το οξυγόνο που περιέχεται στον κύλινδρο. Τα αέρια καύσιμα περιέχουν μικρές ποσότητες αζώτου και συνεπώς παράγουν μικρά ποσά NOx με αυτόν τον μηχανισμό. Ο άνθρακας και το λάδι περιέχουν πολύ περισσότερο άζωτο και άρα το ποσοστό NOx που προέρχεται από το καύσιμο στις περιπτώσεις αυτές είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με τις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται αέρια καύσιμα.

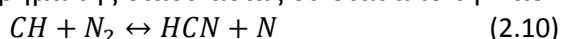
Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι πλήρως γνωστός – κατανοητός, αλλά έχει παρατηρηθεί ότι δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την θερμοκρασία και εξαρτάται από το περιεχόμενο του καυσίμου σε αζωτούχες ενώσεις (NH₃, HCN, CN) αλλά και από το λόγο ισοδυναμίας καυσίμου - αέρα (σχηματίζονται NOx για Φ ≤ 1). Για την μοντελοποίηση του μηχανισμού αυτού χρησιμοποιούνται οι κάτωθι σχέσεις:



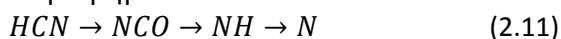
όπου το X συμβολίζει άλλα προϊόντα. Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητός.

2.4 Άμεσα NOx (prompt NOx)

Παράγονται από την άμεση αντίδραση ριζών υδρογονανθράκων όπως C, CH, και CH₂, οι οποίες παρήχθησαν από το καύσιμο στη διάρκεια της καύσης, με το άζωτο του αέρα καύσης. Η αντίδραση αυτή γίνεται πολύ γρήγορα και παράγονται μεταβατικές ουσίες που στη συνέχεια οξειδώνονται σε NOx καθώς αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα καύσης (δηλ. του οξυγόνου που περιέχεται στο καυσαέριο). Το πρώτο και το πιο σημαντικό βήμα της διαδικασίας δίνεται από την πιο κάτω σχέση:



όπου η μεταβατική ουσία είναι η HCN η οποία θα μετατραπεί στη συνέχεια σε ατομικό άζωτο μετά από μια σειρά βημάτων:



και στη συνέχεια το N οξειδώνεται και δίνει NOx.

Σε υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζεται η αντίδραση:



η οποία συνεισφέρει στο σπάσιμο των δεσμών του N₂. Τα άτομα του αζώτου από την αντίδραση αυτή οξειδώνονται και αυτά (αφού αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα καύσης) σε NOx.

2.5 *Επιπτώσεις των Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου (NOx)*

Το άζωτο αποτελεί το 78% του όγκου της ατμόσφαιρας. Η μετατροπή του αζώτου σε οξείδια προϋποθέτει κάποια διαδικασία καύσης. Οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα προέρχονται, ως επί των πλείστων, από ανθρωπογενείς δραστηριότητες λόγω της καύσης στις μηχανές εσωτερικής καύσεως που χρησιμοποιούνται κυρίως στις μεταφορές (οδικές, αεροπορικές, θαλάσσιες) αλλά και για την παραγωγή ενέργειας. Οξείδια του αζώτου, βέβαια εκπέμπονται και από φυσικά φαινόμενα όπως είναι τα ηφαίστεια και οι κεραυνοί.

Τα οξείδια του αζώτου συμμετέχουν στην εμφάνιση ποικιλίας αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον, όπως οι σημαντικές αλλαγές στη σύσταση ορισμένων ειδών βλάστησης υδροβιοτόπων και χερσαίων εκτάσεων, η εμφάνιση της όξινης βροχής, η όξινη και ο ευτροφισμός γλυκών υδάτων, η μειωμένη ορατότητα, η αύξηση επιπέδων τοξινών σε διάφορα είδη ψαριών και άλλων υδρόβιων ζώων.

Εξίσου σημαντικές επιπτώσεις έχουν τα οξείδια του αζώτου πάνω στον άνθρωπο. Η περιορισμένη διαλυτότητα τους επιτρέπει να διεισδύσουν βαθιά στο κατώτερο αναπνευστικό σύστημα. Οι ενοχλήσεις μπορούν να αρχίσουν από χαμηλές συγκεντρώσεις των 15 ppm, με ερεθισμό στα μάτια και στη μύτη. Από τα 25 ppm αρχίζουν οι αναπνευστικές ενοχλήσεις, με βήχα, δύσπνοια, πόνους στο στήθος, βήχα με κίτρινο επίχρισμα ή αίμα, κυάνωση, πυρετό, κρίση άσθματος, αυξημένο αναπνευστικό ρυθμό και πνευμονικό οίδημα. Έκθεση σε 150-200 ppm μπορεί να οδηγήσει σε θανατηφόρα πνευμονική ίωση. Το διοξείδιο του αζώτου αντιδρά επίσης με την αιμοσφαιρίνη δημιουργώντας αδρανείς ενώσεις, με κύρια την μεθαιμοσφαιρίνη, της οποίας τα επίπεδα χρησιμοποιούνται και σαν ένδειξη του ύψους της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μονοξείδιο και διοξείδιο του αζώτου. Μ' αυτό τον τρόπο εμποδίζεται η οξυγόνωση των ιστών. Το αποτέλεσμα είναι ταχυπαλμία υπέρταση και καρδιακή αρρυθμία.

3 Διεθνής Συνθήκη για την Πρόληψη της Ρύπανσης από τη Ναυτιλία (MARPOL 73/78)

3.1 Ιστορικό MARPOL 73/78

Το πρώτο μισό του 20ού αιώνα η ρύπανση των θαλασσών από πετρέλαιο άρχισε να θεωρείται σοβαρό πρόβλημα, με αποτέλεσμα πολλές χώρες να επιθυμούν να εισάγουν εθνικούς κανονισμούς ελέγχου των εκροών πετρελαίου μέσα στα χωρικά τους ύδατα. Έτσι, το 1954 πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο διάσκεψη με αντικείμενο τη ρύπανση των θαλασσών από το πετρέλαιο, η οποία οδήγησε στην υιοθέτηση της **Διεθνούς Συνθήκης για την πρόληψη της μόλυνσης της θάλασσας από το πετρέλαιο (OILPOL)**. Η Συνθήκη OILPOL τέθηκε σε ισχύ στις 26 Ιουλίου του 1958, χρονιά κατά την οποία όλες οι λειτουργίες της μεταφέρθηκαν στον IMO (International Maritime Organization). Η Συνθήκη OILPOL, η οποία τροποποιήθηκε το 1962, 1969 και 1971, εξέτασε πρωτίστως τη ρύπανση ως αποτέλεσμα των στερεότυπων διαδικασιών βυτιοφόρων και της εκροής πετρελαιούχων αποβλήτων από τους χώρους των μηχανημάτων –θεωρώντας τις ως δύο από τις σημαντικότερες αιτίες της ρύπανσης πετρελαίου από τα σκάφη- και προσπάθησε να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της μόλυνσης των θαλασσών από το πετρέλαιο (ως πετρέλαιο ορίζεται το ακατέργαστο πετρέλαιο, το πετρέλαιο καυσίμων, το βαρύ πετρέλαιο diesel και το λάδι λίπανσης) με δύο κύριους τρόπους:

- με την καθιέρωση των "απαγορευμένων ζωνών": το όριο απαγόρευσης της εκροής πετρελαίου ή μειγμάτων του, που περιέχουν περισσότερα από 100 μέρη του πετρελαίου ανά εκατομμύριο, επεκτάθηκε στα 50 –τουλάχιστον- μίλια από το κοντινότερο έδαφος
- με την απαίτηση για όλα τα συμβαλλόμενα μέρη για την λήψη όλων των κατάλληλων μέτρων ώστε να διαμορφώσουν τις λιμενικές εγκαταστάσεις τους για να μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τη ρύπανση των θαλασσών από τις πετρελαιοκηλίδες και τα υπολείμματα

3.2 Η Συνθήκη του 1973

Το 1973 πραγματοποιήθηκε η προγραμματισμένη από τον IMO Διεθνής Διάσκεψη, οι εργασίες της οποίας είχαν σαν αποτέλεσμα την υπογραφή της Διεθνούς Συνθήκης για την πρόληψη της ρύπανσης από τα σκάφη. Στην εν λόγω διάσκεψη αναγνωρίστηκε ότι, παρόλο που η αύξηση των περιστατικών τυχαίας ρύπανσης ήταν θεαματική, η λειτουργική ρύπανση των σκαφών εξακολουθούσε να αποτελεί τη μεγαλύτερη απειλή των θαλασσών. Ως εκ τούτου, η Συνθήκη του 1973 ενσωμάτωσε ένα μεγάλο μέρος της Συνθήκης OILPOL του 1954 και των τροποποιήσεών της στο Παράρτημα I που καλύπτει το πετρέλαιο. Ωστόσο, η Συνθήκη του 1973, εκτός από τη ρύπανση του πετρελαίου, είχε σαν έναν ακόμα στόχο να εξετάσει και να περιορίσει και άλλες μορφές ρύπανσης από τα σκάφη. Έτσι, σε άλλα παραρτήματα καλύφθηκαν οι χημικές ουσίες, οι επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονταν σε συσκευασμένη μορφή, τα λύματα και τα απορρίμματα. Η Συνθήκη του 1973 περιέλαβε επίσης δύο πρωτόκολλα, μετά από την εξέταση των εκθέσεων για τα περιστατικά που σχετίζονταν με επιβλαβείς ουσίες και διαιτησία (Reports on Incidents involving Harmful Substances and Arbitration).

Προκειμένου να τεθεί σε ισχύ η Συνθήκη του 1973 απαιτούνταν η επικύρωση από 15 κράτη, των οποίων συνδυασμένος ο εμπορικός στόλος μεταφραζόταν σε περισσότερο από το 50% της παγκόσμιας ακαθάρστης χωρητικότητας. Μέχρι το 1976 τη Συνθήκη είχαν επικυρώσει τρεις μόνο χώρες, η Ιορδανία, η Κένυα και η Τυνησία, οι οποίες αντιπροσώπευαν λιγότερο από το 1% του στόλου της παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας, παρόλο που κάθε κράτος είχε τη δυνατότητα να γίνει συμβαλλόμενο μέρος στη Συνθήκη επικυρώνοντας μόνο τα παραρτήματα I (που κάλυπτε το πετρέλαιο) και II (που αφορούσε στις χημικές ουσίες) και όχι τα παραρτήματα III έως V, που κάλυπταν τα επιβλαβή αγαθά σε συσκευασμένη μορφή, τα λύματα και τα απορρίμματα, τα οποία ήταν προαιρετικά.

3.3 Η Διάσκεψη του 1978

Τον Φεβρουάριο του 1978, μετά από μια διετία (1976-1977) κατά την οποία είχαν σημειωθεί πολλά ατυχήματα δεξαμενόπλοιων, ο IMO οργάνωσε μια διάσκεψη με αντικείμενο την ασφάλεια των δεξαμενόπλοιων και την πρόληψη της ρύπανσης από τα σκάφη αυτά. Οι εργασίες της διάσκεψης αυτής οδήγησαν στην υιοθέτηση μέτρων τα οποία επηρέασαν τόσο το σχεδιασμό όσο και τη λειτουργία των πετρελαιοφόρων και τα οποία ενσωματώθηκαν και στο μέρος του πρωτοκόλλου του 1978 που αφορούσε τη Συνθήκη SOLAS του 1974 (Safety of Life at Sea - SOLAS του 1978) και στο μέρος που αφορούσε τη διεθνή Συνθήκη του 1973 για την πρόληψη της ρύπανσης από τα σκάφη (MARPOL του 1978) -που υιοθετήθηκε στις 17 Φεβρουαρίου 1978. Το σημαντικότερο γεγονός στο δρόμο για την επίτευξη της έναρξης ισχύος της MARPOL του 1978 ήταν ότι επιτράπηκε στις Η.Π.Α. να γίνουν συμβαλλόμενο μέλος στη Συνθήκη αποδεχόμενες, καταρχήν, μόνο το Παράρτημα I (που αφορούσε στο πετρέλαιο) και όχι το Παράρτημα II (που αφορούσε στις χημικές ουσίες), αφού για αυτό αποφασίστηκε ότι δεν θα ήταν δεσμευτικό για τα επόμενα τρία χρόνια μετά την έναρξη ισχύος της συνθήκης. Το γεγονός αυτό έδωσε χρόνο στις Η.Π.Α. να ξεπεράσουν τα τεχνικά προβλήματα που προέκυπταν από την αποδοχή του Παραρτήματος II, το οποίο διαφορετικά θα αποτελούσε σημαντικό εμπόδιο στην επικύρωση της Συνθήκης. Δεδομένου ότι η Συνθήκη του 1973 δεν είχε τεθεί ακόμα σε ισχύ, το πρωτόκολλο MARPOL του 1978 απορρόφησε τη γονική Συνθήκη. Το συνδυασμένο όργανο -η Διεθνής Συνθήκη για την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης από τα σκάφη του 1973, τροποποιημένη από το πρωτόκολλο του 1978 (MARPOL 73/78)- τέθηκε τελικά σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου 1983 (για τα Παραρτήματα I και II). Το παράρτημα V, που καλύπτει τα απορρίμματα, τέθηκε σε ισχύ στις 31 Δεκεμβρίου 1988, το Παράρτημα III, που καλύπτει τις επιβλαβείς ουσίες που μεταφέρονται σε συσκευασμένη μορφή, τέθηκε σε ισχύ την 1^η Ιουλίου 1992, ενώ το Παράρτημα IV, που καλύπτει τα λύματα, τέθηκε σε ισχύ στις 27 Σεπτεμβρίου 2003. Το Παράρτημα VI, που καλύπτει την ατμοσφαιρική ρύπανση, υιοθετήθηκε τον Σεπτέμβριο του 1997 και τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου του 2005. Τα παραρτήματα (Annexes) της Marpol παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Παραρτήματα (Annexes) της MARPOL 73/78

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

3.4 Το πρωτόκολλο του 1997 (παράρτημα VI - κανονισμοί για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα σκάφη)

Υιοθέτηση: 26 Σεπτεμβρίου 1997

Έναρξη ισχύος: 19 Μαΐου του 2005

Στο πλαίσιο του νέου πρωτοκόλλου στη Σύμβαση MARPOL 73/78, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) ενέκρινε το 1997 παράρτημα (Παράρτημα VI) το οποίο περιλαμβάνει κανονισμούς για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από πλοία. Το παράρτημα έχει τεθεί σε ισχύ από τις 19 Μαΐου 2005. Με τις διατάξεις του εν λόγω Παραρτήματος θεσπίζονται ενιαίοι κανόνες που στοχεύουν στη λήψη συγκεκριμένων μέτρων για τον έλεγχο και την πρόληψη της ρύπανσης του αέρα από τα πλοία. Ειδικότερα, μεταξύ των λοιπών απαιτήσεων, περιλαμβάνονται ρυθμίσεις, υπό μορφή κανονισμών, με τις οποίες καθορίζονται οι ανώτατα επιτρεπόμενες περιεκτικότητες σε θείο του καυσίμου πετρελαίου που χρησιμοποιούν τα πλοία, τα επίπεδα εκπομπών οξειδίων του αζώτου για μηχανές diesel πλοίων καθώς και τα ληπτέα μέτρα σε λιμάνια και τερματικούς σταθμούς για την υποδοχή δεξαμενόπλοιων στα οποία μπορεί να απαιτηθεί η ύπαρξη συστημάτων ελέγχου εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs).

Κανονισμός 13 του Παραρτήματος VI

Ο Κανονισμός 13 του Παραρτήματος VI αφορά τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) από τους κινητήρες diesel του κάθε πλοίου. Αυτός ο κανονισμός έχει εφαρμογή:

- Σε κάθε μηχανή diesel με ισχύ μεγαλύτερη από 130 kW η οποία εγκαθίσταται σε ένα πλοίο το οποίο κατασκευάστηκε μετά την 1η Ιανουαρίου 2000
- Σε κάθε μηχανή diesel με ισχύ μεγαλύτερη από 130 kW η οποία υπόκειται σε μετασκευή ευρείας έκτασης² μετά την 1η Ιανουαρίου 2000.

² Για τον κανονισμό 13 “μετασκευή ευρείας έκτασης” σημαίνει τροποποίηση μιας μηχανής στην περίπτωση που:
(i) Μια μηχανή αντικαθίσταται από μια νέα μηχανή που κατασκευάστηκε μετά την 1η Ιανουαρίου 2000,
(ii) Οποιαδήποτε σημαντική μετατροπή γίνεται στη μηχανή, όπως ορίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NO_x,
(iii) Η μέγιστη συνεχής απόδοση των στροφών της μηχανής αυξάνεται περισσότερο από 10%.

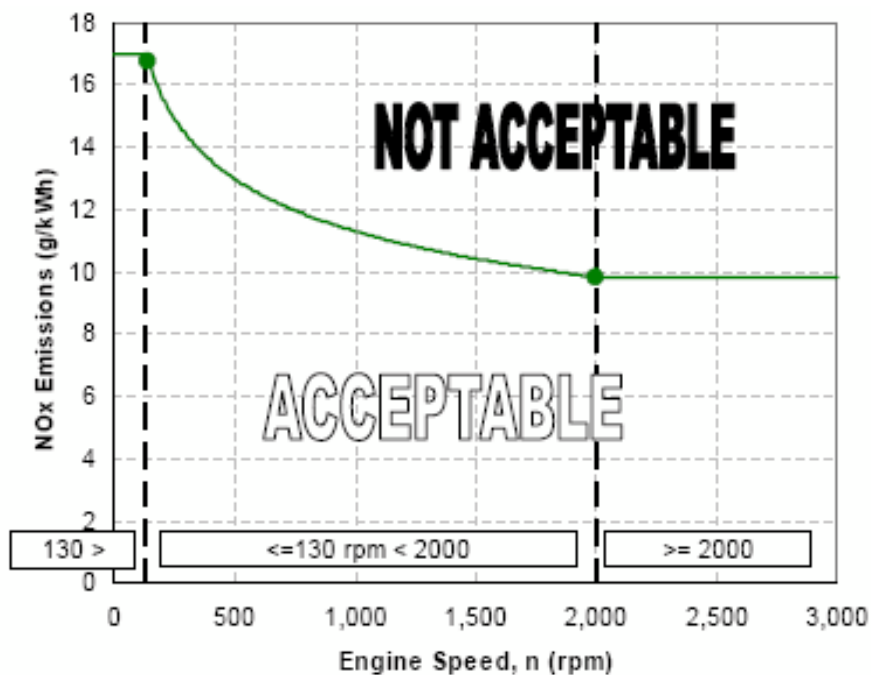
Από τον Κανονισμό 13 εξαιρούνται:

- Μηχανές diesel έκτακτης ανάγκης, μηχανές που τοποθετούνται σε σωσίβιες λέμβους και σε οποιαδήποτε συσκευή ή εξοπλισμό που χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης
- Μηχανές που τοποθετούνται σε πλοία τα οποία απασχολούνται αποκλειστικά σε ταξίδια εντός υδάτων που ανήκουν στην κυριαρχία ή δικαιοδοσία του Κράτους τη σημαία του οποίου φέρει το πλοίο, με την προϋπόθεση ότι τέτοιες μηχανές υπόκεινται σε ένα εναλλακτικό μέτρο ελέγχου NOx που καθιερώθηκε από την Αρχή.

Ο Κανονισμός 13 της MARPOL Annex VI, καθορίζει τα όρια εκπομπών NOx με εφαρμογή σε προωστήριες και βοηθητικές μηχανές. Τα όρια, που ονομάζονται όρια Tier I, καθορίζονται από μία καμπύλη που βασίζεται στην ταχύτητα του στροφαλοφόρου άξονα σε στροφές ανά λεπτό όπως αυτά δίνονται στον πίνακα 3.2 και στο σχήμα 3.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο χαμηλότερες είναι οι στροφές λειτουργίας της μηχανής, τόσο πιο υψηλά προσδιορίζονται τα όρια εκπομπών. Αυτό γίνεται για την διευκόλυνση των δίχρονων ναυτικών κινητήρων diesel με στροφές λειτουργίας λιγότερες από 130 rpm, γιατί οι δίχρονοι κινητήρες diesel παρουσιάζουν σε σχέση με τους τετράχρονους κινητήρες diesel, υψηλότερες θερμοκρασίες και μεγαλύτερο χρόνο παραμονής των αερίων μέσα στον κύλινδρο, δηλαδή περισσότερο χρόνο για τον σχηματισμό NOx.

Πίνακας 3.2 Όρια εκπομπών NOx της MARPOL 73/78, Annex VI, Κανονισμός 13

| Ταχύτητα Μηχανής (n) | Όριο εκπομπών NOx (g/kWh) |
|------------------------|---------------------------|
| n < 130 rpm | 17 |
| 130 rpm ≤ n < 2000 rpm | 45 · n ^{-0.2} |
| n ≥ 2000 rpm | 9.8 |



Σχήμα 3.1 Όρια εκπομπών NOx της MARPOL 73/78, Annex V, Κανονισμός 13

3.5 Τεχνικός Κώδικας NOx - Κύκλοι Δοκιμών Κινητήρων Diesel

Ανάλογα με την λειτουργία τους οι κινητήρες υποβάλλονται σε αντιστοίχους κύκλους δοκιμών (Test Cycles) σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα NOx. Σκοπός των Κύκλων Δοκιμών Κινητήρων Diesel είναι ο υπολογισμός μίας ζυγισθείσας τιμής ειδικής εκπομπής του κάθε ρύπου που να αντιπροσωπεύει τις εκπομπές ρύπων σε όλα τα σημεία λειτουργίας του ναυτικού κινητήρα diesel ανάλογα με τη λειτουργία του. Οι κύκλοι δοκιμών καθορίζουν το φορτίο που θα λαμβάνονται οι μετρήσεις καθώς και το συντελεστή βαρύτητας (Weighting Factor) της κάθε μέτρησης ο οποίος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ζυγισθείσας τιμής ειδικής εκπομπής του κάθε αερίου ρύπου του κινητήρα. Οι κύκλοι δοκιμών χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

«E2»: Εφαρμόζεται σε κυρία συστήματα πρόωσης πλοίων σταθερής ταχύτητας περιστροφής (συμπεριλαμβανομένων diesel ηλεκτροκινητήρων και κινητήρων ελεγχόμενης κλίσης πτερυγίων έλικας). Οι μετρήσεις λαμβάνονται στις συνθήκες που αναγράφονται στον πίνακα (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3 Κύκλος Δοκιμών E2

| | | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|
| Ταχύτητα | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Ισχύς | 100% | 75% | 50% | 25% |
| Συντελεστής Βαρύτητας | 0,2 | 0,5 | 0,15 | 0,15 |

«E3»: Εφαρμόζεται στους κύριους και στους βοηθητικούς κινητήρες του πλοίου που λειτουργούν με βάση το νομό της έλικας. Οι μετρήσεις λαμβάνονται στις συνθήκες του πίνακα (Πίνακας 3.4).

Πίνακας 3.4 Κύκλος Δοκιμών E3

| | | | | |
|------------------------------|------|-----|------|------|
| Ταχύτητα | 100% | 91% | 80% | 63% |
| Ισχύς | 100% | 75% | 50% | 25% |
| Συντελεστής Βαρύτητας | 0,2 | 0,5 | 0,15 | 0,15 |

«D2»: Εφαρμόζεται σε σταθερής ταχύτητας βοηθητικούς κινητήρες. Οι μετρήσεις λαμβάνονται στις συνθήκες του πίνακα (Πίνακας 3.5).

Πίνακας 3.5 Κύκλος δοκιμών D2

| | | | | | |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| Ταχύτητα | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Ισχύς | 100% | 75% | 50% | 25% | 10% |
| Συντελεστής Βαρύτητας | 0,05 | 0,25 | 0,3 | 0,3 | 0,1 |

«C1»: Εφαρμόζεται σε μεταβλητής ταχύτητας και μεταβλητού φορτίου βοηθητικούς κινητήρες που δεν συμπεριλαμβάνονται στη κατηγορία E3. Οι μετρήσεις λαμβάνονται στις συνθήκες του πίνακα (Πίνακας 3.6).

Πίνακας 3.6 Κύκλος δοκιμών C1

| Ταχύτητα | Ονομαστική | | | | Ενδιάμεση | | | Άφορτης Λειτουργίας |
|-----------------|-------------------|-----|-----|-----|------------------|-----|-----|----------------------------|
| Ροπή | 100% | 75% | 50% | 10% | 100% | 75% | 50% | 0% |

Η ενδιάμεση ταχύτητα στην κατηγορία C1 ορίζεται από τον κατασκευαστή με βάση τις εξής απαιτήσεις:

- Για κινητήρες που προορίζονται να λειτουργούν σε ένα εύρος ταχυτήτων σε καμπύλη πλήρους φορτίου, ενδιάμεση ταχύτητα ορίζεται η ταχύτητα στην μέγιστη ροπή, αν η τιμή της βρίσκεται στο διάστημα 60%-75% της ονομαστικής ταχύτητας.
- Εάν η τιμή της ταχύτητας στην μέγιστη ροπή είναι μικρότερη του 60% της ονομαστικής ταχύτητας τότε ενδιάμεση ταχύτητα ορίζεται το 60% της ονομαστικής ταχύτητας.
- Εάν η τιμή της ταχύτητας στην μέγιστη ροπή είναι μεγαλύτερη του 75% της ονομαστικής ταχύτητας τότε ενδιάμεση ταχύτητα ορίζεται το 75% της ονομαστικής ταχύτητας.
- Για κινητήρες που δεν λειτουργούν σε καμπύλη πλήρους φορτίου η ενδιάμεση ταχύτητα τυπικά ορίζεται μεταξύ 60%-70% της μέγιστης ονομαστικής ταχύτητας.

Βάσει του Τεχνικού Κώδικα NOx μια μέτρηση σε κάποιο από τα φορτία που υποδεικνύονται στους πίνακες των Κύκλων Δοκιμών Κινητήρα θεωρείται έγκυρη όταν κατά τη διάρκεια της μέτρησης το φορτίο δεν αποκλίνει περισσότερο από 5% από την τιμή των κύκλων δοκιμών.

Στον Τεχνικό Κώδικα NOx προβλέπονται εναλλακτικοί συνδυασμοί φορτίων – συντελεστών βαρύτητας για τους κύκλους E3, E2 και D2. Βασική προϋπόθεση ώστε να είναι σύμφωνος με τον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 ο εναλλακτικός Κύκλος Δοκιμής Κινητήρα Diesel αποτελεί: οι αντίστοιχοι συντελεστές βαρύτητας των τυπικών κύκλων δοκιμών E3, E2 και D2, των φορτίων που θα επιλεγούν για τον εναλλακτικό κύκλο να έχουν άθροισμα μεγαλύτερο από 0,50. Επιπλέον το άθροισμα των νέων συντελεστών βαρύτητας που αντιστοιχούν στα επιλεγμένα φορτία τροποποιούνται έτσι ώστε να ισούνται με 1. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η μέτρηση στο 75% του φορτίου είναι απαραίτητη για μηχανές που κατηγοριοποιούνται στους κύκλους δοκιμών E2 και E3.

Για να θεωρηθεί ότι μια μηχανή βρίσκεται εντός των ορίων που προβλέπει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός πρέπει, επιπλέον, οι ειδικές εκπομπές NOx σε κάθε σημείο λειτουργίας να μην υπερβαίνουν τις τιμές των ορίων που αναφέρονται στις συνολικές ειδικές εκπομπές των κύκλων δοκιμών κινητήρα κατά περισσότερο από 50% εκτός από:

1. Το σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στο 10% του φορτίου λειτουργίας για τον κύκλο δοκιμών κινητήρα D2
2. Το σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στο 10% του φορτίου λειτουργίας για τον κύκλο δοκιμών κινητήρα C1
3. Το σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στην άφορτη λειτουργία της μηχανής για τον κύκλο δοκιμών κινητήρα D2

3.6 Αναθεώρηση της MARPOL 73/78

Τον Απρίλιο του 2008 η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (ΜΕΡC) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (ΙΜΟ) ενέκρινε τις προτεινόμενες τροποποιήσεις που περιλαμβάνονται στο Παράρτημα VI της MARPOL 73/78 σχετικά με τους κανονισμούς για την μείωση των επιβλαβών εκπομπών από τη ναυτιλία.

Οι βασικές αλλαγές είναι στην σταδιακή μείωση των εκπομπών οξειδίων θείου (SOx) από τα πλοία, με το παγκόσμιο όριο του θείου να μειώνεται αρχικά σε 3,50% (από το τρέχον 4,50%), από την 1η Ιανουαρίου 2012 και έπειτα σταδιακά σε 0,50 %, από την 1η Ιανουαρίου 2020, υπό τον όρο ότι μία μελέτη σκοπιμότητας θα έχει ολοκληρωθεί το αργότερο έως το 2018. Από την 1η Μαρτίου 2010 τα εφαρμόσιμα όρια στις περιοχές ελέγχου εκπομπής θείου (SECAs) θα μειωθούν στο 1,00%, (από τα τρέχοντα 1,50 %) και στο 0,10%, από την 1η Ιανουαρίου 2015.

Επιπλέον, η τελευταία αναθεώρηση της συνθήκης MARPOL 73/78 περιλαμβάνει ακόμη πιο αυστηρά όρια όσον αφορά της εκπομπές των NOx από ναυτικές μηχανές:

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

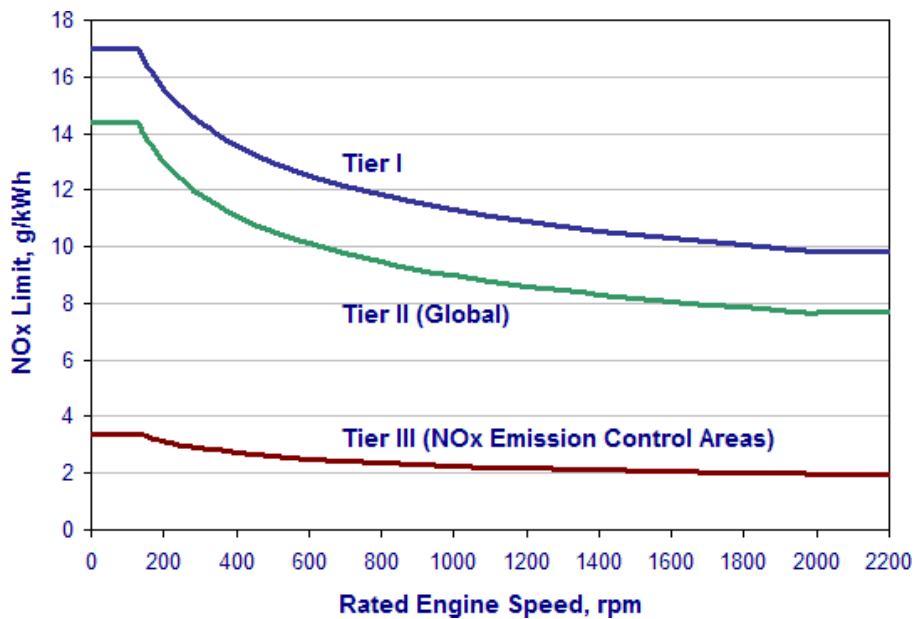
Στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα όρια εκπομπών NOx των κινητήρων ανάλογα με το έτος κατασκευής τους.

Μέχρι την αναθεώρηση της συνθήκης MARPOL Annex VI οι μηχανές που έχουν εγκατασταθεί στα πλοία πριν από την 1^η Ιανουαρίου 2000, δεν υπόκεινται σε κανέναν περιορισμό όσον αφορά τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Πλέον στον τροποποιημένο κανονισμό Technical Code 2008 [resolution ΜΕΡC.177(58)] περιλαμβάνονται και οι μηχανές που έχουν εγκατασταθεί στα πλοία από την 1^η Ιανουαρίου 1990 έως την 31^η Δεκεμβρίου 1999, έχουν όγκο εμβολισμού ίσο ή μεγαλύτερο από 90 lt και μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ πάνω από 5000 kw. Το όριο για αυτούς τους κινητήρες είναι 17 g/kWh.

Πίνακας 3.7 Όρια εκπομπών NOx κινητήρων diesel ανάλογα με το έτος κατασκευής τους

| Tier | Ship construction date on or after | Total weighted cycle emission limit (g/kWh) | | |
|------|------------------------------------|---|---------------------------------------|----------|
| | | n = engine's rated speed (rpm) | | |
| | | n < 130 | n = 130 - 1999 | n ≥ 2000 |
| I | 1 January 2000 | 17.0 | $45.n^{-0.2}$ e.g., 720 rpm – 12.1 | 9.8 |
| II | 1 January 2011 | 14.4 | $44.n^{-0.23}$ e.g., 720 rpm – 9.7 | 7.7 |
| III | 1 January 2016 ³ | 3.4 | $9.n^{-0.2}$ e.g., 720 rpm – 2.4 | 2.0 |

³ Η τελική απόφαση για το πότε θα εφαρμοστεί το Tier III θα ληφθεί το 2013. Ενδέχεται το έτος εφαρμογής του Tier III να είναι αργότερα του 2006.



Σχήμα 3.2 Μεταβολή των ορίων εκπομπών NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας.

4 Κανονισμοί για τις εκπομπές ρύπων Ναυτικών Κινητήρων Diesel από άλλους οργανισμούς

4.1 ΗΠΑ - Οργάνωση Προστασίας του Περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency, EPA)

Η Οργάνωση Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, έχει ως σκοπό την προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος από το 1970. Όπως και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υιοθετήσει τους κανονισμούς που έχουν προταθεί από τον IMO, αλλά τους έχει χρησιμοποιήσει σαν βάση για μία πιο αυστηρή πολιτική για τις εκπομπές που προέρχονται από ναυτικές μηχανές.

Το σύστημα κανονισμών της EPA, χωρίζεται σε τρία επίπεδα. Τα πρότυπα του πρώτου επιπέδου (Tier 1) είναι σε εναρμόνιση με τα όρια της MARPOL Annex VI και ήταν εθελοντικά μέχρι το 2004, αλλά υποχρεωτικά από το 2004. Τα πρότυπα του Tier 2 είναι πιο απαιτητικά από το Tier 1 και τέθηκαν σε ισχύ από το 2007. Τα πρότυπα του Tier 3, αφορούν πετρελαιομηχανές άνω των 37 kW (50 hp) και τέθηκαν σε εφαρμογή από το 2008. Τα πρότυπα του Tier 4, δεν έχουν τεθεί σε ισχύ σε ναυτικούς κινητήρες diesel. Παρόλα αυτά, τα πρότυπα του Tier 4, εκδόθηκαν μαζί με την Advanced Notice of Proposed Rulemaking, που αναφέρει τα μελλοντικά πρότυπα εκπομπών για τις ναυτικές πετρελαιομηχανές, οπότε αναμένεται η ημερομηνία που και αυτά θα τεθούν σε ισχύ.

Πίνακας 4.1 . EPA Tier 2 - Όρια εκπομπών ρύπων από ναυτικούς κινητήρες

| Category | Displacement (D) | CO | NOx+THC | PM | Date |
|----------|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|
| | <i>dm³ per cylinder</i> | <i>g/kWh</i> | <i>g/kWh</i> | <i>g/kWh</i> | |
| 1 | Power ≥ 37 kW D < 0.9 | 5.0 | 7.5 | 0.40 | 2005 |
| | 0.9 ≤ D < 1.2 | 5.0 | 7.2 | 0.30 | 2004 |
| | 1.2 ≤ D < 2.5 | 5.0 | 7.2 | 0.20 | 2004 |
| | 2.5 ≤ D < 5.0 | 5.0 | 7.2 | 0.20 | 2007 ^a |
| 2 | 5.0 ≤ D < 15 | 5.0 | 7.8 | 0.27 | 2007 ^a |
| | 15 ≤ D < 20 Power < 3300 kW | 5.0 | 8.7 | 0.50 | 2007 ^a |
| | 15 ≤ D < 20 Power ≥ 3300 kW | 5.0 | 9.8 | 0.50 | 2007 ^a |
| | 20 ≤ D < 25 | 5.0 | 9.8 | 0.50 | 2007 ^a |
| | 25 ≤ D < 30 | 5.0 | 11.0 | 0.50 | 2007 ^a |

a - Tier 1 certification requirement starts in 2004

Πίνακας 4.2 EPA Tier 3 - Όρια εκπομπών ρύπων από ναυτικούς κινητήρες

| Power (P) | Displacement (D) | NOx+HC† | PM | Date |
|---------------|------------------------------------|------------------|-------------------|------|
| <i>kW</i> | <i>dm³ per cylinder</i> | <i>g/kWh</i> | <i>g/kWh</i> | |
| P < 19 | D < 0.9 | 7.5 | 0.40 | 2009 |
| 19 ≤ P < 75 | D < 0.9 ^a | 7.5 | 0.30 | 2009 |
| | | 4.7 ^b | 0.30 ^b | 2014 |
| 75 ≤ P < 3700 | D < 0.9 | 5.4 | 0.14 | 2012 |
| | 0.9 ≤ D < 1.2 | 5.4 | 0.12 | 2013 |
| | 1.2 ≤ D < 2.5 | 5.6 | 0.11 ^c | 2014 |
| | 2.5 ≤ D < 3.5 | 5.6 | 0.11 ^c | 2013 |
| | 3.5 ≤ D < 7 | 5.8 | 0.11 ^c | 2012 |

† Tier 3 NOx+HC standards do not apply to 2000-3700 kW engines.
a - < 75 kW engines ≥ 0.9 dm³/cylinder are subject to the corresponding 75-3700 kW standards.
b - Option: 0.20 g/kWh PM & 5.8 g/kWh NOx+HC in 2014.
c - This standard level drops to 0.10 g/kWh in 2018 for < 600 kW engines.

Πίνακας 4.3 EPA Tier 4 - Όρια εκπομπών ρύπων από ναυτικούς κινητήρες

| Power (P) | NOx | HC | PM | Date |
|-----------------|--------------|--------------|-------------------|---------------------|
| <i>kW</i> | <i>g/kWh</i> | <i>g/kWh</i> | <i>g/kWh</i> | |
| P ≥ 3700 | 1.8 | 0.19 | 0.12 ^a | 2014 ^c |
| | 1.8 | 0.19 | 0.06 | 2016 ^{b,c} |
| 2000 ≤ P < 3700 | 1.8 | 0.19 | 0.04 | 2014 ^{c,d} |
| 1400 ≤ P < 2000 | 1.8 | 0.19 | 0.04 | 2016 ^c |
| 600 ≤ P < 1400 | 1.8 | 0.19 | 0.04 | 2017 ^d |

a - 0.25 g/kWh for engines with 15-30 dm³/cylinder displacement.
b - Optional compliance start dates can be used within these model years.
c - Option for Cat. 2: Tier 3 PM/NOx+HC at 0.14/7.8 g/kWh in 2012, and Tier 4 in 2015.
d - The Tier 3 PM standards continue to apply for these engines in model years 2014 and 2015 only.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται τα όρια εκπομπών ρύπων που επιβάλλει η Οργάνωση Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) των ΗΠΑ ανά χρονολογία σε σύγκριση με τα αντίστοιχα όρια που θέτει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός μέσω της συνθήκης Marpol 73/78.

Worldwide - IMO

| kW | (HP) | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|-------|-------|--------|------|------|------|---------|------|------|------|------|-----------|------|------|
| > 130 | > 174 | Tier I | | | | Tier II | | | | | Tier III* | | |

* In emission control areas only

U.S. EPA - Tier 2 and Tier 3**

| Displacement (L/cyl) | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|----------------------|--------|------|------|------|------|--------|--------|--------|------|------|------|------|
| < 0.9 | Tier 2 | | | | | Tier 3 | | | | | | |
| 0.9 - 1.2 | Tier 2 | | | | | | Tier 3 | | | | | |
| 1.2 - 2.5 | Tier 2 | | | | | | | Tier 3 | | | | |
| 2.5 - 3.5 | Tier 2 | | | | | | | Tier 3 | | | | |
| 3.5 - 7.0 | Tier 2 | | | | | Tier 3 | | | | | | |

** EPA Tier 2 and Tier 3 implementation based on displacement

U.S. EPA Tier 4***

| kW | (HP) | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|-------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|--------|------|
| 600 - 1399 | 805 - 1876 | | | | | | | | | | | Tier 4 | |
| 1400 - 1999 | 1877 - 2681 | | | | | | | | | | | Tier 4 | |
| 2000 - 3700 | 2682 - 4962 | | | | | | | | | Tier 4 | | | |

*** EPA Tier 4 implementation based on maximum engine power

Σχήμα 4.1 Επιβολή των ορίων εκπομπών ρύπων του EPA και του IMO ανά χρονολογία

4.2 Ευρωπαϊκή Ένωση

Η Ευρωπαϊκή Ένωση ακολουθεί μια πολιτική για το περιβάλλον που στηρίζεται στην άποψη ότι τα υψηλά περιβαλλοντικά πρότυπα εγείρουν καινοτομίες και θέσεις εργασίας. Με βάση αυτήν την πολιτική, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναπτύξει μια στρατηγική για την μείωση των επιβλαβών αερίων εκπομπών από τα από τα πλοία. Ο αντικειμενικός σκοπός αυτής της στρατηγικής, είναι ο περιορισμός εκπομπών NO_x που προέρχονται από τα πλοία, σε περιπτώσεις όπου αυτές υπερβαίνουν τα αποδεκτά επίπεδα και είναι βλαβερά για την υγεία και το περιβάλλον. Επιπλέον της επικύρωσης της συνθήκης MARPOL 73/78, το ευρωπαϊκό κοινοβούλιο έχει υιοθετήσει πιο αυστηρά πρότυπα για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Τα πρότυπα αυτά είναι γνωστά ως Stage III/IV, και υιοθετήθηκαν τον Απρίλιο του 2004. Τα όρια των Stage III/IV, εναρμονίζονται με τα πρότυπα της Οργάνωσης Προστασίας του Περιβάλλοντος του Tier 3/4 (όπως παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.1). Επιπλέον, μέθοδος για την εκτίμηση των εκπομπών των ναυτικών κινητήρων, αναπτύχθηκε σε συνεργασία με την EPA. Αυτό είναι αποτέλεσμα των πιέσεων που ασκήθηκαν από τους κατασκευαστές μηχανών και εξοπλισμού, προκειμένου να σταθεροποιηθούν σε παγκόσμια κλίμακα τα πρότυπα εκπομπών. Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναπτύσσει ένα σύστημα που επιβραβεύει τα πλοία που ήδη έχουν δραστηριοποιηθεί όσον αφορά τον περιορισμό των εκπομπών NO_x, με μειωμένες εισφορές ελλιμενισμού και παρέχει κίνητρα για την μείωση των εκπομπών NO_x πέρα από τις απαιτήσεις των κανονισμών.

4.3 Σουηδία

Η Σουηδία θεωρείται από τους πρωτοπόρους στην θέσπιση προτύπων που αφορούν την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και ως προέκταση και τον έλεγχο των εκπομπών αερίων ρύπων από ναυτικές μηχανές, όπως SO₂ και NO_x. Επίσης ήταν μια από τις πρώτες χώρες που επικύρωσαν τη συνθήκη 73/78 της MARPOL. Από την 1η Ιανουαρίου 1998 η Σουηδία έχει καθιερώσει ένα πρόγραμμα που αφορά στα δικαιώματα ελλιμενισμού και διάπλου, βασισμένο στις εκπομπές NO_x και την περιεκτικότητα το καυσίμου σε S. Πριν την κλιμακωτή δομή τελών που έχει εφαρμοστεί, υπήρχε ένα καθορισμένο τέλος διάπλου και ελλιμενισμού για όλα τα πλοία, που ήταν 3,6 SEK/GTR (Swedish Kroner per gross rated tonnage). Στο ισχύον σύστημα, τα δικαιώματα για μη ελεγχόμενες εκπομπές NO_x είναι υψηλότερα από τα προηγούμενα τέλη, αλλά τα τέλη αυτά μειώνονται από το μέγιστο, όσο πιο χαμηλές είναι οι εκπομπές των δύο προαναφερθέντων ρυπαντών. Αυτό πιστοποιείται από τα επίπεδα εκπομπών NO_x για τις οποίες έχει λάβει σχετικό πιστοποιητικό το πλοίο.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Σκοπός του υπολογιστικού μέρους της διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση και η αξιολόγηση των ειδικών εκπομπών ρύπων, με έμφαση στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, ναυτικών κινητήρων diesel χρησιμοποιώντας μετρημένες συγκεντρώσεις στο καυσαέριο. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 ο Τεχνικός Κώδικας NOx του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού περιέχει μια μεθοδολογία εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων βάσει της οποίας δημιουργήθηκε λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων, εφαρμόστηκε σε ναυτικούς κινητήρες diesel και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα του. Για την εκτενέστερη ανάλυση τόσο των αποτελεσμάτων όσο και της ίδιας της μεθοδολογίας εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων του Τεχνικού Κώδικα NOx δημιουργήθηκε μια απλοποιημένη μεθοδολογία για τον ίδιο υπολογισμό που βασίζεται σε χημικές εξισώσεις καύσεις η οποία εφαρμόστηκε στους ίδιους ναυτικούς κινητήρες diesel. Επιπροσθέτως, εξετάστηκε η επίπτωση σφάλματος μέτρησης στα αποτελέσματα που δίνουν τα δύο λογισμικά εκτίμησης ρύπων

5 Μεθοδολογία εκτίμησης εκπομπών ρύπων βασιζόμενη στον Τεχνικό Κώδικά NOx 2008

Το πρώτο μέρος (Κεφάλαιο 5) του υπολογιστικού μέρους της εργασίας αφορά τη δημιουργία αλγορίθμου με βάση τον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 [*RESOLUTION MEPC.177(58)*] του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) που εκτιμά τις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) και λοιπών ρύπων βασιζόμενος σε μετρημένες συγκεντρώσεις ρύπων στο καυσαέριο, στη σύνθεση του καιόμενου καυσίμου και στις συνθήκες περιβάλλοντος. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο παρών κεφάλαιο έχει δημιουργηθεί λαμβάνοντας υπόψιν τις πιο πρόσφατες τροποποιήσεις του Τεχνικού Κώδικα NOx που τέθηκαν σε ισχύ τον Ιούλιο του 2010. Η τελευταία έκδοση του Τεχνικού Κώδικα NOx είναι πιο πλήρης από τις προηγούμενες και καθορίζει με μεγαλύτερη σαφήνεια όλα τα στάδια της διαδικασίας υπολογισμού των ειδικών εκπομπών οξειδίων του αζώτου αλλά και άλλων ρύπων χρησιμοποιώντας μετρημένες συγκεντρώσεις στα καυσαέρια.

5.1 Δεδομένα Εισόδου

Τα απαραίτητα δεδομένα για το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αναγράφονται στον Πίνακα 5.1 και αφορούν: το σημείο λειτουργίας του κινητήρα, μετρημένες συγκεντρώσεις στο καυσαέριο, τη σύνθεση του καιόμενου καυσίμου και τις συνθήκες περιβάλλοντος. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο λογισμικό που δημιουργήθηκε για κάθε σημείο λειτουργίας της μηχανής που επιλέχθηκαν να γίνουν μετρήσεις σύμφωνα με τους Κύκλους Δοκιμών Κινητήρα Diesel που παρουσιάζονται στην Παράγραφο 3.5.

Πίνακας 5.1 Δεδομένα εισόδου

| Symbol | Unit | Description |
|--------------------------|------|--|
| C_{CO_D} | ppm | Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στο ξηρό καυσαέριο |
| C_{CO_2d} | % | Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂) στο ξηρό καυσαέριο (%) κατ όγκο |
| C_{HCW} | ppmC | Συγκέντρωση υδρογονανθράκων (HC) στο υγρό καυσαέριο |
| $C_{NO_{Xd}}$ | ppm | Συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NO _x) στο ξηρό καυσαέριο |
| C_{O_2d} | % | Συγκέντρωση οξυγόνου (O ₂) στο ξηρό καυσαέριο κατ όγκο |
| Load | % | Φορτίο |
| Nrpm | rpm | Στροφές/λεπτό |
| p_b | kPa | Βαρομετρική πίεση του περιβάλλοντος |
| Power | kW | Ισχύς που αποδίδει η μηχανή |
| p_{sc} | kPa | Πίεση εισαγωγής του αέρα στο θάλαμο καύσης |
| q_{mf} | kg/h | Κατανάλωση καυσίμου |
| R_a | % | Σχετική υγρασία |
| T_a | K | Απόλυτη θερμοκρασία του περιβάλλοντος |
| T_{sc} | K | Απόλυτη θερμοκρασία εισαγωγής του αέρα στο θάλαμο καύσης |
| TS_{CRef} | K | Απόλυτη θερμοκρασία αναφοράς εισαγωγής του αέρα στο θάλαμο καύσης (Δίνεται από τον κατασκευαστή της μηχανής) |
| w_{ALF} | % | Περιεκτικότητα κατά μάζα υδρογόνου στο καύσιμο |
| w_{BET} | % | Περιεκτικότητα κατά μάζα άνθρακα στο καύσιμο |
| w_{DEL} | % | Περιεκτικότητα κατά μάζα αζώτου στο καύσιμο |
| w_{EPS} | % | Περιεκτικότητα κατά μάζα οξυγόνου στο καύσιμο |

5.2 Επιπλέον μεταβλητές που εμφανίζονται στους υπολογισμούς

Πίνακας 5.2 Πίνακας Μεταβλητών

| Unit | Symbol | Description |
|------|--------------------------|--|
| | α | Λόγος γραμμομορίων υδρογόνου προς άνθρακα στο καύσιμο |
| | C_{CO2ad} | Περιεκτικότητα του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα σε CO ₂ |
| | C_{gas} | Η συγκέντρωση του εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης στο υγρό καυσαέριο |
| | C_{H2d} | Συγκέντρωση υδρογόνου στο ξηρό καυσαέριο κατ' όγκο |
| | C_{w_i} | Η συγκέντρωση του εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης στο υγρό καυσαέριο |
| | C_{d_i} | Η συγκέντρωση του εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης στο ξηρό καυσαέριο |
| | f_c | συντελεστής άνθρακα |
| | f_{fd} | Ειδική σταθερά καυσίμου για υπολογισμό παροχής ξηρού καυσαερίου |
| | H_a | Η απόλυτη υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα (g νερού/kg ξηρού αέρα) |
| | H_{sc} | Η απόλυτη υγρασία του αέρα εισαγωγής (g νερού/kg ξηρού αέρα) |
| | k_{hd} | Συντελεστής διόρθωσης εκπομπών NOx για την υγρασία και τη θερμοκρασία |
| | k_w | Συντελεστής διόρθωσης ξηρού/υγρού καυσαερίου |
| | p_a | Η τάση ατμών του ατμοσφαιρικού αέρα |
| | p_r | Πίεση των υδρατμών μετά το λουτρό ψύξης του συστήματος |
| | t_a | Η θερμοκρασία περιβάλλοντος |
| | t_s | Η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής |
| | p_{sc} | Η τάση ατμών του αέρα εισαγωγής |
| | q_{mew} | Παροχή υγρού καυσαερίου |
| | q_{mgas} | Παραγωγή εκάστοτε αερίου ρύπου |
| | q_{NOx} | Παραγωγή οξειδίων του αζώτου |
| | $q_{specific_i}$ | Ειδική εκπομπή εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης |
| | $q_{total_specific_i}$ | Οι συνολικές ειδικές εκπομπές (i) προϊόντος καύσης όπως προβλέπεται στους Κύκλους Δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού |
| | R_{GAS} | Ειδική σταθερά αερίου του παραγόμενου καυσαερίου |
| | R_i | Ειδική σταθερά του κάθε αερίου προϊόντος καύσης |
| | $\rho_{exhaust_gas}$ | Πυκνότητα παραγόμενου ξηρού καυσαερίου σε πρότυπες συνθήκες |
| | ρ_{gas_i} | Η πυκνότητα του εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης σε πρότυπες συνθήκες |
| | Wf_i | Ο συντελεστής βαρύτητας όπως αυτός προβλέπεται στους Κύκλους Δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού |
| | X_i | Γραμμομοριακό κλάσμα αερίου προϊόντος καύσης (i) |

5.3 Μετατροπή σχετικής υγρασίας σε απόλυτη

Μετατροπή σχετικής υγρασίας ατμοσφαιρικού αέρα σε απόλυτη
Η θερμοκρασία περιβάλλοντος σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$) είναι:

$$t_a = T_a - 273.15 \quad (5.1)$$

Η τάση ατμών του αέρα του περιβάλλοντος είναι:

$$p_a = (4.856884 + 0.2660089 \cdot t_a + 0.01688919 \cdot t_a^2 - 7.477123 \cdot 10^{-5} \cdot t_a^3 + 8.10525 \cdot 10^{-6} \cdot t_a^4 - 3.115221 \cdot 10^{-8} \cdot t_a^5) \cdot (101.32 / 760) \quad (5.2)$$

Η απόλυτη υγρασία (g νερού/kg ξηρού αέρα) δίνεται από τον τύπο:

$$H_a = 6.22 \cdot p_a \cdot R_a / (p_b - 0.01 \cdot R_a \cdot p_a) \quad (5.3)$$

Μετατροπή σχετικής υγρασίας αέρα εισαγωγής σε απόλυτη

Η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής σε βαθμούς Κελσίου $^{\circ}\text{C}$ είναι:

$$t_s = T_{sc} - 273.15 \quad (5.4)$$

Η τάση ατμών του αέρα εισαγωγής είναι:

$$p_{sc} = (4.856884 + 0.2660089 \cdot t_s + 0.01688919 \cdot t_s^2 - 7.477123 \cdot 10^{-5} \cdot t_s^3 + 8.10525 \cdot 10^{-6} \cdot t_s^4 - 3.115221 \cdot 10^{-8} \cdot t_s^5) \cdot (101.32 / 760) \quad (5.5)$$

Η απόλυτη υγρασία (g νερού/kg ξηρού αέρα) του αέρα εισαγωγής δίνεται από τον τύπο:

$$H_{sc} = 6.22 \cdot p_{sc} \cdot 100 / (p_c - p_{sc}) \quad (5.6)$$

5.4 Διόρθωση συγκεντρώσεων ξηρού/υγρού καυσαερίου

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των μοριακών ενώσεων στο καυσαέριο πλην αυτής των υδρογονανθράκων αναφέρονται σε ξηρό καυσαέριο. Ο Τεχνικός Κώδικας NOx προβλέπει τον υπολογισμό ενός συντελεστή διόρθωσης (k_w) ώστε οι συγκεντρώσεις να αναφέρονται σε υγρό καυσαέριο ($c_{w_i} = k_w \cdot c_{d_i}$) Ακολουθεί ο υπολογισμός:

Υπολογισμός συντελεστή διόρθωσης ξηρού/υγρού καυσαερίου

Λόγος γραμμομορίων υδρογόνου προς άνθρακα στο καύσιμο:

$$\alpha = 11.9164 \cdot \frac{w_{ALF}}{w_{BET}} \quad (5.7)$$

Συγκέντρωση υδρογόνου στο ξηρό καυσαέριο¹:

$$c_{H2d} = \frac{0.5 \cdot \alpha \cdot c_{COd} \cdot (c_{COd} + c_{CO2d})}{c_{COd} + 3 \cdot c_{CO2d}} \quad (5.8)$$

Συντελεστής k_{w2} :

$$k_{w2} = \frac{1.608 \cdot H_a}{1000 + (1.608 \cdot H_a)} \quad (5.9)$$

Τελικά ο συντελεστής διόρθωσης $k_w = k_{wr2}$ (Συμβολισμός του Τεχνικού Κώδικα ΝΟχ για τον συντελεστή στην περίπτωση που η παροχή καυσαερίου υπολογίζεται με τη μέθοδο ισοζυγίου άνθρακα) δίνεται από τον τύπο⁴:

$$k_{wr2} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot 0.005 \cdot (c_{CO2d} + c_{COd}) - 0.01 \cdot c_{H2d} + k_{w2} \cdot \frac{P_r}{P_b}} \quad (5.10)$$

P_r : πίεση των υδρατμών μετά το λουτρό ψύξης του συστήματος σε kPa
(Προτεινόμενη τιμή 0,76 kPa για θερμοκρασία λουτρού ψύξης 3 °C)

5.5 Υπολογισμός παροχής καυσαερίου

Ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίων γίνεται με τον τρόπο που αναφέρει το Παράρτημα 6 του Τεχνικού κώδικα ΝΟχ 2008 και βασίζεται στο ισοζύγιο άνθρακα μεταξύ αντιδρώντων και προϊόντων. Εξισώνεται η ποσότητα άνθρακα που περιέχεται στο καύσιμο και στον ατμοσφαιρικό αέρα με την ποσότητα άνθρακα που περιέχεται στα αέρια προϊόντα της καύσης, δηλαδή στο διοξείδιο του άνθρακα, στο μονοξείδιο του άνθρακα και στους άκαυστους υδρογονάνθρακες. Από αυτή την εξίσωση και λαμβάνοντας υπόψιν την υγρασία του αέρα εισαγωγής υπολογίζεται η παροχή υγρού καυσαερίου.

Υπολογισμός παροχής καυσαερίων με τη μέθοδο ισοζυγίου άνθρακα

Υπολογισμός ειδικής σταθεράς καυσίμου για υπολογισμό παροχής υγρού καυσαερίου:

$$f_{fd} = -0.055593 \cdot W_{ALF} + 0.008002 \cdot W_{DEL} + 0.0070046 \cdot W_{EPS} \quad (5.11)$$

Υπολογισμός συντελεστή άνθρακα f_c :

$$f_c = (c_{CO2d} - c_{CO2ad}) \cdot 0.5441 + \frac{c_{COd}}{18522} + \frac{c_{HCw}}{17355} \quad (5.12)$$

$c_{CO2ad} = 0.03\%$ (Περιεκτικότητα του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα σε CO_2)

Υπολογισμός παροχής καυσαερίων με τη μέθοδο ισοζυγίου άνθρακα:

$$q_{mew} = q_{mf} \cdot \left(\frac{\left(\frac{14 \cdot (w_{BET} \cdot w_{BET})}{\left(\frac{14 \cdot w_{BET}}{f_c} + (w_{ALF} \cdot 0.008936) - 1 \right) \cdot \frac{1}{1293} + f_{fd}} \right)}{f_c \cdot f_c} + (w_{ALF} \cdot 0.008936) - 1 \right) \cdot \left(1 + \frac{H_a}{1000} \right) + 1 \quad (5.13)$$

➤ Εάν $H_a \geq H_{sc}$ τότε στην σχέση (5.13) η H_{sc} παίρνει τη θέση της H_a

⁴ Κατ εξαίρεση η συγκέντρωση του CO στις σχέσεις (4.5) και (4.7) είναι κατ όγκο (%)

5.6 Διόρθωση εκπομπών NOx για την υγρασία και τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής

Η διόρθωση αφορά Μηχανές Εσωτερικής Καύσης με σύστημα ενδιάμεσης ψύξης του αέρα εισαγωγής καθώς οι κινητήρες στους οποίους εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 5 στην παρούσα διπλωματική εργασία διαθέτουν αντίστοιχο σύστημα. Ο Τεχνικός Κώδικα NOx 2008 προβλέπει τον υπολογισμό ενός συντελεστή διόρθωσης εκπομπών NOx (k_{hd}) ώστε να λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της υγρασίας και τη θερμοκρασίας στο σχηματισμό οξειδίων του αζώτου. Ο συντελεστής k_{hd} χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της παροχής οξειδίων του αζώτου όπως φαίνεται στη Σχέση (5.15).

Υπολογισμός συντελεστή (k_{hd}):

$$k_{hd} = \frac{1}{1 - 0.012 \cdot (H_a - 10.71) - 0.00275 \cdot (T_a - 298) + 0.00285 \cdot (T_{SC} - T_{SCRef})} \quad (5.14)$$

T_{SCRef} : Απόλυτη θερμοκρασία αναφοράς εισαγωγής του αέρα στο θάλαμο καύσης σε Kelvin (Δίνεται από τον κατασκευαστή της μηχανής)

T_{SC} : Απόλυτη θερμοκρασία εισαγωγής του αέρα στο θάλαμο καύσης σε Kelvin

➤ Εάν $H_a \geq H_{sc}$ τότε στον τύπο (5.14) η H_{sc} παίρνει τη θέση της H_a

5.7 Υπολογισμός παροχής ρύπων σε (kg/h)

Ο Τεχνικός Κώδικα NOx 2008 προβλέπει τον ακόλουθο υπολογισμό για την παροχή οξειδίων του αζώτου:

$$q_{NOx} = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mew} \cdot k_{hd} \quad (5.15)$$

και για τους υπόλοιπα αέρια προϊόντα καύσης:

$$q_{mgas} = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mew} \quad (5.16)$$

$$u_{gas} = \frac{\rho_{gas_i}}{\rho_{exhaust_gas}} \quad (5.17)$$

c_{gas} : Η συγκέντρωση του εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης σε ppm υγρού καυσαερίου (οπότε η συγκέντρωση του O_2 και του CO_2 που είναι μετρημένες κατ όγκο (%) πρέπει να πολλαπλασιαστούν επί 10^4)

ρ_{gas_i} : Η πυκνότητα του εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης σε πρότυπες⁵ συνθήκες (kg/m^3)

$\rho_{exhaust_gas}$: Πυκνότητα παραγόμενου ξηρού καυσαερίου σε πρότυπες συνθήκες (kg/m^3) – Ο υπολογισμός της παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5.8.

Πίνακας 5.3 Η πυκνότητα του εκάστοτε αερίου ρύπου σε πρότυπες συνθήκες

| Αέριο | NOx | CO | HC | CO2 | O2 |
|---|-------|------|--------------------|--------|--------|
| Πυκνότητα ρ_{gas} (kg/Nm^3) | 2.053 | 1.25 | 1.865 ⁶ | 1.9636 | 1.4277 |

⁵ Πρότυπες συνθήκες: (πίεση 101,3kPa, θερμοκρασία 273K)

⁶ Στην παρούσα έκθεση θεωρούμε ότι οι υδρογονάνθρακες έχουν αναχθεί σε ισοδύναμο προπάνιο (C_3H_8)

5.8 Υπολογισμός πυκνότητας παραγόμενου ξηρού καυσαερίου σε πρότυπες συνθήκες

Καθώς ο Τεχνικός Κώδικα NOx 2008 δεν περιλαμβάνει κάποια μέθοδο υπολογισμού πυκνότητας παραγόμενου καυσαερίου σε πρότυπες συνθήκες προσαρμόστηκε η μέθοδος που αναφέρεται στο [Paul Gothe Bochum - "Formula catalogue for measuring of particulate matter in flowing gas"- www.paulgothe.de] ώστε να εφαρμοστεί στο προς μελέτη πρόβλημα. Θεωρείται για τον υπολογισμό ότι το καυσαέριο αποτελείται από τα μετρημένα: CO₂, CO, NO_x, O₂, HC και το υπόλοιπο είναι άζωτο (N₂).

Υπολογισμός γραμμομοριακών κλασμάτων των αερίων προϊόντος καύσης

$$X_{CO_2} = C_{CO_2d} / 100 \quad (5.18)$$

$$X_{CO} = C_{COd} / 10^6 \quad (5.19)$$

$$X_{O_2} = C_{O_2d} / 100 \quad (5.20)$$

$$X_{NO_x} = C_{NO_xd} / 10^6 \quad (5.21)$$

$$X_{HC} = C_{HCd} / (3 \cdot 10^6) \quad (5.22)$$

$$X_{N_2} = 1 - (X_{CO_2} + X_{CO} + X_{O_2} + X_{NO_x} + X_{HC}) \quad (5.23)$$

Γνωρίζοντας την ειδική σταθερά του κάθε αερίου προϊόντος καύσης (R_i) υπολογίζεται η ειδική σταθερά αερίου του παραγόμενου καυσαερίου:

$$R_{GAS} = \sum X_i \cdot R_i \quad (5.24)$$

Από την καταστατική εξίσωση αερίων σε πρότυπες συνθήκες είναι:

$$\rho_{exhaust_gas} = 101,3 / (R_{GAS} \cdot 273) \quad (5.25)$$

5.9 Υπολογισμός ειδικής εκπομπής ρύπων

Η ειδική εκπομπή του κάθε αερίου ($q_{specific_i}$) σε (g/kWh) δίνεται εάν διαιρεθεί η παροχή του κάθε αερίου προϊόντος καύσης σε (g/h) με την ισχύ που αποδίδει η μηχανή σε (kW).

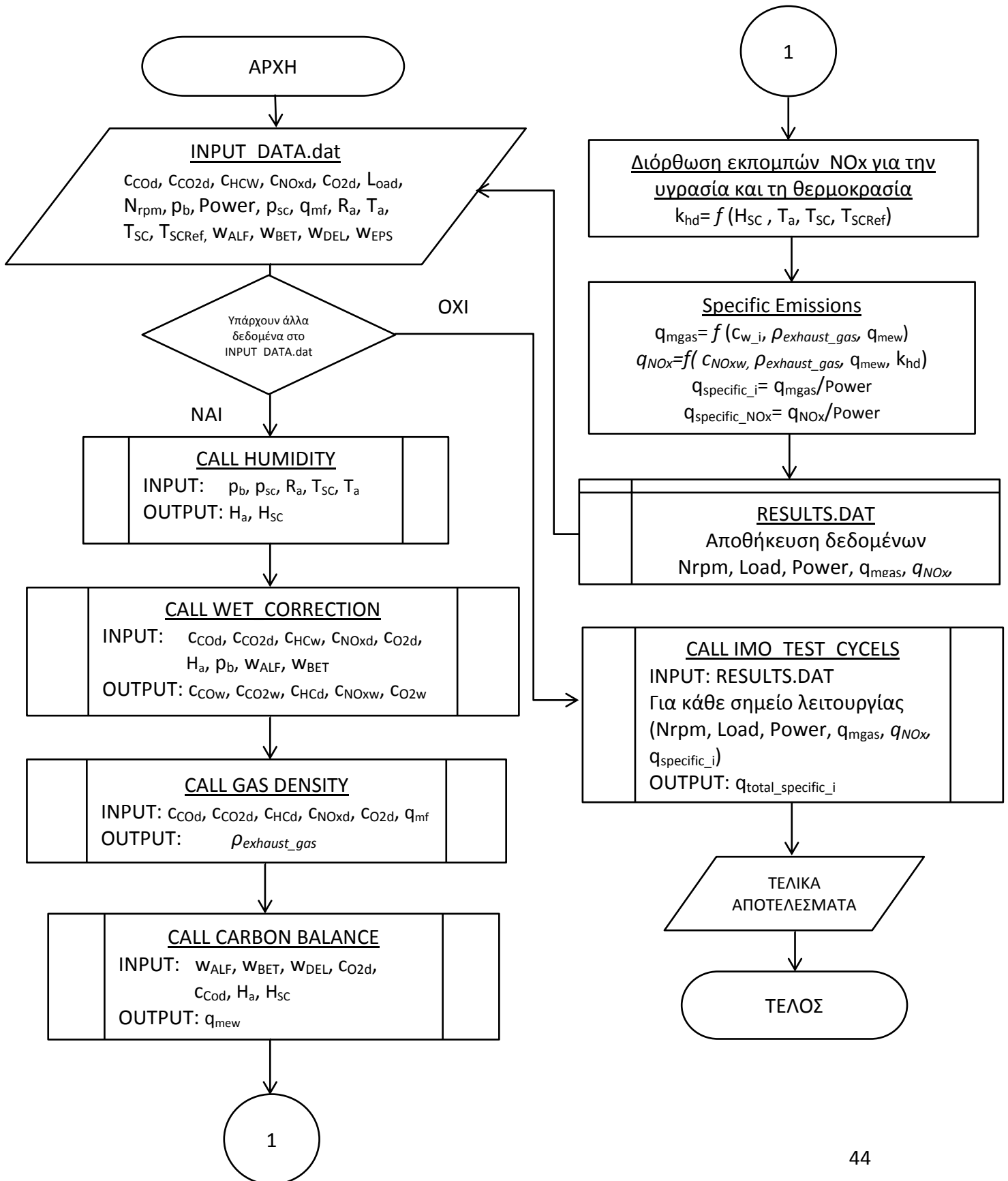
$$q_{specific_i} = q_{mgas} / Power \quad (5.26)$$

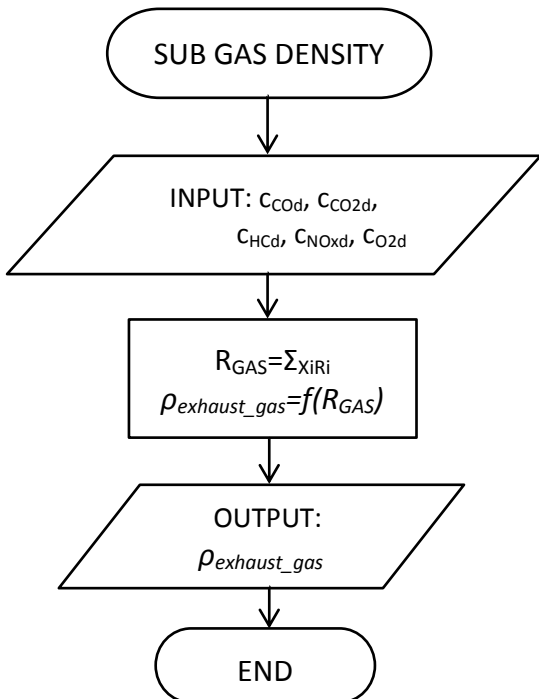
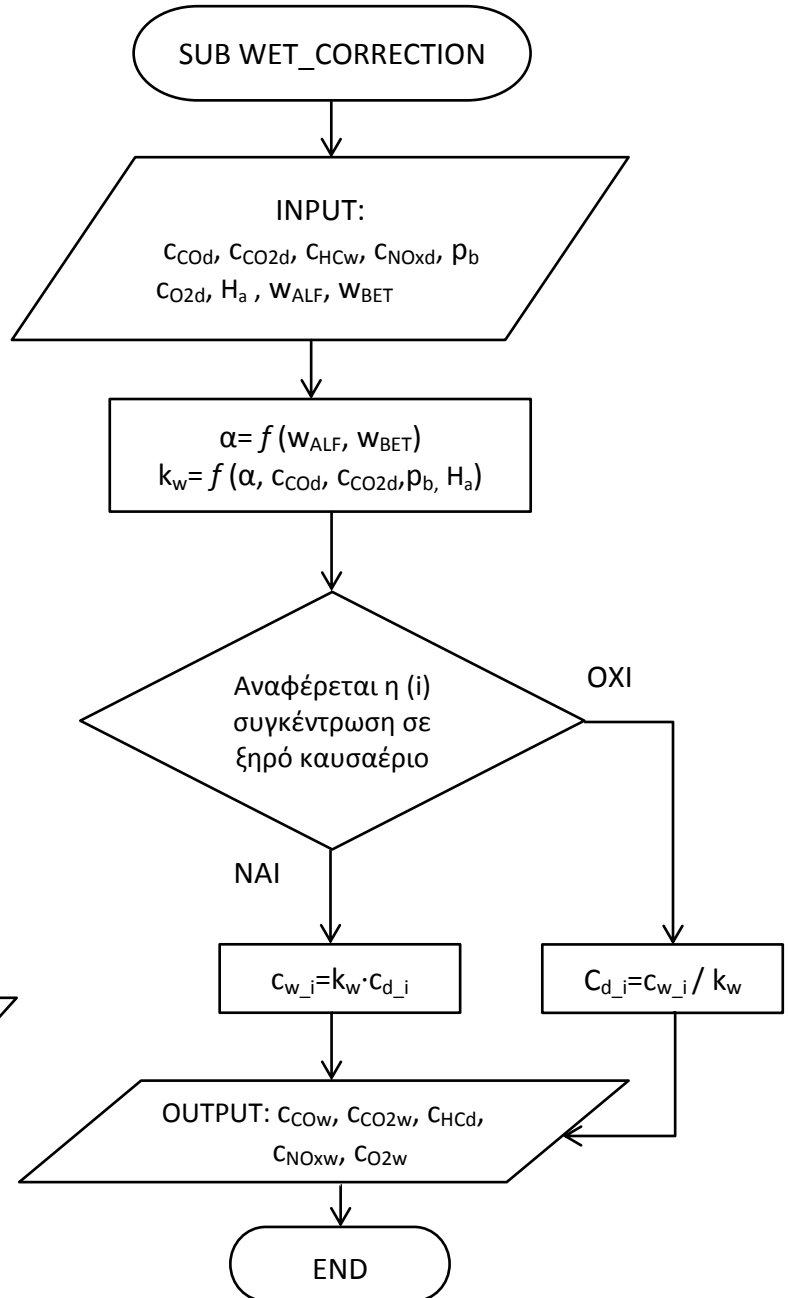
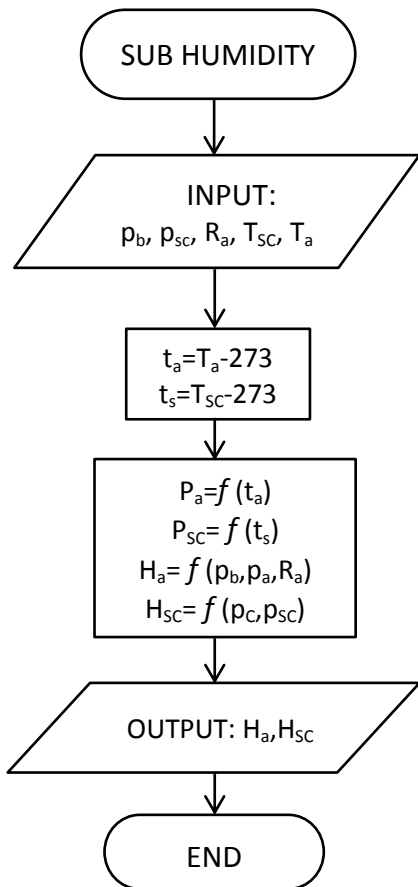
Οι συνολικές ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) αλλά και οποιουδήποτε άλλου αερίου προϊόντος καύσης υπολογίζονται βάση των Κύκλων Δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (βλέπε Παράγραφο 3.5)

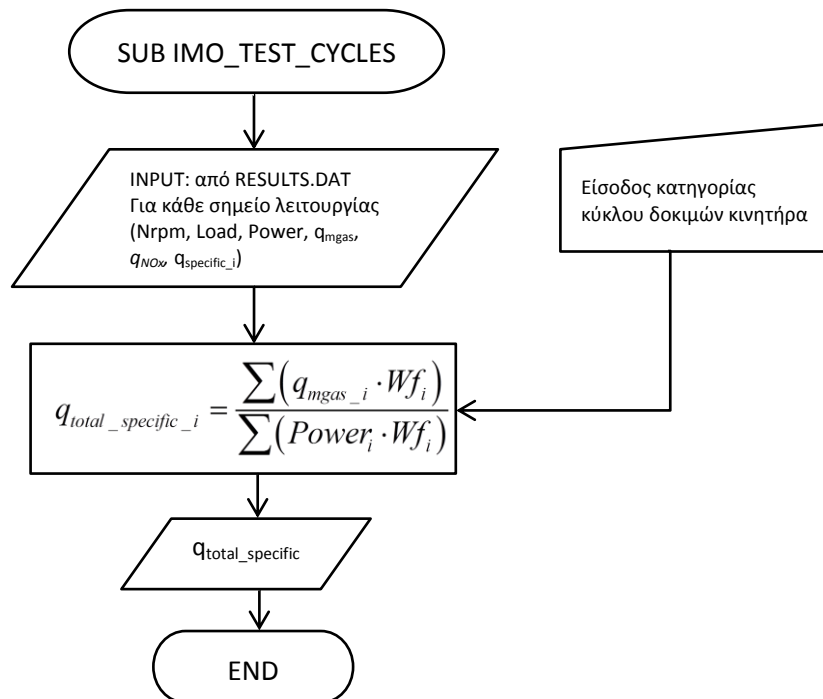
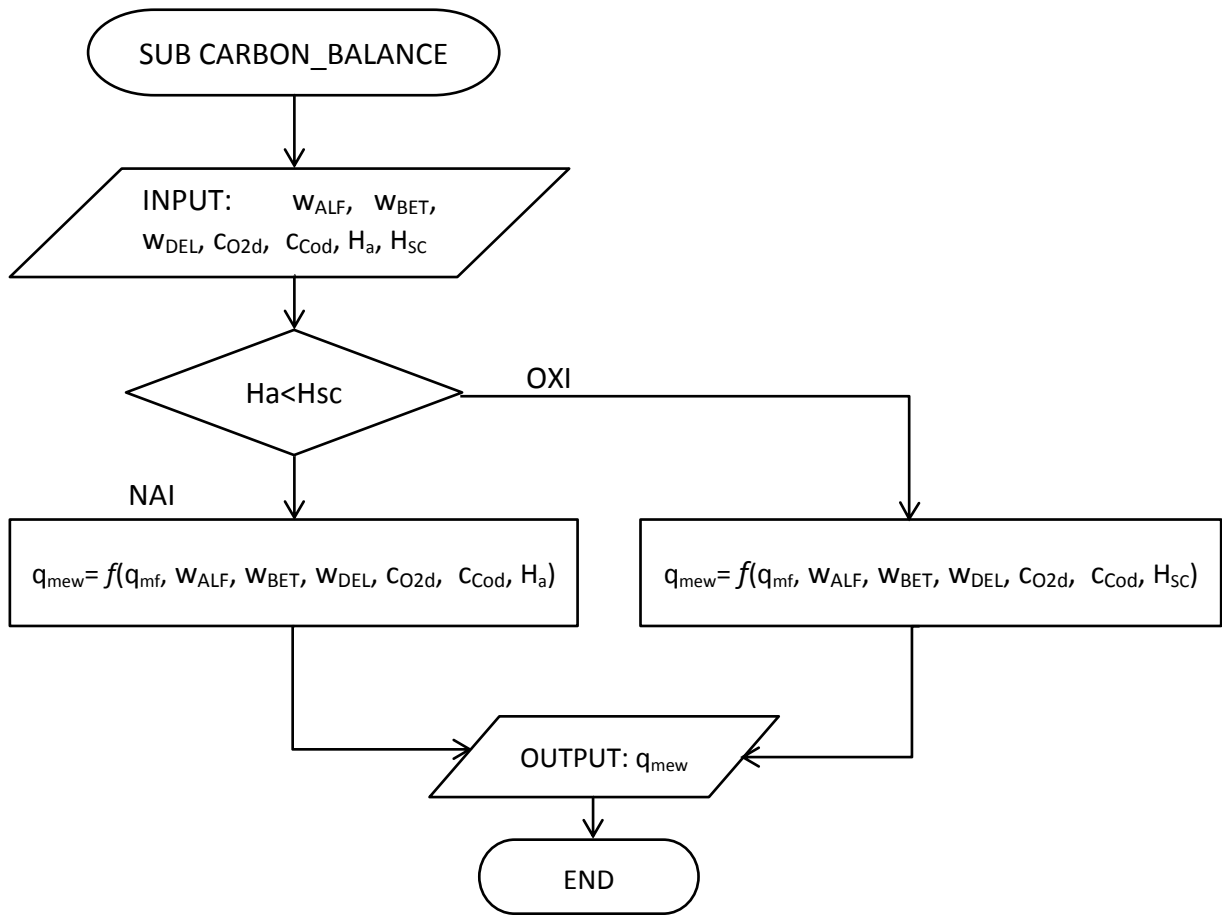
$$q_{total_specific_i} = \frac{\sum (q_{mgas_i} \cdot Wf_i)}{\sum (Power_i \cdot Wf_i)} \quad (5.27)$$

Wf_i: Ο συντελεστής βαρύτητας όπως αυτός προβλέπεται στους Κύκλους Δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού

5.10 Διάγραμμα Ροής του λογισμικού εκτίμησης εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικά NOx 2008







6 Εκτίμηση Ειδικών Εκπομπών Ρύπων με χρήση της Στοιχειομετρικής και Πραγματικής καύσης.

Με σκοπό να αξιολογηθούν εκτενέστερα η μεθοδολογίας εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα ΝΟx τα αποτελέσματα της δημιουργήθηκε και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6 μια απλοποιημένη μεθοδολογία εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη χημεία της καύσης και χρησιμοποιεί μετρημένες συγκεντρώσεις. Πρόκειται, δηλαδή, για μια μεθοδολογία που αφορά τον ίδιο υπολογισμό που περιγράφει ο Τεχνικός Κώδικας ΝΟx περί ειδικών εκπομπών ρύπων αλλά χρησιμοποιεί απλές χημικές εξισώσεις καύσεις.

Το πρόβλημα του υπολογισμού ειδικής εκπομπής ρύπων έγκειται στο γεγονός ότι δεν είναι πάντα δυνατή η αξιόπιστη μέτρηση της παροχής καυσαερίου από τις υπάρχουσες μετρητικές διατάξεις. Γι αυτό το λόγο, στον Τεχνικό Κώδικα ΝΟx περιέχεται η δυνατότητα χρήσης μεθόδου εκτίμησης της παροχής καυσαερίων βασισμένη στο ισοζύγιο άνθρακα μεταξύ αντιδρώντων και προϊόντων καύσης. Στην απλοποιημένη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6 για να εκτιμηθεί η παροχή καυσαερίων υπολογίζεται ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα-καυσίμου (AFR) καθώς και ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (συντελεστής Φ) στο εκάστοτε σημείο λειτουργίας της μηχανής. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μια απλοποιημένη μέθοδος για τον υπολογισμό του συντελεστή διόρθωσης συγκέντρωσης ξηρού/υγρού καυσαερίου (k_w). Τα υπόλοιπα μέρη του υπολογισμού ειδικών εκπομπών ρύπων που αφορούν: τον υπολογισμό της απόλυτης υγρασίας του αέρα εισαγωγής και του περιβάλλοντος, τη διόρθωση εκπομπών ΝΟx ώστε να ληφθούν υπόψιν η υγρασία και η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής, τον υπολογισμό παροχής ρύπων και τον υπολογισμό ειδικών εκπομπών ρύπων έγιναν σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα ΝΟx όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5.

6.1 Δεδομένα Εισόδου

Τα απαραίτητα δεδομένα για το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση αναγράφονται στον Πίνακα 6.1. Κατ' αντιστοιχία με το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα ΝΟx 2008 και παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 τα δεδομένα εισόδου για την απλοποιημένη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο αφορούν: το σημείο λειτουργίας του κινητήρα, μετρημένες συγκεντρώσεις στο καυσαέριο, τη σύνθεση του καίόμενου καυσίμου και τις συνθήκες περιβάλλοντος. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο λογισμικό που δημιουργήθηκε για κάθε σημείο λειτουργίας της μηχανής που επιλέχθηκαν να γίνουν μετρήσεις σύμφωνα με τους Κύκλους Δοκιμών Κινητήρα Diesel που παρουσιάζονται στην Παράγραφο 3.5.

Πίνακας 6.1 Δεδομένα Εισόδου

| Symbol | Unit | Description |
|---------------|------|--|
| C_{CO_D} | ppm | Συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO) στο ξηρό καυσαέριο |
| $C_{CO_{2d}}$ | % | Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂) στο ξηρό καυσαέριο κατ όγκο |
| C_{HCW} | ppmC | Συγκέντρωση υδρογονανθράκων (HC) στο υγρό καυσαέριο |
| $C_{NO_{xd}}$ | ppm | Συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NO _x) στο ξηρό καυσαέριο σε ppm |
| $C_{O_{2d}}$ | % | Συγκέντρωση οξυγόνου (O ₂) στο ξηρό καυσαέριο κατ ογκο |
| Load | % | Ποσοστό επί της μέγιστης ισχύος |
| Nrpm | rpm | Στροφές/λεπτό |
| p_b | kPa | Βαρομετρική πίεση του περιβάλλοντος |
| Power | kW | Ισχύς που αποδίδει η μηχανή |
| p_c | kPa | Πίεση εισαγωγής του αέρα στο θάλαμο καύσης |
| q_{mf} | kg/h | Κατανάλωση καυσίμου |
| R_a | % | Σχετική υγρασία |
| T_a | K | Απόλυτη θερμοκρασία του περιβάλλοντος |
| T_{sc} | K | Απόλυτη θερμοκρασία εισαγωγής του αέρα στο θάλαμο καύσης |
| TS_{CRef} | K | Απόλυτη θερμοκρασία αναφοράς εισαγωγής του αέρα στο θάλαμο καύσης (Δίνεται από τον κατασκευαστή της μηχανής) |
| w_{ALF} | % | Περιεκτικότητα κατά μάζα υδρογόνου στο καύσιμο |
| w_{BET} | % | Περιεκτικότητα κατά μάζα άνθρακα στο καύσιμο |
| w_{BET} | % | Περιεκτικότητα κατά μάζα θείου στο καύσιμο |
| w_{DEL} | % | Περιεκτικότητα κατά μάζα αζώτου στο καύσιμο |
| w_{EPS} | % | Περιεκτικότητα κατά μάζα οξυγόνου στο καύσιμο |

6.2 Επιπλέον μεταβλητές που εμφανίζονται στους υπολογισμούς

Πίνακας 6.2 Πίνακας Μεταβλητών

| Unit | Symbol | Description |
|------|--------|---|
| | - | ΑFRST |
| | - | Μοριακό βάρος του εκάστοτε i στοιχείου |
| | % | Περιεκτικότητα του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα σε CO ₂ |
| | - | Η συγκέντρωση του εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης στο ξηρό καυσαέριο |
| | ppm | Η συγκέντρωση του εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης στο υγρό καυσαέριο |
| | % | Συγκέντρωση υδρογόνου στο ξηρό καυσαέριο κατ' όγκο |
| | - | Η συγκέντρωση του εκάστοτε αερίου προϊόντος καύσης στο υγρό καυσαέριο |
| | - | συντελεστής άνθρακα |
| | - | Ειδική σταθερά καυσίμου για υπολογισμό παροχής ξηρού καυσαερίου |

| Unit | Symbol | Description |
|--------------------------|-------------------|--|
| H_a | g/kg | Η απόλυτη υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα (g νερού/kg ξηρού αέρα) |
| H_{sc} | g/kg | Η απόλυτη υγρασία του αέρα εισαγωγής (g νερού/kg ξηρού αέρα) |
| k_{hd} | - | Συντελεστής διόρθωσης εκπομπών NOx για την υγρασία και τη θερμοκρασία |
| k_w | - | Συντελεστής διόρθωσης ξηρού/υγρού καυσαερίου |
| m | kmol/kg fuel | Περιεκτικότητα άνθρακα στο καύσιμο ανά κιλό καυσίμου |
| n | kmol/kg fuel | Περιεκτικότητα υδρογόνου στο καύσιμο ανά κιλό καυσίμου |
| $n_{(O2_st)}$ | kmol | Η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου για στοιχειομετρική καύση |
| n_{PD} | kmol/kg fuel | Γραμμομόρια ξηρού καυσαερίου ανά κιλό καυσίμου |
| n_{PW} | kmol/kg fuel | Γραμμομόρια υγρού καυσαερίου ανά κιλό καυσίμου |
| p | kmol/kg fuel | Περιεκτικότητα θείου στο καύσιμο ανά κιλό καυσίμου |
| p_a | kPa | Η τάση ατμών του ατμοσφαιρικού αέρα |
| p_r | kPa | Πίεση των υδρατμών μετά το λουτρό ψύξης του συστήματος |
| p_{sc} | kPa | Η τάση ατμών του αέρα εισαγωγής |
| q | kmol/kg fuel | Περιεκτικότητα αζώτου στο καύσιμο ανά κιλό καυσίμου |
| q_{mew} | kg/h | Παροχή υγρού καυσαερίου |
| q_{mgas} | kg/h | Παραγωγή εκάστοτε αερίου ρύπου |
| $q_{specific_i}$ | g/kWh | Ειδική εκπομπή κάθε αερίου προϊόντος καύσης |
| $q_{total_specific_i}$ | g/kWh | Οι συνολικές ειδικές εκπομπές (i) προϊόντος καύσης όπως προβλέπεται στους Κύκλους Δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού |
| q_{NOx} | kg/h | Παραγωγή οξειδίων του αζώτου |
| R_{GAS} | J/(kg·K) | Ειδική σταθερά αερίου του παραγόμενου καυσαερίου |
| R_i | J/(kg·K) | Ειδική σταθερά του κάθε αερίου προϊόντος καύσης |
| t_a | °C | Η θερμοκρασία περιβάλλοντος |
| t_s | °C | Η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής |
| Wf_i | - | Ο συντελεστής βαρύτητας όπως αυτός προβλέπεται στους Κύκλους Δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού |
| X_i | - | Γραμμομοριακό κλάσμα αερίου προϊόντος καύσης (i) |
| Y_{O2_AIR} | % | Η κατά μάζα περιεκτικότητα σε οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα |
| α | - | Λόγος γραμμομορίων υδρογόνου προς άνθρακα στο καύσιμο |
| $\rho_{exhaust_gas}$ | kg/m ³ | Πυκνότητα παραγόμενου ξηρού καυσαερίου σε πρότυπες συνθήκες |

6.3 Υπολογισμός σύστασης του καυσίμου σε $\left(\frac{Kmol}{kg\ fuel}\right)$

Έστω ότι το καύσιμο αποτελείται από άνθρακα, υδρογόνο, θείο, άζωτο και οξυγόνο και έχει μοριακό τύπο $C_mH_nS_pN_qO_r$. Υπολογισμός της σύστασης του καυσίμου σε κάθε στοιχείο ανά μονάδα μάζας καυσίμου:

$$\underline{\text{Άνθρακας:}} \quad m = \frac{W_{BET}}{100 \cdot AWC} \left(\frac{Kmol}{kg\ fuel} \right) \quad (6.1)$$

$$\underline{\text{Υδρογόνο:}} \quad n = \frac{W_{ALF}}{100 \cdot AWH} \left(\frac{Kmol}{kg\ fuel} \right) \quad (6.2)$$

$$\underline{\text{Θείο:}} \quad p = \frac{W_{GAM}}{100 \cdot AWS} \left(\frac{Kmol}{kg\ fuel} \right) \quad (6.3)$$

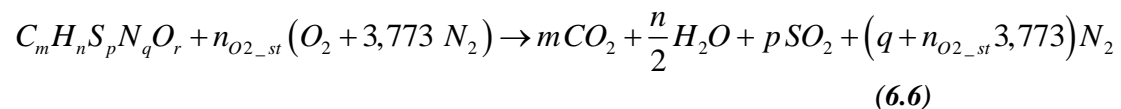
$$\underline{\text{Άζωτο:}} \quad q = \frac{W_{DEL}}{100 \cdot AWN} \left(\frac{Kmol}{kg\ fuel} \right) \quad (6.4)$$

$$\underline{\text{Οξυγόνο:}} \quad r = \frac{W_{EPS}}{100 \cdot AWO} \left(\frac{Kmol}{kg\ fuel} \right) \quad (6.5)$$

6.4 Στοιχειομετρική Καύση

Στοιχειομετρική ονομάζεται η ιδανική-τέλεια καύση στην οποία χρησιμοποιείται, τόσο οξυγόνο, όσο ακριβώς απαιτείται για την οξείδωση των στοιχείων του καυσίμου. Όπως είναι φυσικό, στα προϊόντα μιας τέτοιας καύσης δεν υπάρχει οξυγόνο.

Χημική εξίσωση στοιχειομετρικής καύσης:



Όπου 3,773 ο λόγος κατά mole περιεκτικότητας οξυγόνου προς άζωτο στην τυπική ατμόσφαιρα.

Ισοζύγιο Οξυγόνου:

$$2 n_{O_2_{st}} + r = 2m + \frac{n}{2} + 2p$$

$$\Rightarrow n_{O_2_{st}} = m + \frac{n}{4} + p - \frac{r}{2} \quad (6.7)$$

Στοιχειομετρικός λόγος αέρα-καυσίμου:

$$AFR_{ST} = n_{O_2_{st}} \cdot 2 \cdot AWO \cdot \frac{1}{Y_{O_2_{AIR}}} \quad (6.8)$$

$Y_{O_2_{AIR}}$: Η κατά μάζα περιεκτικότητα σε οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα
 $Y_{O_2_{AIR}}=23,2\%$ (τυπική ατμόσφαιρα)

6.5 Καύση με περίσσεια αέρα- Πραγματική Καύση

Η καύση γίνεται στην πράξη με χρήση περισσότερης ποσότητας οξειδωτικού μέσου (οξυγόνου ή αέρα) από όση θεωρητικά απαιτείται για την πλήρη οξείδωση των συστατικών του καυσίμου.

Υπολογισμός γραμμομοριακών κλασμάτων των αερίων προϊόντος καύσης:

$$X_{CO_2} = C_{CO_2d} / 100 \quad (6.9)$$

$$X_{CO} = C_{COd} / 10^6 \quad (6.10)$$

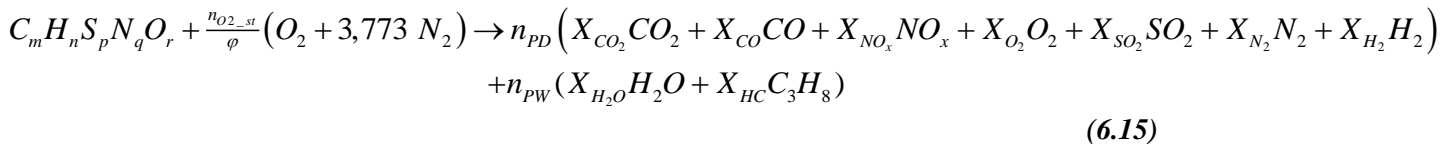
$$X_{O_2} = C_{O_2d} / 100 \quad (6.11)$$

$$X_{NO_x} = C_{NO_xd} / 10^6 \quad (6.12)$$

$$X_{HC} = C_{Hcd} / (3 \cdot 10^6) \quad (6.13)$$

$$X_{SO_2} = C_{SO_2d} / 100 \quad (6.14)$$

Χημική εξίσωση πραγματικής καύσης:



n_{PD} : Γραμμομόρια ξηρού καυσαερίου ανά κιλό καυσίμου $\left(\frac{kmol}{kg \text{ fuel}} \right)$

n_{PW} : Γραμμομόρια υγρού καυσαερίου ανά κιλό καυσίμου $\left(\frac{kmol}{kg \text{ fuel}} \right)$

Παραδοχές:

- Η συγκέντρωση υδρογονανθράκων έχει αναχθεί σε ισοδύναμο προπάνιο (C_3H_8)
- Η συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου (NO_x) έχει αναχθεί σε ισοδύναμο δι-οξείδιο του αζώτου (NO_2) κατά ISO 8178

Ισοζύγιο Άνθρακα:

$$m = n_{PD} (X_{CO_2} + X_{CO}) + n_{PW} \cdot X_{HC} \quad (6.16)$$

Ισοζύγιο Οξυγόνου:

$$r + \frac{2 \cdot n_{O_2-st}}{\varphi} = n_{PD} (X_{CO} + 2X_{CO_2} + 2X_{NO_x} + 2X_{O_2} + 2X_{SO_2}) + n_{PW} X_{H_2O} \quad (6.17)$$

Για το παραγόμενο καυσαέριο ισχύει:

$$n_{PW} = n_{PD} + X_{H_2O} \cdot n_{PW} \\ \Rightarrow n_{PD} = (1 - X_{H_2O}) \cdot n_{PW} \quad (6.18)$$

Υπολογισμός συντελεστή Φ

Από τον συνδυασμό των εξισώσεων (6.16) και (6.18) προκύπτει:

$$n_{PW} = \frac{m}{(X_{CO} + 2X_{CO_2})(1 - X_{H_2O}) + 3X_{HC}} \quad (6.19)$$

Από τον συνδυασμό των εξισώσεων (6.17) και (6.18) προκύπτει:

$$\varphi = \frac{2 \cdot n_{O_2_{st}}}{\left[(X_{CO} + 2X_{CO_2} + 2X_{NO_x} + 2X_{O_2} + 2X_{SO_2})(1 - X_{H_2O}) + X_{H_2O} \right] \cdot n_{PW} - r} \quad (6.20)$$

Από [INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS – John B. Heywood]:

$$X_{H_2O} = \left(\frac{n}{2m} \right) \cdot \frac{X_{CO} + 2X_{CO_2}}{1 + \frac{X_{CO}}{K \cdot X_{CO_2}} + \frac{n}{2m} \cdot (X_{CO} + 2X_{CO_2})}, \quad K=3,5 \quad (6.21)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (6.19),(6.20) και (6.21) υπολογίζεται ο συντελεστής φ.

6.6 Υπολογισμός παροχής καυσαερίου

Έχοντας υπολογισμένα τον στοιχειομετρικό λόγο αέρα-καυσίμου και τον συντελεστή φ και με δεδομένη την παροχή καυσίμου εκτιμάται η παροχή καυσαερίου σε (kg/h).

Πραγματικός λόγος αέρα-καυσίμου:

$$AFR = AFR_{ST} / \varphi \quad (6.22)$$

Παροχή καυσαερίου:

$$q_{mew} = q_{mf} (AFR + 1) \quad (6.23)$$

6.7 Διόρθωση συγκεντρώσεων ξηρού/υγρού καυσαερίου

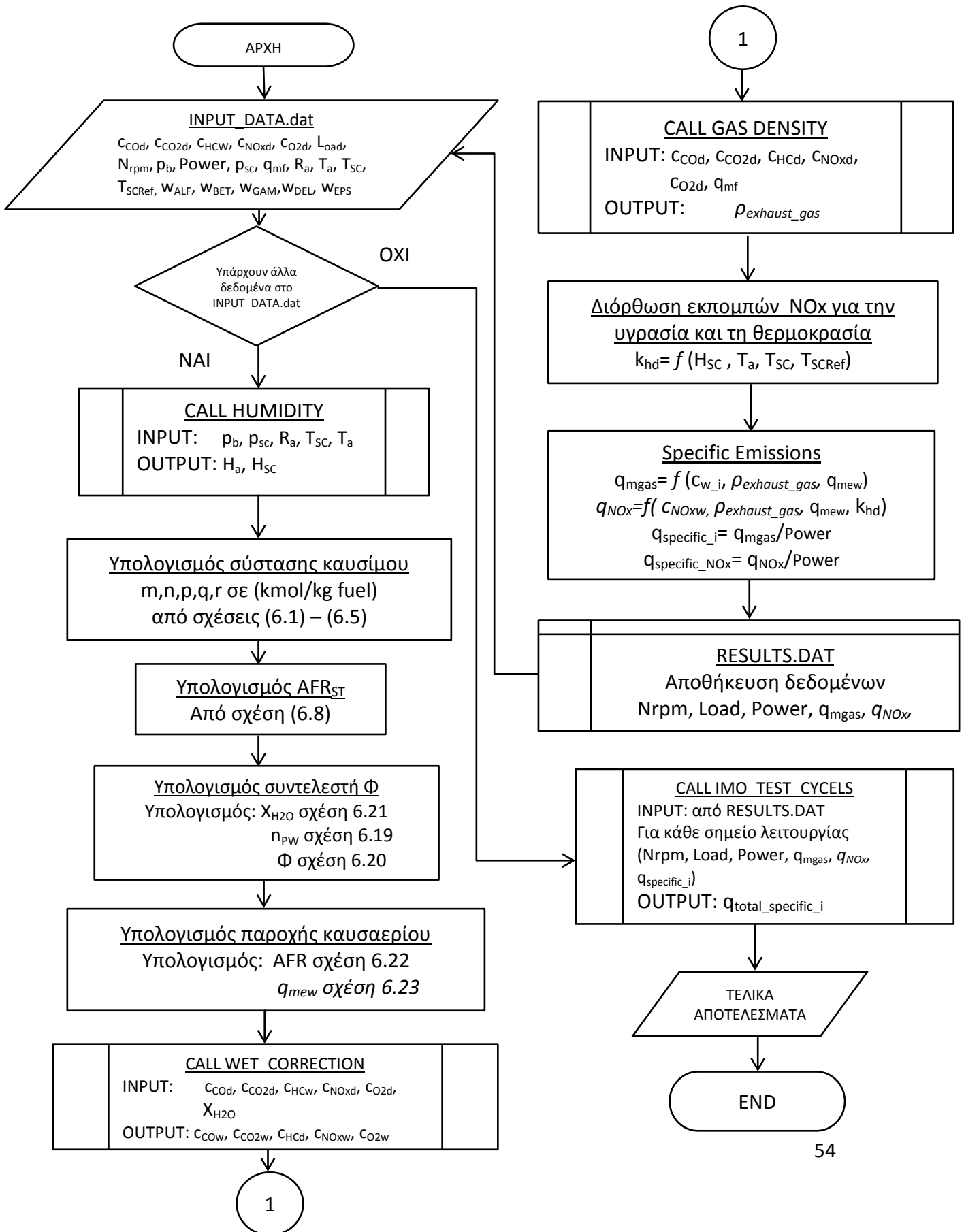
Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των μοριακών ενώσεων στο καυσαέριο πλην αυτής των υδρογονανθράκων αναφέρονται σε καυσαέριο χωρίς υγρασία. Χρησιμοποιήθηκε μια απλοποιημένη μέθοδος για τον υπολογισμό συντελεστή διόρθωσης (k_w) ώστε οι συγκεντρώσεις να αναφέρονται σε υγρό καυσαέριο ($c_{w_i} = k_w \cdot c_{d_i}$) σαν εναλλακτική αυτής που περιέχεται στον Τεχνικό Κώδικα ΝΟx 2008. Ακολουθεί ο υπολογισμός:

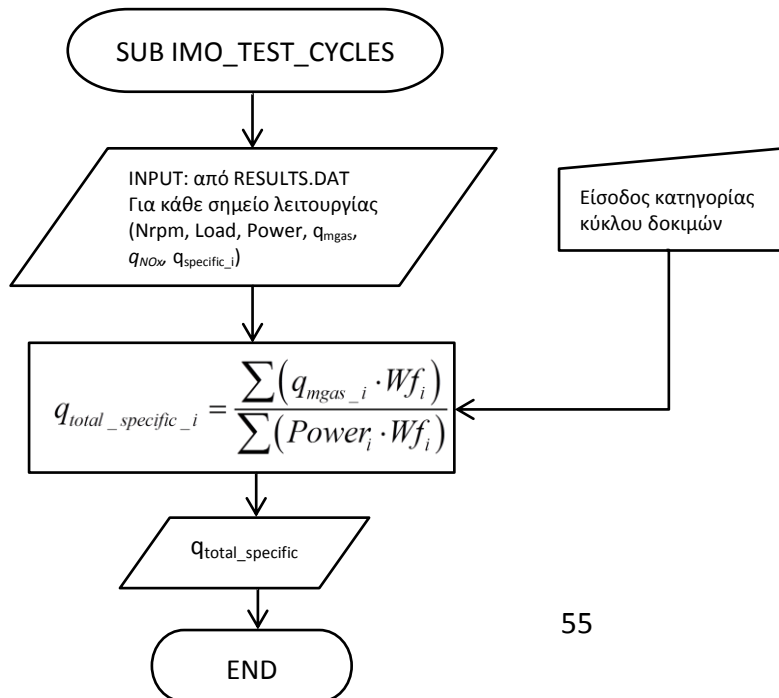
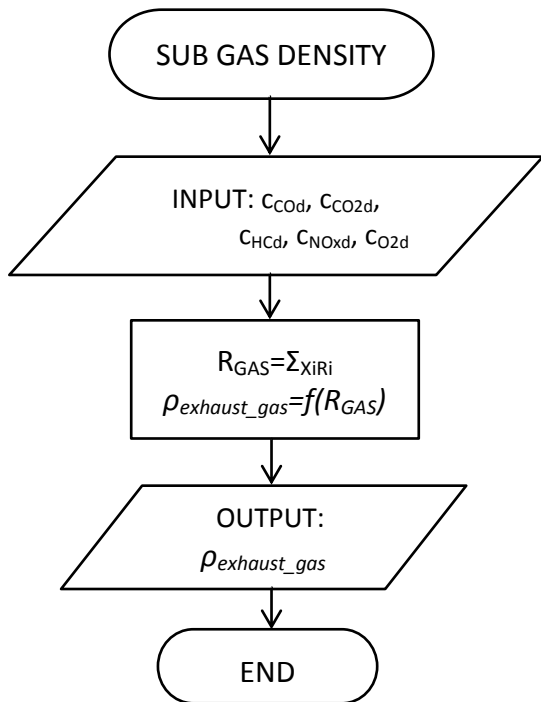
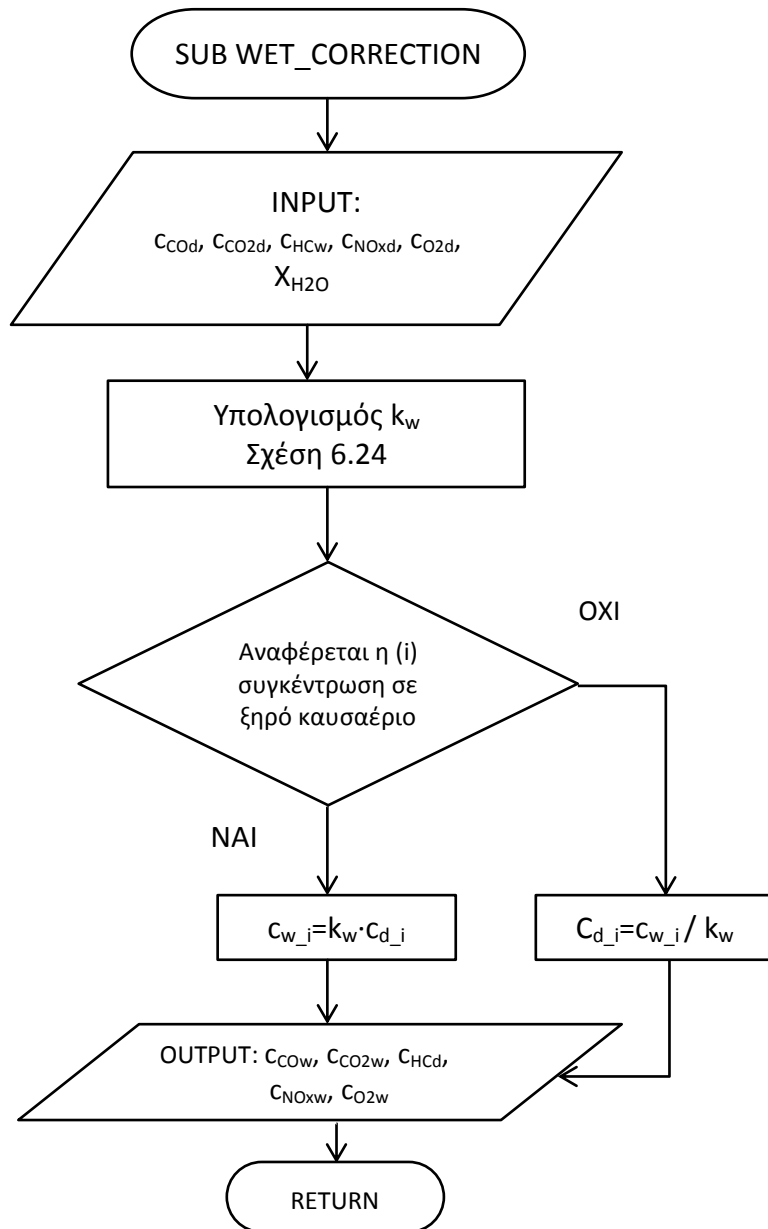
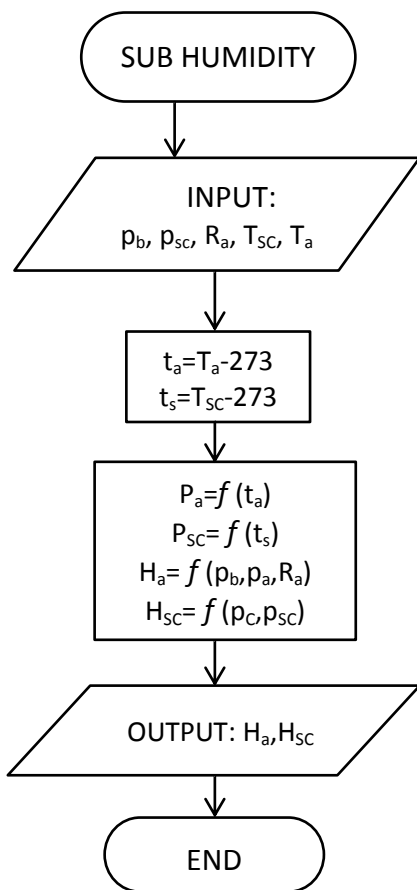
$$\left\{ \begin{array}{l} X_{i_wet} = \frac{n_i}{n_{PW}} \\ X_{i_dry} = \frac{n_i}{n_{PD}} \end{array} \right\} \xrightarrow{(\div)} \frac{X_{i_wet}}{X_{i_dry}} = \frac{n_{PD}}{n_{PW}} \xrightarrow{(5.18)} X_{i_wet} = (1 - X_{H_2O}) \cdot X_{i_dry}$$
$$\Rightarrow k_w = 1 - X_{H_2O} \quad (6.24)$$

Σημείωση:

Τα υπόλοιπα μέρη του υπολογισμού ειδικών εκπομπών ρύπων που αφορούν: τον υπολογισμό της απόλυτης υγρασίας του αέρα εισαγωγής και του περιβάλλοντος, τη διόρθωση εκπομπών ΝΟx ώστε να ληφθούν υπόψη η υγρασία και η θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής, τον υπολογισμό παροχής ρύπων και τον υπολογισμό ειδικών εκπομπών ρύπων έγιναν σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα ΝΟx όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 στις παραγράφους (5.3), (5.6), (5.7), (5.8) και (5.9)

6.8 Διάγραμμα Ροής του λογισμικού εκτίμησης εκπομπών ρύπων βάσει της στοιχειομετρικής και πραγματικής καύσης.





7 Εφαρμογή των λογισμικών εκτίμησης ρύπων σε μετρήσεις ναυτικών κινητήρων diesel

Στο παρών κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή του λογισμικού εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και χρησιμοποιεί μετρημένες συγκεντρώσεις και του λογισμικού εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση και χρησιμοποιεί μετρημένες συγκεντρώσεις σε μετρήσεις τεσσάρων ναυτικών κινητήρων diesel.

Κάθε ναυτικός κινητήρας diesel που κατασκευάζεται πρέπει, σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα NOx, να περνά μια σειρά δοκιμών σε κλίνη δοκιμών πριν εγκατασταθεί σε πλοίο. Σε αυτές τις δοκιμές περιλαμβάνεται και η εκτίμηση ειδικών εκπομπών οξειδίων του αζώτου σύμφωνα με τους Κύκλους Δοκιμών Κινητήρων Diesel του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού. Επίσης, ειδικά για τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου εκδίδεται ένα πιστοποιητικό που πιστοποιεί ότι ο κινητήρας είναι σύμφωνος με τα όρια της Marpol 73/78. Σε αυτό το πιστοποιητικό, που καλείτε (Engine International Air Pollution Prevention Certificate) αναγράφονται οι μετρημένες τιμές με τις οποίες έγινε ο υπολογισμός της εκτίμησης ειδικών εκπομπών NOx και οι τιμές των ειδικών εκπομπών NOx που αποτελούν το αποτέλεσμα των υπολογισμών. Επιπλέον, καθόλη τη διάρκεια ζωής του κάθε κινητήρα πρέπει να διατηρείται ένα αρχείο (NOx Technical File ή απλούστερα NOx file), όπου αναφέρονται όλες οι επιθεωρήσεις-επισκευές που έχει υποστεί η υπό έλεγχο μηχανή και όλα τα ανταλλακτικά μέρη που χρησιμοποιήθηκαν και ότι αυτά είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Ειδικότερα, για κινητήρες που κατασκευάζονται σε γραμμή παραγωγής προβλέπεται από τον Τεχνικό Κώδικα NOx η παραπάνω διαδικασία ελέγχου ειδικών εκπομπών NOx για μία αντιπροσωπευτική μηχανή που καλείται «μητρική μηχανή» (parent engine) και όχι για κάθε μια ξεχωριστή μηχανή, προς διευκόλυνση του κατασκευαστή.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται εφαρμογή των δύο λογισμικών που παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 5 και 6 σε δεδομένα από NOx files τεσσάρων ναυτικών κινητήρων diesel. Τα δεδομένα των NOx files που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό ειδικών εκπομπών NOx παραθέτονται στο Παράρτημα I της διπλωματικής εργασίας και αφορούν πιστοποιητικά που έχουν δοθεί σε parent engines. Οι πρώτοι δύο κινητήρες (Κινητήρας A και Κινητήρας B) στους οποίους έγινε εφαρμογή των δύο λογισμικών είναι δίχρονοι, υπερπληρωμένοι, diesel κινητήρες κύριας πρόωσης πλοίου. Οι δύο επόμενοι κινητήρες (Κινητήρας C και Κινητήρας D) στους οποίους έγινε εφαρμογή των δύο λογισμικών είναι τετράχρονοι, υπερπληρωμένος, diesel, ναυτικοί κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής, σταθερών στροφών.

Σκοπός της εφαρμογής των δύο λογισμικών εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που χρησιμοποιούν μετρημένες συγκεντρώσεις στα τέσσερα NOx files ναυτικών κινητήρων diesel είναι η αξιολόγηση των δύο μεθοδολογιών μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων τους τόσο με τα αποτελέσματα που αναγράφονται στα NOx file όσο και μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι επειδή τα αποτελέσματα που περιέχονται στα NOx files και σχετίζονται με εκπομπές ρύπων δεν είναι μετρημένες τιμές αλλά αποτέλεσμα υπολογισμών, η όποια σύγκριση με αυτά τα αποτελέσματα είναι ενδεικτική και γίνεται με κάθε επιφύλαξη. Επιπλέον, γίνεται ανάλυση των εκπομπών ρύπων από τους κινητήρες σε όλο το φάσμα των στροφών λειτουργίας.

7.1 Εφαρμογή στον Κινητήρα Α

Η Μηχανή Α είναι ένας δίχρονος υπερπληρωμένος diesel κινητήρας κύριας πρόωσης που λειτουργεί με το νόμο της έλικας. Το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση και χρησιμοποιούν μετρημένες συγκεντρώσεις εφαρμόστηκαν στο NOx file της Μηχανής Α. Το NOx file της Μηχανής Α βρίσκεται στο παράρτημα Ι. Ο κινητήρας υπάγεται στην κατηγορία Ε3 των κύκλων δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και διαγράμματα εκπομπών ρύπων συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου με σκοπό την αξιολόγηση τους.

Στον Πίνακα 6.1 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών του λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 παρουσιάζουν μικρό σφάλμα σε σχέση με εκείνα του NOx file της μηχανής. Η πιθανότερη πηγή αυτής της μικρής διαφοράς είναι ότι το NOx file συντάχθηκε το 2006 και οι υπολογισμοί δεν έχουν γίνει με τις τελευταίες τροποποιήσεις του Τεχνικού Κώδικα NOx. Οι προηγούμενες εκδόσεις του κώδικα επέτρεπαν μεγαλύτερη ελευθερία στους υπολογισμούς καθώς δεν ήταν σαφώς καθορισμένα όλα τα στάδια της διαδικασίας υπολογισμού. Συνεπώς, τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.1 μπορούν να χαρακτηριστούν αξιόπιστα.

Πίνακας 7.1 Κινητήρας Α - Αποτελέσματα λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 - Σύγκριση με NOx file

| LOAD (%) | 100% | | 75% | | 50% | | 25% | |
|-----------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file |
| Dry/Wet correction | 0.973 | 0.966 | 0.975 | 0.968 | 0.975 | 0.968 | 0.976 | 0.969 |
| | Error= 0.72% | | Error= 0.74% | | Error= 0.71% | | Error= 0.69% | |
| K _{HD} | 0.882 | 0.879 | 0.879 | 0.877 | 0.875 | 0.873 | 0.913 | 0.911 |
| | Error= 0.31% | | Error= 0.26% | | Error= 0.28% | | Error= 0.25% | |
| GasFlow (kg/h) | 156156.3 | 158067.0 | 123627.8 | 126244.0 | 83151.9 | 85519.0 | 44525.3 | 45231.0 |
| | Error= 1.21% | | Error= 2.07% | | Error= 2.77% | | Error= 1.56% | |
| NOx (kg/h) | 215.932 | 216.910 | 173.960 | 173.190 | 106.557 | 108.700 | 47.534 | 47.860 |
| | Error= 0.45% | | Error= 0.44% | | Error= 1.97% | | Error= 0.68% | |
| NOx specific (g/kWh) | 12.986 | 13.050 | 13.944 | 14.120 | 12.816 | 13.070 | 11.434 | 11.510 |
| | Error= 0.49% | | Error= 1.25% | | Error= 1.94% | | Error= 0.66% | |
| Test Cycle E3 (g/kWh) | 13.406 | 13.550 | IMO limit | | | | | |
| | Error= 1.07% | | 17 (g/kWh) | | | | | |

Στον Πίνακα 7.2 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών του λογισμικού που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα με εκείνα του NOx file της μηχανής. Αν και τα αποτελέσματα που περιέχονται στα NOx files είναι εκτιμημένες και όχι μετρημένες τιμές τα αποτελέσματα που δίνει το λογισμικό για την Μηχανή Α και φαίνονται στον Πίνακα 7.2 μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα.

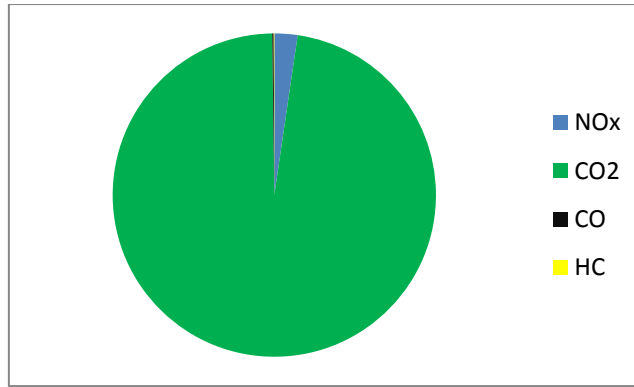
Πίνακας 7.2 Κινητήρας Α - Αποτελέσματα λογισμικού που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση - Σύγκριση με NOx file

| LOAD (%) | 100% | | 75% | | 50% | | 25% | |
|-----------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file |
| Dry/Wet correction | 0.968 | 0.966 | 0.970 | 0.968 | 0.970 | 0.968 | 0.971 | 0.969 |
| | Error= 0.17% | | Error= 0.20% | | Error= 0.18% | | Error= 0.16% | |
| K _{HD} | 0.882 | 0.879 | 0.879 | 0.877 | 0.875 | 0.873 | 0.913 | 0.911 |
| | Error= 0.31% | | Error= 0.26% | | Error= 0.28% | | Error= 0.25% | |
| GasFlow (kg/h) | 158104.1 | 158067.0 | 125690.4 | 126244.0 | 84817.3 | 85519.0 | 45106.2 | 45231.0 |
| | Error= 0.02% | | Error= 0.44% | | Error= 0.82% | | Error= 0.28% | |
| NOx (kg/h) | 217.441 | 216.910 | 175.924 | 173.190 | 108.124 | 108.700 | 47.904 | 47.860 |
| | Error= 0.24% | | Error= 1.58% | | Error= 0.53% | | Error= 0.09% | |
| NOx specific (g/kWh) | 13.077 | 13.050 | 14.101 | 14.120 | 13.005 | 13.070 | 11.523 | 11.510 |
| | Error= 0.21% | | Error= 0.13% | | Error= 0.50% | | Error= 0.12% | |
| Test Cycle E3 (g/kWh) | 13.543 | 13.550 | IMO limit | | | | | |
| | Error= 0.05% | | 17 (g/kWh) | | | | | |

Τόσο στον Πίνακα 7.3 όσο και στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου Δοκιμών Κινητήρα E3 και από τα δύο λογισμικά που αναπτύχθηκαν. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών είναι της τάξεως του 1%. Παρατηρούμε επίσης ότι εάν και συγκριτικά με τις εκπομπές CO₂ εκείνες των NOx είναι περισσότερο από μια τάξη μεγέθους λιγότερες, οι αρνητικές επιπτώσεις που έχουν στο περιβάλλον και στους ζωντανούς οργανισμούς καθιστούν απαραίτητη τη δημιουργία κανονισμών για τον περιορισμό τους. Επίσης φαίνεται ότι οι εκπομπές υδρογονανθράκων (HC) και CO είναι δύο τάξεις μεγέθους λιγότερες από αυτές των NOx. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίοι κανονισμοί έχουν συνταχθεί για τον περιορισμό τους περιορίζονται σε εθνικό επίπεδο και δεν έχουν υιοθετηθεί ακόμα από τον IMO παρά τις αρνητικές συνέπειες που προκαλεί η εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα.

Πίνακας 7.3 Ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου δοκιμών E3

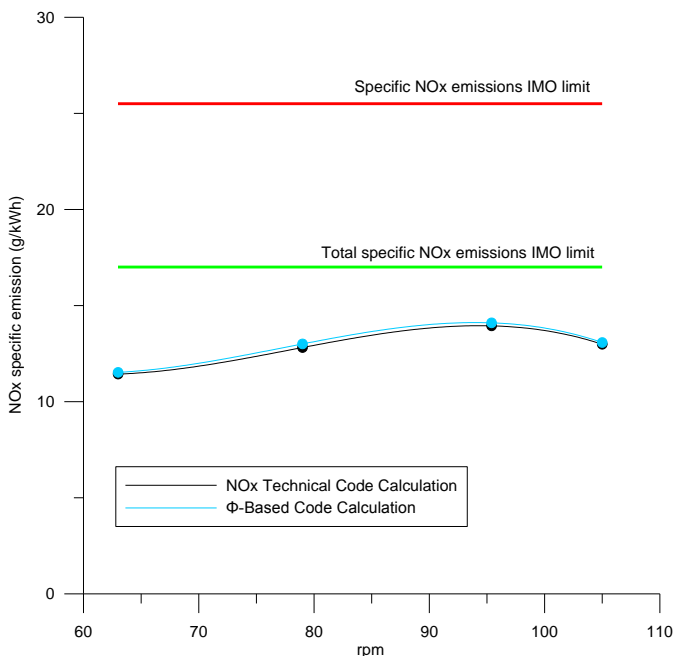
| | Μονάδα | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle E3 NOx Technical Code Calculations | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle E3 φ-Based Calculations | Διαφορά (%) |
|-----------------|--------|--|---|-------------|
| NOx | g/kWh | 13.406 | 13.543 | 1.0% |
| CO ₂ | kg/kWh | 0.566 | 0.571 | 1.0% |
| CO | g/kWh | 0.857 | 0.866 | 1.0% |
| HC | g/kWh | 0.345 | 0.350 | 1.6% |



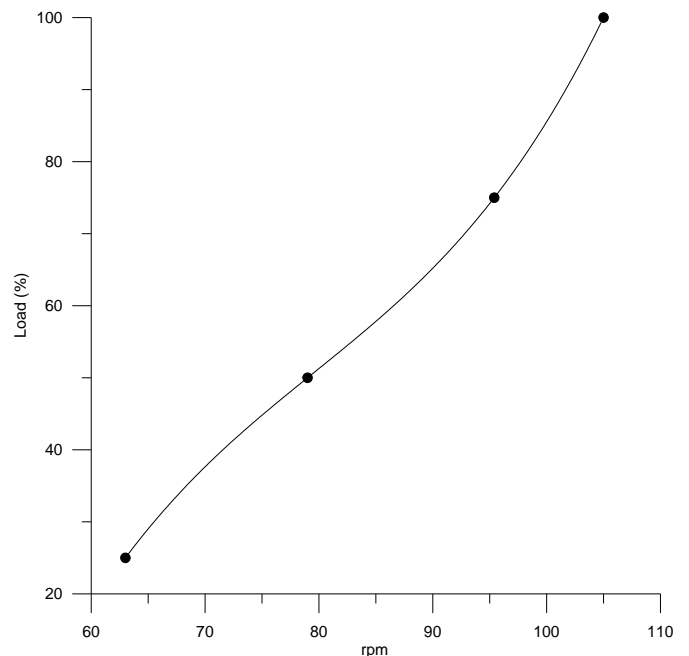
Σχήμα 7.1 Ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου δοκιμών E3 – Συγκριτικά

7.1.1 Έλεγχος εναρμόνισης ειδικών εκπομπών NO_x με τα όρια της Marpol 73/78 – Καμπύλη φόρτισης Κινητήρα Α.

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x συναρτήσει των στροφών λειτουργίας της μηχανής όπως υπολογίστηκε και με τις δύο μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν. Με πράσινο χρώμα φαίνεται το όριο των ειδικών εκπομπών NO_x βάσει του κύκλου δοκιμών κινητήρα E3. Στον τεχνικό κώδικα αναφέρεται ότι για κάθε σημείο λειτουργίας το όριο για τις ειδικές εκπομπές NO_x είναι 50% περισσότερο από το αντίστοιχο όριο των κύκλων δοκιμών κινητήρα. Αυτό το όριο φαίνεται στο Σχήμα 7.2 με κόκκινο χρώμα. Οι ειδικές εκπομπές NO_x του κινητήρα Α βρίσκονται κάτω από το ανώτατο επιτρεπτό αυτό όριο σε όλο το φάσμα των στροφών λειτουργίας. Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η καμπύλη φόρτισης του Κινητήρα Α κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων.



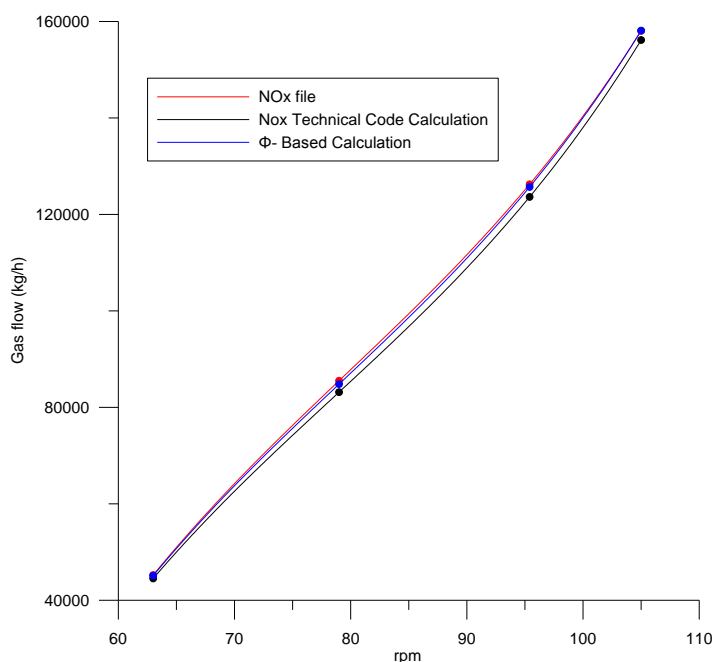
Σχήμα 7.2 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NO_x συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



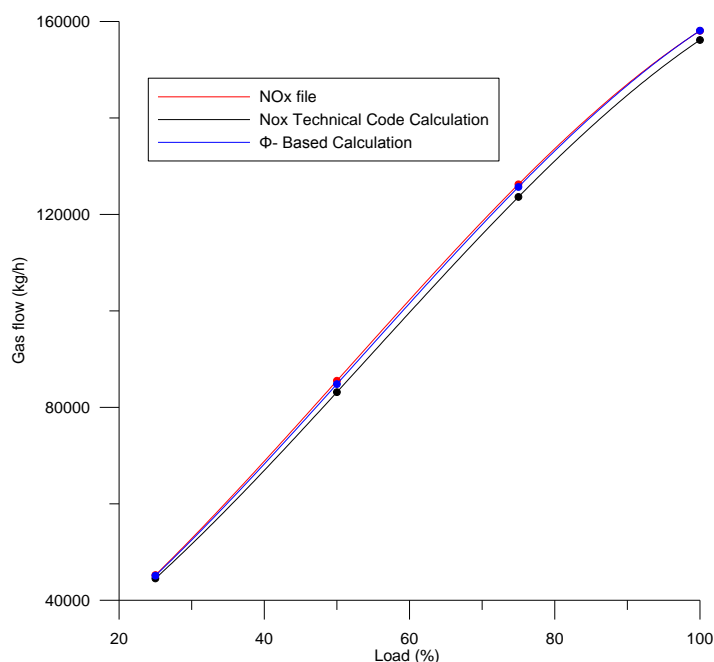
Σχήμα 7.3 Καμπύλη φόρτισης του Κινητήρα Α

7.1.2 Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου

Ένας από τους βασικούς υπολογισμούς που περιλαμβάνει ο Τεχνικός Κώδικας NOx είναι εκείνος της παροχής καυσαερίου. Στα Σχήματα 7.4 και 7.5 παρουσιάζεται αντίστοιχα η μεταβολή της παροχής καυσαερίου συναρτήσει των στροφών και του φορτίου λειτουργίας όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση. Στα ίδια σχήματα φαίνεται η παροχή καυσαερίου που αναγράφεται στο NOx file του Κινητήρα A. Η καμπύλη της παροχής καυσαερίου που προέκυψε από τα αποτελέσματα του λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 φαίνεται πως βρίσκεται κατά ένα μικρό ποσοστό κατακόρυφα μετατοπισμένη προς τα κάτω σε σύγκριση με τις αντίστοιχες καμπύλες που προκύπτουν από τις τιμές που περιέχονται στο NOx file και από τις τιμές που εκτιμά το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση. Η διαφορά αυτή βάσει του Πίνακα 7.1 είναι περίπου 2%. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους για τη διαφορά που προκύπτει στις ειδικές εκπομπές NOx. Αντίθετα, η καμπύλη της παροχής καυσαερίου που προέκυψε από τα αποτελέσματα του λογισμικού που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση ταυτίζεται σχεδόν απόλυτα με αυτή του NOx file (Σχήμα 7.4 και Σχήμα 7.5).⁷



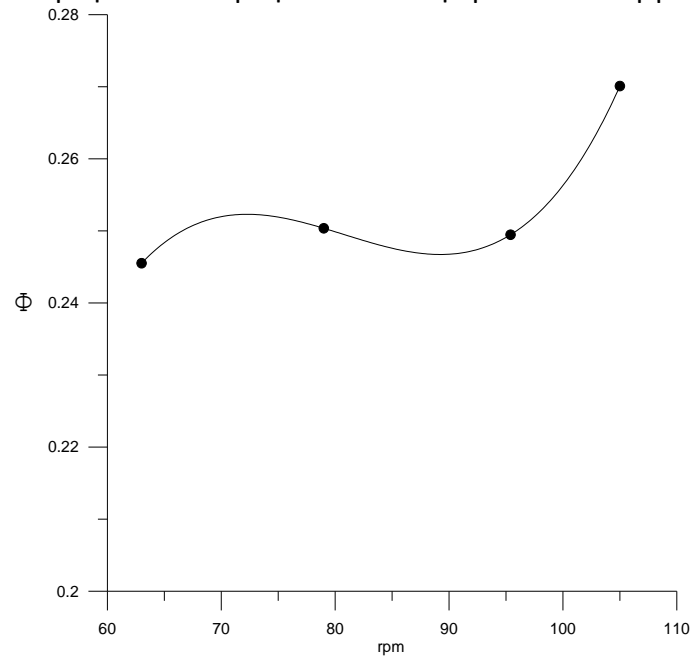
Σχήμα 7.4 Μεταβολή παροχής καυσαερίου συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



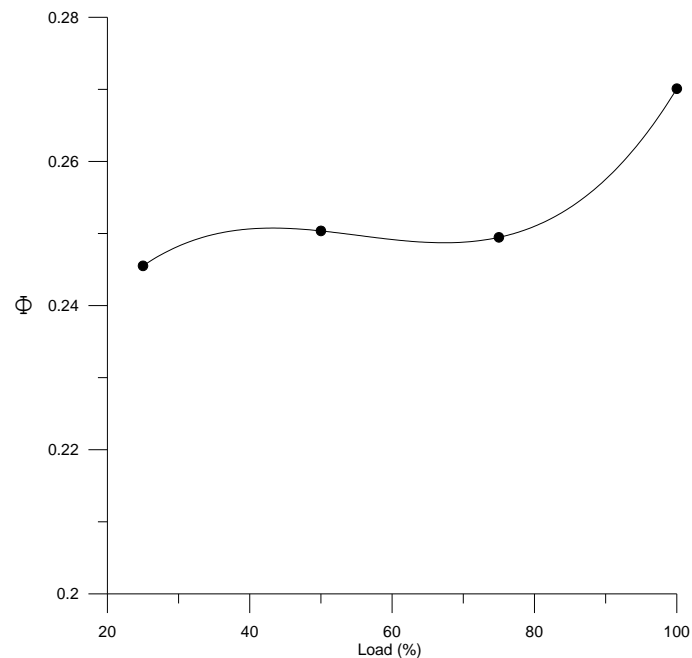
Σχήμα 7.5 Μεταβολή παροχής καυσαερίου συναρτήσει του φορτίου

⁷ Ο όρος «Φ-Based Calculation» αφορά υπολογισμό που έχει γίνει με το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση και χρησιμοποιεί μετρημένες συγκεντρώσεις όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6 για τον υπολογισμό της παροχής καυσαερίων από το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση υπολογίζεται ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα-καυσίμου (AFR_{ST}) και στη συνέχεια ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (equivalence ratio) ή συντελεστής Φ . Ο συντελεστής Φ είναι ο λόγος του πραγματικού λόγου καυσίμου-αέρα προς τον στοιχειομετρικό. Στα Σχήματα 7.6 και 7.7 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή Φ συναρτήσει των στροφών και του φορτίου λειτουργίας αντίστοιχα.



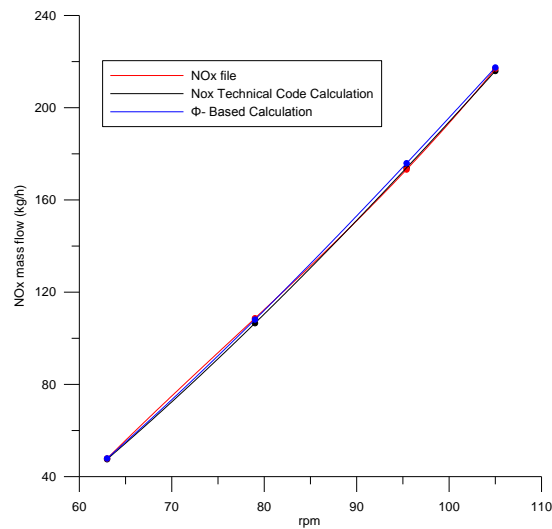
Σχήμα 7.6 Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



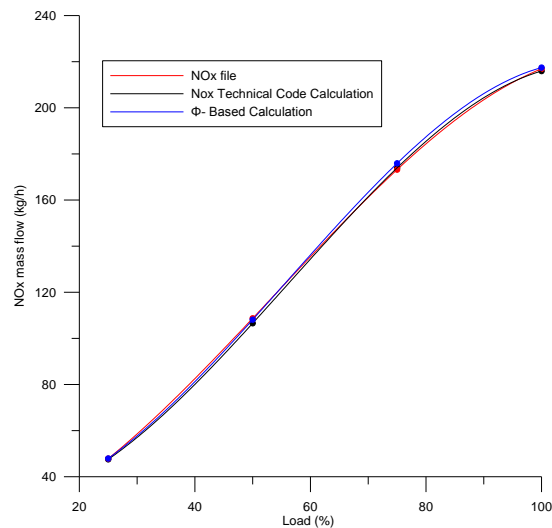
Σχήμα 7.7 Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα συναρτήσει του φορτίου

7.1.3 Αξιολόγηση εκπομπών NOx

Στα Σχήματα 7.8 και 7.9 παρουσιάζεται η εκπομπή NOx σε κλά αν ώρα συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου αντίστοιχα όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008, αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Όσο το φορτίο και οι στροφές αυξάνονται, αυξάνεται και η παραγωγή NOx καθώς το εκπεμπόμενο καυσαέριο είναι συνολικά περισσότερο. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 7.6, η παροχή NOx μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει του φορτίου. Είναι εμφανές από τα Σχήματα 7.8 και 7.9 ότι η καμπύλη των αποτελεσμάτων και των δύο λογισμικών σχεδόν ταυτίζεται με εκείνη του NOx file του Κινητήρα Α.

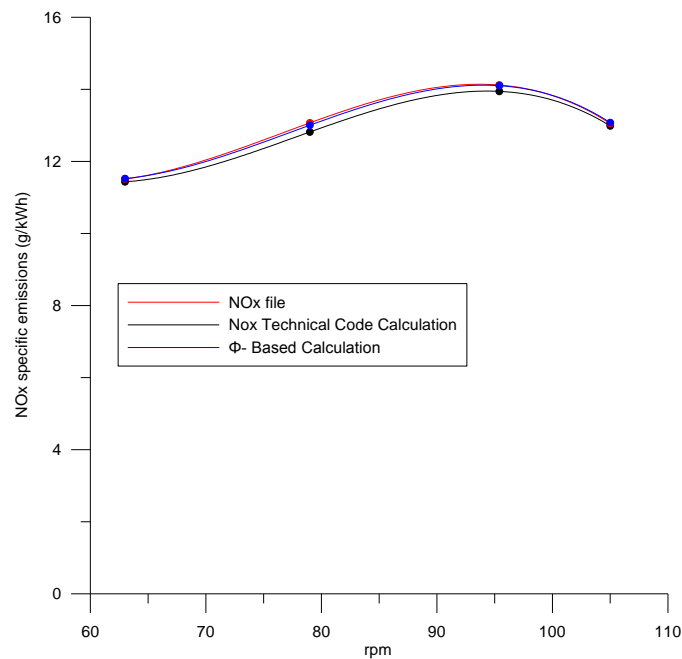


Σχήμα 7.8 Μεταβολή παροχής NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

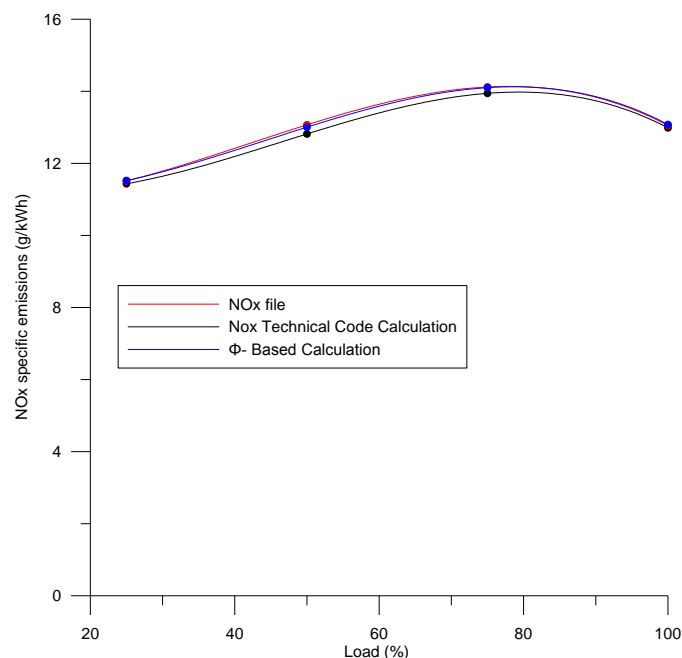


Σχήμα 7.9 Μεταβολή παροχής NOx συναρτήσει του φορτίου

Στα Σχήματα 7.10 και 7.11 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές NOx σε γραμμάρια ανά κιλοβατώρα συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου αντίστοιχα όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Η μορφή των διαγραμμάτων εξαρτάται άμεσα την καμπύλη φόρτισης του Κινητήρα Α (Σχήμα 7.3).



Σχήμα 7.10 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



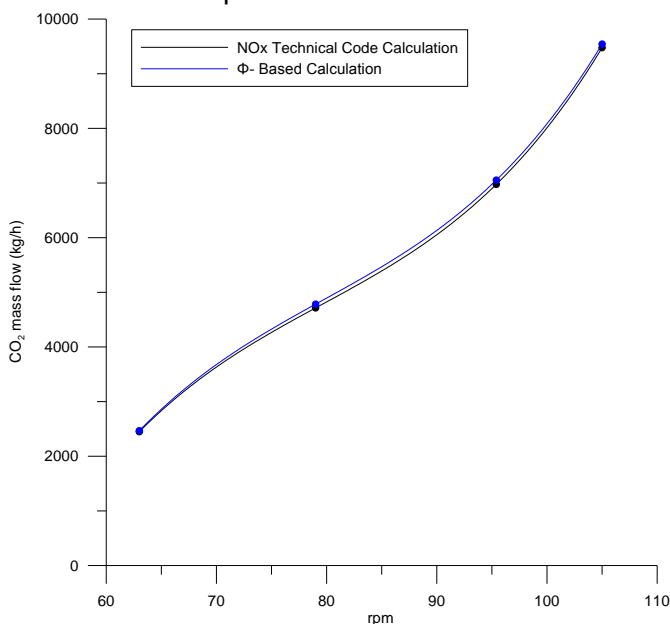
Σχήμα 7.11 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει του φορτίου

7.1.4 Αξιολόγηση εκπομπών CO₂

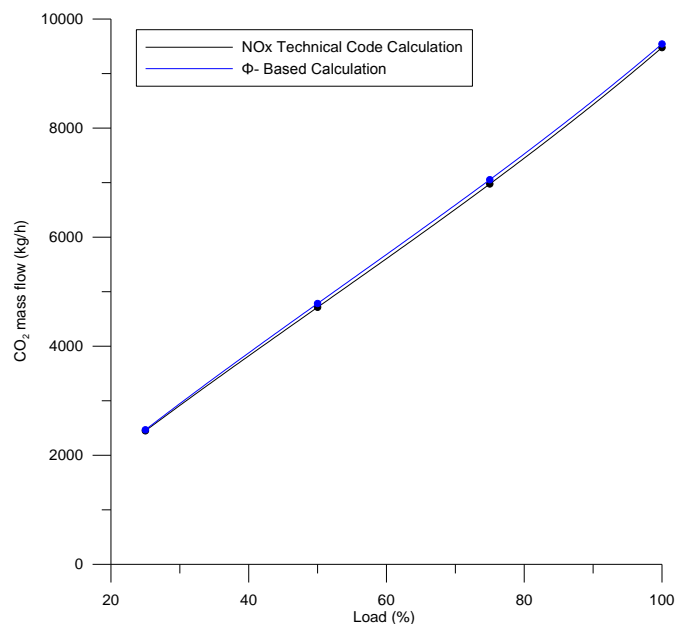
Το διοξείδιο του άνθρακα δεν μπορεί να θεωρηθεί ουσιαστικά ως ρύπος καθώς αποτελεί άμεσο και αναπόφευκτο προϊόν της καύσης. Ανήκει, όμως, στην κατηγορία των «αερίων του θερμοκηπίου». Οι αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα από ανθρώπινη δραστηριότητα οδηγούν στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Παρόλαυτα, η ναυτιλία έχει μέχρι στιγμής εξαιρεθεί από το πλαίσιο του Κιότο για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Όσον αφορά τον ανθρώπινο οργανισμό το CO₂, μόνο σε εξαιρετικά μεγάλες συγκεντρώσεις (8% και άνω), μπορεί να προκαλέσει πονοκεφάλους, θολή όραση και παραισθήσεις

Η μεθοδολογία του Τεχνικού Κώδικα NOx 2008 δεν περιορίζεται μόνο στον υπολογισμό των εκπομπών οξειδίων του αζώτου αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό εκπομπών και άλλων ρύπων. Χρησιμοποιήθηκαν το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση για τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂. Καθώς στο NOx file του Κινητήρα A δεν περιλαμβάνονται αποτελέσματα σχετικά με άλλους ρύπους πέρα από τα NOx η αξιολόγηση θα περιοριστεί στη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών.

Στα Σχήματα 7.12 και 7.13 παρουσιάζεται η μεταβολή των ολικών εκπομπών CO₂ από τον Κινητήρα A σε κιλά ανά ώρα σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας και το φορτίο αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι και τα δύο διαγράμματα δείχνουν ότι ο εκπομπές CO₂ αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου και των στροφών. Μάλιστα η αύξηση αυτή είναι σχεδόν γραμμική σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα (Σχήμα 7.13). Επιπλέον, σε όλο το εύρος των στροφών αλλά και του φορτίου οι ολικές εκπομπές CO₂ που υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 είναι σταθερά ελάχιστα λιγότερες σε σχέση με αυτές που υπολογίζει το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση.

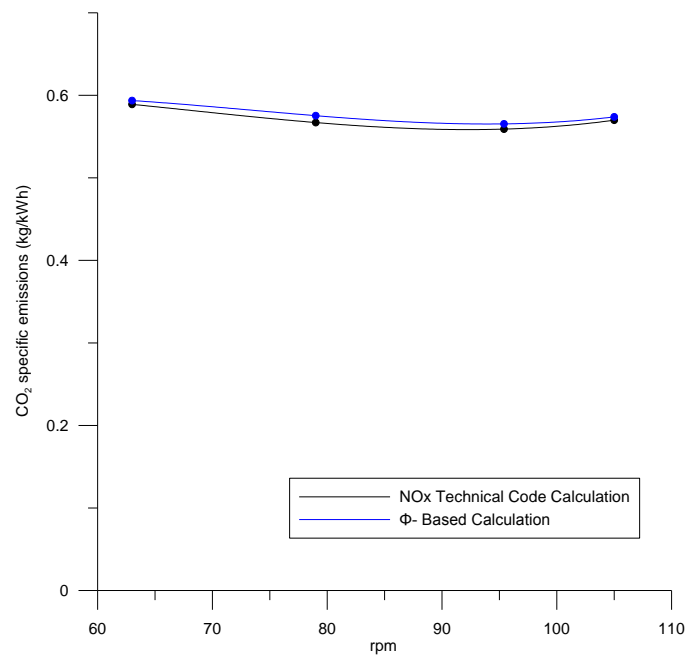


Σχήμα 7.12 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

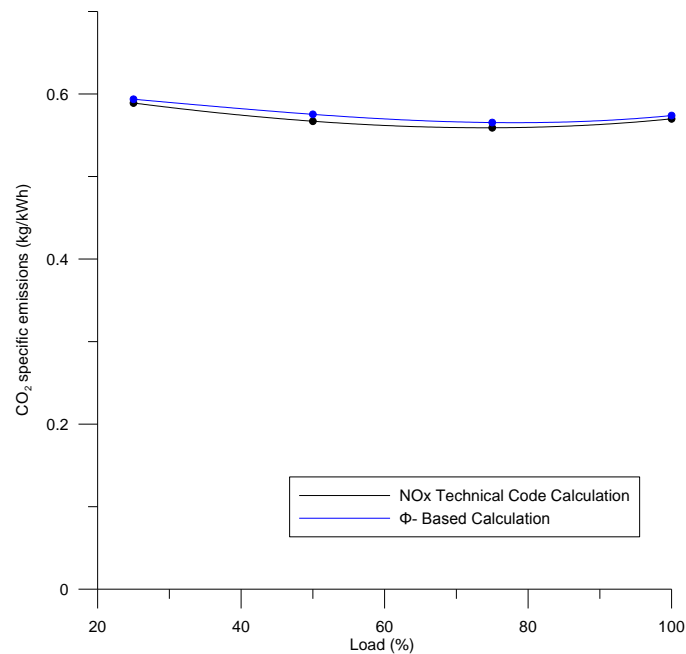


Σχήμα 7.13 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου

Η μικρή διαφορά μεταξύ των ολικών εκπομπών CO₂ που προκύπτει από την εφαρμογή των δύο μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν στα Κεφάλαια 5 και 6 μεταφέρεται και στις ειδικές εκπομπές CO₂ όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.14 και 7.15. Στα Σχήματα 7.14 και 7.15 παρουσιάζεται η μεταβολή των ειδικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου του κινητήρα αντίστοιχα. Επίσης, στα ίδια σχήματα, φαίνεται ότι οι ειδικές εκπομπές CO₂ διατηρούνται σχεδόν σταθερές σε όλο το εύρος των σημείων λειτουργίας του Κινητήρα Α.



Σχήμα 7.14 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

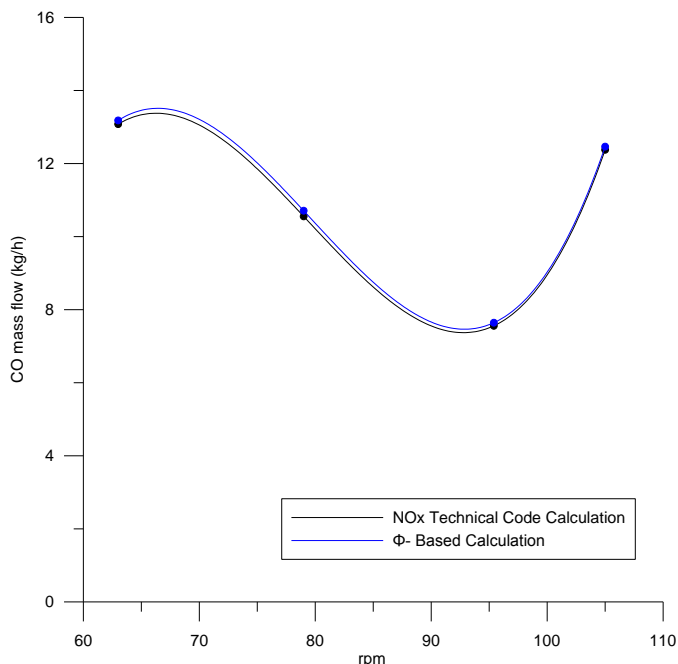


Σχήμα 7.15 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου

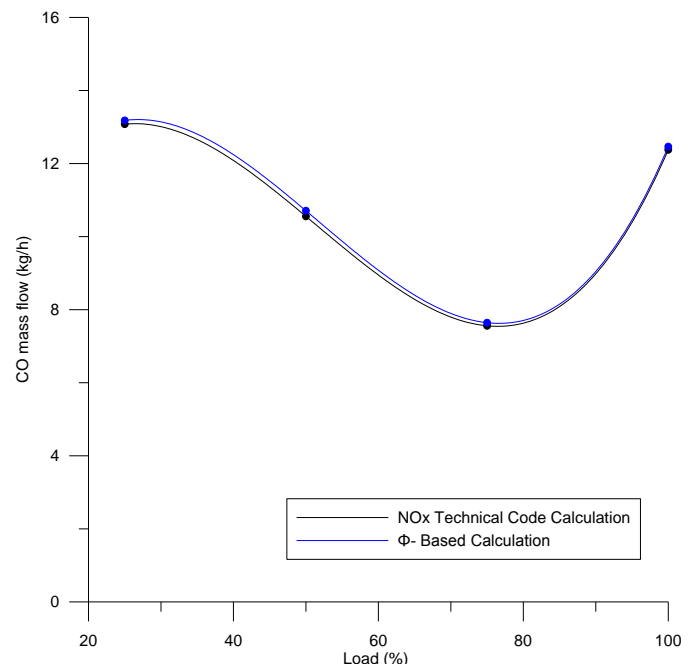
7.1.5 Εκπομπές CO

Η ίδια διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για τις εκπομπές CO₂ ακολουθείται και για εκείνες του CO. Στα Σχήματα 7.16 και 7.17 παρουσιάζεται η παραγωγή CO συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου αντίστοιχα όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Παρατηρούνται διακυμάνσεις των ολικών εκπομπών CO με τη μεταβολή του φορτίου και των στροφών λειτουργίας. Αυτές οι μεταβολές οφείλονται στο γεγονός ότι τα CO εκπέμπονται όταν η καύση στους κυλίνδρους δεν είναι τέλεια. Οι κινητήρες είναι σχεδιασμένοι ώστε να έχουν κάποιο σημείο κανονικής λειτουργίας, κοντά στο 75% του φορτίου στην περίπτωση του Κινητήρα Α, όπου ο βαθμός απόδοσης της καύσης είναι μέγιστος. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα 6.15 όπου στην περιοχή φορτίου κοντά στο 75% παρουσιάζει ελάχιστο η καμπύλη ολικών εκπομπών CO πράγμα που συνεπάγεται καλύτερη καύση του μίγματος στους κυλίνδρους.

Επιπλέον, σε όλο το εύρος των στροφών αλλά και του φορτίου οι ολικές εκπομπές CO που υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 είναι σταθερά ελάχιστα λιγότερες σε σχέση με αυτές που υπολογίζει το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση όπως συνέβαινε και με τις εκπομπές CO₂. Ενδεχομένως αυτή η διαφορά να προκύπτει λόγω της 1% λιγότερης παροχής καυσαερίων που προκύπτει από τον Τεχνικό Κώδικα NOx.

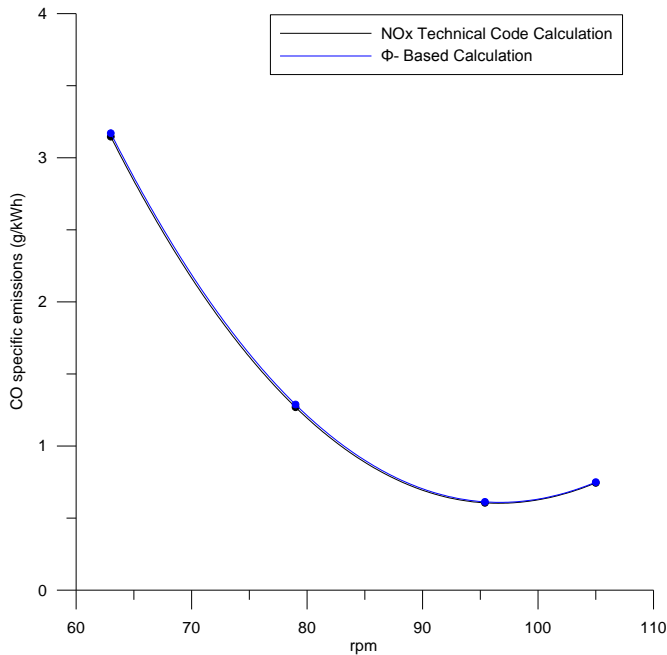


Σχήμα 7.16 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

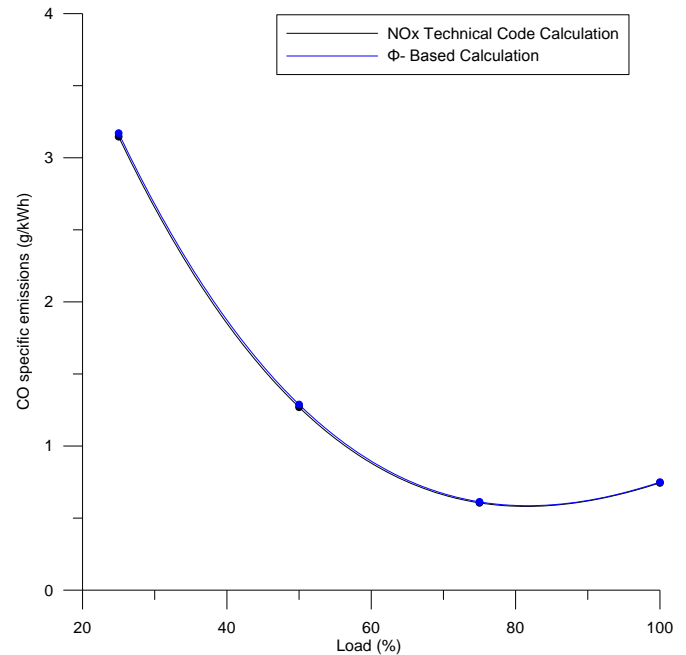


Σχήμα 7.17 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου

Ωστόσο, αυτή η μικρή διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθοδολογιών στις ολικές εκπομπές CO δεν μεταφέρεται στον υπολογισμό των ειδικών εκπομπών CO καθώς η διαίρεση των ολικών εκπομπών με την αποδιδόμενη ισχύ του κινητήρα την απαλείφει, όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.18 και 7.19. Στα ίδια σχήματα είναι εμφανές ότι οι ειδικές εκπομπές CO ακολουθούν πτωτική πορεία με την αύξηση του φορτίου και των στροφών.



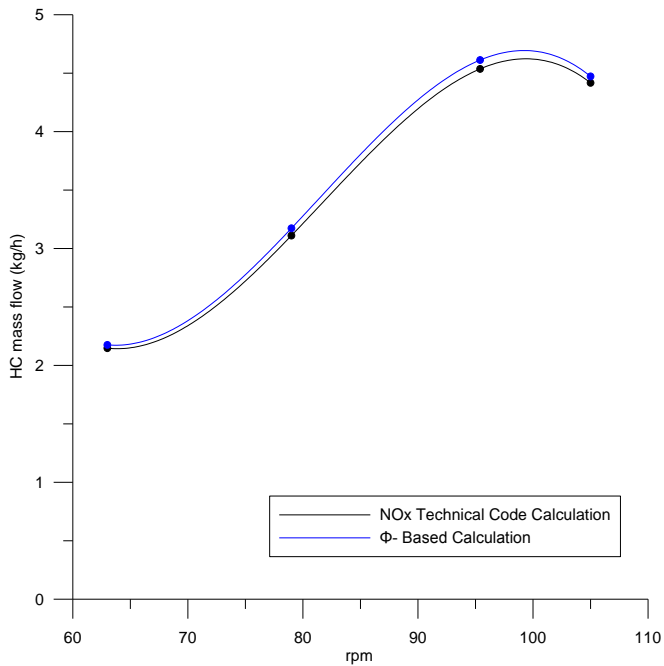
Σχήμα 7.18 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



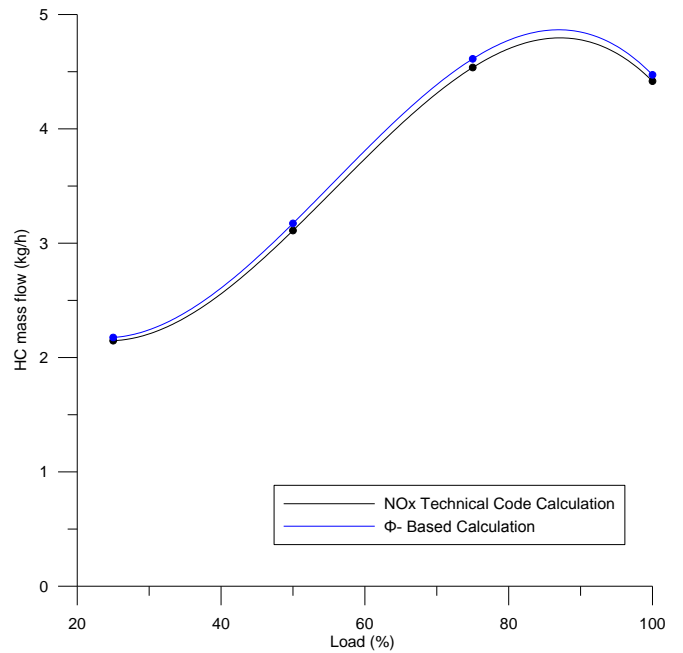
Σχήμα 7.19 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου

7.1.6 Εκπομπές Υδρογονανθράκων (HC)

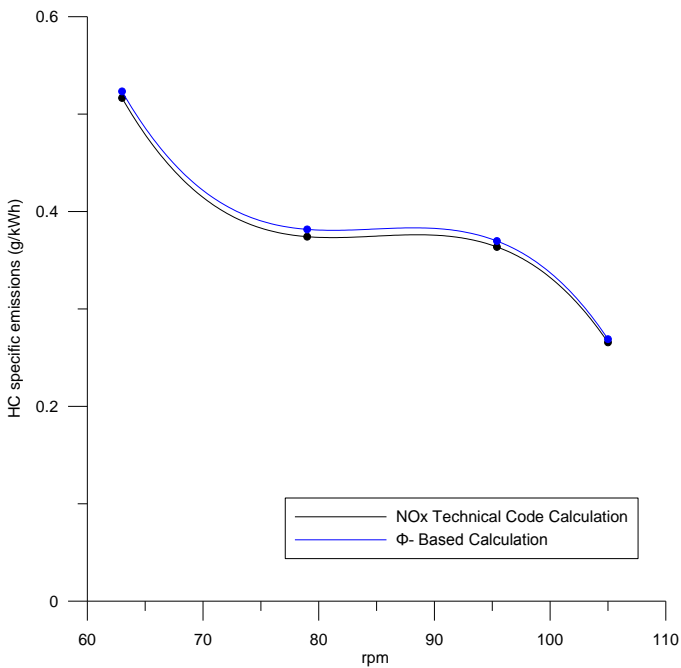
Για τις εκπομπές υδρογονανθράκων έχει γίνει η υπόθεση και στις δύο μεθοδολογίες υπολογισμού ρύπων που αναπτύχθηκαν ότι αναφέρονται σε ισοδύναμο προπάνιο (C_3H_8). Στα σχήματα 7.20 και 7.21 που παρουσιάζουν τη μεταβολή των ολικών εκπομπών υδρογονανθράκων συναρτήσει των στροφών και του φορτίου αντίστοιχα παρατηρείται ότι και σε αυτή την περίπτωση το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 δίνει σταθερά ελάχιστα χαμηλότερες εκπομπές σε σύγκριση με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση, κάτι που συμβαίνει και στις ειδικές εκπομπές CO όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.22 και 7.23. Οι ολικές εκπομπές CO παρουσιάζουν σημαντική αύξηση στο εύρος στροφών μεταξύ 75-90 στροφές ανά λεπτό και για φορτίο 45% με 80%. Αυτή η μορφή στις καμπύλες των ολικών εκπομπών φαίνεται στις αντίστοιχες των ειδικών οι οποίες είναι σταθερές στο ίδιο εύρος φορτίου-στροφών.



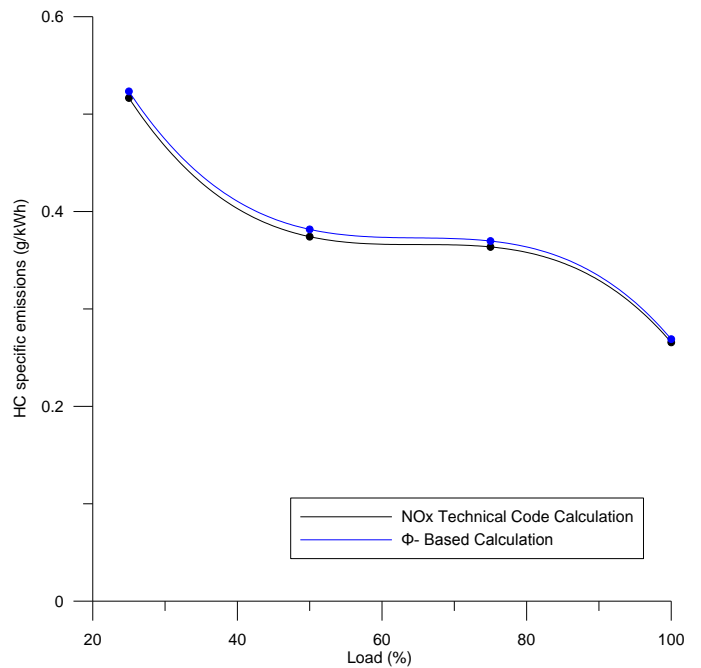
Σχήμα 7.20 Μεταβολή ολικών εκπομπών HC συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



Σχήμα 7.21 Μεταβολή ολικών εκπομπών HC συναρτήσει του φορτίου



Σχήμα 7.22 Μεταβολή ειδικών εκπομπών HC συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



Σχήμα 7.23 Μεταβολή ειδικών εκπομπών HC συναρτήσει του φορτίου

7.2 Εφαρμογή στον Κινητήρα Β

Ο Κινητήρας Β είναι ένας δίχρονος υπερπληρωμένος diesel κινητήρας κύριας πρόωσης που λειτουργεί με το νόμο της έλικας μικρότερης ισχύος σε σχέση με τον Κινητήρα Α. Το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση εφαρμόστηκαν στο NOx file του Κινητήρα Β, το οποίο βρίσκεται στο Παράρτημα Ι. Ο κινητήρας υπάγεται στην κατηγορία Ε3 των κύκλων δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και διαγράμματα εκπομπών ρύπων συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου με σκοπό την αξιολόγηση τους.

Στον Πίνακα 7.4 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών του λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 ταυτίζονται απόλυτα με εκείνα του NOx file της μηχανής με μοναδική εξαίρεση τον συντελεστή k_{HD} στο 75% του φορτίου που όμως δεν οδηγεί σε αποκλίσεις άλλων παραμέτρων. Συνεπώς, τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.4 μπορούν να χαρακτηριστούν αξιόπιστα.

Πίνακας 7.4 Κινητήρας Β - Αποτελέσματα λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 - Σύγκριση με NOx file

| LOAD (%) | 100% | | 75% | | 50% | | 25% | |
|-----------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file |
| Dry/Wet correction | 0.972 | 0.965 | 0.976 | 0.969 | 0.977272 | 0.970 | 0.979 | 0.972 |
| | Error= 0.75% | | Error= 0.76% | | Error= 0.75% | | Error= 0.76% | |
| K_{HD} | 0.875 | 0.873 | 0.867 | 0.894 | 0.866005 | 0.864 | 0.887 | 0.885 |
| | Error= 0.20% | | Error= 3.07% | | Error= 0.23% | | Error= 0.18% | |
| GasFlow (kg/h) | 98691.0 | 99458.0 | 82938.9 | 83452.0 | 57842.3 | 58412.0 | 32560.5 | 32751.0 |
| | Error= 0.77% | | Error= 0.61% | | Error= 0.98% | | Error= 0.58% | |
| NOx (kg/h) | 155.680 | 155.830 | 131.864 | 131.580 | 94.488 | 94.620 | 51.656 | 51.520 |
| | Error= 0.10% | | Error= 0.22% | | Error= 0.14% | | Error= 0.26% | |
| NOx specific (g/kWh) | 14.064 | 14.080 | 15.885 | 15.850 | 17.060 | 17.080 | 18.679 | 18.630 |
| | Error= 0.11% | | Error= 0.22% | | Error= 0.11% | | Error= 0.26% | |
| Test Cycle E3 (g/kWh) | 15.636 | 15.620 | IMO limit | | | | | |
| | Error= 0.10% | | 17 (g/kWh) | | | | | |

Στον Πίνακα 7.5 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών του λογισμικού που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση ταυτίζονται και αυτά απόλυτα με τα αντίστοιχα του NOx file της μηχανής. Αν και τα αποτελέσματα που περιέχονται στα NOx files είναι και αυτές εκτιμημένες και όχι μετρημένες τιμές τα αποτελέσματα που δίνει το λογισμικό για τον Κινητήρα Β και φαίνονται στον Πίνακα 7.5 μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα.

Πίνακας 7.5 Κινητήρας Β - Αποτελέσματα λογισμικού που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση - Σύγκριση με NOx file

| LOAD (%) | 100% | | 75% | | 50% | | 25% | |
|-----------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file |
| Dry/Wet correction | 0.966 | 0.965 | 0.970 | 0.969 | 0.971 | 0.970 | 0.974 | 0.972 |
| | Error= 0.11% | | Error= 0.13% | | Error= 0.12% | | Error= 0.19% | |
| K _{HD} | 0.875 | 0.873 | 0.867 | 0.894 | 0.866 | 0.864 | 0.887 | 0.885 |
| | Error= 0.20% | | Error= 3.07% | | Error= 0.23% | | Error= 0.18% | |
| GasFlow (kg/h) | 99804.0 | 99458.0 | 83770.1 | 83452.0 | 58523.8 | 58412.0 | 32845.0 | 32751.0 |
| | Error= 0.35% | | Error= 0.38% | | Error= 0.19% | | Error= 0.29% | |
| NOx (kg/h) | 156.437 | 155.830 | 132.345 | 131.580 | 95.001 | 94.620 | 51.813 | 51.520 |
| | Error= 0.39% | | Error= 0.58% | | Error= 0.40% | | Error= 0.57% | |
| NOx specific (g/kWh) | 14.132 | 14.080 | 15.943 | 15.850 | 17.153 | 17.080 | 18.736 | 18.630 |
| | Error= 0.37% | | Error= 0.59% | | Error= 0.43% | | Error= 0.57% | |
| Test Cycle E3 (g/kWh) | 15.701 | 15.620 | IMO limit | | | | | |
| | Error= 0.52% | | 17 (g/kWh) | | | | | |

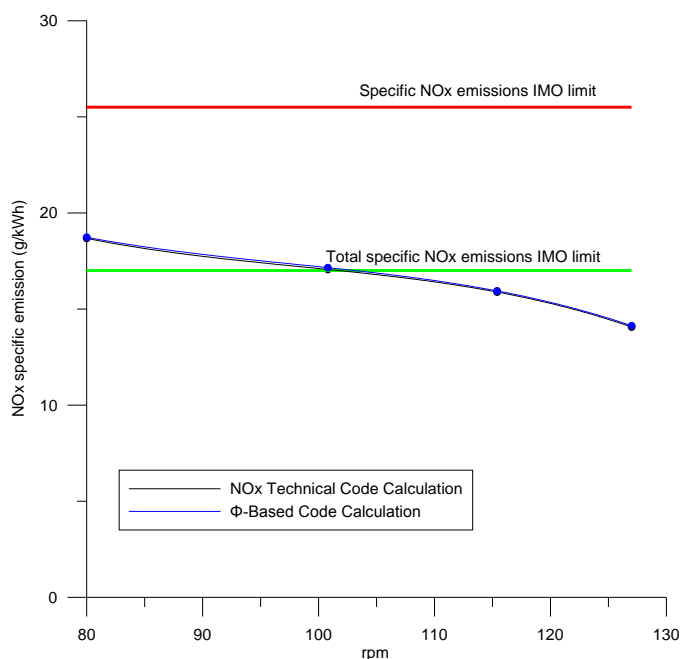
Στον Πίνακα 7.6 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου Δοκιμών Κινητήρα Ε3 όπως υπολογίστηκαν και από τα δύο λογισμικά που αναπτύχθηκαν. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών είναι 0,4% για την ειδική κατανάλωση όλων των ρύπων εκτός από αυτή των υδρογονανθράκων που είναι 1,1%.

Πίνακας 7.6 Ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου δοκιμών Ε3

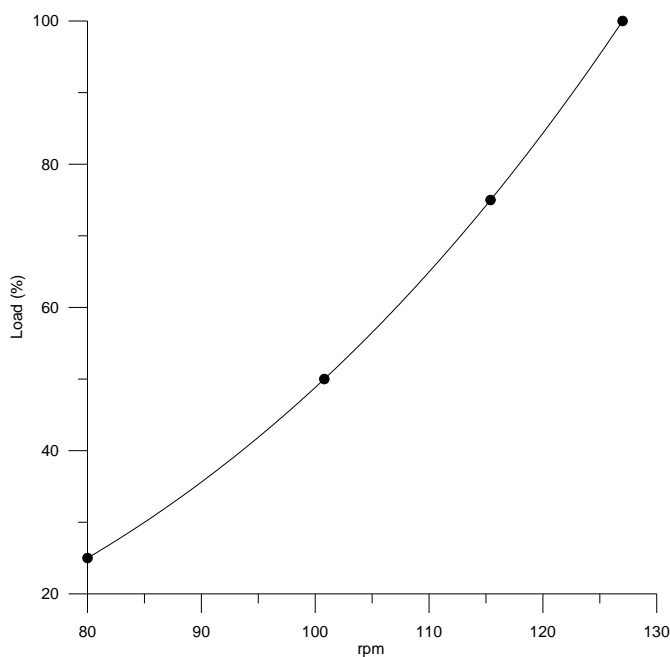
| | Μονάδα | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle E3 NOx Technical Code Calculations | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle E3 φ-Based Calculations | Διαφορά (%) |
|-----|--------|--|---|-------------|
| NOx | g/kWh | 15.636 | 15.701 | 0.4% |
| CO2 | kg/kWh | 0.565 | 0.567 | 0.4% |
| CO | g/kWh | 0.500 | 0.502 | 0.4% |
| HC | g/kWh | 0.365 | 0.369 | 1.1% |

7.2.1 Έλεγχος εναρμόνισης ειδικών εκπομπών NOx με τα όρια της Marpol 73/78 – Καμπύλη φόρτισης Κινητήρα Β.

Στο Σχήμα 6.24 παρουσιάζεται η μεταβολή των ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας όπως υπολογίστηκε και με τις δύο μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν. Με πράσινο χρώμα φαίνεται το όριο των ειδικών εκπομπών NOx βάσει του κύκλου δοκιμών κινητήρα Ε3. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.24 η καμπύλη εκπομπών NOx βρίσκεται πάνω από το όριο αυτό στην περιοχή στροφών λειτουργίας από 80 έως περίπου 100. Αυτό, όμως δεν σημαίνει ότι ο κινητήρας δεν πληρεί τις προϋποθέσεις του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού για τις εκπομπές NOx. Στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αναφέρεται ότι το όριο για τις ειδικές εκπομπές NOx σε κάθε σημείο λειτουργίας είναι 50% περισσότερο από το αντίστοιχο όριο των κύκλων δοκιμών κινητήρα. Αυτό το όριο φαίνεται στο Σχήμα 7.24 με κόκκινο χρώμα. Η καμπύλη εκπομπών NOx της Μηχανή Α βρίσκεται κάτω από το ανώτατο επιτρεπτό αυτό όριο. Στο Σχήμα 7.25 παρουσιάζεται η καμπύλη φόρτισης του Κινητήρα Β κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων



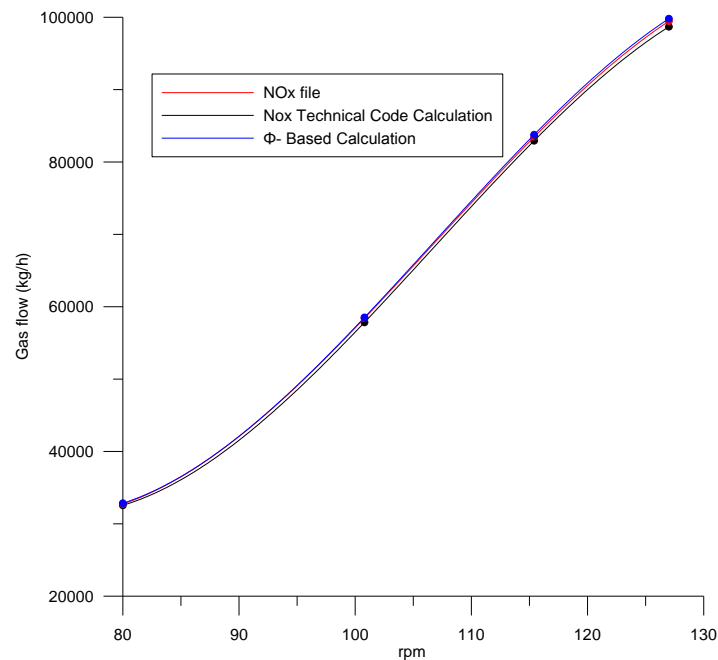
Σχήμα 7.24 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας.



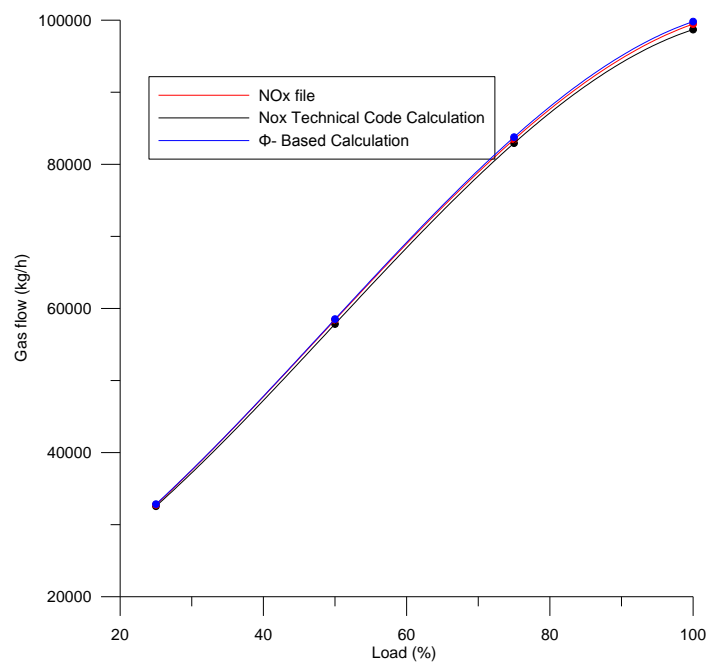
Σχήμα 7.25 Καμπύλη φόρτισης Κινητήρα Β

7.2.2 Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου

Στα Σχήματα 7.26 και 7.27 παρουσιάζεται αντίστοιχα η μεταβολή της παροχής καυσαερίου συναρτήσει των στροφών και του φορτίου λειτουργίας όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Στα ίδια σχήματα φαίνεται η παροχή καυσαερίου που αναγράφονται στο NOx file της μηχανής A. Οι τρεις καμπύλες ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα σε όλο το φάσμα του φορτίου και των στροφών λειτουργίας.

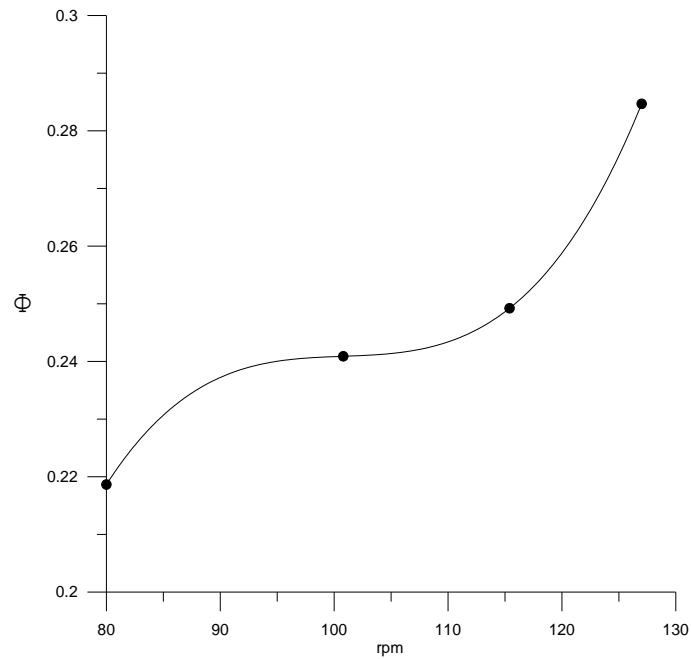


Σχήμα 7.26 Μεταβολή παροχής καυσαερίου συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

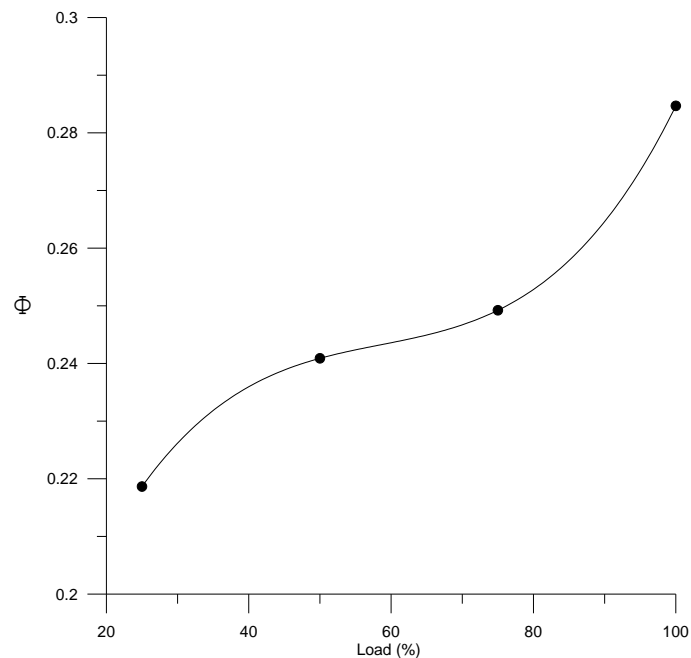


Σχήμα 7.27 Μεταβολή παροχής καυσαερίου συναρτήσει του φορτίου

Στα Σχήματα 7.28 και 7.29 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (συντελεστή Φ) συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου αντίστοιχα όπως υπολογίζεται από το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση.



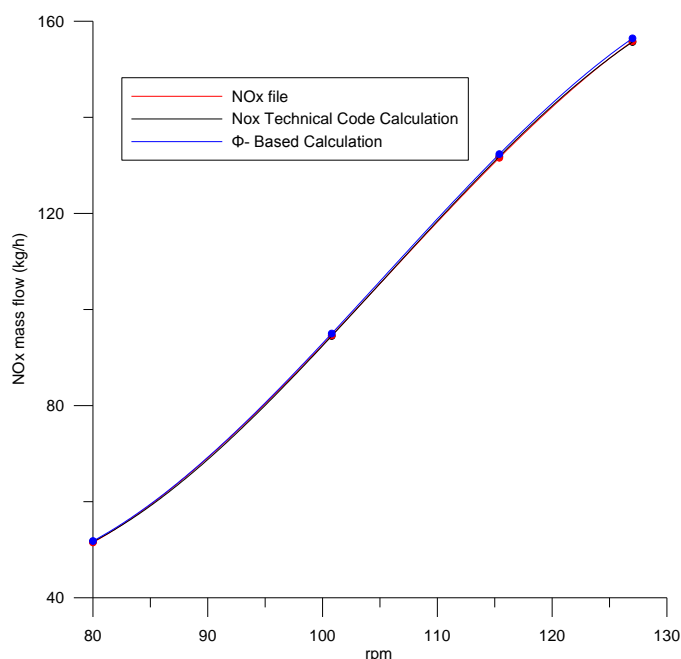
Σχήμα 7.28 Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



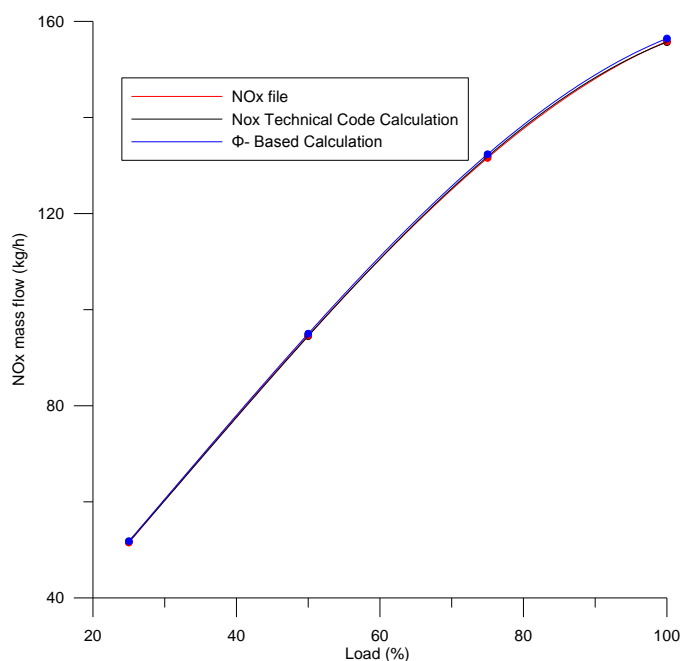
Σχήμα 7.29 Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα συναρτήσει του φορτίου

7.2.3 Εκπομπές NOx

Στα Σχήματα 7.30 και 7.31 παρουσιάζεται η παροχή NOx συναρτήσει των στροφών και του φορτίου λειτουργίας αντίστοιχα όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με εκείνο που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Όσο το φορτίο αλλά και οι στροφές αυξάνονται, αυξάνεται και η παραγωγή NOx καθώς το εκπεμπόμενο καυσαέριο είναι συνολικά περισσότερο. Η καμπύλη των αποτελεσμάτων και των δύο λογισμικών σχεδόν ταυτίζεται με εκείνη του NOx file της μηχανής A.



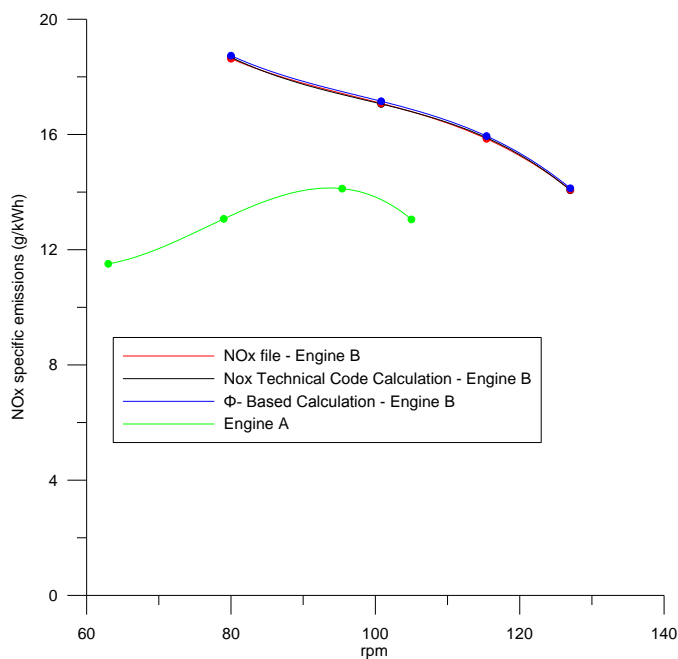
Σχήμα 7.30 Μεταβολή ολικών εκπομπών NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



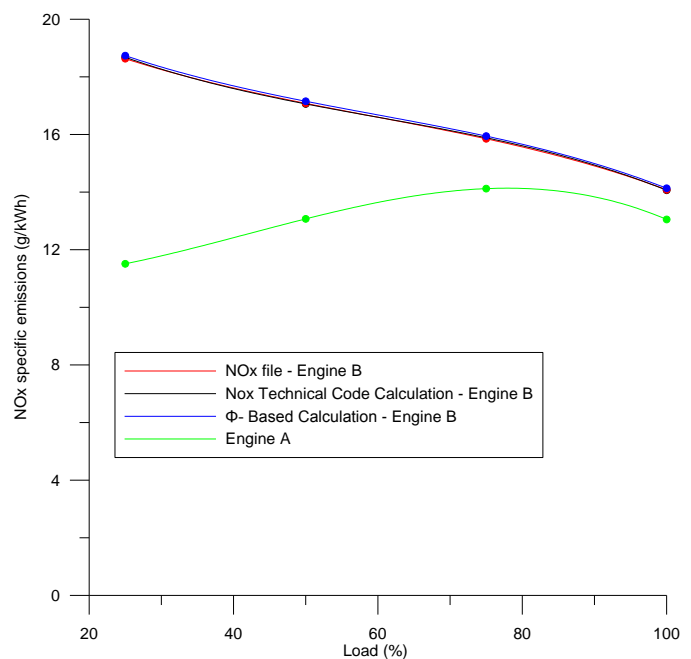
Σχήμα 7.31 Μεταβολή ολικών εκπομπών NOx συναρτήσει του φορτίου

Στα Σχήματα 7.32 και 7.33 παρουσιάζεται η μεταβολή των ειδικών εκπομπών NOx σε γραμμάρια ανά κιλοβατώρα συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου αντίστοιχα όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Η μορφή των διαγραμμάτων εξαρτάται άμεσα από την καμπύλη φόρτισης του Κινητήρα Β (Σχήμα 7.25).

Στα Σχήματα 7.32 και 7.33 δίνεται, επιπλέον, η μεταβολή των ειδικών εκπομπών NOx του Κινητήρα Α συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου. Ο Κινητήρας Α είναι ισχυρότερος του Κινητήρα Β και λειτουργεί σε διαφορετικό φάσμα στροφών λειτουργίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.32. Συγκρίνοντας τη μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx των δύο κινητήρων, εξάγεται ότι ενώ οι ειδικές εκπομπές NOx του Κινητήρα Β ακολουθούν πτωτική πορεία όσο οι στροφές λειτουργίας και το φορτίο αυξάνονται, οι ειδικές εκπομπές NOx του Κινητήρα Α αυξάνονται, παρουσιάζουν μέγιστο στο 75% του φορτίου και σε 95 στροφές ανά λεπτό και στη συνέχεια φθίνουν. Η φθίνουσα μορφή των καμπυλών μεταβολής ειδικών εκπομπών NOx του Κινητήρα Β συναρτήσει των στροφών λειτουργία είναι συνήθης σε diesel μηχανές εσωτερικής καύσης



Σχήμα 7.32 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

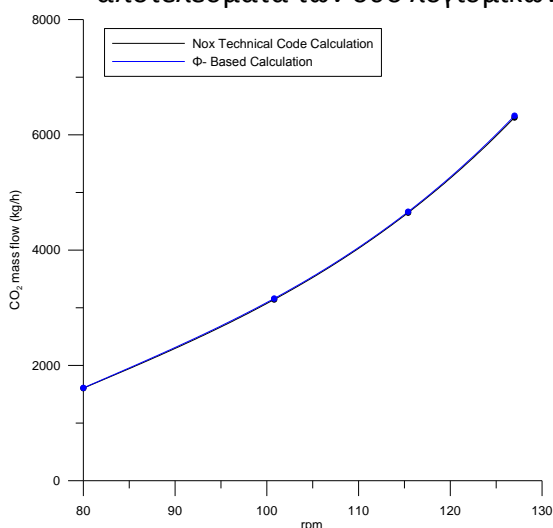


Σχήμα 7.33 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει του φορτίου

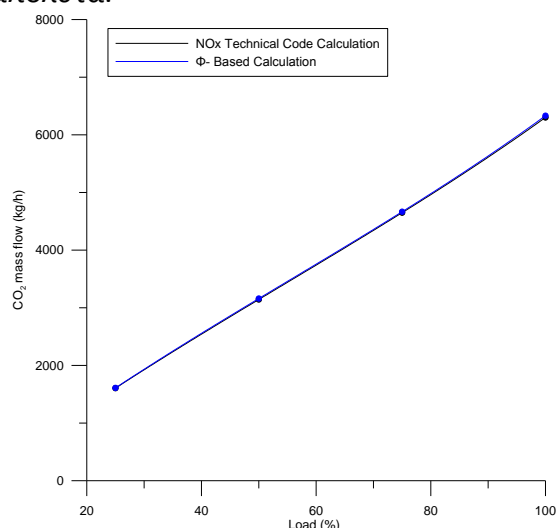
7.2.4 Εκπομπές CO₂

Ομοίως με την εφαρμογή στη Μηχανή Α μελετήθηκαν οι εκπομπές CO₂ και για την Μηχανή Β. Στα Σχήματα 7.34 και 7.35 παρουσιάζεται η μεταβολή των ολικών εκπομπών CO₂ σε κιλά ανά ώρα σε συνάρτηση με τις στροφές και το φορτίο λειτουργίας αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι και τα δύο διαγράμματα δείχνουν ότι ο εκπομπές CO₂ αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου και των στροφών. Μάλιστα η αύξηση αυτή είναι σχεδόν γραμμική σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας της μηχανής. Επιπλέον, σε όλο το εύρος των στροφών αλλά και του φορτίου οι ολικές εκπομπές CO₂ που υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 ταυτίζονται με αυτές που υπολογίζει το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση.

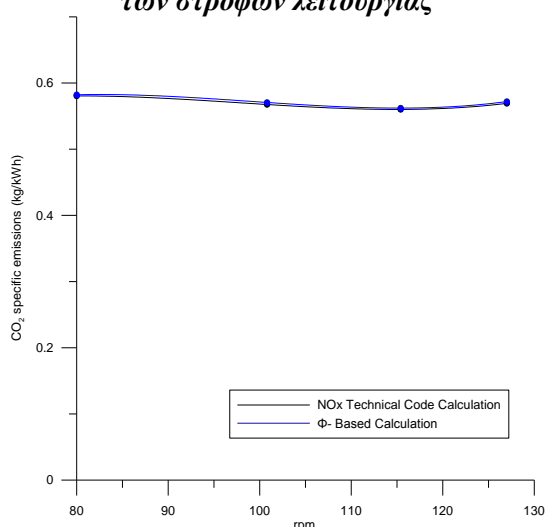
Στα Σχήματα 7.36 και 7.37 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές CO₂ συναρτήσει του φορτίου και των στροφών λειτουργίας του Κινητήρα Β αντίστοιχα όπως υπολογίστηκε και από τα δύο λογισμικά. Οι ειδικές εκπομπές CO₂ διατηρούνται σχεδόν σταθερές σε όλο το εύρος των σημείων λειτουργίας και τα αποτελέσματα των δύο λογισμικών ταυτίζονται απόλυτα.



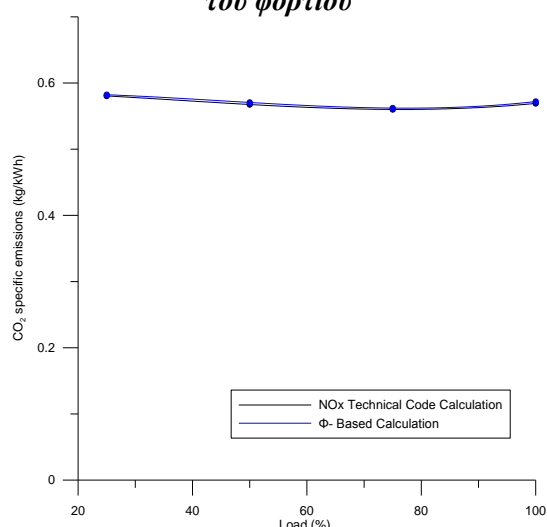
Σχήμα 7.34 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



Σχήμα 7.35 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου



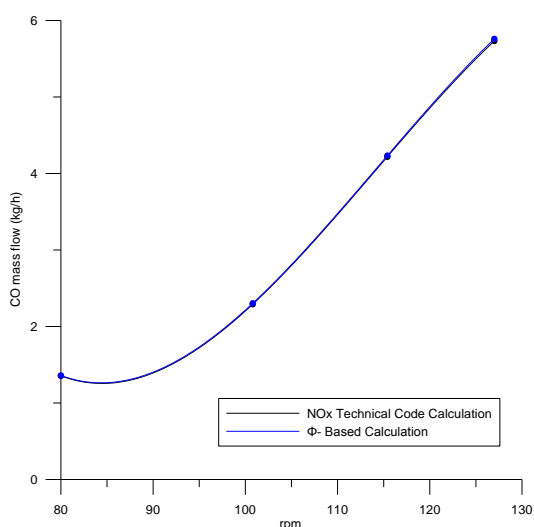
Σχήμα 7.36 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



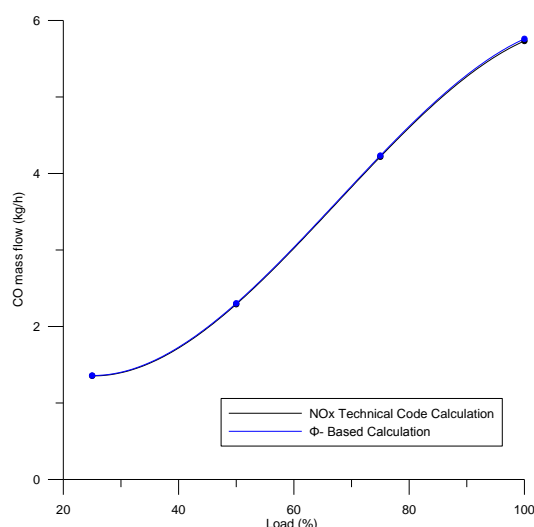
Σχήμα 7.37 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου

7.2.5 Εκπομπές CO

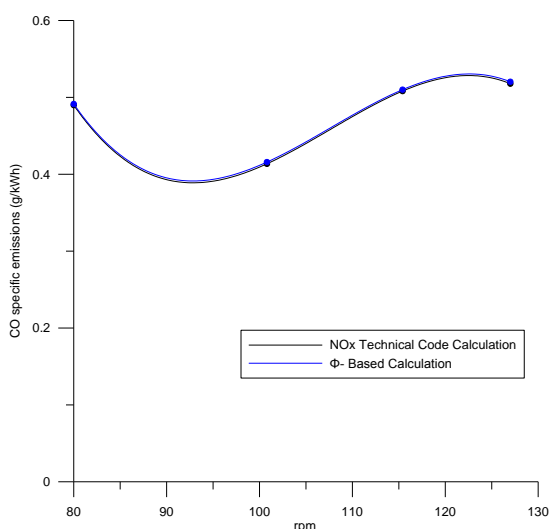
Η ίδια διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για τις εκπομπές CO₂ ακολουθείται και για τα CO. Στα Σχήματα 7.38 και 7.39 παρουσιάζεται η παραγωγή CO συναρτήσει των στροφών και του φορτίου λειτουργίας αντίστοιχα όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με εκείνο που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Και οι δύο καμπύλες αυξάνουν όσο αυξάνονται οι στροφές και το φορτίο σε αντίθεση με τα αντίστοιχα διαγράμματα του Κινητήρα A (Σχήματα 7.16 και 7.17) που παρουσίαζαν ελάχιστο. Λόγω της αύξουσας μορφής των καμπυλών των ολικών εκπομπών CO, οι καμπύλες ειδικών εκπομπών CO δεν αποκλίνουν πολύ από μια σταθερή τιμή λίγο κάτω από 0,5 g/kWh γι όλο το φάσμα των σημείων λειτουργίας (Σχήματα 7.40 και 7.41)



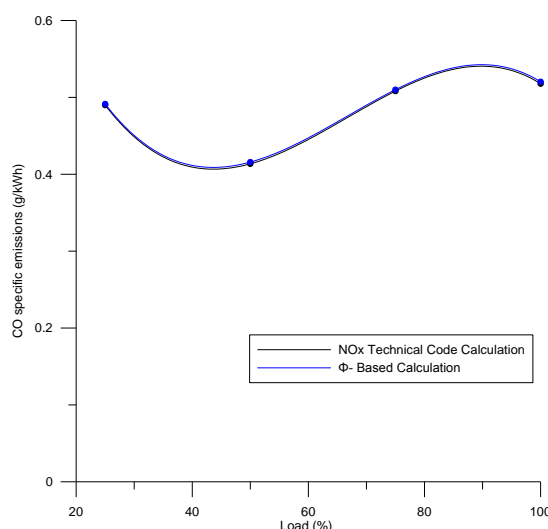
Σχήμα 7.38 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



Σχήμα 7.39 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου



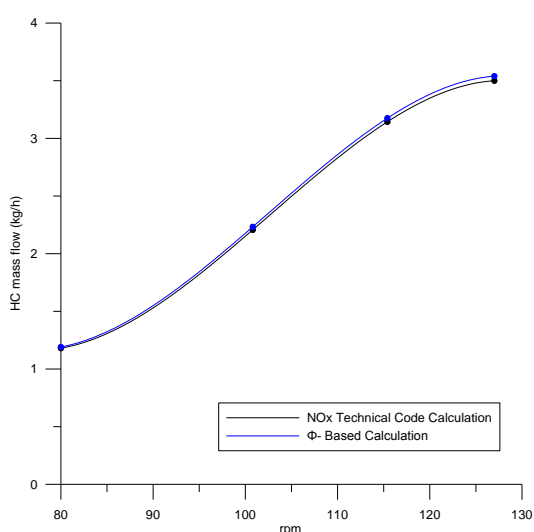
Σχήμα 7.40 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



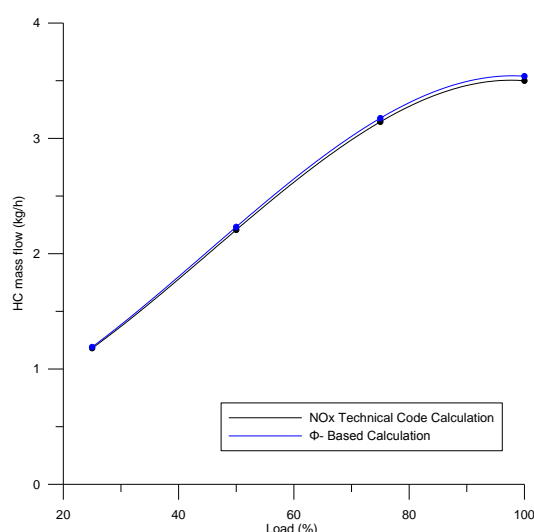
Σχήμα 7.41 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου

7.2.6 Εκπομπές Υδρογονανθράκων (HC)

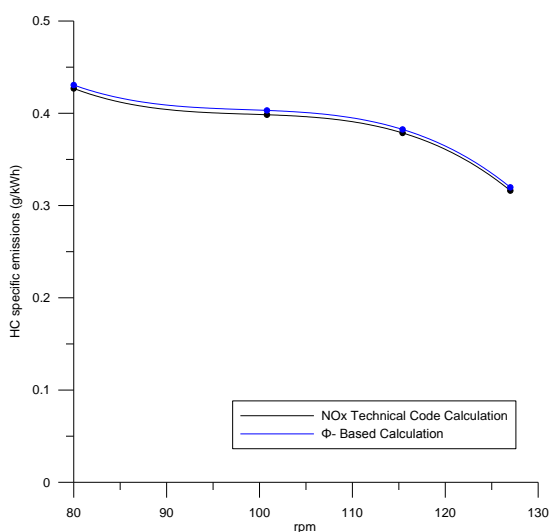
Αξίζει να επαναληφθεί ότι για τις εκπομπές υδρογονανθράκων έχει γίνει η υπόθεση και στις δύο μεθοδολογίες υπολογισμού ρύπων που αναπτύχθηκαν ότι αναφέρονται σε ισοδύναμο προπάνιο (C_3H_8). Στα σχήματα 7.42 και 7.43 που παρουσιάζουν τη μεταβολή των ολικών εκπομπών υδρογονανθράκων συναρτήσει των στροφών και του φορτίου αντίστοιχα παρατηρείται το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 δίνει σχεδόν ίδιες εκπομπές HC σε σύγκριση αυτές που υπολογίζει το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Το ίδιο συμβαίνει και για τις ειδικές εκπομπές HC όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.44 και 7.45. Οι ολικές εκπομπές HC αυξάνονται όσο αυξάνονται οι στροφές και το φορτίο λειτουργίας. Αντίθετα, οι ειδικές εκπομπές HC είναι σχεδόν σταθερές σε όλα τα σημεία λειτουργίας της μηχανής με μία ελαφρά φθίνουσα τάση όσο αυξάνονται οι στροφές.



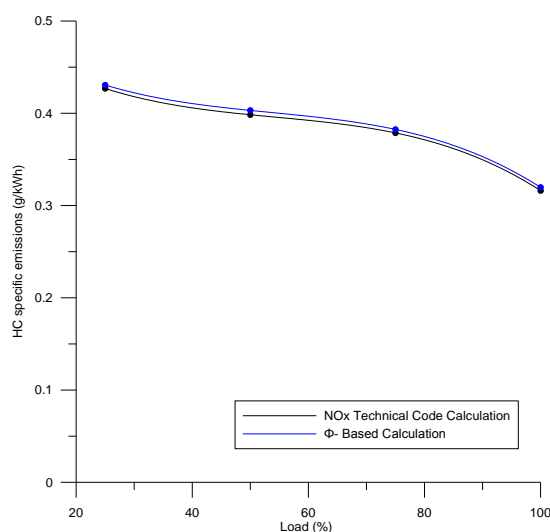
Σχήμα 7.42 Μεταβολή ολικών εκπομπών HC συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



Σχήμα 7.43 Μεταβολή ολικών εκπομπών HC συναρτήσει του φορτίου



Σχήμα 7.44 Μεταβολή ειδικών εκπομπών HC συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



Σχήμα 7.45 Μεταβολή ειδικών εκπομπών HC συναρτήσει του φορτίου

7.3 Εφαρμογή στη Μηχανή C

Ο Κινητήρας C είναι ένας τετράχρονος, υπερπληρωμένος, diesel, κινητήρας ηλεκτροπαραγωγής, σταθερών στροφών. Ο κινητήρας C αποδίδει ισχύ μιας τάξης μεγέθους λιγότερη από την ισχύ που αποδίδουν οι Κινητήρες A και B. Το λογισμικό εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και το λογισμικό που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση εφαρμόστηκαν στο NOx file του Κινητήρα C το οποίο βρίσκεται στο Παράρτημα I. Ο κινητήρας υπάγεται στην κατηγορία D2 των κύκλων δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και διαγράμματα εκπομπών ρύπων συναρτήσει του φορτίου με σκοπό την αξιολόγηση τους.

Στον Πίνακα 7.7 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών του λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 ταυτίζονται απόλυτα με εκείνα του NOx file του κινητήρα, συνεπώς μπορούν να χαρακτηριστούν αξιόπιστα.

Πίνακας 7.7 Κινητήρας C - Αποτελέσματα λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 - Σύγκριση με NOx file

| LOAD (%) | 100% | | 75% | | 50% | | 25% | | 10% | |
|----------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file |
| Dry/Wet correction | 0.950 | 0.942 | 0.952 | 0.944 | 0.954 | 0.946 | 0.958 | 0.951 | 0.968 | 0.960 |
| | Error= 0.86% | | Error= 0.85% | | Error= 0.86% | | Error= 0.76% | | Error= 0.81% | |
| K _{HD} | 0.956 | 0.956 | 0.961 | 0.961 | 0.962 | 0.962 | 0.962 | 0.963 | 0.967 | 0.968 |
| | Error= 0.03% | | Error= 0.01% | | Error= 0.01% | | Error= 0.05% | | Error= 0.09% | |
| Gas Flow (kg/h) | 7963.3 | 7884 | 6311.3 | 6350 | 4660.3 | 4678 | 2785.4 | 2799 | 2120.3 | 2123 |
| | Error= 1.01% | | Error= 0.61% | | Error= 0.38% | | Error= 0.48% | | Error= 0.13% | |
| NOx (kg/h) | 13.803 | 13.64 | 10.387 | 10.43 | 6.35 | 6.36 | 2.852 | 2.85 | 1.209 | 1.2 |
| | Error= 1.19% | | Error= 0.42% | | Error= 0.16% | | Error= 0.06% | | Error= 0.72% | |
| NOx specific (g/kWh) | 12.324 | 12.18 | 12.365 | 12.41 | 11.339 | 11.35 | 10.185 | 10.19 | 10.792 | 10.73 |
| | Error= 1.18% | | Error= 0.36% | | Error= 0.09% | | Error= 0.05% | | Error= 0.57% | |
| Test Cycle D2(g/kWh) | 11.656 | 11.66 | IMO limit | | | | | | | |
| | Error= 0.04% | | 12.1 (g/kWh) | | | | | | | |

Στον Πίνακα 7.8 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών του λογισμικού που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση ταυτίζονται και αυτά σχεδόν απόλυτα με τα αντίστοιχα του NOx file του κινητήρα. Οι ειδικές εκπομπές NOx του Κινητήρα C όπως υπολογίστηκαν και με τα δύο λογισμικά βρίσκονται μέσα στα όρια που προβλέπει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός.

Πίνακας 7.8 Κινητήρας C - Αποτελέσματα λογισμικού που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση - Σύγκριση με NOx file

| LOAD (%) | 100% | | 75% | | 50% | | 25% | | 10% | |
|-----------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file | Calculated | NOx file |
| Dry/Wet | 0.954 | 0.942 | 0.956 | 0.944 | 0.958 | 0.946 | 0.962 | 0.951 | 0.972 | 0.960 |
| Correction | Error= 1.22% | | Error= 1.27% | | Error= 1.29% | | Error= 1.18% | | Error= 1.27% | |
| K _{HD} | 0.956 | 0.956 | 0.961 | 0.961 | 0.962 | 0.962 | 0.962 | 0.963 | 0.967 | 0.968 |
| | Error= 0.03% | | Error= 0.01% | | Error= 0.01% | | Error= 0.05% | | Error= 0.09% | |
| GasFlow | 7889.6 | 7884.0 | 6337.3 | 6350.0 | 4670.7 | 4678.0 | 2792.8 | 2799.0 | 2118.6 | 2123.0 |
| (kg/h) | Error= 0.07% | | Error= 0.20% | | Error= 0.16% | | Error= 0.22% | | Error= 0.21% | |
| NOx (kg/h) | 13.725 | 13.640 | 10.473 | 10.430 | 6.391 | 6.360 | 2.871 | 2.850 | 1.213 | 1.200 |
| | Error= 0.63% | | Error= 0.41% | | Error= 0.49% | | Error= 0.75% | | Error= 1.10% | |
| NOx specific | 12.255 | 12.180 | 12.468 | 12.410 | 11.412 | 11.350 | 10.255 | 10.190 | 10.833 | 10.730 |
| (g/kWh) | Error= 0.61% | | Error= 0.47% | | Error= 0.55% | | Error= 0.63% | | Error= 0.96% | |
| Test Cycle | 11.724 | 11.660 | IMO limit | | | | | | | |
| D2(g/kWh) | Error= 0.55% | | 12.1 (g/kWh) | | | | | | | |

Στον Πίνακα 7.9 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου Δοκιμών Κινητήρα D2 όπως υπολογίστηκαν και από τα δύο λογισμικά που αναπτύχθηκαν. Παρατηρείται ταύτιση των αποτελεσμάτων.

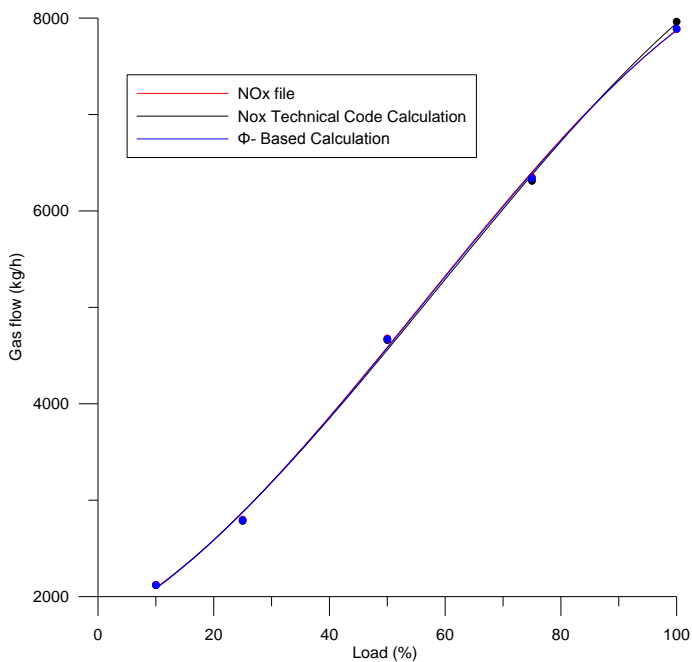
Πίνακας 7.9 Ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου δοκιμών D2

| | Μονάδα | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle E3 NOx Technical Code Calculations | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle D2 φ-Based Calculations | Διαφορά (%) |
|-----|--------|--|---|----------------|
| NOx | g/kWh | 11.656 | 11.724 | 0.6% |
| CO2 | kg/kWh | 0.646 | 0.65 | 0.6% |
| CO | g/kWh | 0.342 | 0.344 | 0.6% |
| HC | g/kWh | 0.538 | 0.539 | 0.2% |

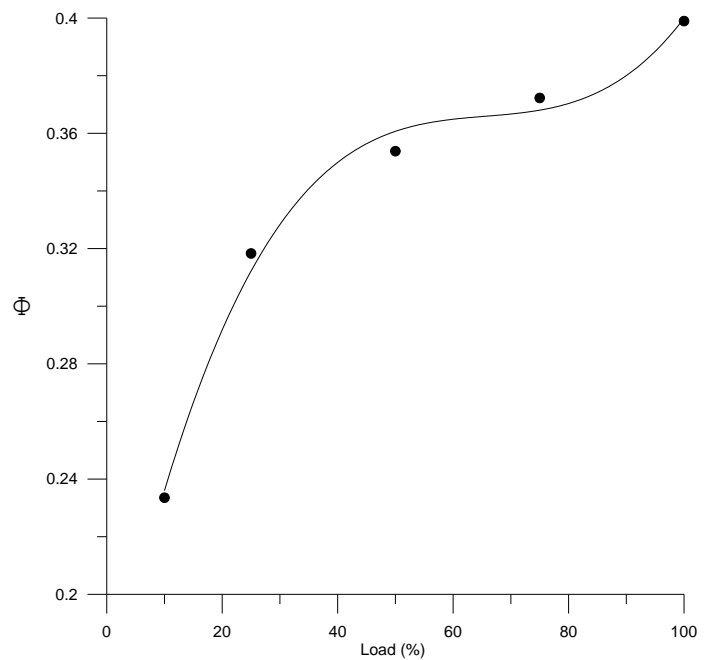
7.3.1 Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου

Ο Κινητήρας C είναι κινητήρας σταθερών στροφών λειτουργίας, γι αυτό τα διαγράμματα που δίνονται στην παρούσα παράγραφο δείχνουν τη μεταβολή των μεγεθών μόνο συναρτήσει του φορτίου. Στο Σχήμα 7.46 παρουσιάζεται η μεταβολή της παροχής καυσαερίου συναρτήσει του φορτίου όπως υπολογίστηκε με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με εκείνο που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Και στην περίπτωση του τετράχρονου αυτού κινητήρα παρατηρείται απόλυτη ταύτιση των τριών καμπυλών σε όλο το φάσμα του φορτίου.

Στο Σχήμα 7.47 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου αέρα (συντελεστή Φ) συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας όπως υπολογίζεται από το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση.



Σχήμα 7.46 Μεταβολή παροχής καυσαερίου συναρτήσει του φορτίου

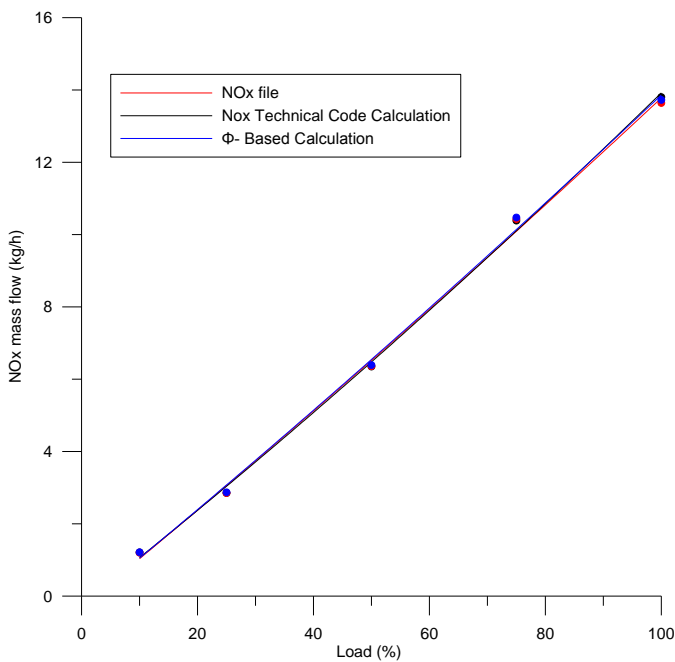


Σχήμα 7.47 Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα συναρτήσει του φορτίου

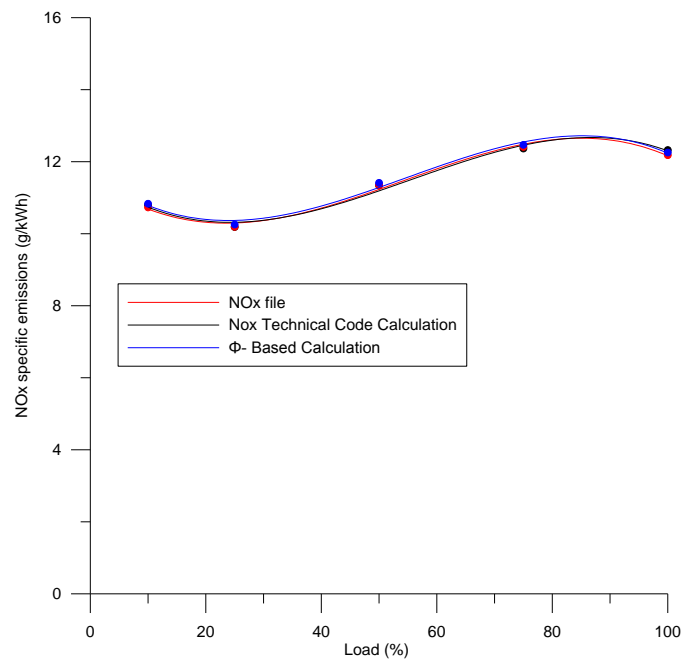
7.3.2 Εκπομπές NOx

Στο Σχήμα 7.48 παρουσιάζεται η παροχή NOx από τον Κινητήρα C συναρτήσει του φορτίου όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με εκείνο που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Όσο το φορτίο αυξάνεται, αυξάνεται και η παραγωγή NOx καθώς το εκπεμπόμενο καυσαέριο είναι συνολικά περισσότερο. Παρατηρούμε ότι η καμπύλη των αποτελεσμάτων και των δύο λογισμικών ταυτίζεται με εκείνη του NOx file του Κινητήρα C.

Στο Σχήμα 7.49 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές NOx σε γραμμάρια ανά κιλοβατώρα συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με εκείνο που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Η ταύτιση των αποτελεσμάτων είναι και εδώ εμφανής. Οι ειδικές εκπομπές NOx μεταβάλλονται μεταξύ 11,3 και 12,5 g/kWh σε όλο το φάσμα των φορτίων.



Σχήμα 7.48 Μεταβολή ολικών εκπομπών NOx συναρτήσει του φορτίου

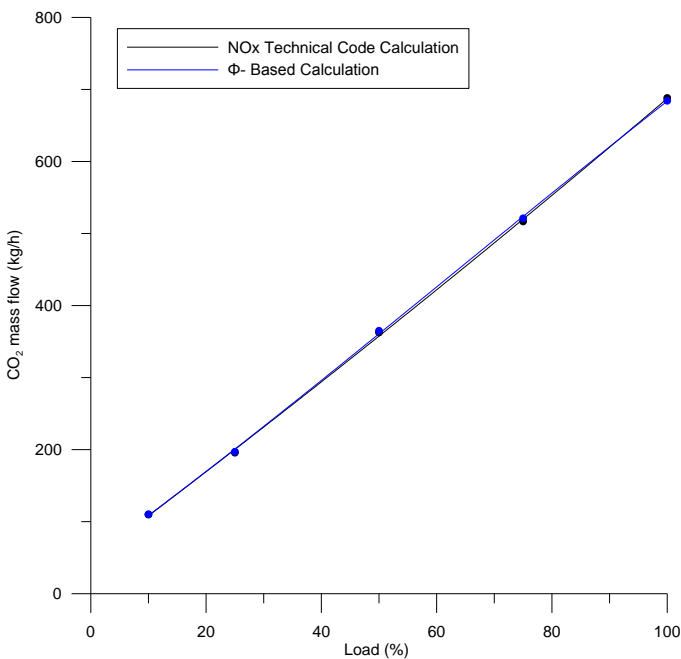


Σχήμα 7.49 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει του φορτίου

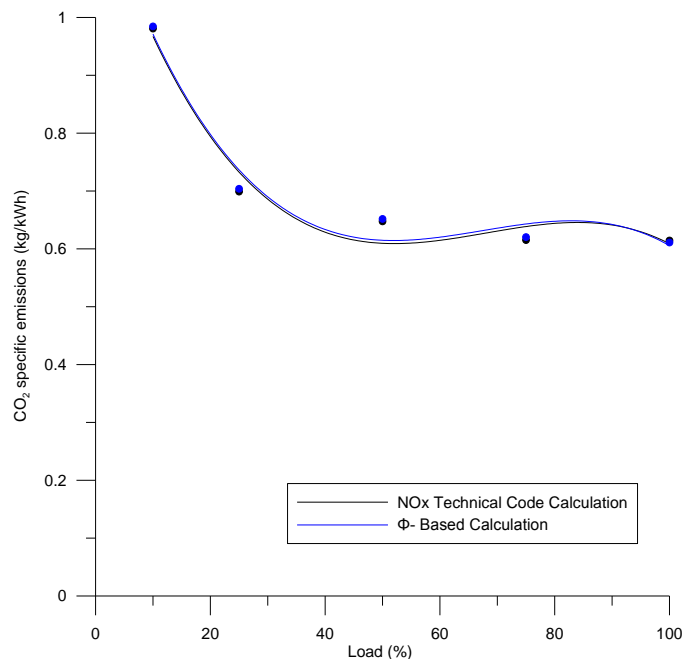
7.3.3 Εκπομπές CO₂

Ομοίως με την εφαρμογή στους δίχρονους κινητήρες A και B μελετήθηκαν οι εκπομπές CO₂ για τον τετράχρονο Κινητήρα C. Στο Σχήμα 7.50 παρουσιάζεται η μεταβολή των ολικών εκπομπών CO₂ σε κιλά ανά ώρα σε συνάρτηση με το φορτίο. Παρατηρούμε ότι οι εκπομπές CO₂ αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου. Μάλιστα η αύξηση αυτή είναι σχεδόν γραμμική όπως συνέβαινε και στους Κινητήρες A και B. Επιπλέον, σε όλο το εύρος των φορτίων λειτουργίας οι ολικές εκπομπές CO₂ που υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 ταυτίζονται με αυτές που υπολογίζει το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση.

Στο Σχήμα 7.51 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές CO₂ συναρτήσει του φορτίου του Κινητήρα C αντίστοιχα όπως υπολογίστηκε και από τα δύο λογισμικά. Καθώς το φορτίο μεταβάλλεται αλλά οι στροφές παραμένουν σταθερές οι ειδικές εκπομπές CO₂ είναι αυξημένες σε χαμηλό φορτίο λειτουργίας. Επιπλέον, και στο Σχήμα 7.51 παρατηρείται απόλυτη συμφωνία των αποτελεσμάτων που δίνουν τα δύο λογισμικά.



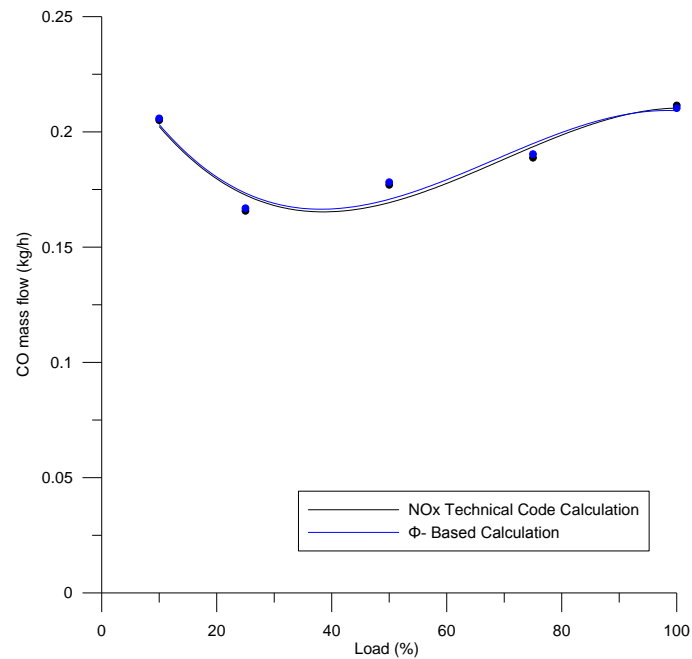
Σχήμα 7.50 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου



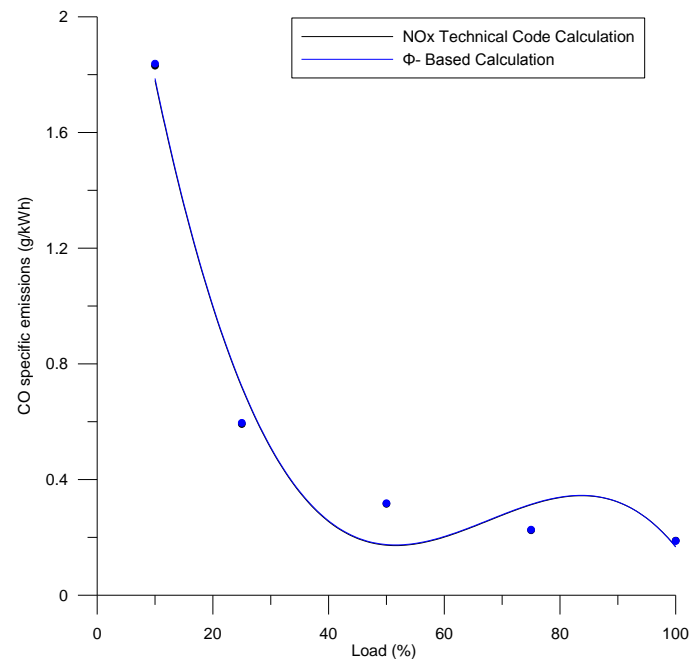
Σχήμα 7.51 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου

7.3.4 Εκπομπές CO

Οι εκπομπές CO συνδέονται με την ατελή καύση στους θαλάμους του κινητήρα. Οι ολικές εκπομπές CO είναι σταθερά λίγο κάτω από τα 0,5kg/h για όλο το φάσμα του φορτίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.52. Το γεγονός ότι ο Κινητήρας C είναι κινητήρας σταθερών στροφών έχει σαν αποτέλεσμα οι ολικές εκπομπές CO να είναι σημαντικά αυξημένες σε χαμηλό φορτίο λειτουργίας (Σχήμα 7.53).



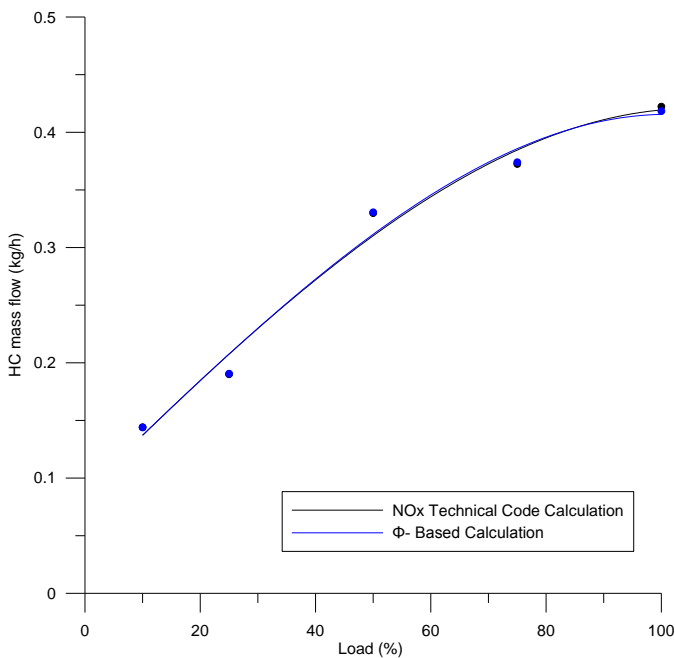
Σχήμα 7.52 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου



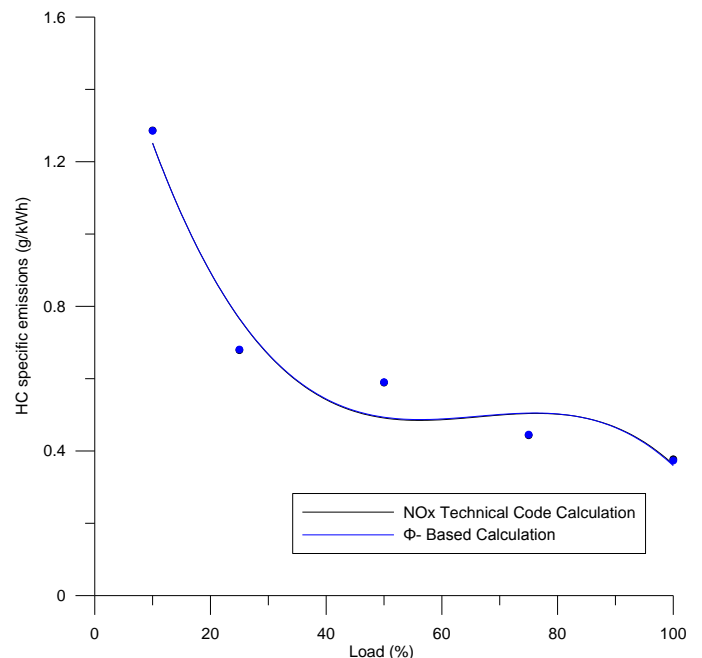
Σχήμα 7.53 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου

7.3.5 Εκπομπές Υδρογονανθράκων (HC)

Επαναλαμβάνεται ότι για τις εκπομπές υδρογονανθράκων έχει γίνει η υπόθεση και στις δύο μεθοδολογίες υπολογισμού ρύπων που αναπτύχθηκαν ότι αναφέρονται σε ισοδύναμο προπάνιο (C_3H_8). Στο Σχήμα 7.54 παρουσιάζεται η μεταβολή των ολικών εκπομπών υδρογονανθράκων συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας. Το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 τις ίδιες εκπομπές HC σε σύγκριση αυτές που υπολογίζει το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Το ίδιο συμβαίνει και στις ειδικές εκπομπές HC όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.55. Στην περίπτωση των ειδικών εκπομπών υδρογονανθράκων όπως και στις υπόλοιπες ειδικές εκπομπές ρύπων του Κινητήρα C παρατηρείται σημαντική αύξηση των εκπομπών σε χαμηλό φορτίο (Σχήμα 7.55) επειδή οι στροφές λειτουργίας του κινητήρα είναι σταθερές.



Σχήμα 7.54 Μεταβολή ολικών εκπομπών HV συναρτήσει του φορτίου



Σχήμα 7.55 Μεταβολή ειδικών εκπομπών HC συναρτήσει του φορτίου

7.4 Εφαρμογή στον Κινητήρα D

Ο Κινητήρας D είναι, όπως και Ο Κινητήρας C, ένας τετράχρονος, υπερπληρωμένος, diesel, κινητήρας ηλεκτροπαραγωγής, σταθερών στροφών . Το λογισμικό εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και το λογισμικό εκτίμησης εκπομπών ρύπων που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση εφαρμόστηκαν στο NOx file του Κινητήρα D το οποίο βρίσκεται στο Παράρτημα Ι. Ο κινητήρας υπάγεται στην κατηγορία D2 των κύκλων δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και διαγράμματα εκπομπών ρύπων συναρτήσει του φορτίου με σκοπό την αξιολόγηση τους.

Στον Πίνακα 7.10 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών του λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 παρουσιάζουν μεγαλύτερο σφάλμα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ίδιου λογισμικού στις υπόλοιπες τρεις μηχανές. Οι ειδικές εκπομπές NOx βάσει του κύκλου δοκιμών κινητήρα D2 διαφέρουν κατά 1,86% σε σχέση με την τιμή που αναγράφεται στο NOx file. Όμως τα NOx file περιέχουν εκτιμημένες τιμές και όχι μετρημένες και οι σύγκριση των αποτελεσμάτων του λογισμικού με αυτές τις τιμές είναι ενδεικτική.

Πίνακας 7.10 Κινητήρας D - Αποτελέσματα λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 - Σύγκριση με NOx file

| LOAD (%) | 100% | | 75% | | 50% | | 25% | | 10% | |
|----------------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | <i>Calculated</i> | <i>NOx file</i> | <i>Calculated</i> | <i>NOx file</i> | <i>Calculated</i> | <i>NOx file</i> | <i>Calculated</i> | <i>NOx file</i> | <i>Calculated</i> | <i>NOx file</i> |
| Dry/Wet Correction | 0.931 | 0.921 | 0.931 | 0.922 | 0.933 | 0.923 | 0.939 | 0.930 | 0.951 | 0.942 |
| | <i>Error= 1.04%</i> | | <i>Error= 1.00%</i> | | <i>Error= 1.03%</i> | | <i>Error= 0.98%</i> | | <i>Error= 0.94%</i> | |
| K _{HD} | 1.073 | 1.070 | 1.040 | 1.069 | 1.055 | 1.069 | 1.002 | 1.067 | 0.919 | 1.069 |
| | <i>Error= 0.31%</i> | | <i>Error= 2.69%</i> | | <i>Error= 1.40%</i> | | <i>Error= 6.12%</i> | | <i>Error= 14.02%</i> | |
| GasFlow (kg/h) | 5200.0 | 5171.1 | 4186.1 | 3911.5 | 2748.1 | 2733.6 | 1758.1 | 1746.6 | 1327.6 | 1317.3 |
| | <i>Error= 0.56%</i> | | <i>Error= 7.02%</i> | | <i>Error= 0.53%</i> | | <i>Error= 0.66%</i> | | <i>Error= 0.78%</i> | |
| NOx (kg/h) | 7.805 | 7.850 | 6.567 | 6.390 | 4.418 | 4.520 | 2.177 | 2.330 | 0.681 | 0.793 |
| | <i>Error= 0.57%</i> | | <i>Error= 2.77%</i> | | <i>Error= 2.25%</i> | | <i>Error= 6.56%</i> | | <i>Error= 14.15%</i> | |
| NOx specific (g/kWh) | 10.476 | - | 11.747 | - | 11.845 | - | 11.706 | - | 9.077 | - |
| Test Cycle D2(g/kWh) | 11.580 | 11.800 | IMO limit | | | | | | | |
| | <i>Error= 1.86%</i> | | 12.1 (g/kWh) | | | | | | | |

Στον Πίνακα 7.11 φαίνεται ότι τα αποτελέσματα των υπολογισμών του λογισμικού που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση παρουσιάζουν διαφορά σε σχέση με τα αντίστοιχα του NOx file του Κινητήρα D. Οι ειδικές εκπομπές NOx βάσει του κύκλου δοκιμών κινητήρα D2 διαφέρουν κατά 1,14% σε σχέση με την τιμή που αναγράφεται στο NOx file. Παρ' όλες αυτές τις διαφορές οι ειδικές εκπομπές NOx του Κινητήρα D όπως υπολογίστηκαν και με τα δύο λογισμικά βρίσκονται μέσα στα όρια που προβλέπει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός.

Πίνακας 7.11 Κινητήρας D - Αποτελέσματα λογισμικού που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση - Σύγκριση με NOx file

| LOAD (%) | 100% | | 75% | | 50% | | 25% | | 10% | |
|----------------------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|----------|---------------|----------|
| | Calculated | Nox file | Calculated | Nox file | Calculated | Nox file | Calculated | Nox file | Calculated | Nox file |
| Dry/Wet | 0.946 | 0.921 | 0.946 | 0.922 | 0.948 | 0.923 | 0.955 | 0.930 | 0.967 | 0.942 |
| Correction | Error= 2.71% | | Error= 2.64% | | Error= 2.68% | | Error= 2.64% | | Error= 2.62% | |
| K _{HD} | 1.073 | 1.070 | 1.040 | 1.069 | 1.054 | 1.069 | 1.002 | 1.067 | 0.919 | 1.069 |
| | Error= 0.31% | | Error= 2.69% | | Error= 1.40% | | Error= 6.12% | | Error= 14.02% | |
| GasFlow (kg/h) | 5143.9 | 5171.1 | 4152.9 | 3911.5 | 2728.4 | 2733.6 | 1736.4 | 1746.6 | 1305.2 | 1317.3 |
| | Error= 0.53% | | Error= 6.17% | | Error= 0.19% | | Error= 0.58% | | Error= 0.92% | |
| NOx (kg/h) | 7.849 | 7.850 | 6.621 | 6.390 | 4.458 | 4.520 | 2.186 | 2.330 | 0.680 | 0.793 |
| | Error= 0.02% | | Error= 3.61% | | Error= 1.37% | | Error= 6.19% | | Error= 14.19% | |
| NOx specific (g/kWh) | 10.535 | - | 11.844 | - | 11.952 | - | 11.751 | - | 9.073 | - |
| Test Cycle D2(g/kWh) | 11.666 | 11.800 | | | | | | | | |
| | Error= 1.14% | | | | | | | | | |

Στον Πίνακα 7.12 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου Δοκιμών Κινητήρα D2 όπως υπολογίστηκαν και από τα δύο λογισμικά που αναπτύχθηκαν. Παρατηρείται ταύτιση των αποτελεσμάτων. Το γεγονός αυτό είναι μια ένδειξη που ενισχύει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών σε σύγκριση με τα αντίστοιχα που περιέχονται στο NOx file του κινητήρα.

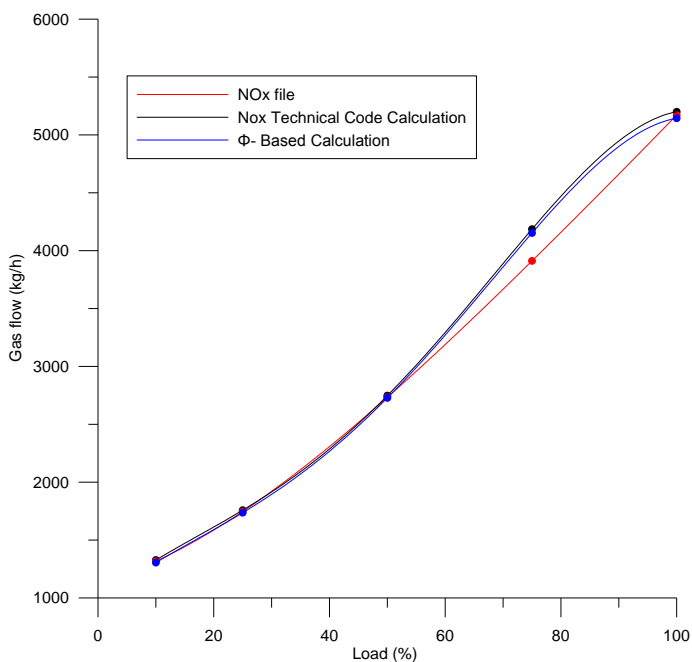
Πίνακας 7.12 Ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου δοκιμών D2

| | Μονάδα | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle E3 NOx Technical Code Calculations | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle D2 φ-Based Calculations | Διαφορά (%) |
|-----|--------|--|---|-------------|
| NOx | g/kWh | 11.58 | 11.47 | 0.9% |
| CO2 | kg/kWh | 0.667 | 0.672 | 0.7% |
| CO | g/kWh | 0.413 | 0.416 | 0.7% |
| HC | g/kWh | 0.442 | 0.438 | 0.9% |

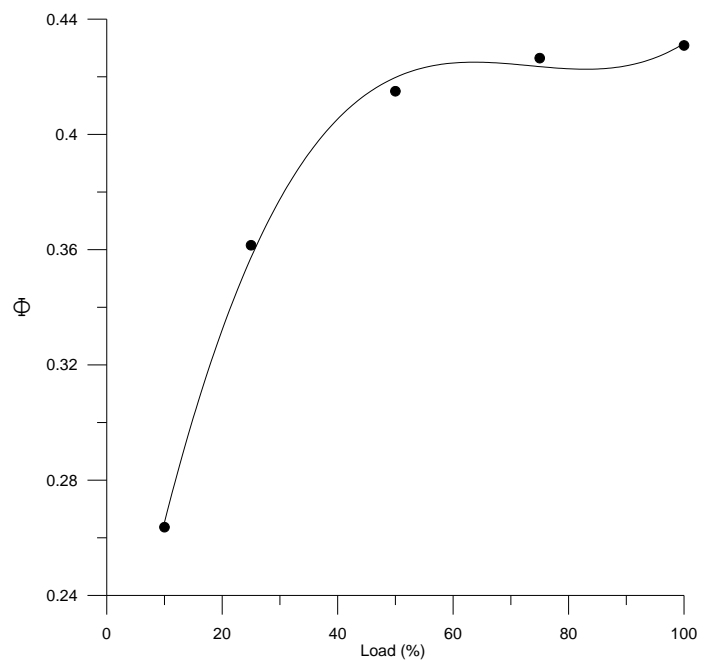
7.4.1 Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου

Ο Κινητήρας D, όπως και ο Κινητήρας C, είναι κινητήρας σταθερών στροφών λειτουργίας, γι αυτό τα διαγράμματα που δίνονται στην παρούσα παράγραφο δείχνουν τη μεταβολή των μεγεθών μόνο συναρτήσει του φορτίου. Στο Σχήμα 7.56 παρουσιάζεται η μεταβολή της παροχής καυσαερίου συναρτήσει του φορτίου όπως υπολογίστηκε με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Στην περίπτωση του τετράχρονου αυτού κινητήρα παρατηρείται απόλυτη ταύτιση της εκτίμησης της παροχής καυσαερίου που προέκυψε από την εφαρμογή των δύο υπολογιστικών μεθόδων που αναπτύχθηκαν, όμως οι αντίστοιχες τιμές που αναγράφονται στο NOx file της μηχανής παρουσιάζουν απόκλιση η οποία βάσει του Πίνακα 6.11 είναι της τάξης 6% για 75% φορτίο.

Στο Σχήμα 7.57 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου ισοδυναμίας καυσίμου αέρα (συντελεστή Φ) συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας όπως υπολογίζεται από το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση.



Σχήμα 7.56 Μεταβολή παροχής καυσαερίου συναρτήσει του φορτίου



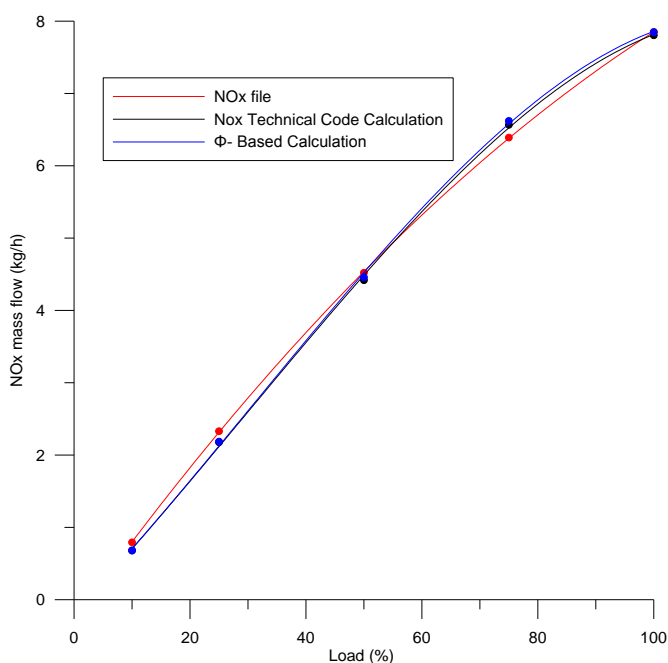
Σχήμα 7.57 Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα συναρτήσει του φορτίου

7.4.2 Εκπομπές NOx

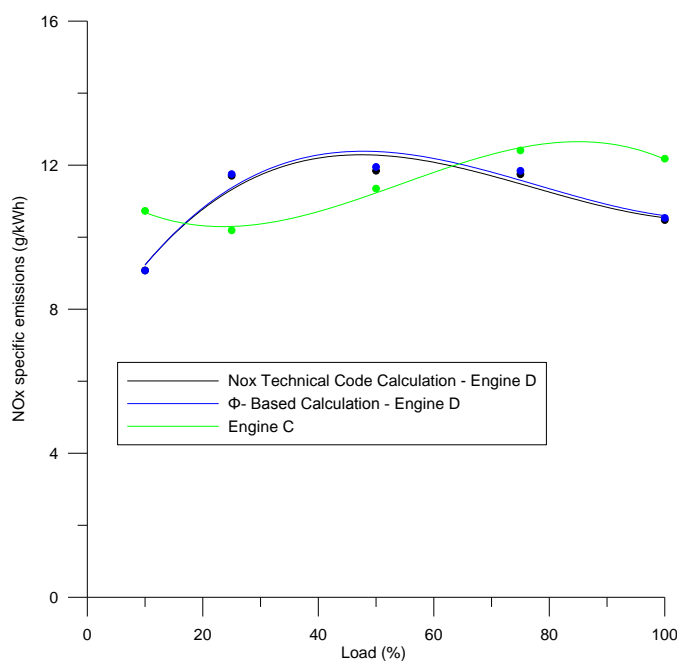
Στο Σχήμα 7.58 παρουσιάζεται η παροχή NOx συναρτήσει του φορτίου όπως υπολογίστηκε με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Είναι εμφανές ότι οι τιμές των ολικών παροχών NOx που υπολογίστηκαν βάσει των δύο μεθοδολογιών ταυτίζονται. Όμως οι ολικές εκπομπές NOx που αναγράφονται στο NOx file της μηχανής αποκλίνουν ελάχιστα από τις δύο άλλες καμπύλες. Όσο το φορτίο αυξάνεται, αυξάνεται και η παραγωγή NOx καθώς το εκπεμπόμενο καυσαέριο είναι συνολικά περισσότερο.

Στο Σχήμα 7.59 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές NOx σε γραμμάρια ανά κιλοβατώρα συναρτήσει του φορτίου όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Η ταύτιση των αποτελεσμάτων είναι εμφανής για τα αποτελέσματα των δύο μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν. Οι ειδικές εκπομπές NOx μεταβάλλονται μεταξύ 10 και 11,8 g/kWh σε όλο το φάσμα του φορτίου, εκτός από μια οριακή τιμή 9g/kWh στο 10% του φορτίου.

Επιπλέον, στο Σχήμα 7.59 δίνεται η μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx του Κινητήρα C συναρτήσει του φορτίου. Ο κινητήρας D αποδίδει 30% λιγότερη ισχύ σε σύγκριση με τον Κινητήρα C, και οι δύο κινητήρες είναι τετράχρονοι, υπερπληρωμένοι, diesel κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής, σταθερών στροφών. Στο Σχήμα 7.59 φαίνεται ότι σε όλο το φάσμα του φορτίου οι ειδικές εκπομπές NOx των δύο κινητήρων κυμαίνονται σε ένα εύρος μεταξύ 10 και 12,4 g/kWh. Όμως, οι ειδικές εκπομπές NOx του κινητήρα D είναι σταθερές στο μεγαλύτερο εύρος του φορτίου, ενώ οι ειδικές εκπομπές NOx του Κινητήρα C παρουσιάζουν ελαφρά αύξουσα τάση με την αύξηση του φορτίου.



Σχήμα 7.58 Μεταβολή ολικών εκπομπών NOx συναρτήσει του φορτίου

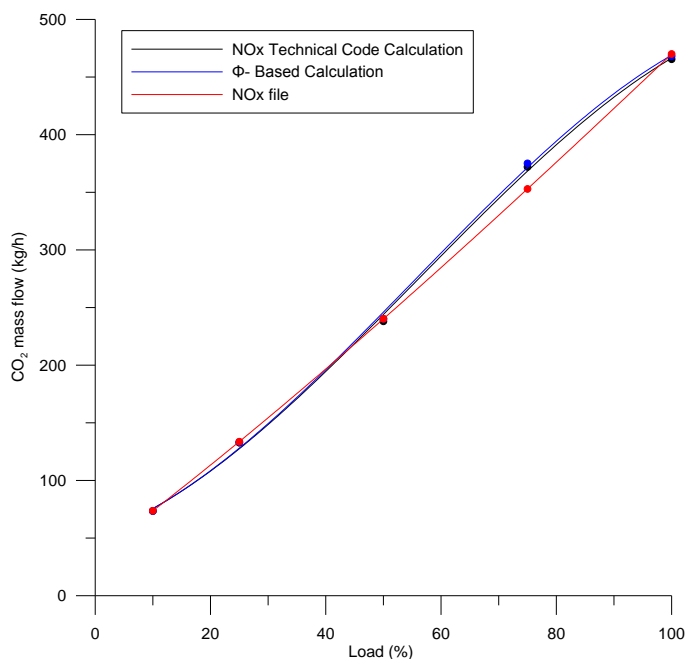


Σχήμα 7.59 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει του φορτίου

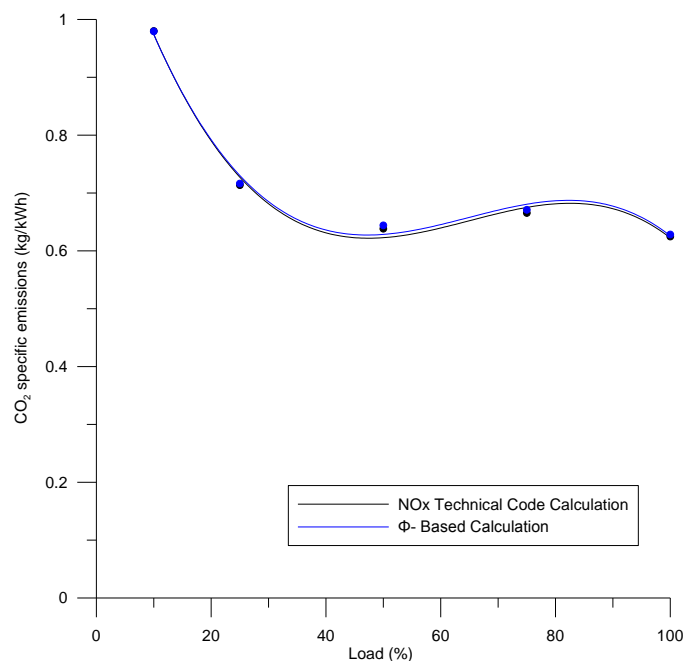
7.4.3 Εκπομπές CO₂

Στο Σχήμα 7.60 παρουσιάζεται η μεταβολή των ολικών εκπομπών CO₂ σε κιλά ανά ώρα σε συνάρτηση με το φορτίο λειτουργίας. Παρατηρούμε ότι ο εκπομπές CO₂ αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου. Σε όλο το εύρος των φορτίων λειτουργίας οι ολικές εκπομπές CO₂ που υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 ταυτίζονται με αυτές που υπολογίζει το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Σε ότι αφορά τις ολικές εκπομπές CO₂ παρατηρείται ελαφρά απόκλιση των τιμών που περιέχονται στο NOx file της Μηχανής D κυρίως κοντά στο 75% του φορτίου.

Στο Σχήμα 7.61 παρουσιάζονται οι ειδικές εκπομπές CO₂ συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας της Μηχανής D όπως υπολογίστηκε και από τα δύο λογισμικά που αναπτύχθηκαν. Καθώς το φορτίο μεταβάλλεται αλλά οι στροφές παραμένουν σταθερές οι ειδικές εκπομπές CO₂ είναι αυξημένες σε χαμηλό φορτίο λειτουργίας κάτι που παρατηρήθηκε και στην Μηχανή C (Σχήμα 7.51). Επιπλέον, στο Σχήμα 7.61 παρατηρείται απόλυτη συμφωνία των αποτελεσμάτων που δίνουν τα δύο λογισμικά σχετικά με τις ειδικές εκπομπές CO₂.



Σχήμα 7.60 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου

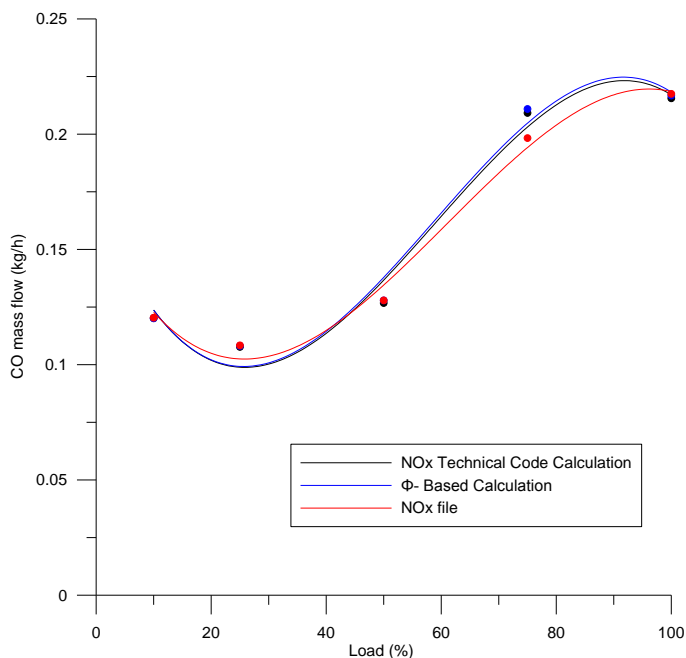


Σχήμα 7.61 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου

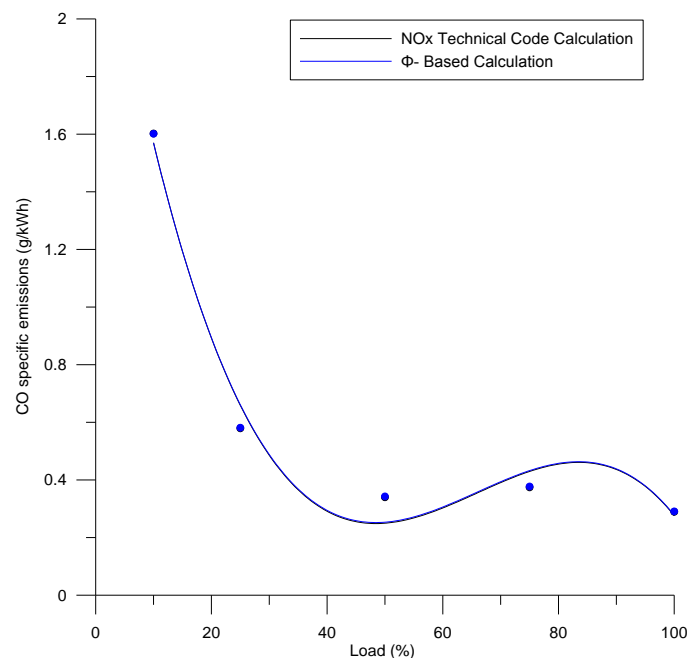
7.4.4 Εκπομπές CO

Οι εκπομπές CO συνδέονται με την ατελή καύση στους θαλάμους του κινητήρα. Στο Σχήμα 7.62 παρατηρείται ότι ολικές εκπομπές CO που προέκυψαν από την εφαρμογή του λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 ταυτίζονται με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την εφαρμογή του λογισμικού που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση στον Κινητήρα C. Αντίθετα, οι ολικές εκπομπές CO που αναγράφονται στο NOx file του Κινητήρα C παρουσιάζουν και σε αυτή την περίπτωση απόκλιση κυρίως στο 75% του φορτίου.

Το γεγονός ότι η Μηχανή D, όπως και η Μηχανή C, είναι κινητήρας σταθερών στροφών έχει σαν αποτέλεσμα οι ολικές εκπομπές CO να είναι σημαντικά αυξημένες σε χαμηλό φορτίο λειτουργίας κάτι που φαίνεται στο Σχήμα 7.63.



Σχήμα 7.62 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου

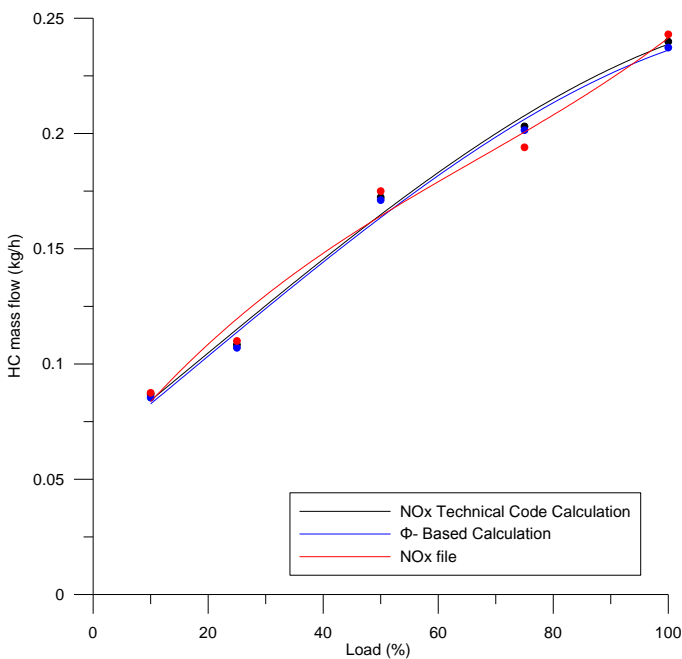


Σχήμα 7.63 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου

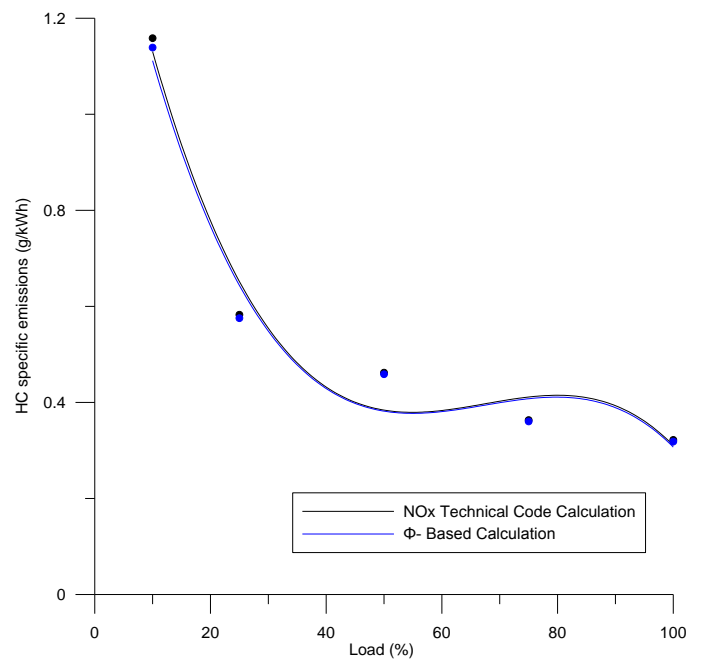
7.4.5 Εκπομπές Υδρογονανθράκων (HC)

Επαναλαμβάνεται για λόγους πληρότητας της έκθεσης ότι για τις εκπομπές υδρογονανθράκων έχει γίνει η υπόθεση και στις δύο μεθοδολογίες υπολογισμού ρύπων που αναπτύχθηκαν ότι αναφέρονται σε ισοδύναμο προπάνιο (C_3H_8). Στο Σχήμα 7.64 παρουσιάζεται η μεταβολή των ολικών εκπομπών υδρογονανθράκων συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας. Το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 εκτιμά τις ίδιες ολικές εκπομπές HC σε σύγκριση με αυτές που υπολογίζει το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση, αλλά οι αντίστοιχες τιμές που αναγράφονται στο NOx file παρουσιάζουν ελαφρά απόκλιση κυρίως, στο 75% του φορτίου.

Στο Σχήμα 7.65 απεικονίζονται οι ειδικές εκπομπές HC όπως υπολογίστηκαν και από τις δύο μεθοδολογίες που αναπτύσσονται στην έκθεση. Στην περίπτωση των ειδικών εκπομπών υδρογονανθράκων παρατηρείται σημαντική αύξηση των εκπομπών HC από τον Κινητήρα D σε χαμηλό φορτίο επειδή οι στροφές λειτουργίας παραμένουν σταθερές.



Σχήμα 7.64 Μεταβολή ολικών εκπομπών HC συναρτήσει του φορτίου



Σχήμα 7.65 Μεταβολή ειδικών εκπομπών HC συναρτήσει του φορτίου

8 Ανάλυση Ευαισθησίας του λογισμικού εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008.

Στα πλαίσια της αξιολόγησης της μεθοδολογίας εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που περιέχεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008, έγινε ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό να μελετηθεί η επίπτωση σφάλματος μέτρησης του CO₂ στην εκτίμηση των ειδικών εκπομπών NOx και της παροχής καυσαερίου. Η μεταβλητή εισόδου για την οποία έγινε η ανάλυση ευαισθησίας είναι το διοξείδιο του άνθρακα, καθώς ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίου, σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα NOx, βασίζεται στο ισοζύγιο άνθρακα. Επιπλέον, στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζεται η ευαισθησία στη μεταβολή της μετρημένης συγκέντρωσης CO₂ του λογισμικού εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 ως προς: τις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου, όπως προβλέπονται από τους κύκλους δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), τις ειδικές εκπομπές ρύπων σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας καθώς και την παροχή καυσαερίου σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα. Σαν ενδεικτικό σημείο λειτουργίας επιλέχθηκε για τους κινητήρες που υπάγονται στην κατηγορία E3 των Κύκλων Δοκιμών εκείνο που αντιστοιχεί στο 75% του φορτίου διότι συνεισφέρει με συντελεστή βαρύτητας 0,5 στον υπολογισμό των ειδικών εκπομπών ρύπων βάσει των Κύκλων Δοκιμών Κινητήρων. Αντίστοιχα, για τις μηχανές που υπάγονται στον Κύκλο D2 επιλέχθηκε το σημείο που αντιστοιχεί στο 50% του φορτίου με συντελεστή βαρύτητας 0,3. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα εισόδου των μηχανών A και C για την ανάλυση που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 8.

8.1 Ανάλυση Ευαισθησίας για τη μετρημένη συγκέντρωση CO₂ στο καυσαέριο

Μεταβάλλοντας τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα σε εύρος 10% πάνω και κάτω από τη μετρημένη τιμή και με βήμα 1% εκτιμήθηκε η επίδραση της μεταβολής αυτής στα αποτελέσματα του λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008. Τα αποτελέσματα που αφορούν την επίδραση της μεταβολής του CO₂ παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα και διαγραμμάτων.

8.1.1 Ανάλυση Ευαισθησίας CO₂ στο NOx file του Κινητήρα A

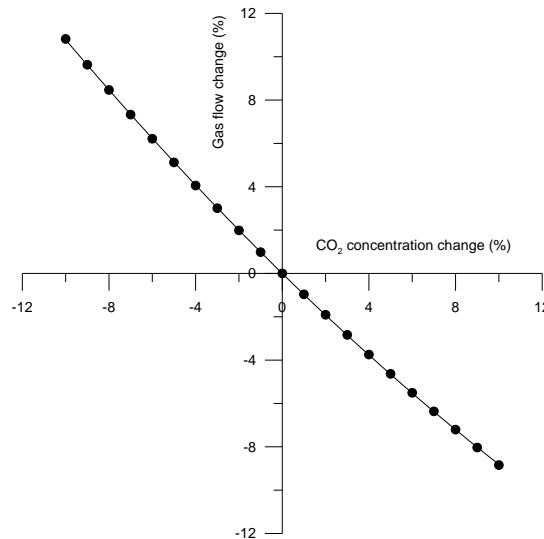
Ο Κινητήρας A είναι ένας δίχρονος υπερπληρωμένος diesel κινητήρας κύριας πρόωσης που λειτουργεί με το νόμο της έλικας. Το NOx file του Κινητήρα A, που περιέχει τις μετρήσεις στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας, βρίσκεται στο Παράρτημα Ι. Στον Πίνακα 8.1 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου στο 75% του φορτίου, στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου στο 75% του φορτίου και στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου βάσει του κύκλου δοκιμών λειτουργίας E3.

Πίνακας 8.1 Ανάλυση ευαισθησίας στο CO₂ - Κινητήρας Α

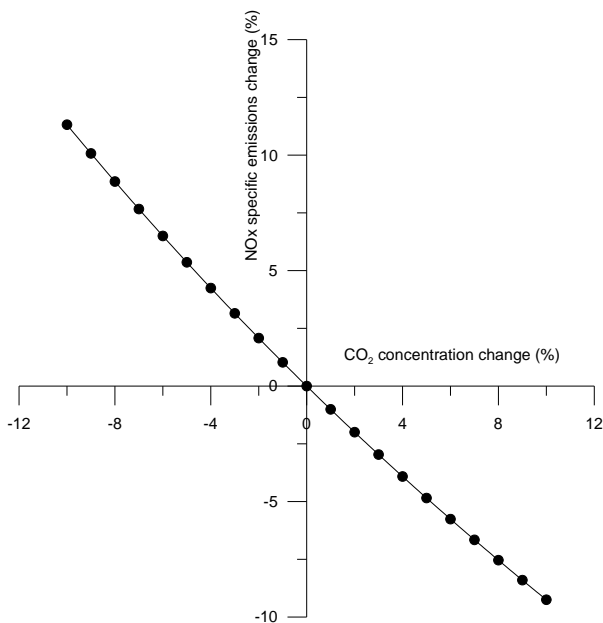
| Μεταβολή Συγκέντρωσης CO ₂ στο ξηρό καυσαέριο (%) | Μεταβολή (%) παροχής υγρού καυσαερίου στο 75% του φορτίου | Μεταβολή (%) Ειδικών εκπομπών NO _x στο 75% του φορτίου | Μεταβολή % Ειδικών εκπομπών NO _x βάσει του κύκλου δοκιμών Ε3 |
|--|---|---|---|
| -10% | 10.82% | 11.30% | 11.31% |
| -9% | 9.63% | 10.05% | 10.07% |
| -8% | 8.47% | 8.84% | 8.85% |
| -7% | 7.33% | 7.65% | 7.66% |
| -6% | 6.21% | 6.49% | 6.50% |
| -5% | 5.12% | 5.35% | 5.36% |
| -4% | 4.06% | 4.23% | 4.24% |
| -3% | 3.01% | 3.14% | 3.15% |
| -2% | 1.99% | 2.07% | 2.08% |
| -1% | 0.98% | 1.03% | 1.03% |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1% | -0.96% | -1.01% | -1.01% |
| 2% | -1.91% | -1.99% | -1.99% |
| 3% | -2.83% | -2.96% | -2.96% |
| 4% | -3.74% | -3.91% | -3.91% |
| 5% | -4.63% | -4.84% | -4.84% |
| 6% | -5.51% | -5.75% | -5.76% |
| 7% | -6.36% | -6.65% | -6.65% |
| 8% | -7.21% | -7.53% | -7.53% |
| 9% | -8.03% | -8.39% | -8.40% |
| 10% | -8.84% | -9.24% | -9.25% |

Όπως γίνεται αντιληπτό τόσο από τον Πίνακα 8.1 όσο και από το Σχήμα 8.2 η μεταβολή στη συγκέντρωση του CO₂ οδηγεί σε σχεδόν γραμμική μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίου σύμφωνα με τον Κώδικα NO_x 2008 γίνεται με τη μέθοδο ισοζυγίου άνθρακα μεταξύ αντιδρώντων και προϊόντων. Το CO₂ βρίσκεται σε σχετικά μεγάλη συγκέντρωση στα καυσαέρια (3,82% για το 75% του φορτίου στο NO_x file του Κινητήρα C) και η μεταβολή του έχει άμεση επίδραση στην παροχή καυσαερίου.

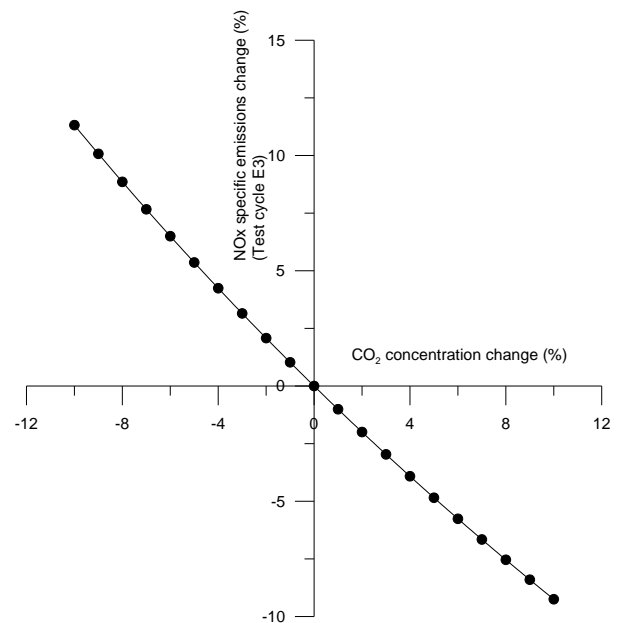
Οι αλλαγές που προκαλεί η μεταβολή της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου οδηγούν σε, επίσης, σχεδόν γραμμική μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 75% του φορτίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2. Επειδή ο συντελεστής βαρύτητας στον Κύκλο Δοκιμών E3 είναι 0,5 για 75% φορτίο, οι μεταβολές στις ειδικές εκπομπές NO_x στο 75% ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα με τις αντίστοιχες του Κύκλου Δοκιμών E3 όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3.



Σχήμα 8.1 Μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 8.2 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 75% του φορτίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 8.3 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x βάσει του κύκλου δοκιμών E3 συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο

8.1.2 Ανάλυση Ευαισθησίας CO₂ στο NO_x file του Κινητήρα C

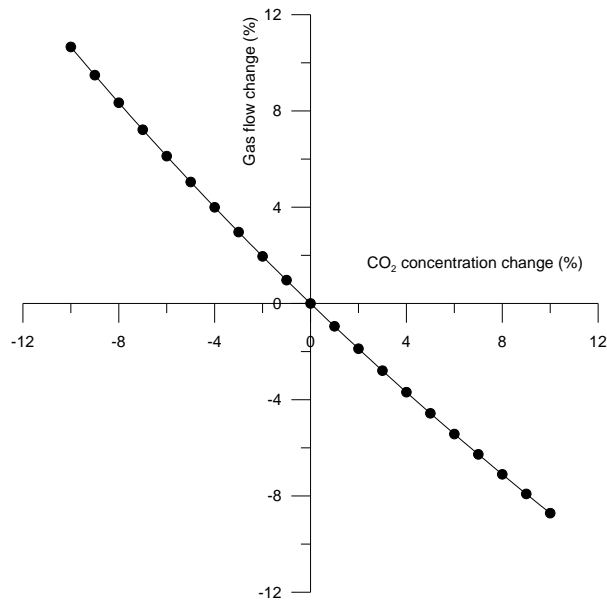
Ο κινητήρας C είναι ένας τετράχρονος, υπερπληρωμένος, diesel κινητήρας ηλεκτροπαραγωγής, σταθερών στροφών. Ο κινητήρας C αποδίδει ισχύ μιας τάξης μεγέθους λιγότερη από την ισχύ που αποδίδει ο Κινητήρας A. Το NO_x file του Κινητήρα C, που περιέχει τις μετρήσεις στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας, βρίσκεται στο παράρτημα Ι. Στον Πίνακα 8.2 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου στο 50% του φορτίου, στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου στο 50% του φορτίου και στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου βάσει του κύκλου δοκιμών λειτουργίας D2.

Πίνακας 8.2 Ανάλυση ευαισθησίας στο CO₂ - Κινητήρας C

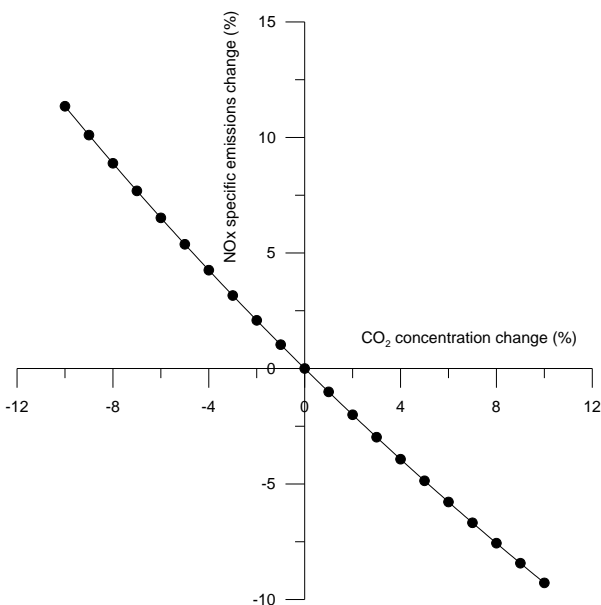
| Μεταβολή Συγκέντρωσης CO ₂ στο ξηρό καυσαέριο (%) | Μεταβολή (%) παροχής υγρού καυσαερίου στο 75% του φορτίου | Μεταβολή (%) Ειδικών εκπομπών NO _x στο 75% του φορτίου | Μεταβολή % Ειδικών εκπομπών NO _x βάσει του κύκλου δοκιμών D2 |
|--|---|---|---|
| -10% | 10.66% | 11.35% | 11.35% |
| -9% | 9.49% | 10.10% | 10.11% |
| -8% | 8.34% | 8.88% | 8.89% |
| -7% | 7.22% | 7.69% | 7.69% |
| -6% | 6.12% | 6.52% | 6.52% |
| -5% | 5.05% | 5.38% | 5.38% |
| -4% | 4.00% | 4.26% | 4.26% |
| -3% | 2.97% | 3.16% | 3.16% |
| -2% | 1.96% | 2.08% | 2.08% |
| -1% | 0.97% | 1.03% | 1.03% |
| 0 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 1% | -0.95% | -1.01% | -1.01% |
| 2% | -1.88% | -2.00% | -2.00% |
| 3% | -2.79% | -2.97% | -2.97% |
| 4% | -3.69% | -3.93% | -3.93% |
| 5% | -4.57% | -4.86% | -4.86% |
| 6% | -5.43% | -5.78% | -5.78% |
| 7% | -6.27% | -6.68% | -6.68% |
| 8% | -7.10% | -7.56% | -7.56% |
| 9% | -7.91% | -8.43% | -8.43% |
| 10% | -8.71% | -9.28% | -9.28% |

Όπως γίνεται αντιληπτό τόσο από τον Πίνακα 8.1 όσο και από το Σχήμα 8.4 η μεταβολή στη συγκέντρωση του CO₂ οδηγεί σε σχεδόν γραμμική μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου, κάτι που συνέβαινε και στην περίπτωση του δίχρονου Κινητήρα A. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίου σύμφωνα με τον Κώδικα NO_x 2008 γίνεται με τη μέθοδο ισοζυγίου άνθρακα μεταξύ αντιδρώντων και προϊόντων. Το CO₂ βρίσκεται σε σχετικά μεγάλη συγκέντρωση στα καυσαέρια (5,40% για το 50% του φορτίου στο NO_x file του Κινητήρα C) και η μεταβολή του έχει άμεση επίδραση στην παροχή καυσαερίου.

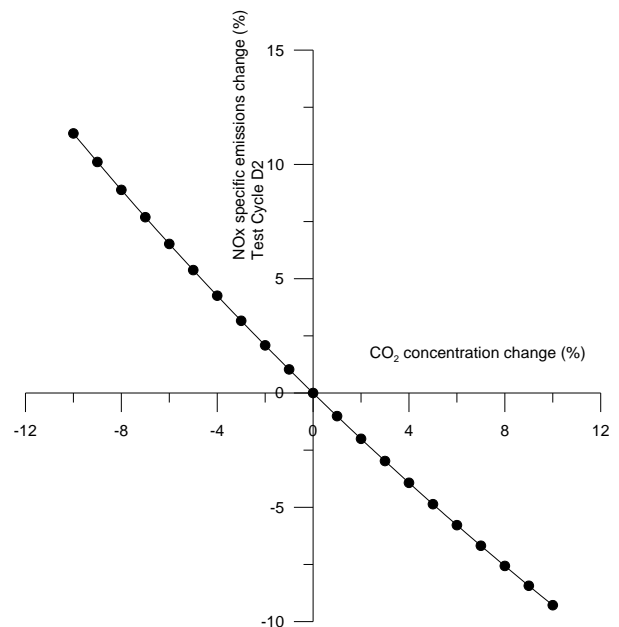
Οι αλλαγές που προκαλεί η μεταβολή της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου οδηγούν σε, επίσης, σχεδόν γραμμική μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 50% του φορτίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.5. Ο συντελεστής βαρύτητας στον Κύκλο Δοκιμών D2 είναι 0,3 για 50% φορτίο, οι μεταβολές στις ειδικές εκπομπές NO_x στο 50% ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα με τις αντίστοιχες του Κύκλου Δοκιμών D2 όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.6.



Σχήμα 8.4 Μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 8.5 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 50% του φορτίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 8.6 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x βάσει του κύκλου δοκιμών D2 συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο

9 Ανάλυση Ευαισθησίας του λογισμικού εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση.

Στα πλαίσια της αξιολόγησης της μεθοδολογίας εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση και παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6, έγινε ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό να μελετηθεί η επίπτωση σφάλματος μέτρησης στη συγκέντρωση CO₂ και O₂ στην εκτίμηση των ειδικών εκπομπών NO_x και της παροχής καυσαερίου. Οι μεταβλητές εισόδου για τις οποίες έγινε η ανάλυση είναι το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο, καθώς ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίου από το λογισμικό εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 6, βασίζεται στο ισοζύγιο άνθρακα και οξυγόνου. Επιπλέον, στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζεται η ευαισθησία στη μεταβολή της μετρημένης συγκέντρωσης CO₂ του λογισμικού εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση ως προς: τις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου, όπως προβλέπονται από τους κύκλους δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), τις ειδικές εκπομπές ρύπων σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας καθώς και την παροχή καυσαερίου σε συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα. Σαν ενδεικτικό σημείο λειτουργίας επιλέχθηκε για τους κινητήρες που υπάγονται στην κατηγορία E3 των Κύκλων Δοκιμών εκείνο που αντιστοιχεί στο 75% του φορτίου διότι συνεισφέρει με συντελεστή βαρύτητας 0,5 στον υπολογισμό των ειδικών εκπομπών ρύπων βάσει των Κύκλων Δοκιμών Κινητήρων. Αντίστοιχα, για τις μηχανές που υπάγονται στον Κύκλο D2 επιλέχθηκε το σημείο που αντιστοιχεί στο 50% του φορτίου με συντελεστή βαρύτητας 0,3. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα εισόδου των μηχανών A και C για την ανάλυση που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 9.

9.1 Ανάλυση Ευαισθησίας στο CO₂

Μεταβάλλοντας τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα σε εύρος 10% πάνω και κάτω από τη μετρημένη τιμή και με βήμα 1% εκτιμήθηκε η επίδραση της μεταβολής αυτής στα αποτελέσματα του λογισμικού εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Τα αποτελέσματα που αφορούν την επίδραση της μεταβολής του CO₂ παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα και διαγραμμάτων.

9.1.1 Ανάλυση Ευαισθησίας CO₂ στο NO_x file του Κινητήρα A

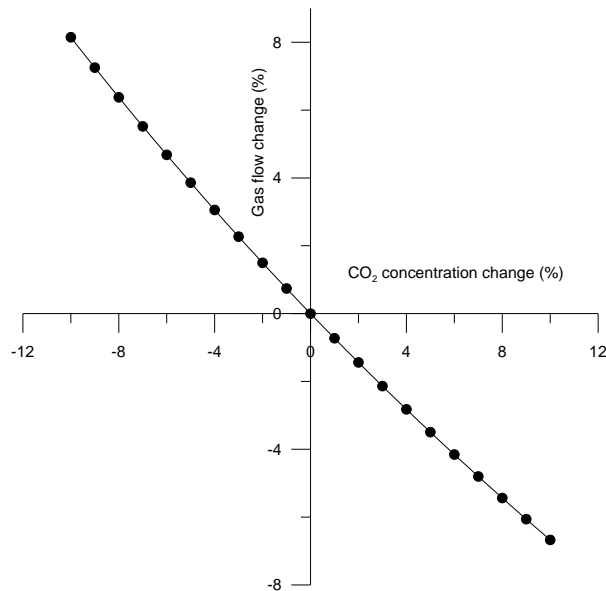
Ο Κινητήρας A είναι ένας δίχρονος υπερπληρωμένος diesel κινητήρας κύριας πρόωσης που λειτουργεί με το νόμο της έλικας. Το NO_x file του Κινητήρα A, που περιέχει τις μετρήσεις στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας, βρίσκεται στο Παράρτημα Ι. Στον Πίνακα 9.1 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου στο 75% του φορτίου, στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου στο 75% του φορτίου και στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου βάσει του κύκλου δοκιμών λειτουργίας E3.

Πίνακας 9.1 Ανάλυση ευαισθησίας στο CO₂ - Μηχανή A

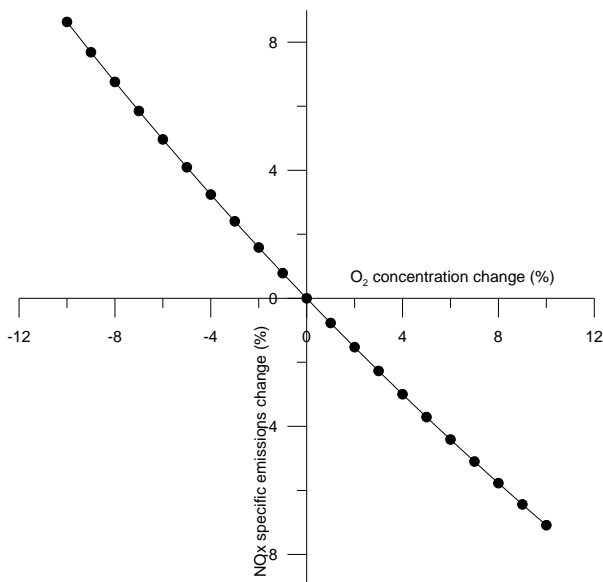
| Μεταβολή Συγκέντρωσης CO ₂ στο ξηρό καυσαέριο (%) | Μεταβολή (%) παροχής υγρού καυσαερίου στο 75% του φορτίου | Μεταβολή (%) Ειδικών εκπομπών NO _x στο 75% του φορτίου | Μεταβολή % Ειδικών εκπομπών NO _x βάσει του κύκλου δοκιμών E3 |
|--|---|---|---|
| -10% | 8.15% | 8.63% | 8.60% |
| -9% | 7.25% | 7.69% | 7.65% |
| -8% | 6.38% | 6.76% | 6.73% |
| -7% | 5.52% | 5.85% | 5.83% |
| -6% | 4.68% | 4.96% | 4.94% |
| -5% | 3.86% | 4.09% | 4.08% |
| -4% | 3.06% | 3.24% | 3.23% |
| -3% | 2.27% | 2.41% | 2.40% |
| -2% | 1.50% | 1.59% | 1.58% |
| -1% | 0.74% | 0.79% | 0.78% |
| 0 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 1% | -0.73% | -0.77% | -0.77% |
| 2% | -1.44% | -1.53% | -1.52% |
| 3% | -2.14% | -2.27% | -2.26% |
| 4% | -2.82% | -3.00% | -2.98% |
| 5% | -3.49% | -3.71% | -3.69% |
| 6% | -4.15% | -4.41% | -4.39% |
| 7% | -4.80% | -5.10% | -5.08% |
| 8% | -5.44% | -5.77% | -5.75% |
| 9% | -6.06% | -6.44% | -6.41% |
| 10% | -6.67% | -7.09% | -7.06% |

Όπως γίνεται αντιληπτό τόσο από τον Πίνακα 9.1 όσο και από το Σχήμα 9.1 η μεταβολή στη συγκέντρωση του CO₂ οδηγεί σε σχεδόν γραμμική μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου όμως δεν είναι ευθέως ανάλογη όπως στην περίπτωση του λογισμικού που δημιουργήθηκε βάσει του Τεχνικού Κώδικα NO_x 2008. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίου σύμφωνα με το λογισμικό εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στην τυπική εξίσωση πραγματικής καύσης (Εξίσωση 6.15). Το CO₂ βρίσκεται σε σχετικά μεγάλη συγκέντρωση στα καυσαέρια (3,82% για το 75% του φορτίου στο NO_x file του Κινητήρα A) και η μεταβολή του έχει άμεση επίδραση στην παροχή καυσαερίου.

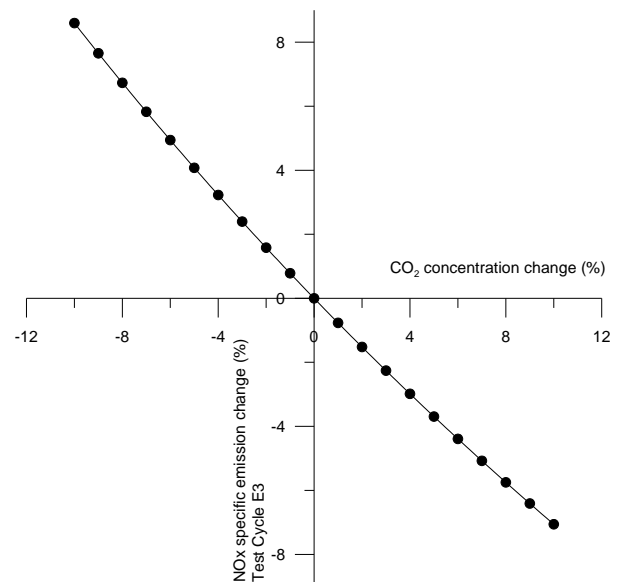
Οι αλλαγές που προκαλεί η μεταβολή της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου οδηγούν σε, επίσης, σχεδόν γραμμική μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 75% του φορτίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.2. Επειδή ο συντελεστής βαρύτητας στον Κύκλο Δοκιμών E3 είναι 0,5 για 75% φορτίο, οι μεταβολές στις ειδικές εκπομπές NO_x στο 75% ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα με τις αντίστοιχες του Κύκλου Δοκιμών E3 όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.3.



Σχήμα 9.1 Μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 9.2 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 75% του φορτίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 9.3 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x βάσει του κύκλου δοκιμών E3 συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο

9.1.2 Ανάλυση Ευαισθησίας CO₂ στο NO_x file του Κινητήρα C

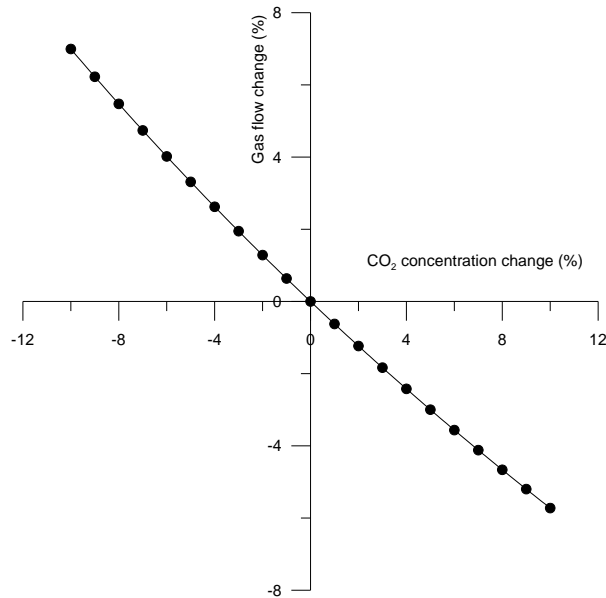
Ο κινητήρας C είναι ένας τετράχρονος, υπερπληρωμένος, diesel κινητήρας ηλεκτροπαραγωγής, σταθερών στροφών. Ο κινητήρας C αποδίδει ισχύ μιας τάξης μεγέθους λιγότερη από την ισχύ που αποδίδει ο Κινητήρας A. Το NO_x file του Κινητήρα C, που περιέχει τις μετρήσεις στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας, βρίσκεται στο παράρτημα Ι. Στον Πίνακα 9.2 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου στο 50% του φορτίου, στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου στο 50% του φορτίου και στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου βάσει του κύκλου δοκιμών λειτουργίας D2.

Πίνακας 9.2 Ανάλυση ευαισθησίας στο CO₂ - Μηχανή C

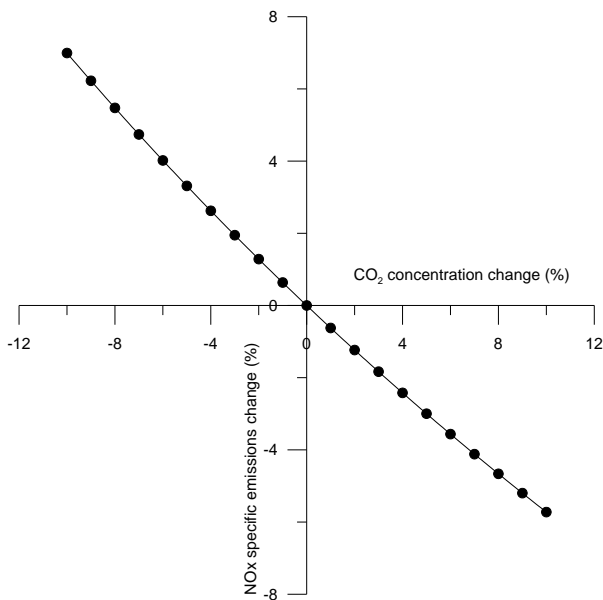
| Μεταβολή Συγκέντρωσης CO ₂ στο ξηρό καυσαέριο (%) | Μεταβολή (%) παροχής υγρού καυσαερίου στο 50% του φορτίου | Μεταβολή (%) Ειδικών εκπομπών NO _x στο 50% του φορτίου | Μεταβολή % Ειδικών εκπομπών NO _x βάσει του κύκλου δοκιμών D2 |
|--|---|---|---|
| -10% | 6.99% | 7.66% | 7.61% |
| -9% | 6.23% | 6.82% | 6.78% |
| -8% | 5.47% | 6.00% | 5.96% |
| -7% | 4.74% | 5.20% | 5.16% |
| -6% | 4.02% | 4.41% | 4.38% |
| -5% | 3.31% | 3.64% | 3.61% |
| -4% | 2.62% | 2.88% | 2.86% |
| -3% | 1.95% | 2.14% | 2.12% |
| -2% | 1.28% | 1.41% | 1.40% |
| -1% | 0.64% | 0.70% | 0.69% |
| 0 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 1% | -0.62% | -0.69% | -0.68% |
| 2% | -1.23% | -1.36% | -1.35% |
| 3% | -1.83% | -2.02% | -2.00% |
| 4% | -2.42% | -2.66% | -2.65% |
| 5% | -3.00% | -3.30% | -3.28% |
| 6% | -3.56% | -3.92% | -3.90% |
| 7% | -4.12% | -4.54% | -4.51% |
| 8% | -4.66% | -5.14% | -5.10% |
| 9% | -5.20% | -5.73% | -5.69% |
| 10% | -5.72% | -6.31% | -6.27% |

Όπως γίνεται αντιληπτό τόσο από τον Πίνακα 9.2 όσο και από το Σχήμα 9.4 η μεταβολή στη συγκέντρωση του CO₂ οδηγεί σε σχεδόν γραμμική μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου, κάτι που συνέβαινε και στη Μηχανή A. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίου σύμφωνα με το λογισμικό εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στην τυπική εξίσωση πραγματικής καύσης (Εξίσωση 6.15). Το CO₂ βρίσκεται σε σχετικά μεγάλη συγκέντρωση στα καυσαέρια (5,40% για το 50% του φορτίου στο NO_x file του Κινητήρα C) και η μεταβολή του έχει άμεση επίδραση στην παροχή καυσαερίου.

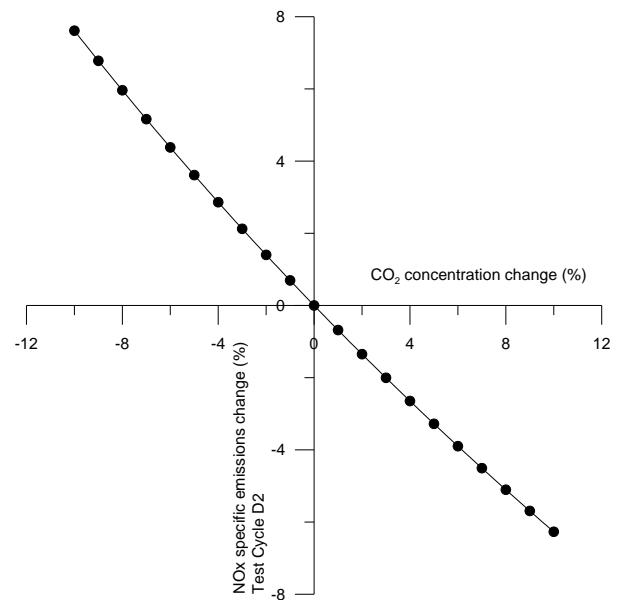
Οι αλλαγές που προκαλεί η μεταβολή της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου οδηγούν σε, επίσης, σχεδόν γραμμική μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 50% του φορτίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.5. Ο συντελεστής βαρύτητας στον Κύκλο Δοκιμών D2 είναι 0,5 για 75% φορτίο, οι μεταβολές στις ειδικές εκπομπές NO_x στο 50% ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα με τις αντίστοιχες του Κύκλου Δοκιμών D2 όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.6.



Σχήμα 9.4 Μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 9.5 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 50% του φορτίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 9.6 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x βάσει του κύκλου δοκιμών D2 συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο

9.2 Ανάλυση Ευαισθησίας στο O₂

Μεταβάλλοντας τη συγκέντρωση του οξυγόνου στο ξηρό καυσαέριο σε εύρος 10% πάνω και κάτω από τη μετρημένη τιμή και με βήμα 1% εκτιμήθηκε η επίδραση της μεταβολής αυτής στα αποτελέσματα του λογισμικού εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Τα αποτελέσματα που αφορούν την επίδραση της μεταβολής του CO₂ παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα και διαγραμμάτων.

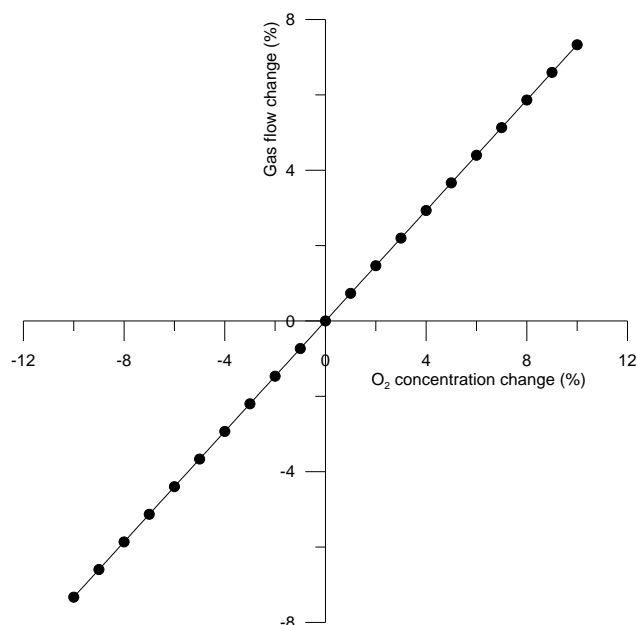
9.2.1 Ανάλυση Ευαισθησίας O₂ στο NO_x file του Κινητήρα A

Ο Κινητήρας A είναι ένας δίχρονος υπερπληρωμένος diesel κινητήρας κύριας πρόωσης που λειτουργεί με το νόμο της έλικας. Το NO_x file του Κινητήρα A, που περιέχει τις μετρήσεις στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας, βρίσκεται στο Παράρτημα Ι. Στον Πίνακα 9.3 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης του O₂ στην παροχή καυσαερίου στο 75% του φορτίου, στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου στο 75% του φορτίου και στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου βάσει του κύκλου δοκιμών κινητήρα E3.

Πίνακας 9.3 Ανάλυση ευαισθησίας στο O₂ – Κινητήρας A

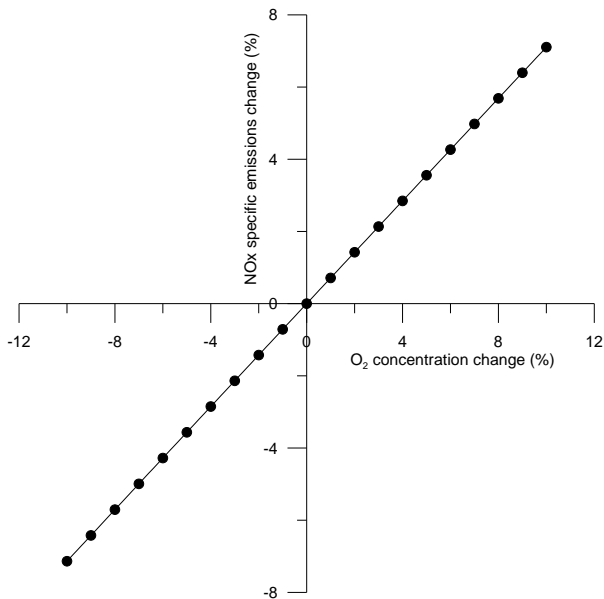
| Μεταβολή Συγκέντρωσης O ₂ στο ξηρό καυσαέριο (%) | Μεταβολή (%) παροχής υγρού καυσαερίου στο 75% του φορτίου | Μεταβολή (%) Ειδικών εκπομπών NO _x στο 75% του φορτίου | Μεταβολή % Ειδικών εκπομπών NO _x βάσει του κύκλου δοκιμών E3 |
|---|---|---|---|
| -10% | -7.33% | -7.14% | -7.08% |
| -9% | -6.60% | -6.42% | -6.37% |
| -8% | -5.86% | -5.71% | -5.67% |
| -7% | -5.13% | -4.99% | -4.96% |
| -6% | -4.40% | -4.28% | -4.25% |
| -5% | -3.66% | -3.56% | -3.54% |
| -4% | -2.93% | -2.85% | -2.83% |
| -3% | -2.20% | -2.14% | -2.12% |
| -2% | -1.47% | -1.42% | -1.41% |
| -1% | -0.73% | -0.71% | -0.71% |
| 0 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 1% | 0.73% | 0.71% | 0.71% |
| 2% | 1.47% | 1.42% | 1.41% |
| 3% | 2.20% | 2.14% | 2.12% |
| 4% | 2.93% | 2.85% | 2.83% |
| 5% | 3.66% | 3.56% | 3.53% |
| 6% | 4.40% | 4.27% | 4.24% |
| 7% | 5.13% | 4.98% | 4.94% |
| 8% | 5.86% | 5.69% | 5.65% |
| 9% | 6.60% | 6.40% | 6.35% |
| 10% | 7.33% | 7.11% | 7.05% |

Όπως γίνεται αντιληπτό τόσο από τον Πίνακα 9.3 όσο και από το Σχήμα 9.7 η μεταβολή στη συγκέντρωση του O_2 οδηγεί σε σχεδόν γραμμική μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου όμως δεν είναι ευθέως ανάλογη όπως στην Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίου σύμφωνα με το λογισμικό εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στην τυπική εξίσωση πραγματικής καύσης (Εξίσωση 6.15). Το O_2 βρίσκεται σε σχετικά μεγάλη συγκέντρωση στα καυσαέρια (16.08% για το 75% του φορτίου στο NOx file του Κινητήρα A) και η μεταβολή του έχει άμεση επίδραση στην παροχή καυσαερίου.

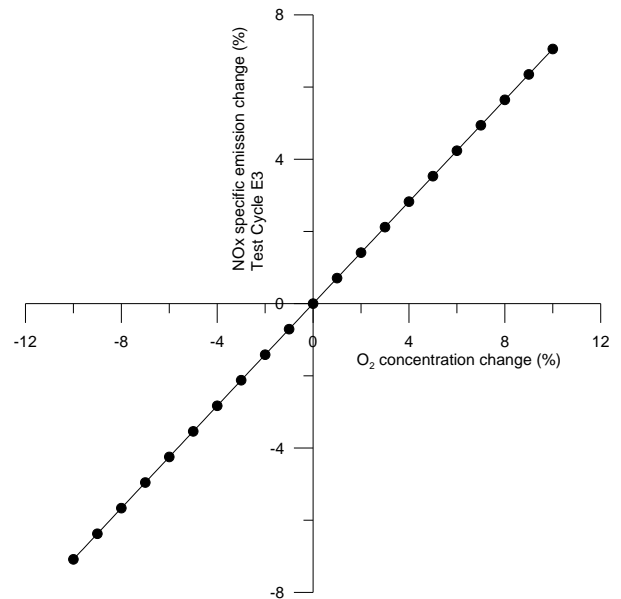


Σχήμα 9.7 Μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης O_2 στο ξηρό καυσαέριο

Οι αλλαγές που προκαλεί η μεταβολή της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου οδηγούν σε, επίσης, σχεδόν γραμμική μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 75% του φορτίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.8. Επειδή ο συντελεστής βαρύτητας στον Κύκλο Δοκιμών E3 είναι 0,5 για 75% φορτίο, οι μεταβολές στις ειδικές εκπομπές NO_x στο 75% ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα με τις αντίστοιχες του Κύκλου Δοκιμών E3 όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.9.



Σχήμα 9.8 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 75% του φορτίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 9.9 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x βάσει του κύκλου δοκιμών E3 συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο

9.2.2 Ανάλυση Ευαισθησίας O₂ στο NO_x file του Κινητήρα C

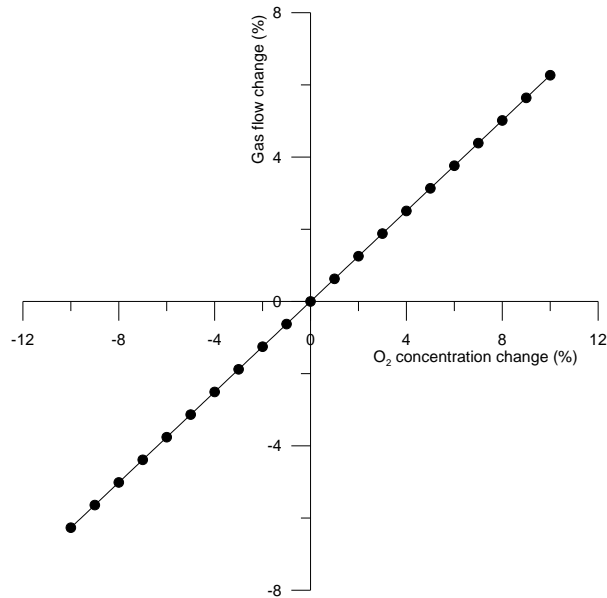
Ο Κινητήρας C είναι ένας τετράχρονος, υπερπληρωμένος, diesel κινητήρας ηλεκτροπαραγωγής, σταθερών στροφών. Ο κινητήρας C αποδίδει ισχύ μιας τάξης μεγέθους λιγότερη από την ισχύ που αποδίδει ο Κινητήρας A. Το NO_x file του Κινητήρα C, που περιέχει τις μετρήσεις στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας, βρίσκεται στο παράρτημα Ι. Στον Πίνακα 9.4 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου στο 50% του φορτίου, στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου στο 50% του φορτίου και στις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου βάσει του κύκλου δοκιμών λειτουργίας D2.

Πίνακας 9.4 Ανάλυση ευαισθησίας στο CO₂ - Κινητήρας C

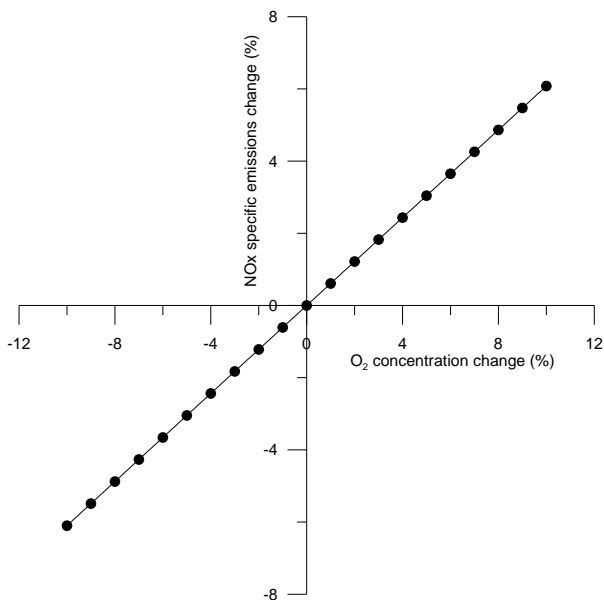
| Μεταβολή Συγκέντρωσης O ₂ στο ξηρό καυσαέριο (%) | Μεταβολή (%) παροχής υγρού καυσαερίου στο 50% του φορτίου | Μεταβολή (%) Ειδικών εκπομπών NO _x στο 50% του φορτίου | Μεταβολή (%) Ειδικών εκπομπών NO _x βάσει του κύκλου δοκιμών E3 |
|---|---|---|---|
| -10% | -6.27% | -6.10% | -6.04% |
| -9% | -5.64% | -5.49% | -5.44% |
| -8% | -5.01% | -4.88% | -4.83% |
| -7% | -4.39% | -4.27% | -4.23% |
| -6% | -3.76% | -3.66% | -3.62% |
| -5% | -3.13% | -3.05% | -3.02% |
| -4% | -2.51% | -2.44% | -2.41% |
| -3% | -1.88% | -1.83% | -1.81% |
| -2% | -1.25% | -1.22% | -1.21% |
| -1% | -0.63% | -0.61% | -0.60% |
| 0 | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 1% | 0.63% | 0.61% | 0.60% |
| 2% | 1.25% | 1.22% | 1.21% |
| 3% | 1.88% | 1.83% | 1.81% |
| 4% | 2.51% | 2.43% | 2.41% |
| 5% | 3.13% | 3.04% | 3.01% |
| 6% | 3.76% | 3.65% | 3.62% |
| 7% | 4.39% | 4.26% | 4.22% |
| 8% | 5.01% | 4.86% | 4.82% |
| 9% | 5.64% | 5.47% | 5.42% |
| 10% | 6.27% | 6.08% | 6.02% |

Όπως γίνεται αντιληπτό τόσο από τον Πίνακα 9.4 όσο και από το Σχήμα 9.10 η μεταβολή στη συγκέντρωση του CO₂ οδηγεί σε σχεδόν γραμμική μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου, κάτι που συνέβαινε και στη Μηχανή A. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός της παροχής καυσαερίου σύμφωνα με το λογισμικό εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στην τυπική εξίσωση πραγματικής καύσης (Εξίσωση 6.15). Το CO₂ βρίσκεται σε σχετικά μεγάλη συγκέντρωση στα καυσαέρια (5,40% για το 50% του φορτίου στο NO_x file του Κινητήρα C) και η μεταβολή του έχει άμεση επίδραση στην παροχή καυσαερίου.

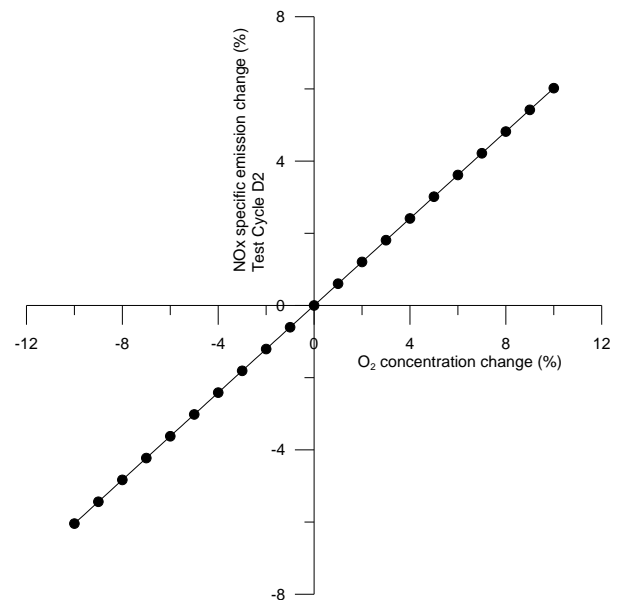
Οι αλλαγές που προκαλεί η μεταβολή της συγκέντρωσης του CO₂ στην παροχή καυσαερίου οδηγούν σε, επίσης, σχεδόν γραμμική μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 50% του φορτίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.11. Ο συντελεστής βαρύτητας στον Κύκλο Δοκιμών D2 είναι 0,5 για 75% φορτίο, οι μεταβολές στις ειδικές εκπομπές NO_x στο 50% ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα με τις αντίστοιχες του Κύκλου Δοκιμών D2 όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.12.



Σχήμα 9.10 Μεταβολή της παροχής υγρού καυσαερίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 9.11 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x στο 50% του φορτίου συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο



Σχήμα 9.12 Μεταβολή των ειδικών εκπομπών NO_x βάσει του κύκλου δοκιμών D2 συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CO₂ στο ξηρό καυσαέριο

10 Εφαρμογή των λογισμικών εκτίμησης ρύπων σε πειραματικές μετρήσεις κινητήρα diesel

Στο Κεφάλαιο 5 και στο Κεφάλαιο 6 αναπτύχθηκαν δύο μεθοδολογίες εκτίμησης εκπομπών ρύπων από ναυτικούς κινητήρες Diesel. Δόθηκε έμφαση στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου λόγω των κανονισμών που επιβάλλονται διεθνώς για τον περιορισμό τους. Η πρώτη μέθοδος εκτίμησης ρύπων βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) ενώ η δεύτερη στη χημεία της στοιχειομετρικής και της πραγματικής καύσης. Οι δύο μεθοδολογίες εφαρμόστηκαν σε τέσσερα NOx files ναυτικών κινητήρων (Κεφάλαιο 7) όπου διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα που δίνουν ταυτίζονται γενικά με τα αντίστοιχα που περιέχονται στα NOx files. Επιπλέον, διεξάχθηκε ανάλυση ευαισθησίας των δύο αλγορίθμων στις μεταβλητές που επηρεάζουν περισσότερο τα τελικά αποτέλεσμα. Έχοντας λοιπόν, διαπιστώσει την αξιοπιστία των δύο μεθοδολογιών με την εφαρμογή τους στα NOx files, εφαρμόστηκαν σε πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν από ναυτικό κινητήρα Diesel. Τα αποτελέσματα και η αξιολόγηση της εφαρμογής αυτής παρουσιάζονται στο παρών κεφάλαιο.

10.1 Εφαρμογή των λογισμικών εκτίμησης ρύπων στις πειραματικές μετρήσεις του Κινητήρα E.

Ο Κινητήρας E είναι ένας ναυτικός, δίχρονος, υπερπληρωμένος, diesel κινητήρας κύριας πρόωσης που λειτουργεί με το νόμο της έλικας. Το λογισμικό εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και το λογισμικό εκτίμησης ρύπων που βασίζεται στη στοιχειομετρική και πραγματική καύση εφαρμόστηκαν στις πειραματικές μετρήσεις του Κινητήρα E που βρίσκονται στο Παράρτημα II. Ο κινητήρας υπάγεται στην κατηγορία E3 των κύκλων δοκιμών κινητήρα του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα αποτελέσματα των υπολογισμών, τα διαγράμματα που προκύπτουν και η αξιολόγηση αυτών.

Όπως φαίνεται στις μετρήσεις που βρίσκονται στο Παράρτημα II τα σημεία λειτουργίας στα οποία έγιναν οι μετρήσεις στη Μηχανή E δεν είναι εκείνα που υποδεικνύονται στον κύκλο δοκιμών κινητήρα E3. Όμως, όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.5, μπορεί να επιλεχθούν άλλοι συντελεστές βαρύτητας στα νέα σημεία λειτουργίας αρκεί σε αυτά να περιλαμβάνεται το σημείο που αντιστοιχεί στο 75% του φορτίου για τις μηχανές που υπάγονται στον κύκλο E3 όπως η Μηχανή E. Οι συντελεστές βαρύτητας που επιλέχθηκαν για κάθε σημείο λειτουργίας φαίνονται στον Πίνακα 10.1.

Πίνακας 10.1 Συντελεστές βαρύτητας κύκλου δοκιμών κινητήρα σε κάθε σημείο λειτουργίας

| | | |
|----------------------|------|------|
| Load | 50% | 75% |
| W_f | 0.23 | 0.77 |

Στον Πίνακα 10.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και του λογισμικού που βασίζεται στη χημεία της πραγματικής και της στοιχειομετρική καύσης στις πειραματικές μετρήσεις της Μηχανής Ε. Παρατηρείται ταύτιση των αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών. Επιπροσθέτως οι τιμές των ειδικών εκπομπών NOx βάσει των κύκλων δοκιμών κινητήρα είναι μέσα στα όρια που επιβάλλει ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός.

Πίνακας 10.2 Κινητήρας Ε - Αποτελέσματα εφαρμογής του λογισμικού που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και του λογισμικού που βασίζεται στη χημεία της πραγματικής και της στοιχειομετρική καύσης

| LOAD (%) | 45% | | 50% | | 65% | | 75% | | 85% | |
|----------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| | <i>Φ</i> -based calculation | NOx Tech. Code | <i>Φ</i> -based calculation | NOx Tech. Code | <i>Φ</i> -based calculation | NOx Tech. Code | <i>Φ</i> -based calculation | NOx Tech. Code | <i>Φ</i> -based calculation | NOx Tech. Code |
| Dry/Wet | 0.963 | 0.959 | 0.964 | 0.960 | 0.964 | 0.960 | 0.964 | 0.961 | 0.963 | 0.959 |
| Correction | Error= 0.39% | | Error= 0.39% | | Error= 0.39% | | Error= 0.39% | | Error= 0.39% | |
| K _{HD} | 0.970 | 0.970 | 0.970 | 0.970 | 0.967 | 0.967 | 0.964 | 0.964 | 0.963 | 0.963 |
| | Error= 0.00% | | Error= 0.00% | | Error= 0.00% | | Error= 0.00% | | Error= 0.00% | |
| GasFlow (kg/h) | 80435.5 | 79799.2 | 88093.3 | 87509.1 | 114031.2 | 112993.2 | 131863.0 | 131172.0 | 150305.7 | 149547.2 |
| | Error= 0.80% | | Error= 0.67% | | Error= 0.92% | | Error= 0.53% | | Error= 0.51% | |
| NOx (kg/h) | 103.424 | 102.208 | 113.367 | 112.178 | 153.608 | 151.618 | 174.359 | 172.772 | 201.180 | 199.388 |
| | Error= 1.19% | | Error= 1.06% | | Error= 1.31% | | Error= 0.92% | | Error= 0.90% | |
| NOx_specific (g/kWh) | 13.085 | 12.931 | 12.983 | 12.847 | 13.806 | 13.627 | 13.427 | 13.304 | 13.622 | 13.500 |
| | Error= 1.19% | | Error= 1.06% | | Error= 1.31% | | Error= 0.92% | | Error= 0.90% | |
| Test Cycle (g/kWh) | 13.352 | 13.228 | IMO limit | | | | | | | |
| | Error= 0.94% | | 17 (g/kWh) | | | | | | | |

Ο Κινητήρας Α στου οποίου το NOx file έγινε εφαρμογή των δύο μεθοδολογιών στο Κεφάλαιο 7, αποτελεί μητρική μηχανή (Parent engine) του Κινητήρα Ε. Όμως καθώς τα φορτία των μετρήσεων διαφέρουν, έγινε σύγκριση των ειδικών εκπομπών NOx όπως προβλέπεται από τους κύκλους δοκιμών κινητήρα της Marpol και όχι σε κάθε φορτίο ξεχωριστά. Στον Πίνακα 10.3 φαίνεται ότι συνολικά, οι ειδικές εκπομπές NOx όπως υπολογίστηκαν για τη Μηχανή Ε διαφέρουν κατά 1,5% από τις υπολογισμένες εκπομπές NOx για τον «Parent engine» Κινητήρα Α. Η απόκλιση των υπολογισμένων τιμών είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την τιμή που αναγράφεται στο NOx file του Κινητήρα Α, 1,46% για τη μεθοδολογία που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση και 2,38% για τον υπολογισμό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008. Όμως, το NOx file συντάχθηκε το 2006 και συνεπώς οι υπολογισμοί δεν έχουν γίνει με τις τελευταίες τροποποιήσεις του Τεχνικού Κώδικα NOx. Οι προηγούμενες εκδόσεις του Τεχνικού Κώδικα NOx επέτρεπαν μεγαλύτερη ελευθερία στους υπολογισμούς καθώς δεν ήταν σαφώς καθορισμένα όλα τα στάδια της διαδικασίας υπολογισμού. Αν λάβουμε υπόψιν και τις διαφορές στις περιβαλλοντικές συνθήκες μεταξύ των μετρήσεων στο NOx file του Κινητήρα Α και των πειραματικών μετρήσεων του Κινητήρα Ε συμπεραίνουμε ότι οι διαφορές που προκύπτουν είναι λογικές και δικαιολογημένες.

Πίνακας 10.3 Σύγκριση ειδικών εκπομπών NOx Κινητήρα Ε και Κινητήρα Α

| | Ειδικές εκπομπές NOx Μηχανής Ε (g/kWh) | Ειδικές εκπομπές NOx Μηχανής Α (g/kWh) | Απόκλιση (%) | Απόκλιση από το NOx file της μηχανής Α |
|---------------------|--|--|--------------|--|
| Φ-based calculation | 13.352 | 13.543 | 1.41% | 1.46% |
| NOx Tech. Code | 13.228 | 13.406 | 1.33% | 2.38% |
| NOx file Μηχανής Α | 13.55 | - | - | - |

Στον Πίνακα 10.4 φαίνονται οι ειδικές εκπομπές ρύπων του Κινητήρα Ε βάσει των κύκλων δοκιμών κινητήρα όπως αυτές υπολογίστηκαν και με τα δύο λογισμικά. Οι τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή των δύο λογισμικών διαφέρουν κατά 1% μεταξύ τους.

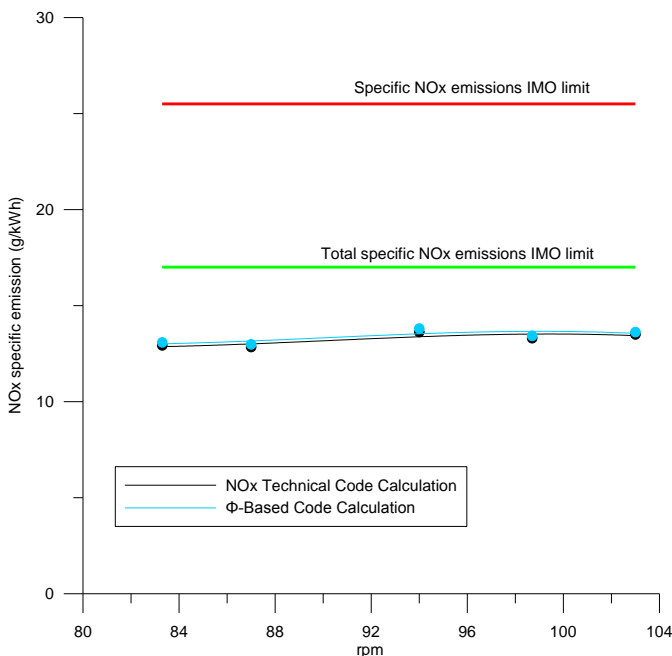
Πίνακας 10.4 Ειδικές εκπομπές ρύπων βάσει του κύκλου δοκιμών κινητήρα

| | Μονάδα | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle NOx Technical Code Calculations | Ειδικές εκπομπές ρύπων Test Cycle Φ-Based Calculations | Διαφορά (%) |
|-----------------|--------|---|--|-------------|
| NOx | g/kWh | 13.406 | 13.543 | 1.03% |
| CO ₂ | kg/kWh | 0.633 | 0.639 | 0.94% |
| CO | g/kWh | 1.662 | 1.678 | 0.95% |

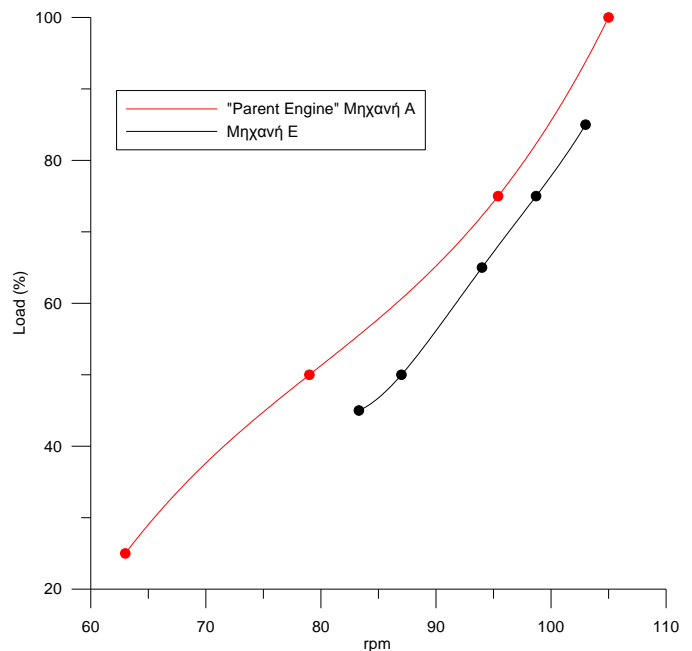
10.2 Έλεγχος εναρμόνισης ειδικών εκπομπών NOx με τα όρια της Marpol 73/78 – Καμπύλη φόρτισης Κινητήρα Ε.

Στο Σχήμα 10.1 παρουσιάζεται η μεταβολή των ειδικών εκπομπών NOx της Μηχανής Ε συναρτήσει των στροφών λειτουργίας όπως υπολογίστηκε και με τις δύο μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν. Με πράσινο χρώμα φαίνεται το όριο των ειδικών εκπομπών NOx βάσει του κύκλου δοκιμών κινητήρα Ε3. Στον τεχνικό κώδικα αναφέρεται ότι για κάθε σημείο λειτουργίας το όριο για τις ειδικές εκπομπές NOx σε κάθε σημείο λειτουργίας είναι 50% περισσότερο από το αντίστοιχο όριο των κύκλων δοκιμών κινητήρα. Αυτό το όριο φαίνεται στο Σχήμα 10.2 με κόκκινο χρώμα. Η καμπύλη εκπομπών NOx της Μηχανής Ε βρίσκεται κάτω από το ανώτατο επιτρεπτό αυτό όριο.

Στο Σχήμα 10.2 παρουσιάζεται η καμπύλη φόρτισης του Κινητήρα Ε κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων και η καμπύλη φόρτισης του Κινητήρα Α. Παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των σημείων λειτουργίας του «Parent Engine» Κινητήρα Α και του Κινητήρα Ε ο οποίος μελετάται στο Κεφάλαιο 10. Αυτή η διαφορά είναι η κύρια πηγή των αποκλίσεων που προκύπτουν στις υπόλοιπες τόσο μετρημένες όσο και εκτιμημένες τιμές που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο. Επιπλέον, καθώς η καμπύλες φόρτισης των Κινητήρων διαφέρουν δεν θα γίνει περεταίρω σύγκριση των εκπομπών ρύπων τους σε γραφήματα, η σύγκριση τους θα περιοριστεί στα όσα αναφέρονται στην παράγραφο 10.1.



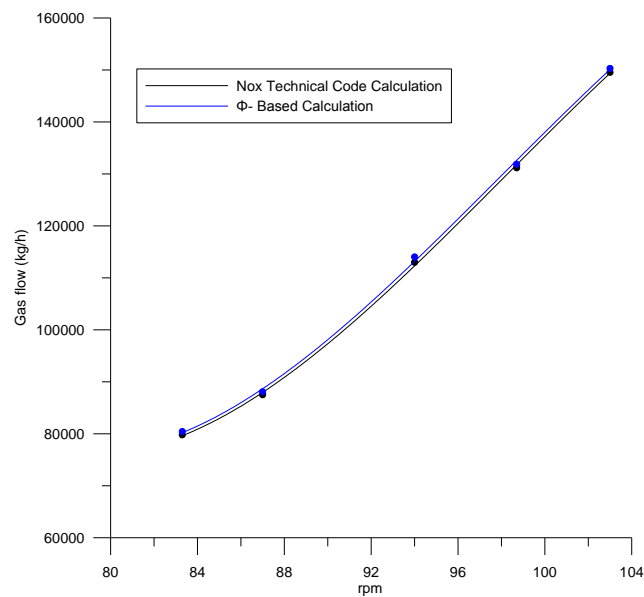
Σχήμα 10.1 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



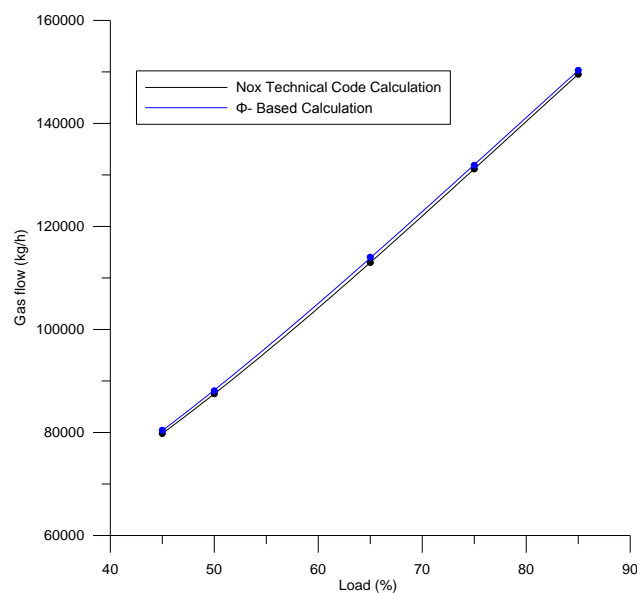
Σχήμα 10.2 Καμπύλη φόρτισης Κινητήρα Ε

10.3 Αξιολόγηση Εκτίμησης Παροχής Καυσαερίου

Στα Σχήματα 10.3 και 10.4 παρουσιάζεται αντίστοιχα η μεταβολή της παροχής καυσαερίου συναρτήσει των στροφών και του φορτίου λειτουργίας όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Οι καμπύλες της εκτιμημένης παροχής καυσαερίου από τα δύο λογισμικά ταυτίζονται απόλυτα. Όσο αυξάνονται οι στροφές λειτουργίας του κινητήρα, αυξάνεται και η παροχή καυσαερίου. Στο Σχήμα 10.4 φαίνεται ότι η παροχή καυσαερίου μεταβάλλεται γραμμικά με την αύξηση του φορτίου.

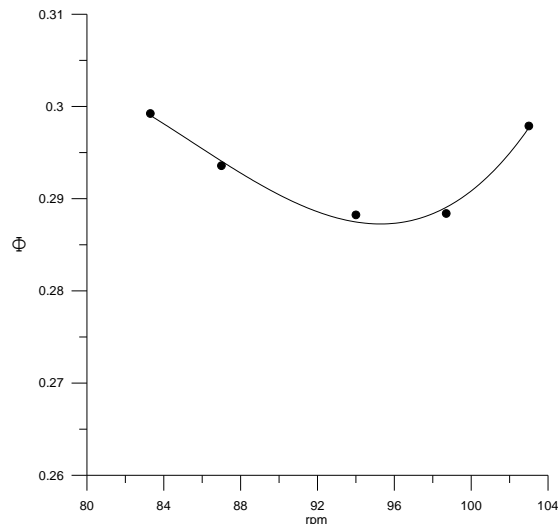


Σχήμα 10.3 Μεταβολή παροχής καυσαερίου συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

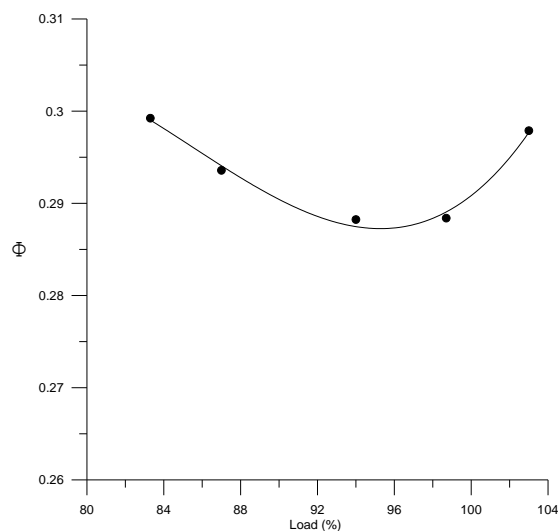


Σχήμα 10.4 Μεταβολή παροχής καυσαερίου συναρτήσει του φορτίου

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6 για τον υπολογισμό της παροχής καυσαερίων από το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση υπολογίζεται ο στοιχειομετρικός λόγος αέρα-καυσίμου (AFR_{ST}) και στη συνέχεια ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα (συντελεστής Φ). Ο συντελεστής Φ είναι ο λόγος του πραγματικού λόγου αέρα-καυσίμου προς τον στοιχειομετρικό. Στα Σχήματα 10.5 και 10.6 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή Φ συναρτήσει των στροφών και του φορτίου λειτουργίας αντίστοιχα. Ο λόγος ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα δεν μεταβάλλεται σημαντικά στο φάσμα των στροφών λειτουργίας και του φορτίου.



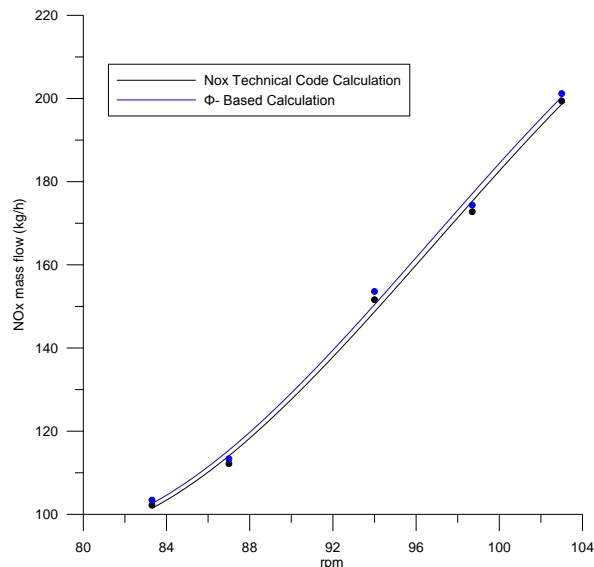
Σχήμα 10.5 Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



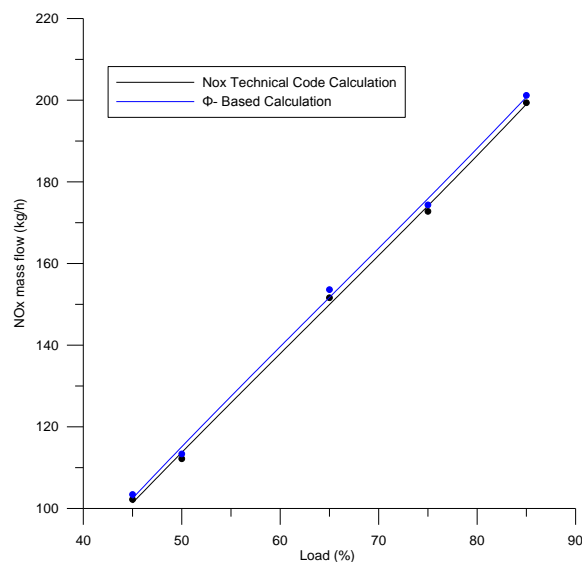
Σχήμα 10.6 Μεταβολή λόγου ισοδυναμίας καυσίμου-αέρα συναρτήσει του φορτίου

10.4 Εκπομπές NOx

Στα Σχήματα 10.7 και 10.8 παρουσιάζεται η παροχή NOx από τη Μηχανή Ε συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου αντίστοιχα, όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Όσο το φορτίο και οι στροφές αυξάνονται, αυξάνεται και η παροχή NOx καθώς το εκπεμπόμενο καυσαέριο είναι συνολικά περισσότερο. Οι καμπύλες των ολικών εκπομπών NOx συναρτήσει τόσο των στροφών όσο και του φορτίου όπως προέκυψαν από την εφαρμογή των δύο λογισμικών ταυτίζονται απόλυτα.

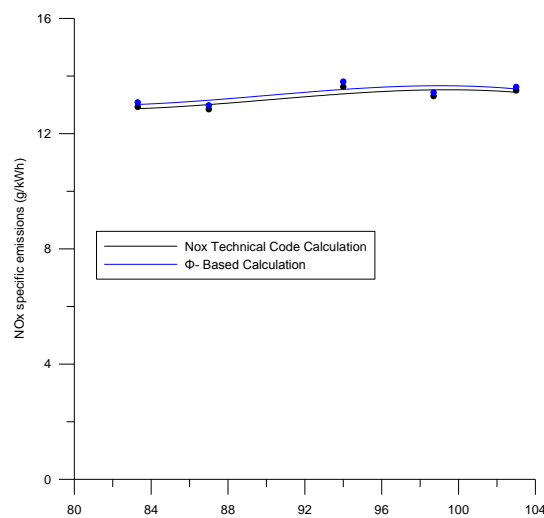


Σχήμα 10.7 Μεταβολή ολικών εκπομπών NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

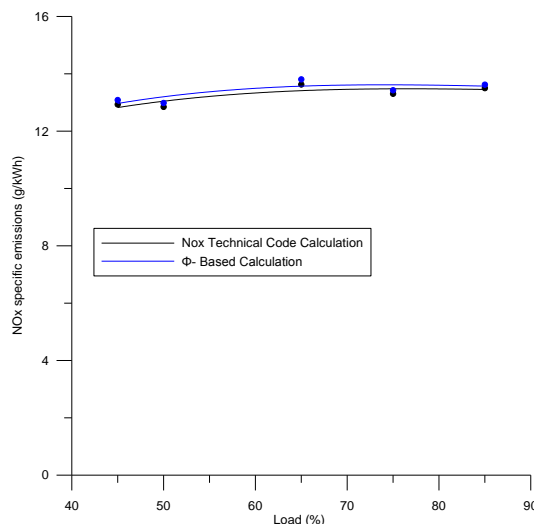


Σχήμα 10.8 Μεταβολή ολικών εκπομπών NOx συναρτήσει του φορτίου

Στα Σχήματα 10.9 και 10.10 δίνονται οι ειδικές εκπομπές NOx σε γραμμάρια ανά κιλοβατώρα συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου αντίστοιχα, όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Η μορφή των διαγραμμάτων εξαρτάται άμεσα από την καμπύλη φόρτισης του κινητήρα (Σχήμα 10.2). Στην περίπτωση των διαγραμμάτων των ειδικών εκπομπών NOx, όπως συμβαίνει και για τις αντίστοιχες των ολικών εκπομπών NOx, οι καμπύλες των εκτιμημένων από τα δύο λογισμικά ειδικών εκπομπών, ταυτίζονται απόλυτα μεταξύ τους. Επιπλέον, στα Σχήματα 10.9 και 10.10 είναι εμφανές ότι οι ειδικές εκπομπές NOx διατηρούνται σχεδόν σταθερές σε όλο το φάσμα των στροφών λειτουργίας και για κάθε φορτίο.



Σχήμα 10.9 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



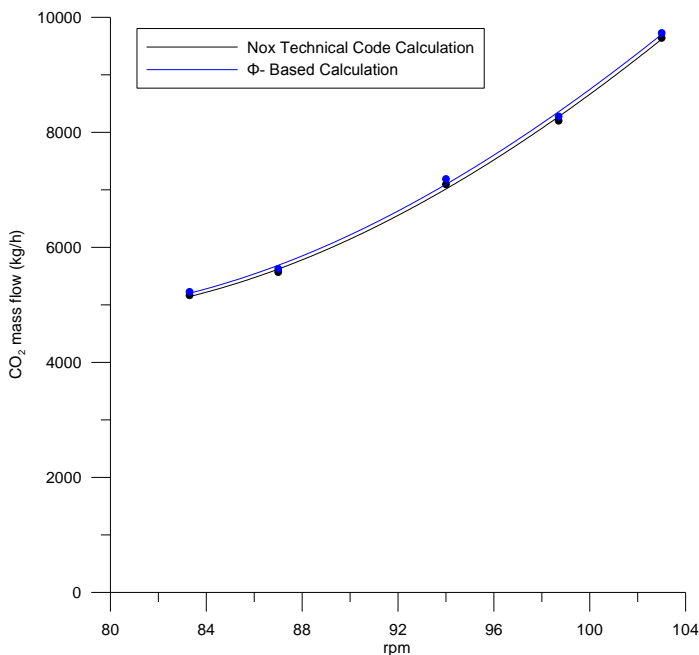
Σχήμα 10.10 Μεταβολή ειδικών εκπομπών NOx συναρτήσει του φορτίου

10.5 Εκπομπές CO₂

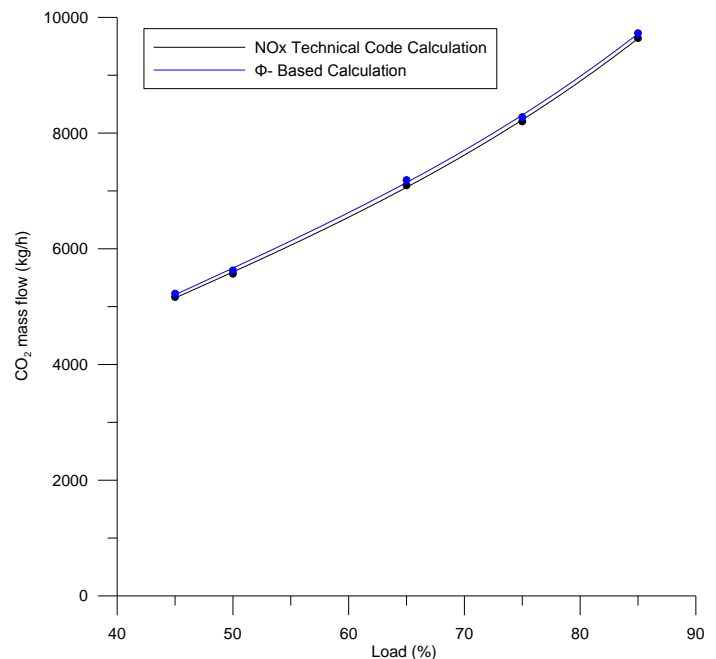
Το διοξείδιο του άνθρακα δεν μπορεί να θεωρηθεί ουσιαστικά ρύπος καθώς αποτελεί άμεσο και αναπόφευκτο προϊόν της καύσης. Ανήκει, όμως, στην κατηγορία των «αερίων του θερμοκηπίου». Οι αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα από ανθρώπινη δραστηριότητα οδηγούν στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Παρόλαυτα, η ναυτιλία έχει μέχρι στιγμής εξαιρεθεί από το πλαίσιο του Κιότο για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Όσον αφορά τον ανθρώπινο οργανισμό το CO₂, μόνο σε εξαιρετικά μεγάλες συγκεντρώσεις (8% και άνω), μπορεί να προκαλέσει πονοκεφάλους, θολή όραση και παραισθήσεις

Η μεθοδολογία του Τεχνικού Κώδικα NOx 2008 δεν περιορίζεται μόνο στον υπολογισμό των εκπομπών οξειδίων του αζώτου αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό εκπομπών και άλλων ρύπων. Χρησιμοποιήθηκαν το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση για τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂.

Στα Σχήματα 10.11 και 10.12 παρουσιάζεται η μεταβολή των ολικών εκπομπών CO₂ σε κιλά ανά ώρα σε συνάρτηση με τις στροφές λειτουργίας και το φορτίο αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι και τα δύο διαγράμματα δείχνουν ότι ο εκπομπές CO₂ αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου και των στροφών. Επιπλέον, σε όλο το εύρος των στροφών αλλά και του φορτίου οι ολικές εκπομπές CO₂ που υπολογίστηκαν τόσο με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 αλλά και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση ταυτίζονται απόλυτα.

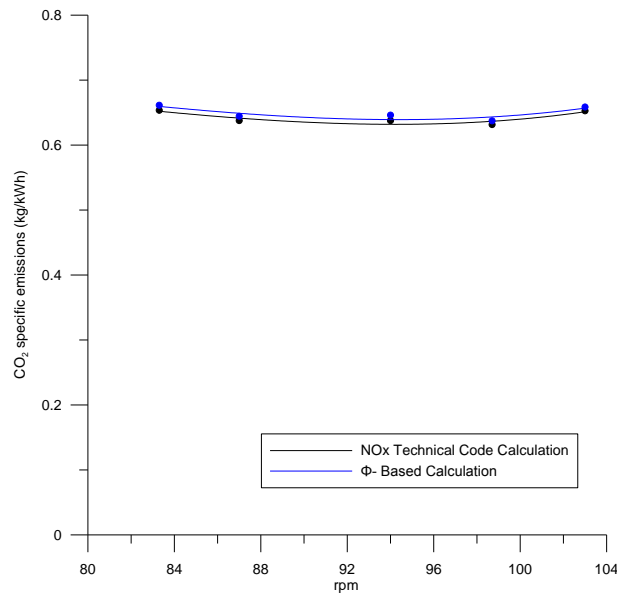


Σχήμα 10.11 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

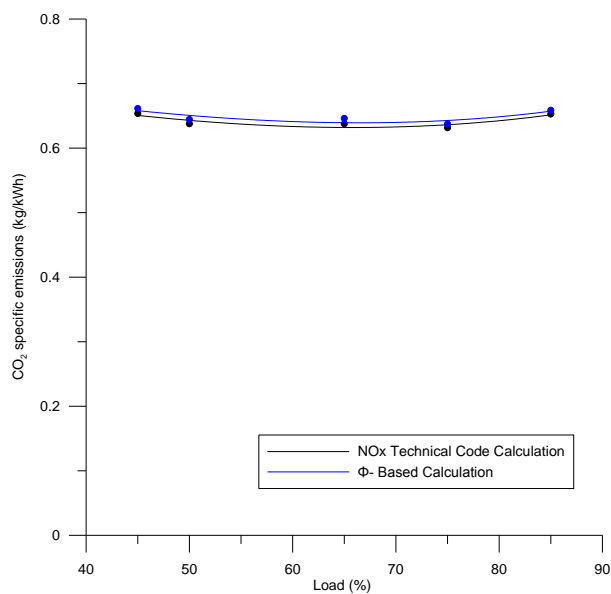


Σχήμα 10.12 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου

Στα Σχήματα 10.13 και 10.14 παρουσιάζεται η μεταβολή των ειδικών εκπομπών CO₂ σε kg/kWh συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου αντίστοιχα. Είναι εμφανές και από τα δύο διαγράμματα ότι οι ειδικές εκπομπές CO₂ παραμένουν σχεδόν σταθερές σε μια τιμή λίγο πάνω 0.6kg/kWh σε όλο το φάσμα του φορτίου και των στροφών λειτουργίας. Επιπλέον οι καμπύλες των εκτιμημένων με τις δύο μεθοδολογίες τιμών των ειδικών εκπομπών CO₂ ταυτίζονται σε κάθε σημείο λειτουργίας της μηχανής.



Σχήμα 10.13 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

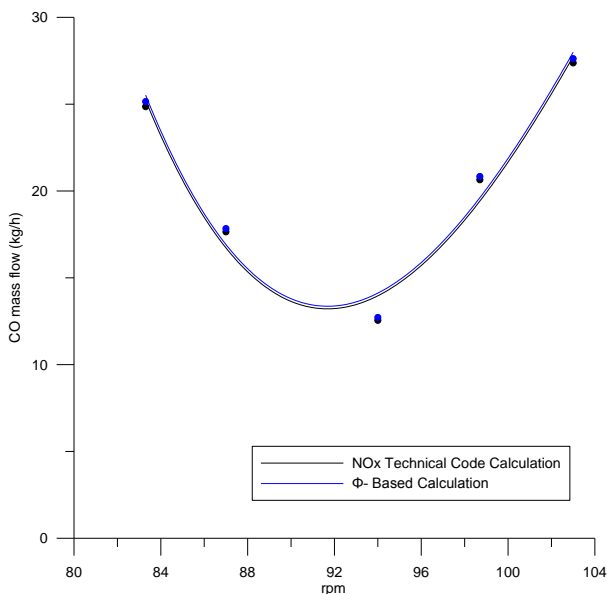


Σχήμα 10.14 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO₂ συναρτήσει του φορτίου

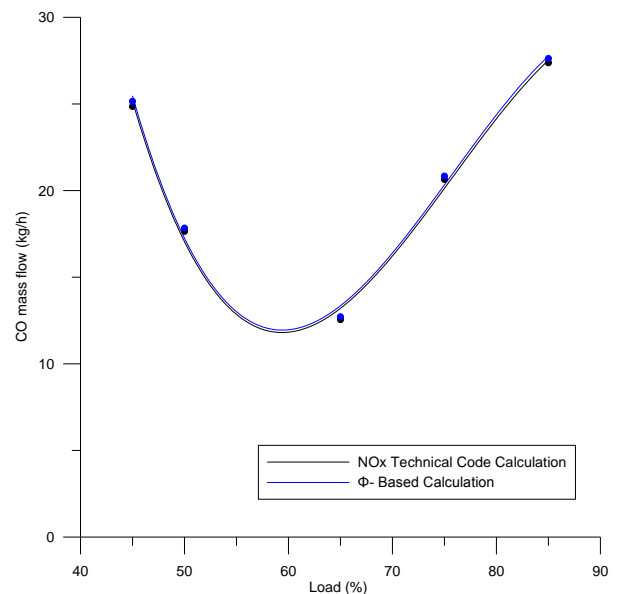
10.6 Εκπομπές CO

Η ίδια διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για τις εκπομπές CO₂ ακολουθείται και για τις εκπομπές CO. Στα Σχήματα 10.15 και 10.16 παρουσιάζεται η παροχή CO συναρτήσει των στροφών λειτουργίας και του φορτίου αντίστοιχα όπως υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και με το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση. Παρατηρούνται διακυμάνσεις των ολικών εκπομπών CO με τη μεταβολή του φορτίου και των στροφών λειτουργίας. Αυτές οι μεταβολές οφείλονται στο γεγονός ότι τα CO εκπέμπονται όταν η καύση στους κυλίνδρους δεν είναι τέλεια. Οι κινητήρες είναι σχεδιασμένοι ώστε να έχουν κάποιο σημείο κανονικής λειτουργίας το οποίο κρίνοντας από τα Σχήματα 10.15 και 10.16 βρίσκεται στο 60% του φορτίου και σε 90rpm για τον Κινητήρα E. Στο Σχήμα 10.15 σε περιοχή στροφών κοντά στις 90rpm η καμπύλη ολικών εκπομπών CO παρουσιάζει ελάχιστο. Το ίδιο συμβαίνει σε περιοχή φορτίου κοντά στο 60%. Το ελάχιστο στις δύο καμπύλες συνεπάγεται καλύτερη καύση του μίγματος στους κυλίνδρους.

Επιπλέον, σε όλο το εύρος των στροφών αλλά και του φορτίου οι ολικές εκπομπές CO που υπολογίστηκαν με το λογισμικό που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 ταυτίζονται με αυτές που υπολογίζει το λογισμικό που βασίζεται στην πραγματική και στοιχειομετρική καύση.

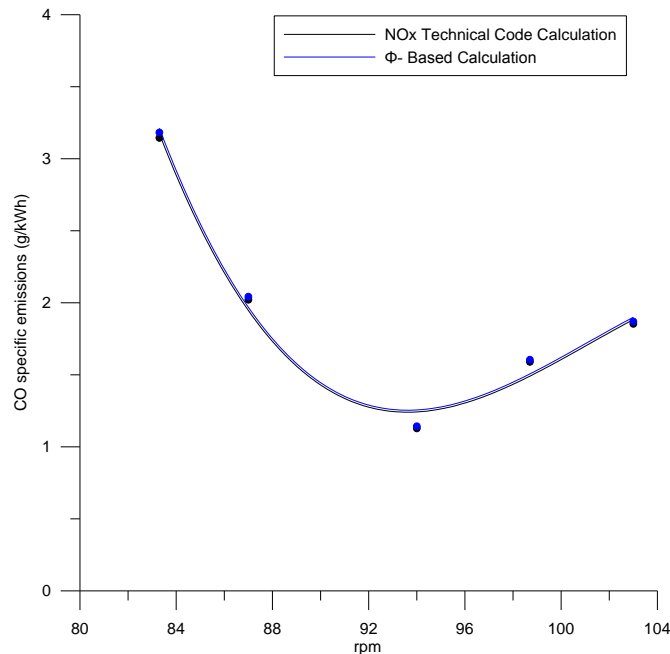


Σχήμα 10.15 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO συναρτήσει των στροφών λειτουργίας

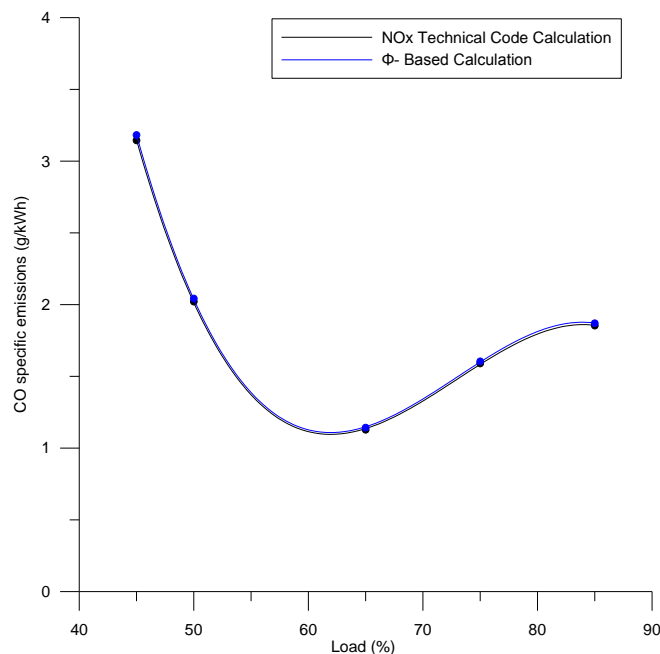


Σχήμα 10.16 Μεταβολή ολικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου

Στα Σχήματα 10.17 και 10.18 δίνονται οι εκτιμημένες τιμές των ειδικών εκπομπών CO που υπολογίστηκαν βάσει των δύο μεθοδολογιών εκτίμησης εκπομπών ρύπων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία, συναρτήσει των στροφών και του φορτίου λειτουργίας. Τα αποτελέσματα των δύο λογισμικών για ότι αφορά τις ειδικές εκπομπές CO ταυτίζονται απόλυτα. Οι καμπύλες ακολουθούν αρχικά πτωτική πορεία και μετά από τις 90rpm και για φορτίο 60% αυξάνουν.



Σχήμα 10.17 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO συναρτήσει των στροφών λειτουργίας



Σχήμα 10.18 Μεταβολή ειδικών εκπομπών CO συναρτήσει του φορτίου

11 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

11.1 Συμπεράσματα

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η ανάπτυξη και αξιολόγηση απλοποιημένων μεθοδολογιών για την εκτίμηση εκπομπών ρύπων από ναυτικούς κινητήρες diesel, με έμφαση στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου. Αναπτύχθηκαν δύο μεθοδολογίες εκτίμησης ειδικών εκπομπών ρύπων χρησιμοποιώντας μετρημένες συγκεντρώσεις. Η πρώτη μεθοδολογία δημιουργήθηκε σύμφωνα με τις υποδείξεις που περιέχονται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού. Η δεύτερη μεθοδολογία δημιουργήθηκε βασιζόμενη στις χημικές εξισώσεις της στοιχειομετρικής καύσης και της καύσης με περίσσεια αέρα.

Με σκοπό να αξιολογηθούν οι δύο μεθοδολογίες έγινε εφαρμογή τους σε μετρήσεις που περιέχονται σε τέσσερα NOx files ναυτικών κινητήρων diesel. Οι πρώτοι δύο κινητήρες (A και B) ήταν δίχρονοι, υπερπληρωμένοι, ναυτικοί, diesel κινητήρας κύριας πρόωσης πλοίου και οι δύο επόμενοι κινητήρες (C και D) ήταν τετράχρονοι, υπερπληρωμένοι, diesel, ναυτικοί κινητήρες ηλεκτροπαραγωγής, σταθερών στροφών. Επιπλέον, εξετάστηκαν : η επίπτωση σφάλματος μέτρησης στη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα στην εκτίμηση ειδικών εκπομπών NOx βάσει της πρώτης μεθοδολογίας και η επίπτωση σφάλματος μέτρησης στη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου στην εκτίμηση ειδικών εκπομπών NOx βάσει της δεύτερης μεθοδολογίας. Τέλος, έγινε εφαρμογή των μεθοδολογιών σε πειραματικές μετρήσεις από έναν δίχρονο, υπερπληρωμένο, ναυτικό κινητήρα κύριας πρόωσης πλοίου (Κινητήρας E)

Από τη διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας προκύπτει ότι:

- Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθοδολογίας εκτίμησης εκπομπών ρύπων που περιέχεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού και συμπεριλαμβάνει τις πιο πρόσφατες τροποποιήσεις που τέθηκαν σε ισχύ τον Ιούλιο του 2010 καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής της απλοποιημένης μεθοδολογίας που βασίζεται στις χημικές εξισώσεις της στοιχειομετρικής καύσης και της καύσης με περίσσεια αέρα γενικά ταυτίζονται.
- Όλοι οι κινητήρες που μελετήθηκαν βρίσκονται μέσα στα όρια του Tier I της συνθήκης MARPOL 73/78 Annex VI για ότι αφορά τις ειδικές εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx).
- Οι εκτιμημένες τιμές εκπομπών ρύπων που περιέχονται στα NOx files των τεσσάρων κινητήρων που μελετήθηκαν δεν παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από την εφαρμογή των δύο μεθοδολογιών εκτίμησης ρύπων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία.
- Οι ειδικές εκπομπές CO, CO₂, HC από τους τετράχρονους, ναυτικούς κινητήρες σταθερών στροφών που εξετάστηκαν είναι αυξημένες σε χαμηλό φορτίο.
- Πιθανό σφάλμα στη μέτρηση της συγκέντρωσης CO₂ οδηγεί σε ανάλογο σφάλμα στην εκτίμηση ειδικών εκπομπών NOx από τη μεθοδολογία που βασίζεται στον Τεχνικό Κώδικα NOx 2008 και από τη μεθοδολογία που βασίζεται στις χημικές εξισώσεις της στοιχειομετρικής καύσης και της καύσης με περίσσεια αέρα.
- Πιθανό σφάλμα στη μέτρηση της συγκέντρωσης O₂ οδηγεί σε ανάλογο σφάλμα στην εκτίμηση ειδικών εκπομπών NOx από τη μεθοδολογία που βασίζεται στις χημικές εξισώσεις της στοιχειομετρικής καύσης και της καύσης με περίσσεια αέρα

11.2 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Όπως αναφέρεται στην παρούσα διπλωματική εργασία ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου κατά την καύση στους κυλίνδρους κινητήρων diesel επηρεάζεται άμεσα από τη θερμοκρασία και την υγρασία του μίγματος. Για την εκτίμηση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου λαμβάνεται υπόψιν η θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος. Ως μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να εξεταστεί η ευαισθησία των μεθοδολογιών εκτίμησης εκπομπών ρύπων στην υγρασία και τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής. Επιπλέον θα μπορούσε να αναπτυχθεί μοντέλο αναγωγής των εκπομπών ρύπων σε συνθήκες αναφοράς ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση τους ανεξάρτητα από τις συνθήκες διεξαγωγής των μετρήσεων.

Επιπροσθέτως, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι απλοποιημένες μεθοδολογίες εκτίμησης εκπομπών οξειδίων του αζώτου από ναυτικούς κινητήρες diesel, ώστε να κατασκευαστεί μοντέλο εκτίμησης του αποτυπώματος NOx (NOx footprint) για τις μεταφορές προϊόντων δια θαλάσσης.

Τέλος, καθώς τόσο διεθνείς όσο και εθνικοί οργανισμοί για την ναυτιλία επιβάλλουν ή σκοπεύουν να επιβάλλουν περιορισμούς τόσο για την περιεκτικότητα των καυσίμων σε θείο (S) όσο και για τις εκπομπές οξειδίων του θείου θα παρουσίαζε ενδιαφέρον να γίνει μελέτη των εκπομπών οξειδίων του θείου στο περιβάλλον από ναυτικούς κινητήρες diesel.

12 Βιβλιογραφία

1. Κων. Δ. Ρακόπουλος:
«Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ», Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα 1998
2. Κων. Δ. Ρακόπουλος, Δημ. Θ. Χουντάλας:
«Καύση-Ρύπανση Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ», Εκδόσεις Φούντα, Αθήνα 1998
3. John B. Heywood:
“Internal Combustion Engine Fundamentals”
Mc Graw-Hill International Editions, Automotive Technology Series, 1988
4. International Maritime Organization:
“Resolution MEPC.177(58), Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides From Marine Diesel Engines”, 2008
5. Βαλάσκας Κωνσταντίνος Α.
Διπλωματική εργασία: «Η Συνθήκη MARPOL 73/78 και οι γενικότερες συνέπειες», 18-10-2007
6. Δέτσης Μηχαήλ
Διπλωματική εργασία: «Προσδιορισμός κατάστασης μηχανής diesel & των εκπομπών οξειδίων του αζώτου αυτής», 2009-2010
7. Σάββα Νικόλαος
Διπλωματική εργασία: «Ανάπτυξη ημιεμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης των εκπομπών του μονοξειδίου του αζώτου που εκλύεται από τους κινητήρες diesel χρησιμοποιώντας το δυναμοδεικτικό τους διάγραμμα σε δεδομένες συνθήκες λειτουργίας.», Οκτώβριος 2009
8. Πολυδωρίδης Α. Νίκος
Διπλωματική εργασία: «Τεχνικές Μείωσης των Εκπομπών Οξειδίων του Αζώτου (NOx) από Ναυτικούς Κινητήρες Diesel και Πρόληψη της Ρύπανσης από τη Ναυτιλία»
9. Paul Gothe Bochum
“Formula catalogue for measuring of particulate matter in flowing gas”-
www.paulgothe.de
10. Maritech News
Τεύχος 07, Ιανουάριος 2008
Εκδόσεις Ναυτιλιακών & Τεχνολογικών Εντύπων ΕΠΕ
11. Ν. Παπαγεωργίου
«Ατμοπαραγωγή Ι», Εκδόσεις Συμεών, 1991

12. DIRECTIVE 97/68/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 1997
13. ΝΟΜΟΣ ΥΠΑΡΙΘ.3104
Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας
Τεύχος πρώτο, Αριθμός Φύλλου 28, 10 Φεβρουαρίου 2003
14. Κ. Χ. Γιαννάκογλου, Ι. Αναγνωστόπουλος, Γ. Μπεργελές
«Αριθμητική Ανάλυση για Μηχανικούς», 2003
15. MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark
«Emission Control MAN B&W Two-stroke Diesel Engines»
16. Φωτίου Κ. Προκόπιος
Διπλωματική εργασία: «Εφαρμογή και Αξιολόγηση Πολυζωνικού Μοντέλου Καύσης σε Κινητήρα Diesel Ηλεκτροπαραγωγής για την Εκτίμηση της Λειτουργίας και των Εκπομπών NOx»
17. Γλώσσα προγραμματισμού: Compaq Visual FORTRAN professional edition 6.6.A
18. Πρόγραμμα γραφικών: Grapher Version 7.0.1870 (2007)
19. Σελίδες από το διαδίκτυο (Internet sites):
- http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_engine
 - http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrogen_oxide#NOx
 - <http://www.dieselnet.com/standards/>
 - <http://marine.cummins.com/>
 - <http://www.wolframalpha.com/>
 - <http://www.cactus2000.de/js/calchum.pdf>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

KINHΘHPΑΣ A - NOx file

| Mode | unit | | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|---------|--------|--------|
| Test number | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Engine power | % | 100 | 75 | 50 | 25 |
| | kW | 16627.7 | 12475.7 | 8314.2 | 4157.1 |
| Engine speed | % | 100 | 91 | 79 | 63 |
| | RPM | 105.0 | 95.4 | 83.3 | 66.1 |
| Exh. Gas temp.at T/C outlet | °C | 217 | 210 | 245 | 251 |
| Ambient Data | | | | | |
| Charge air pressure | kPa | 304.0 | 220.6 | 121.6 | 39.2 |
| Barometric pressure | kPa | 102.7 | 102.7 | 102.7 | 102.7 |
| Ambient air humidity | % | 19.0 | 21.0 | 22.0 | 23.0 |
| Ambient air temperature | °C | 6.5 | 6.0 | 6.0 | 5.5 |
| Scavenge air temperature | °C | 38.0 | 34.0 | 32.0 | 20.0 |
| Intercooled air reference temperature | °C | 48.0 | 43.0 | 39.0 | 44.0 |
| Fuel | | | | | |
| Uncorrected fuel consumption | kg/h | 2977.6 | 2189.5 | 1482.7 | 773.5 |
| Exhaust Gas | | | | | |
| Gas flow | kg/h | 158067 | 124055 | 84037 | 44458 |
| Gaseous Emission Data | | | | | |
| CO concentration (Dry) | ppm | 84.5 | 65.0 | 135.0 | 312.0 |
| CO2 concentration (Dry) | % | 4.12 | 3.82 | 3.84 | 3.72 |
| HC concentration (Wet) | ppmC | 59.0 | 76.5 | 78.0 | 100.5 |
| O2 concentration (Dry) | % | 15.58 | 16.08 | 16.13 | 16.15 |
| NOx concentration (Dry) | ppm | 1018.0 | 1036.0 | 948.0 | 756.0 |
| NOx humidity/temp. correction factor | - | 0.879 | 0.877 | 0.873 | 0.911 |
| Dry/Wet correction factor | - | 0.966 | 0.968 | 0.968 | 0.969 |
| NOx mass flow | kg/h | 216.91 | 176.19 | 108.70 | 47.86 |
| Nox specific | g/kWh | 13.05 | 14.12 | 13.07 | 11.51 |
| Test Cycle (E3) | g/kWh | 13.55 | | | |
| Fuel Element Analysis | | | | | |
| C (Carbon) | % mass | 87.29 | | | |
| H (Hydrogen) | % mass | 11.86 | | | |
| N (Nitrogen) | % mass | 0.08 | | | |
| O (Oxygen) | % mass | 0.49 | | | |
| S (Sulphur) | % mass | 0.26 | | | |

KINHΘHPΑΣ B - NOx file

| Mode | unit | | | | |
|---------------------------------------|-------------|---------|--------|--------|--------|
| Test number | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Engine power | % | 100 | 75 | 50 | 25 |
| | kW | 11069.1 | 8301 | 5538.4 | 2765.5 |
| Engine speed | % | 100 | 91 | 79 | 63 |
| | RPM | 127.0 | 115.4 | 100.8 | 80.0 |
| Exh. Gas temp.at T/C outlet | °C | 234 | 207 | 220 | 230 |
| Ambient Data | | | | | |
| Charge air pressure | kPa | 304.0 | 220.6 | 121.6 | 39.2 |
| Barometric pressure | kPa | 102.5 | 102.5 | 102.5 | 102.5 |
| Ambient air humidity | % | 8.0 | 10.0 | 10.0 | 12.0 |
| Ambient air temperature | °C | 8.0 | 5.8 | 6.5 | 11.7 |
| Scavenge air temperature | °C | 40.0 | 37.0 | 34.0 | 36.0 |
| Intercooled air reference temperature | °C | 48.0 | 43.0 | 39.0 | 44.0 |
| Fuel | | | | | |
| Uncorrected fuel consumption | kg/h | 1978.9 | 1457.7 | 984.9 | 502.5 |
| Exhaust Gas | | | | | |
| Gas flow | kg/h | 99458 | 83452 | 58412 | 32751 |
| Gaseous Emission Data | | | | | |
| CO concentration (Dry) | ppm | 62.0 | 54.0 | 42.0 | 44.0 |
| CO2 concentration (Dry) | % | 4.34 | 3.79 | 3.67 | 3.32 |
| HC concentration (Wet) | ppmC | 74.0 | 79.0 | 79.5 | 75.5 |
| O2 concentration (Dry) | % | 15.23 | 15.95 | 16.15 | 16.58 |
| NOx concentration (Dry) | ppm | 1172.0 | 1186.0 | 1218.0 | 1152.0 |
| NOx humidity/temp. correction factor | - | 0.873 | 0.864 | 0.864 | 0.885 |
| Dry/Wet correction factor | - | 0.965 | 0.969 | 0.970 | 0.972 |
| NOx mass flow | kg/h | 155.83 | 131.58 | 94.62 | 51.52 |
| Nox specific | g/kWh | 14.08 | 15.85 | 17.08 | 18.63 |
| Test Cycle (E3) | g/kWh | 15.62 | | | |
| Fuel Element Analysis | | | | | |
| C (Carbon) | % mass | 87.32 | | | |
| H (Hydrogen) | % mass | 11.86 | | | |
| N (Nitrogen) | % mass | 0.07 | | | |
| O (Oxygen) | % mass | 0.5 | | | |
| S (Sulphur) | % mass | 0.23 | | | |

KINHΘHPΑΣ C - NOx file

| Mode | unit | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Test number | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Engine power | % | 100 | 75 | 50 | 25 | 10 |
| | kW | 1120 | 840 | 560 | 280 | 112 |
| Engine speed | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | RPM | 720.0 | 720.0 | 720.0 | 720.0 | 720.0 |
| Exh. Gas temp.at T/C outlet | °C | 310 | 300 | 315 | 310 | 260 |
| Ambient Data | | | | | | |
| Charge air pressure | kPa | 275.6 | 199.1 | 40.2 | 121.6 | 9.8 |
| Barometric pressure | kPa | 102.8 | 102.8 | 102.8 | 102.8 | 102.8 |
| Ambient air humidity | % | 38.7 | 39.1 | 38.2 | 37.8 | 36.6 |
| Ambient air temperature | °C | 24.0 | 24.6 | 25.0 | 25.2 | 26.2 |
| Scavenge air temperature | °C | 44.0 | 44.0 | 43.0 | 42.0 | 42.0 |
| Intercooled air reference temperature | °C | 44.0 | 44.0 | 43.0 | 42.0 | 42.0 |
| Fuel | | | | | | |
| Uncorrected fuel consumption | kg/h | 217.6 | 163.4 | 114.6 | 61.8 | 34.6 |
| Exhaust Gas | | | | | | |
| Gas flow | kg/h | 7884 | 6350 | 4678 | 2799 | 2123 |
| Gaseous Emission Data | | | | | | |
| CO concentration (Dry) | ppm | 29.1 | 32.7 | 41.4 | 64.5 | 103.5 |
| CO2 concentration (Dry) | % | 6.03 | 5.70 | 5.40 | 4.85 | 3.53 |
| HC concentration (Wet) | ppmC | 111.0 | 123.5 | 148.0 | 142.5 | 141.5 |
| O2 concentration (Dry) | % | 12.65 | 13.40 | 13.78 | 14.55 | 16.30 |
| NOx concentration (Dry) | ppm | 1210.0 | 1140.0 | 940.0 | 702.0 | 384.0 |
| NOx humidity/temp. correction factor | - | 0.956 | 0.961 | 0.962 | 0.963 | 0.968 |
| Dry/Wet correction factor | - | 0.942 | 0.944 | 0.946 | 0.951 | 0.960 |
| NOx mass flow | kg/h | 13.64 | 10.43 | 6.36 | 2.85 | 1.20 |
| Nox specific | g/kWh | 12.18 | 12.41 | 11.35 | 10.19 | 10.73 |
| Test Cycle (D2) | g/kWh | 11.66 | | | | |
| Fuel Element Analysis | | | | | | |
| C (Carbon) | % mass | 87.32 | | | | |
| H (Hydrogen) | % mass | 11.84 | | | | |
| N (Nitrogen) | % mass | 0.08 | | | | |
| O (Oxygen) | % mass | 0.51 | | | | |
| S (Sulphur) | % mass | 0.23 | | | | |

KINHΘPAΣ D – NOx file

| Mode | unit | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Test number | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Engine power | % | 100 | 75 | 50 | 25 | 10 |
| | kW | 745 | 559 | 373 | 186 | 75 |
| Engine speed | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | RPM | 720.0 | 720.0 | 720.0 | 720.0 | 720.0 |
| Exh. Gas temp.at T/C outlet | °C | 356.4 | 3652.4 | 365.8 | 318.6 | 241.4 |
| Ambient Data | | | | | | |
| Charge air pressure | kPa | 343.5 | 261.5 | 188.5 | 132.5 | 108.9 |
| Barometric pressure | kPa | 101.5 | 101.5 | 101.5 | 101.5 | 101.5 |
| Ambient air humidity | % | 68.7 | 67.8 | 67.8 | 68.7 | 67.1 |
| Ambient air temperature | °C | 27.6 | 27.6 | 27.6 | 27.4 | 27.8 |
| Scavenge air temperature | °C | 48.4 | 46.2 | 46.0 | 45.3 | 44.4 |
| Intercooled air reference temperature | °C | 48.0 | 46.0 | 46.0 | 45.0 | 44.0 |
| Fuel | | | | | | |
| Uncorrected fuel consumption | kg/h | 149 | 111.9 | 76.2 | 42.4 | 23.4 |
| Exhaust Gas | | | | | | |
| Gas flow | kg/h | 5171.1 | 3911.5 | 2733.6 | 1746.6 | 1317.3 |
| Gaseous Emission Data | | | | | | |
| CO concentration (Dry) | ppm | 46.4 | 55.9 | 51.5 | 67.8 | 98.6 |
| CO2 concentration (Dry) | % | 12.21 | 12.33 | 12.58 | 13.64 | 15.63 |
| HC concentration (Wet) | ppm | 96.6 | 101.6 | 131.3 | 128.8 | 136.3 |
| O2 concentration (Dry) | % | 12.13 | 12.25 | 12.50 | 13.56 | 15.56 |
| NOx concentration (Dry) | ppm | 953.0 | 1027.0 | 1037.0 | 833.0 | 370.0 |
| NOx humidity/temp. correction factor | - | 1.070 | 1.069 | 1.069 | 1.067 | 1.069 |
| Dry/Wet correction factor | - | 0.921 | 0.922 | 0.923 | 0.930 | 0.942 |
| NOx mass flow | kg/h | 7.85 | 6.39 | 4.52 | 2.33 | 0.79 |
| CO2 mass flow | kg/h | 470.0 | 352.9 | 240.3 | 133.6 | 73.7 |
| CO mass flow | kg/h | 217.50 | 198.30 | 127.90 | 108.40 | 120.40 |
| HC mass flow | kg/h | 0.243 | 0.194 | 0.175 | 0.110 | 0.088 |
| Nox specific | g/kWh | - | - | - | - | - |
| Test Cycle (E3) | g/kWh | 11.8 | | | | |
| Fuel Element Analysis | | | | | | |
| C (Carbon) | % mass | 86.88 | | | | |
| H (Hydrogen) | % mass | 13.05 | | | | |
| N (Nitrogen) | % mass | 0.01 | | | | |
| O (Oxygen) | % mass | 0.00 | | | | |
| S (Sulphur) | % mass | 0.06 | | | | |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ Ε – Δεδομένα Πειραματικών Μετρήσεων

| Mode | unit | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Test number | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Engine power | % | 45 | 50 | 65 | 75 | 85 |
| | kW | 7904 | 8732 | 11126 | 12986 | 14769 |
| Engine speed | % | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | RPM | 83.3 | 87 | 94 | 98.7 | 103 |
| Exh. Gas temp.at T/C outlet | °C | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Ambient Data | | | | | | |
| Charge air pressure | kPa | 105 | 125 | 175 | 225 | 185 |
| Barometric pressure | kPa | 101 | 101 | 100.9 | 100.9 | 100.9 |
| Ambient air humidity | % | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Ambient air temperature | °C | 293.0 | 293.0 | 293.0 | 293.0 | 293.0 |
| Scavenge air temperature | °C | 31.0 | 31.0 | 34.0 | 37.0 | 40.0 |
| Intercooled air reference temperature | °C | 39.0 | 39.0 | 41.0 | 43.0 | 45.3 |
| Fuel | | | | | | |
| Uncorrected fuel consumption | kg/h | 1659.8 | 1784.1 | 2268.3 | 2624.4 | 3087.9 |
| Gaseous Emission Data | | | | | | |
| CO concentration (Dry) | ppm | 337 | 218 | 120 | 170 | 198 |
| CO ₂ concentration (Dry) | % | 4.46 | 4.38 | 4.32 | 4.3 | 4.44 |
| HC concentration (Wet) | ppm | - | - | - | - | - |
| O ₂ concentration (Dry) | % | 15.06 | 15.15 | 15.29 | 15.23 | 15.03 |
| NO _x concentration (Dry) | ppm | 870 | 870 | 913 | 898 | 912 |
| Fuel Element Analysis | | | | | | |
| C (Carbon) | % mass | 86.2 | | | | |
| H (Hydrogen) | % mass | 12.4 | | | | |
| N (Nitrogen) | % mass | 0.0 | | | | |
| O (Oxygen) | % mass | 0.0 | | | | |
| S (Sulphur) | % mass | 1.42 | | | | |