



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής

&

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ**

Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών



ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ»

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ**

**COMPARATIVE STUDY OF ELECTRONICALLY CONTROLLED AND
CONVENTIONAL MARINE ENGINES**

Όνοματεπώνυμο Φοιτητή:

ΣΚΑΜΝΕΛΟΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ

Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:

Δρ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Δ. ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2024

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΔΡΟΣΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος Σκαμνέλος Παντελής του Λάμπρου, με αριθμό μητρώου8066247..... φοιτητής του Διϋδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής της Σχολής Μηχανικών Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο δηλών

Σκαμνέλος Παντελής



Ημερομηνία

29/03/2024

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ**

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

ΣΚΑΜΝΕΛΟΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Διϋδραματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη επιχειρεί μια ολοκληρωμένη εξέταση των “Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενων Κινητήρων Ντίζελ (Electronically Controlled Diesel Engines - ECDE)” σε αντίθεση με τους “Συμβατικούς Κινητήρες Ντίζελ (Conventional Diesel Engines - CDE)” στο πλαίσιο της ναυτικής πρόωσης. Με στόχο να διακρίνει τον πιο αποδοτικό τύπο κινητήρα για τα σύγχρονα και μελλοντικά πλοία, η παρούσα εργασία διερευνά τη σχετική βιβλιογραφία που καλύπτει διάφορες παραμέτρους, όπως την κατανάλωση καυσίμου, την απόδοση ισχύος, τις εκπομπές ρύπων, την αξιοπιστία και την οικονομική βιωσιμότητα. Τα ευρήματα αποκαλύπτουν ότι οι ECDE, εξοπλισμένοι με εξελιγμένα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, υπερτερούν των CDE σε διάφορους τομείς. Επιτρέπουν βελτιωμένες δυνατότητες παρακολούθησης, ελέγχου και διάγνωσης και εξασφαλίζουν βέλτιστη απόδοση με μειωμένη συντήρηση. Οι ECDE επιδεικνύουν σταθερά ανώτερη απόδοση καύσης, οδηγώντας σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών. Αντίθετα, ενώ οι CDE αρχικά είναι οικονομικότεροι, τείνουν να έχουν υψηλότερο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Επιπλέον, η ικανότητα των ECDE να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους ανάλογα με τις θαλάσσιες συνθήκες και τις συνθήκες που σχετίζονται με το φορτίο, αυξάνει περαιτέρω την αποδοτικότητα και την περιβαλλοντική τους συμβατότητα. Αν και το αρχικό κόστος και η πολυπλοκότητα της εγκατάστασης των ECDE μπορεί να είναι υψηλότερα, τα μακροπρόθεσμα οφέλη από τη μείωση του λειτουργικού κόστους και την αύξηση της αποδοτικότητας τις καθιστούν μια πιο οικονομικά ορθή επένδυση. Ουσιαστικά, η έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι ECDE, συμπεριλαμβανομένων των βελτιωμένων επιδόσεων, του ακριβούς ελέγχου του κινητήρα και των προηγμένων διαγνωστικών δυνατοτήτων, τους καθιστούν ιδανική επιλογή για τα σύγχρονα πλοία.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενοι Κινητήρες Ντίζελ, Συμβατικοί Κινητήρες Ντίζελ, Πρόωση, Απόδοση Κινητήρα

Abstract

This study attempts a comprehensive examination of "Electronically Controlled Diesel Engines (ECDE)" as opposed to "Conventional Diesel Engines (CDE)" in the context of marine propulsion. In order to distinguish the most efficient engine type for modern and future ships, this paper explores the relevant literature covering various parameters such as fuel consumption, power efficiency, emissions, reliability and economic viability. The findings reveal that ECDEs, equipped with sophisticated electronic control systems, outperform CDEs in several areas. They enable improved monitoring, control and diagnostic capabilities and ensure optimal performance with reduced maintenance. ECDEs consistently demonstrate superior combustion efficiency, leading to significant reductions in fuel consumption and emissions. Conversely, while CDEs are initially more cost-effective, they tend to have higher operating and maintenance costs over their life cycle. In addition, the ability of ECDEs to adapt their operation according to sea and load-related conditions further increases their efficiency and environmental compatibility. Although the initial cost and complexity of installing ECDEs may be higher, the long-term benefits of reduced operating costs and increased efficiency make them a more economically sound investment. In essence, the research concludes that the advantages offered by ECDEs, including improved performance, precise engine control and advanced diagnostic capabilities, make them an ideal choice for modern ships.

Keywords: Electronically Controlled Diesel Engines, Conventional Diesel Engines, Propulsion, Engine Performance

Περιεχόμενα

<u>Περίληψη</u>	5
<u>Abstract</u>	6
<u>1. Εισαγωγή</u>	9
<u>2. Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενοι Κινητήρες</u>	12
<u>2.1. Χαρακτηριστικά των Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενων Κινητήρων τύπου Common Rail</u>	13
<u>2.2. Πίεση Ψεκασμού Καυσίμου</u>	14
<u>2.3. Έλεγχος Ψεκασμού Καυσίμου</u>	15
<u>2.4. Κινητήρες W-X με Ηλεκτρονικό Έλεγχο</u>	16
<u>2.5. Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενοι Κινητήρες MAN B&W ME</u>	17
<u>2.5.1. Μειωμένη Κατανάλωση Καυσίμου</u>	17
<u>2.5.2. Λειτουργική Ασφάλεια και Ευελιξία</u>	18
<u>2.5.3. Ευελιξία Εκπομπών Καυσαερίων</u>	19
<u>2.5.4. Λειτουργία κινητήρα MAN ME</u>	21
<u>2.5.5. Σύστημα ψεκασμού καυσίμου</u>	22
<u>2.5.6. Σύστημα Ελέγχου των Κινητήρων ME</u>	24
<u>2.5.7. Λειτουργία</u>	24
<u>2.6. Ηλεκτρονικός Έλεγχος Κινητήρων Diesel και Εκπομπές NO_x</u>	27
<u>3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Εφαρμογών Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Κινητήρων Ντίζελ</u>	30
<u>3.1. Έξυπνο Διαγνωστικό Εργαλείο Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Κινητήρα Ντίζελ</u> 30	
<u>3.1.1. Εφαρμογή Διαγνωστικού Εργαλείου</u>	31
<u>3.2. Τεχνολογία Ευφυούς Διάγνωσης Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Συστήματος Έγχυσης Καυσίμου Κινητήρα Diesel</u>	34
<u>3.2.1. Αρχή Λειτουργίας και Κοινές Βλάβες</u>	37

3.2.2.	<u>Προκλήσεις της Τεχνολογία Ευφυούς Διάγνωσης</u>	42
3.2.3.	<u>Μελλοντική Τάση Ανάπτυξης της Τεχνολογίας</u>	44
3.3.	<u>Πρόβλεψη Εκπομπών NOx και Απόδοση Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Κινητήρα Ντίζελ</u>	45
3.3.1.	<u>Μοντέλο Μηδενικών Διαστάσεων των Scarpin et al. (2012)</u>	47
3.3.2.	<u>Επίδραση της Μέγιστης Πίεσης σε SFC και Εκπομπές NOX</u>	52
3.3.3.	<u>Επίδραση της Πίεσης Συμπίεσης στο SFC και στις Εκπομπές NOX</u>	53
3.3.4.	<u>Επίδραση Πίεσης Σάρωσης Κυλίνδρου στο SFC και στις Εκπομπές NOX</u>	53
3.4.	<u>Πρόβλεψη Εκπομπών Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Κινητήρα Ντίζελ Βάσει Μοντελοποίησης Νευρωνικών Δικτύων</u>	55
3.4.1.	<u>Το Μοντέλο BP ANN των Wang et al. (2010)</u>	57
4.	<u>Σύγκριση Μεταξύ Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Ναυτιλιακού Κινητήρα Ντίζελ και Συμβατικού Κινητήρα</u>	66
4.1.	<u>Περιπτώσεις Κινητήρων Ντίζελ</u>	67
4.1.1.	<u>Η Σειρά 4000 της MTU</u>	68
4.1.2.	<u>Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας ντίζελ CAT 3516C</u>	70
4.1.3.	<u>Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας ντίζελ MAN 6L23/30H Mk3</u>	71
4.1.4.	<u>Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας ντίζελ Wärtsilä 31</u>	72
4.2.	<u>Σύγκριση στην Κατανάλωση Καυσίμου</u>	73
4.3.	<u>Σύγκριση Ισχύος Εξόδου</u>	74
4.4.	<u>Σύγκριση Εκπομπών Ρύπων</u>	74
4.5.	<u>Σύγκριση στην Αξιοπιστία</u>	76
4.6.	<u>Οικονομική Σύγκριση</u>	77
4.7.	<u>Συγκριτικός Πίνακας</u>	78
5.	<u>Συμπεράσματα</u>	80
	<u>Βιβλιογραφία</u>	81

Εισαγωγή

Καθώς το παγκόσμιο περιβάλλον επιδεινώνεται με τη μείωση των ορυκτών καυσίμων, υπάρχουν αυξανόμενες απαιτήσεις για εξοικονόμηση ενέργειας και τεχνολογίες χαμηλής ρύπανσης. Τα συστήματα τροφοδοσίας καυσίμου ντίζελ χρησιμοποιούνται σε παραδοσιακά θαλάσσια συστήματα ενέργειας στις εσωτερικές πλωτές μεταφορές, ειδικά σε πολλές ασιατικές χώρες (Cheenkachorn et al., 2013).

Οι κινητήρες με ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως μεγαλύτερη ακρίβεια ελέγχου, λιγότερες εκπομπές ρύπων, χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου κ.λπ. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης σημαντικά μειονεκτήματα στο υπάρχον ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου: το λογισμικό αναπτύσσεται χειροκίνητα με προγραμματισμό στη γλώσσα C, οι στρατηγικές ελέγχου εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας κλασικούς αλγόριθμους PID ελέγχου και απαιτείται περισσότερος χρόνος για την παραγωγή του συστήματος. Αντίθετα, ο σχεδιασμός βάσει μοντέλου (Model based design, MBD) είναι μια πιο αποτελεσματική μέθοδος για την ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου. Στη διαδικασία του MBD, σύγχρονοι αλγόριθμοι ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση πιο σύνθετων στρατηγικών ελέγχου και ο κώδικας C μπορεί να δημιουργηθεί αυτόματα μέσω ενός μοντέλου. Έτσι, το MBD μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια ελέγχου και την αξιοπιστία του λογισμικού, να μειώσει το χρόνο ανάπτυξης και να μειώσει τα σφάλματα λειτουργίας.

Για τη μείωση των εκπομπών κινητήρων ντίζελ και τη διατήρηση της απόδοσης ισχύος, πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε διαφορετικούς τύπους καθαρών καυσίμων ως υποκατάστατα για την αντικατάσταση του πρωτογενούς καυσίμου ντίζελ, όπως ο διμεθυλαιθέρας (DME) (Park and Lee, 2014, 2013), το υδρογόνο (Dhole et al., 2014), το φυσικό αέριο (Tarabet et al., 2014; Papagiannakis et al., 2007) και ούτω καθεξής. Ειδικά στην Κίνα, το φυσικό αέριο έχει προσελκύσει την προσοχή πολλών ερευνητών λόγω των άφθονων αποθεμάτων και της πρακτικότητας του. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται με τη μορφή συμπιεσμένου φυσικού αερίου (compressed natural gas, CNG) και υγρού φυσικού αερίου (liquid natural gas, LNG). Το CNG χρησιμοποιείται συχνά σε ταξί και λεωφορεία στην Κίνα λόγω του

χαμηλότερους κόστους και της καλύτερης απόδοσής του (Wang et al., 2012). Σε σύγκριση με το CNG, το LNG είναι πιο αποδοτικό όσον αφορά την αποθήκευση, την ασφάλεια και την ευκολία μεταφοράς, ειδικά στα πλοία. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι το LNG προτιμάται για μακροχρόνια χρήση, είναι πιο οικονομικό σε συστήματα μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων (Verbeek et al., 2011), είναι πιο φιλικό προς το περιβάλλον (Arteconi et al., 2010), και έχει υψηλότερη απόδοση (Chandler and Proc, 2004).

Τα συστήματα παροχής φυσικού αερίου κινητήρα έχουν τέσσερις κύριες μορφές: Πρώτον, υπάρχει ένας αναμίκτης παρόμοιος με ένα καρμπυρατέρ στο σύστημα παροχής αερίου του κινητήρα, όπου το αέριο και ο αέρας απορροφώνται και αναμειγνύονται από την αρνητική πίεση του κυλίνδρου. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτού του αναμικτήρα είναι η απλή του δομή, αλλά είναι δύσκολο να ελεγχθεί με ακρίβεια η αναλογία αέρα προς καύσιμο (air to fuel ratio, AFR). Δεύτερον, το σύστημα έγχυσης ενός σημείου (single-point injection system, SPI) έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως απλή δομή, αξιόπιστη κατάσταση λειτουργίας, χαμηλό κόστος, ευκολία συντήρησης κ.λπ. Τρίτον, το σύστημα έγχυσης πολλαπλών σημείων (multiple-point injection system, MPI) (Wiens et al., 2002) είναι ακριβές, ομοιόμορφο και σταθερό και παρουσιάζει καλή απόκριση και χαρακτηριστικά χαμηλών εκπομπών, αλλά είναι πολύπλοκο και δαπανηρό. Τέταρτον, το σύστημα άμεσης έγχυσης αερίου (gas direct injection, GDI) (Dimitrescu et al., 2000) μπορεί να προσαρμόσει με ακρίβεια τις ποσότητες φυσικού αερίου ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα. Ωστόσο, υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις για ολόκληρο τον κινητήρα, με αποτέλεσμα μια πολύπλοκη δομή. Όπως είναι γνωστό, ο κινητήρας ντίζελ του οχήματος έχει πολλές συνθήκες εργασίας, με διακυμάνσεις στην ταχύτητα από 600 rpm έως 3000 rpm και φορτία από 0% έως 100%, όπως εκκίνηση, ρελαντί, θέρμανση, γρήγορη επιτάχυνση, γρήγορη επιβράδυνση, ανοδική κλίση, πλήρη φορτία, και ούτω καθεξής. Αυτή η παραλλαγή είναι ο λόγος για τον οποίο λέγεται ότι οι κινητήρες ντίζελ των οχημάτων λειτουργούν υπό επιφανειακές συνθήκες. Ωστόσο, οι πετρελαιοκινητήρες θαλάσσης λειτουργούν ως επί το πλείστον υπό συνθήκες πλευσης, επιτάχυνσης, στροφής και όπισθεν, ενώ πληρούν τα χαρακτηριστικά πρόωσης. Ο πετρελαιοκινητήρας θαλάσσης λειτουργεί συχνά σε γραμμικές συνθήκες με ποικίλες ταχύτητες από 600 rpm έως 1500 rpm. Επομένως, το SPI μπορεί να

καλύπτει την απαίτηση ακρίβειας ελέγχου για κινητήρες πλοίων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η θερμοκρασία ανάφλεξης του φυσικού αερίου είναι πολύ υψηλή, πολλά πιλοτικά καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάφλεξη φυσικού αερίου (Lounici et al., 2014), όπως DME, υδρογόνο , καύσιμο ντίζελ και ούτω καθεξής. Μεταξύ αυτών των πιλοτικών καυσίμων, το καύσιμο ντίζελ χρησιμοποιείται συχνά για την ανάφλεξη του φυσικού αερίου, επειδή οι κινητήρες διπλού καυσίμου βασίζονται γενικά σε κινητήρες ντίζελ.

Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενοι Κινητήρες

Ο ηλεκτρονικός έλεγχος με χρήση υπολογιστή και το σύστημα common rail για τον ψεκασμό καυσίμου εφαρμόζονται ως γενικές τεχνολογίες για κινητήρες εσωτερικής καύσης με καύσιμο ντίζελ. Το common rail είναι ένα σύστημα έγχυσης καυσίμου για κινητήρες ντίζελ που αυξάνει την πίεση καυσίμου χρησιμοποιώντας αντλίες, προσσωρεύει το καύσιμο στον κοινό σωλήνα υψηλής πίεσης (common rail) και εγχέει το συσσωρευμένο καύσιμο υψηλής πίεσης σε κάθε κύλινδρο στον απαιτούμενο χρόνο μέσω ηλεκτρονικά ελεγχόμενων βαλβίδων. Υπήρχαν πολλά τεχνικά ζητήματα που έπρεπε να επιλυθούν για την εφαρμογή της τεχνολογίας common rail, αφενός επειδή η ποσότητα ψεκασμού καυσίμου για μεγάλου μεγέθους δίχρονους κινητήρες θαλάσσης είναι περίπου 4000 φορές μεγαλύτερη από τους κινητήρες αυτοκινήτων και αφετέρου επειδή το υψηλού ιξώδους Βαρύ Πετρέλαιο (Heavy Fuel Oil, HFO) που χρησιμοποιείται στη ναυτιλία περιέχει σημαντικές ποσότητες ρύπων.

Οι συνεργαζόμενες εταιρίες Diesel United Ltd. (DU) και η εταιρία Winterthur Gas & Diesel Ltd. (Ελβετία) - η πρώην Wärtsilä Switzerland Ltd., αναπτύσσουν ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα ψεκασμού καυσίμου και έχουν καθιερώσει την τεχνολογία common rail για σύστημα ψεκασμού καυσίμου για μεγάλες κινητήρες θαλάσσης μετά από επανειλημμένες τεχνικές βελτιώσεις. Επιπλέον, ο έλεγχος των βαλβίδων εξαγωγής και των βαλβίδων εκκίνησης έχει επίσης ψηφιοποιηθεί και ανατίθεται σε υπολογιστή, ως αποτέλεσμα αυτών των προσπαθειών ο πρώτος στον κόσμο κινητήρας θαλάσσης μεγάλου μεγέθους με εφαρμοσμένο common rail κυκλοφόρησε στην αγορά το 2001 με την ονομασία RT-flex. Επί του παρόντος, οι κινητήρες RT-flex και οι επόμενοι κινητήρες της σειράς Wärtsilä X (κινητήρες W-X) είναι οι μόνοι κινητήρες που εφάρμοσαν την τεχνολογία common rail που δέχεται και χρησιμοποιεί ως καύσιμο το βαρύ πετρέλαιο.

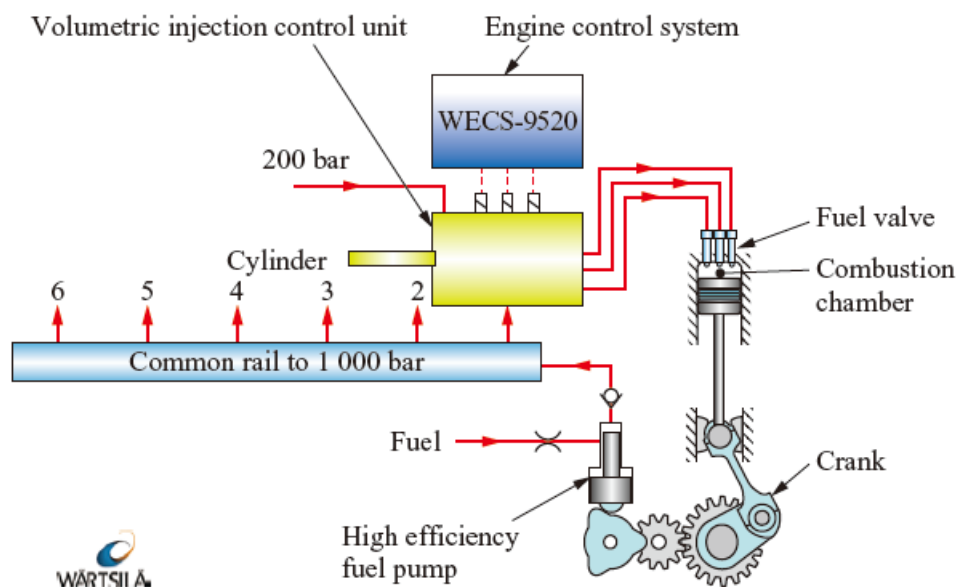
Τις τελευταίες δυο δεκαετίες έχει νομοθετηθεί και επιβάλλεται η περιβαλλοντική συμβατότητα των ναυτιλιακών κινητήρων με αποτέλεσμα να απαιτείται η σταδιακή μείωση των ρυθμών εκπομπών για οξείδια του αζώτου (NO_x) κ.λπ. σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς. Το πρώτο στάδιο ελέγχου εκπομπών NO_x του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization, IMO) επιβλήθηκε το 2000, το δεύτερο στάδιο επιβλήθηκε το 2011 και ο τρίτος περιορισμός το 2016. Επιπλέον αναζητούνται τρόποι για να επιτευχθεί η μείωση του ρυθμού κατανάλωσης

καυσίμων η οποία θα επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την εκπομπή CO₂ καθώς επίσης και το λειτουργικό κόστος του πλοίου.

2.1. Χαρακτηριστικά των Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενων Κινητήρων τύπου Common Rail

Στις συμβατικές αντλίες καυσίμου τύπου εμβόλου που οδηγούνται με έκκεντρο, η συμπίεση του καυσίμου επιτυγχάνεται με την ανοδική κίνηση του εμβόλου που ανυψώνεται από την περιστροφή του έκκεντρου, για το λόγο αυτό υπάρχουν δυσκολίες στην ευέλικτη βελτιστοποίηση του ελέγχου του χρονισμού έγχυσης και της πίεσης έγχυσης.

Από την άλλη πλευρά, οι κινητήρες τύπου common rail δεν αυξάνουν την πίεση κάθε φορά που γίνεται η έγχυση του καυσίμου, αλλά αντίθετα διατηρούν πάντα σε σταθερή τιμή την εσωτερική πίεση του common rail και ανοίγουν ή κλείνουν αυτόματα τις βαλβίδες καυσίμου ώστε να επιτύχουν την επιθυμητή διάρκεια της έγχυσης καυσίμου. Με τον τρόπο αυτό επίσης επιτρέπουν την ευέλικτη ρύθμιση για την πλήρωση καυσίμου καθώς και τη διατήρηση σταθερής πίεσης καυσίμου στο common rail. Το Σχ. 1 δείχνει το σύστημα ψεκασμού καυσίμου τύπου common rail.



Σχ. 1. Το σύστημα ψεκασμού καυσίμου στον κινητήρα τύπου common rail.

2.2. Πίεση Ψεκασμού Καυσίμου

Σε κινητήρες τύπου έκκεντρου η πίεση ψεκασμού αυξάνεται σχεδόν αναλογικά με το τετράγωνο της ταχύτητας ανόδου του εμβόλου, η ταχύτητα ανόδου του εμβόλου καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του έκκεντρου και η ταχύτητα περιστροφής του έκκεντρου από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, με αποτέλεσμα να παρέχεται χαμηλή πίεση ψεκασμού στο εύρος χαμηλών στροφών περιστροφής ενός κινητήρα και να παρέχεται υψηλή πίεση ψεκασμού στο εύρος υψηλών στροφών ενός κινητήρα. Συνεπώς σε κινητήρες τύπου έκκεντρου είναι εξαιρετικά δύσκολο να ελεγχθεί η πίεση έγχυσης καυσίμου, καθώς αυτή εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και αυτός είναι ένας σημαντικός περιορισμός για τη βέλτιστη ρύθμιση του κινητήρα.

Για έναν ηλεκτρονικά ελεγχόμενο κινητήρα τύπου common rail, η πίεση ψεκασμού καυσίμου ελέγχεται ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής ή από το φορτίο ενός κινητήρα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη πίεση ψεκασμού καυσίμου για μεταβλητά φορτία κινητήρα. Ο ρυθμός έγχυσης καυσίμου της αντλίας τροφοδοσίας καυσίμου που τροφοδοτεί το καύσιμο στον κινητήρα common rail, ελέγχεται με βάση την πίεση στον συσσωρευτή καυσίμου, ενώ ο χρόνος εκροής της αντλίας καυσίμου δεν σχετίζεται με τις στροφές του κινητήρα. Στον κινητήρα RT-flex, η αντλία καυσίμου κινείται σε περίπου 7-8 φορές υψηλότερη συχνότητα από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης στους συμβατικούς κινητήρες τύπου έκκεντρου χρησιμοποιούνται αντλίες καυσίμου σε κάθε κύλινδρο, ενώ από την άλλη πλευρά σε έναν κινητήρα RT-flex ο μικρότερος αριθμός αντλιών καυσίμου είναι μόνο δύο (Hashimoto, 2016).

Επιπλέον στους κινητήρες τύπου έκκεντρου, η εσωτερική πίεση του θαλάμου του εμβόλου απελευθερώνεται στο τέλος της έγχυσης για να επιτευχθεί η απότομη διακοπή της έγχυσης καυσίμου, αλλά η απελευθέρωση της συσσωρευμένης πίεσης σημαίνει απώλεια ενέργειας και έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλή απόδοση των αντλιών. Επιπλέον απαιτούνται αντίμετρα για τους παλμούς και τις διαβρώσεις σπληαίωσης στις γραμμές επιστροφής του καυσίμου που προκαλούνται από αυτή την απώλεια ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, οι αντλίες καυσίμου για τον τύπο common rail κατασκευάζονται με ηλεκτρονικό έλεγχο και εγχύουν μόνο την απαιτούμενη

ποσότητα καυσίμου. Αυτό παρέχει καλύτερη απόδοση και δεν απαιτεί αντίμετρα για τη σπηλαιώση ή τους παλμούς στις γραμμές επιστροφής καυσίμου.

2.3. Έλεγχος Ψεκασμού Καυσίμου

Ο κινητήρας RT-flex διαθέτει μονάδες βέλτιστου ελέγχου σύμφωνα με τις στροφές και το φορτίο του κινητήρα, ώστε να επιτυγχάνει 1) χρονοισμό ψεκασμού, 2) συνολική ποσότητα ψεκασμού σε μία διαδρομή και 3) ποσότητα ψεκασμού καυσίμου ανά μονάδα χρόνου (εφεξής καλούμενος ρυθμός έγχυσης) που εξαρτάται από την πίεση έγχυσης. Μεταξύ των παραπάνω, οι έλεγχοι έγχυσης καυσίμου εκτός από τον ρυθμό έγχυσης 3) πραγματοποιούνται με την εναλλαγή της διαδρομής του σερβοελαίου χρησιμοποιώντας μια βαλβίδα στο κοινό σωλήνα συσσώρευσης καυσίμου, η οποία είναι μια ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα υψηλής ταχύτητας καθώς και την κίνηση της βαλβίδας ελέγχου στη Μονάδα Ελέγχου Έγχυσης (Injection Control Unit, ICU) σύμφωνα με εντολή από το Σύστημα Ελέγχου Κινητήρα Wärtsilä (Wärtsilä Engine Control System, WECS). Η ποσότητα ψεκασμού καυσίμου στο 3) διατηρεί μεγάλο εύρος ελέγχου ανεξάρτητα από την ταχύτητα και το φορτίο στον κινητήρα (Hashimoto, 2016).

Ένας από τους λόγους για τις δυσκολίες εφαρμογής του συστήματος common rail σε μεγάλους κινητήρες θαλάσσης περιγράφηκε παραπάνω και είναι η δυσκολία της άμεσης χρήσης του καυσίμου ως σερβοέλαιο. Το καύσιμο για μεγάλους ναυτιλιακούς κινητήρες είναι το βαρύ πετρέλαιο, το οποίο έχει μια ποικιλία στα χαρακτηριστικά του όπως στο ιξώδες, στη θερμοαντική αξία αλλά και στους ρύπους που χαρακτηρίζουν κάθε ναυτιλιακό καύσιμο. Η ICU χρησιμοποιεί το λιπαντικό με σταθερά χαρακτηριστικά όταν είναι υπό πίεση και έχει μια καθιερωμένη λειτουργία για να ελέγχει σωστά την έγχυση καυσίμου αλλάζοντας τη διαδρομή του σερβοελαίου με μια βαλβίδα στο σωλήνα συσσώρευσης καυσίμου (common rail), ενώ ταυτόχρονα η λειτουργία της είναι ασφαλής σε περίπτωση εμφάνισης αστοχίας, όπως για παράδειγμα αν παρουσιαστεί ελάττωμα σε σωλήνες υψηλής πίεσης ή βαλβίδες καυσίμου. Αυτός ο μηχανισμός ήταν η σημαντική ανακάλυψη για την εφαρμογή του συστήματος έγχυσης καυσίμου τύπου common rail στους μεγάλους κινητήρες ναυτιλίας που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία. Επιπλέον, η καθυστέρηση στην έγχυση καυσίμου έχει βελτιωθεί με τη μετατόπιση ορισμένων από τις λειτουργίες της ICU

στις βαλβίδες καυσίμου για τους κινητήρες W-X, τους διαδόχους των κινητήρων RT-flex.

2.4.Κινητήρες W-X με Ηλεκτρονικό Έλεγχο

Οι μεγάλοι πετρελαιοκινητήρες θαλάσσης DU-Wärtsilä τύπου common rail έχουν επιφέρει την ανανέωση του συμβατικού ελέγχου που βασίζεται στην περιστροφή του εκκεντροφόρου άξονα συγχρονισμένου με τον άξονα του στροφάλου, έχουν παρουσιάσει πλεονεκτήματα ως προς τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς των καυσαερίων, έχουν υψηλότερη απόδοση σε όλο το λειτουργικό εύρος εξόδου και χαρακτηρίζονται ως φιλικόι προς το περιβάλλον θαλάσσιοι κινητήρες εξοικονόμησης ενέργειας. Πλέον στην αγορά μεγάλων κινητήρων πλοίων, σχεδόν όλοι οι νέοι κινητήρες που εγκαθίστανται είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι για μείωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων. Οι κινητήρες που κατασκευάστηκαν από τη DU από το 2008, ήταν ήδη σχεδόν 100% ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι. Αυτό αναγνωρίζεται ως αποτέλεσμα της υψηλής αξιολόγησης της τεχνολογίας ηλεκτρονικού ελέγχου για κινητήρες τύπου common rail RT-flex που διαθέτουν απλές, ευέλικτες και πολυλειτουργικές λύσεις.

Με τη χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου, αποκτάται ευελιξία ελέγχου που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης αλλά και την ευκολία της συνεχόμενης πλεύσης σε χαμηλή ταχύτητα (slow steaming) για μείωση του λειτουργικού κόστους. Επιπλέον, συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της αυτοματοποιημένης λειτουργίας της αντιμετώπισης προβλημάτων που βασίζεται σε πληροφορίες ανάδρασης από ηλεκτρονικά ελεγχόμενα εξαρτήματα και παρέχει και άλλα πλεονεκτήματα, εκτός από τις επιδόσεις των κινητήρων που αναφέρονται παραπάνω.

Επί του παρόντος, οι κινητήρες διπλού καυσίμου που επιτρέπουν την καύση πριν από την ανάμιξη με χρήση του φυσικού αερίου ως καύσιμο καθώς και την καύση ντίζελ με χρήση βαρέος πετρελαίου ως καύσιμο παρουσιάζονται επίσης στη σειρά κινητήρων W-X. Για την υλοποίηση κινητήρων διπλού καυσίμου, αυτές οι τεχνολογίες ψηφιακού ελέγχου με χρήση υπολογιστών είναι απαραίτητες.

Συνοπτικά ο ηλεκτρονικός έλεγχος στο τύπο common rail, αποτελεί μια τεχνολογία που μπορεί να χρησιμεύσει ως βάση για τη μελλοντική ανάπτυξη μεγάλων κινητήρων θαλάσσης, καθώς η απλότητα της ιδέας και η υψηλή ευελιξία ελέγχου υποδηλώνουν σημαντική δυνατότητα για περαιτέρω εξέλιξη.

Με βάση τη σύντηξη μεγάλων θαλάσσιων κινητήρων και τεχνολογίας ηλεκτρονικού ελέγχου, αναμένεται ότι οι προσπάθειες για νέους βελτιωμένους κινητήρες θα συνεχιστούν με στόχο την ταυτόχρονη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου, τη μείωση των εκπομπών NO_x και γενικότερα της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και την υψηλότερη απόδοση σε όλα τα εύρη ισχύος λειτουργίας.

2.5. Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενοι Κινητήρες MAN B&W ME

Σε έναν συμβατικό κινητήρα (MC), ο εκκεντροφόρος ελέγχει μηχανικά τον ψεκασμό καυσίμου και τη λειτουργία της βαλβίδας εξαγωγής, όμως αυτή η σύνδεση παρέχει πολύ περιορισμένη ευελιξία χρονισμού. Οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι κινητήρες της σειράς MAN B&W ME που εισήχθησαν στην αγορά το 2001, παραιτούνται από τον εκκεντροφόρο και εκμεταλλεύονται υδραυλικά και μηχανικά συστήματα που υποστηρίζονται από ηλεκτρονικό υλικό και λογισμικό για την ενεργοποίηση του ψεκασμού καυσίμου και των βαλβίδων εξαγωγής. Οι κινητήρες ME έγιναν διαθέσιμοι σε μεγέθη κυλίνδρου από 500 mm έως 1080 mm.

Ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος ψεκασμός καυσίμου και η ενεργοποίηση της βαλβίδας εξαγωγής επιτρέπουν την ανεξάρτητη και συνεχή ρύθμιση του χρονισμού για κάθε κύλινδρο και παρέχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

2.5.1. Μειωμένη Κατανάλωση Καυσίμου

- Τα χαρακτηριστικά έγχυσης καυσίμου μπορούν να βελτιστοποιηθούν σε πολλές διαφορετικές συνθήκες φορτίου, ενώ αντίθετα ένας συμβατικός κινητήρας βελτιστοποιείται για φορτίο που βρίσκεται συνήθως στο 90–100 τοις εκατό της μέγιστης ονομαστικής τιμής του.
- Η σταθερή μέγιστη πίεση καυσίμου P_{max} στο ανώτερο εύρος φορτίου μπορεί να επιτευχθεί με συνδυασμό του χρονισμού έγχυσης καυσίμου και της διακύμανσης του λόγου συμπίεσης μεταβάλλοντας το κλείσιμο της βαλβίδας εξαγωγής. Ως αποτέλεσμα, η μέγιστη πίεση μπορεί να διατηρείται σταθερή σε

ένα ευρύτερο εύρος φορτίου χωρίς υπερφόρτωση του κινητήρα, οδηγώντας σε σημαντικές μειώσεις στην κατανάλωση καυσίμου σε μερικό φορτίο.

- Η on-line παρακολούθηση της διαδικασίας του κυλίνδρου διασφαλίζει ότι η κατανομή του φορτίου μεταξύ των κυλίνδρων και η πίεση πυροδότησης του μεμονωμένου κυλίνδρου μπορούν να διατηρηθούν ως νέο πρότυπο σε όλη τη διάρκεια ζωής του κινητήρα.

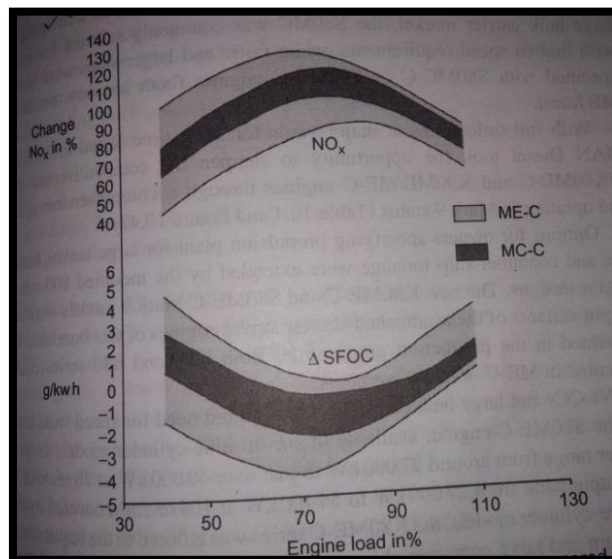
2.5.2. Λειτουργική Ασφάλεια και Ευελιξία

- Βελτίωση της λειτουργίας διακοπής σύγκρουσης (crash stop) και κίνησης προς τα πίσω (reverse running) του κινητήρα, επειδή ο χρονισμός των βαλβίδων εξαγωγής και ο ψεκασμός καυσίμου μπορούν να βελτιστοποιηθούν και για αυτούς τους ελιγμούς.
- Μπορεί να επιτευχθεί πέδηση κινητήρα (engine braking), μειώνοντας την απόσταση ακινητοποίησης του πλοίου.
- Ταχύτερη επιτάχυνση του κινητήρα, καθώς η πίεση του αέρα μπορεί να αυξηθεί ταχύτερα από το κανονικό, όταν κατά την επιτάχυνση ανοίγουν νωρίτερα οι βαλβίδες εξαγωγής.
- Η αργή λειτουργία βελτιώνεται σημαντικά: οι ελάχιστες στροφές/λεπτό είναι σημαντικά χαμηλότερες από ό,τι για έναν συμβατικό κινητήρα, η αργή λειτουργία είναι πολύ πιο ομαλή και η καύση βελτιώνεται χάρη στον ηλεκτρονικό έλεγχο του ψεκασμού καυσίμου.
- Η ηλεκτρονική παρακολούθηση του κινητήρα (με χρήση του συστήματος CoCoS-EDS της MAN B&W) εντοπίζει συνθήκες λειτουργίας που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε προβλήματα απόδοσης. Η ζημιά λόγω κακής ποιότητας καυσίμου ανάφλεξης μπορεί να αποφευχθεί με τον έλεγχο του ψεκασμού (προ-έγχυση).
- Το σύστημα ελέγχου κινητήρα ενσωματώνει λειτουργία on-line συστήματος προστασίας (on-line Protection System, OPS) της MAN B&W, η οποία διασφαλίζει ότι ο κινητήρας συμμορφώνεται με το διάγραμμα φορτίου και δεν υπερφορτώνεται όπως συχνά συμβαίνει σε ρηγά νερά και με λειτουργία βαριάς προπέλας.
- Η συντήρηση είναι ευκολότερη και οικονομικότερη, ως αποτέλεσμα της προστασίας από τη γενική υπερφόρτωση καθώς και την υπερφόρτωση

μεμονωμένων κυλίνδρων, καθώς επίσης λόγω των συνθηκών βελτιωμένης λειτουργίας του κινητήρα. Επιπλέον η προστασία ενισχύεται από την ικανότητα του συστήματος διάγνωσης να προειδοποιεί έγκαιρα για αστοχίες και σφάλματα και έτσι να επιτρέπει την έγκαιρη λήψη των κατάλληλων αντίμετρων.

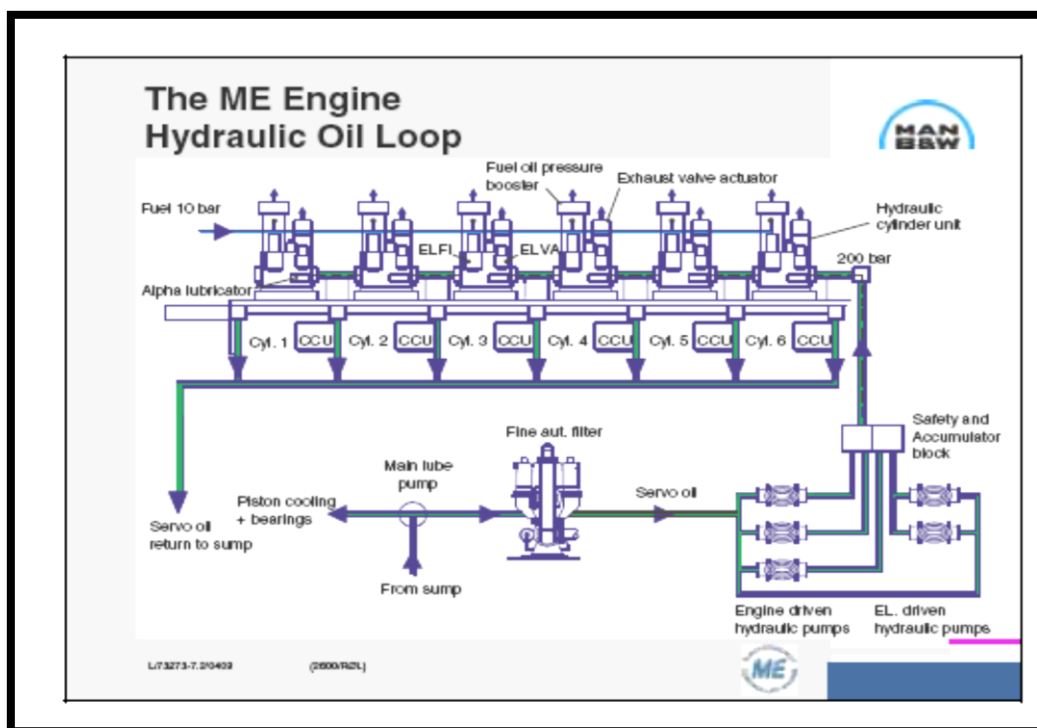
2.5.3. Ευελιξία Εκπομπών Καυσαερίων

- Ο κινητήρας μπορεί να αλλάξει σε διάφορες λειτουργίες χαμηλών εκπομπών, ενώ οι εκπομπές καυσαερίων NO_x μπορούν να μειωθούν κάτω από τα όρια του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization, IMO), εάν αυτό επιβάλλεται από τους τοπικούς κανονισμούς.
- Με την κατάλληλη επιλογή των τρόπων λειτουργίας, τα πλοία μπορούν να πλέουν με χαμηλότερες εκπομπές καυσαερίων σε περιοχές, όπου αυτό μπορεί να απαιτείται λόγω κανονισμών, ή να πλέουν με πιο οικονομικό τρόπο λόγω συστημάτων μεταβλητών λιμενικών τελών, χωρίς αυτό να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμου εκτός αυτών των περιοχών.



Σχ. 2. Γραφική αναπαράσταση της εκπομπής NO_x .

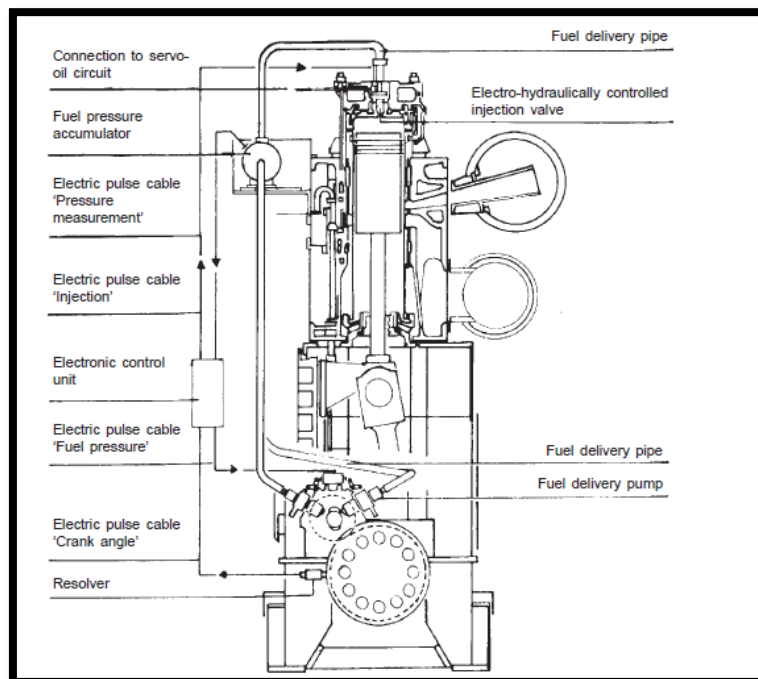
Τα ακόλουθα εξαρτήματα του συμβατικού κινητήρα MC εξαλείφονται στον κινητήρα ME: κίνηση καδένας εκκεντροφόρου άξονα, εκκεντροφόρος με έκκεντρα καυσίμου, έκκεντρα εξάτμισης και έκκεντρα ενδείξεων, εξοπλισμός ενεργοποίησης αντλίας καυσίμου συμπεριλαμβανομένων των οδηγών κυλίνδρων και του μηχανισμού οπισθοπορείας, συμβατικές αντλίες ψεκασμού καυσίμου, γρανάτζι ενεργοποίησης βαλβίδας εξαγωγής και οδηγοί κυλίνδρων, διανομέας αέρα με εκκίνηση από τον κινητήρα, ηλεκτρονικός ρυθμιστής με ενεργοποιητή, ρυθμιστικός άξονας, μηχανικοί λιπαντήρες κυλίνδρων με κίνηση από τον κινητήρα και κονσόλα ελέγχου στην πλευρά του κινητήρα. Αυτά τα στοιχεία αντικαθίστανται στον κινητήρα ME από μια ηλεκτροϋδραυλική πλατφόρμα που περιλαμβάνει: ένα υδραυλικό τροφοδοτικό ισχύος (hydraulic power supply, HPS), μια μονάδα υδραυλικού κυλίνδρου (hydraulic cylinder unit, HCU) με ηλεκτρονικό ψεκασμό καυσίμου (electronic fuel injection, ELFI) και ηλεκτρονική ενεργοποίηση βαλβίδας εξαγωγής (electronic exhaust valve actuation ELVA), έναν ηλεκτρονικό λιπαντήρα κυλίνδρου Alpha, μια ηλεκτρονικά ελεγχόμενη βαλβίδα εκκίνησης, έναν τοπικό πίνακα ελέγχου, ένα σύστημα ελέγχου με ρυθμιστή και σύστημα πληροφόρησης και παρακολούθησης της κατάστασης του κινητήρα.



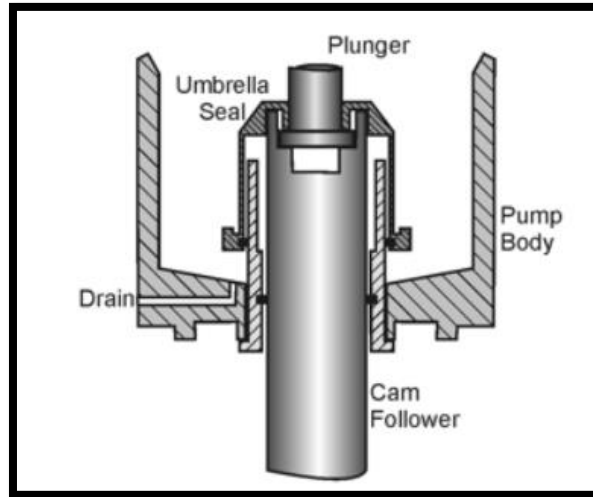
Σχ. 3. Διάγραμμα βρόχου υδραυλικού συστήματος.

2.5.4. Λειτουργία κινητήρα MAN ME

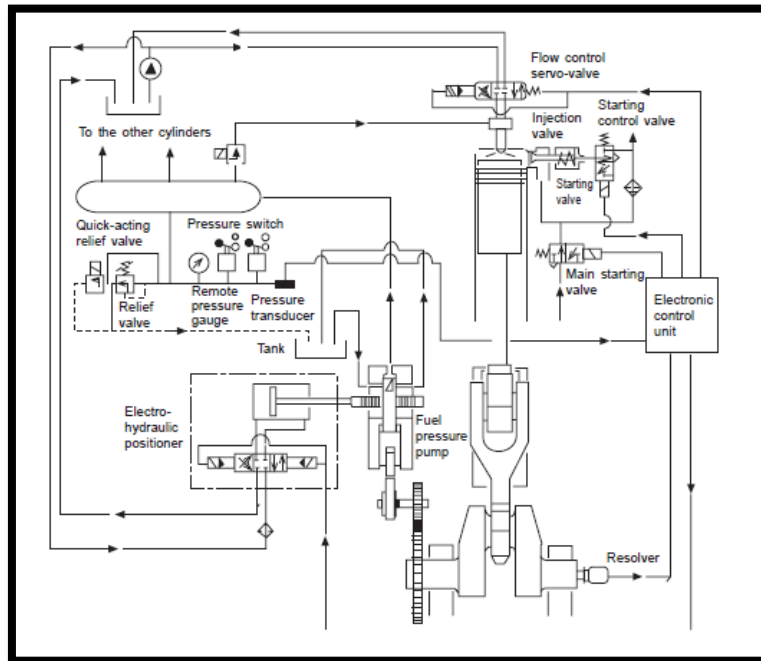
Η έρευνα και ανάπτυξη κατά την κατασκευή και εξέλιξη του κινητήρα επικεντρώθηκε στη μετατροπή των ηλεκτρονικών στοιχείων σε ένα αρθρωτό σύστημα, η διαδικασία αυτή απαίτησε την ανάπτυξη μιας νέας υπολογιστικής μονάδας και μεγάλων πακέτων λογισμικού, τα οποία και τα δύο έπρεπε να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις των νηογνομόνων για θαλάσσιες εφαρμογές. Το σύστημα έγχυσης και ανάφλεξης δεύτερης γενιάς βασίζεται σε σερβομηχανισμό ελαίου υψηλής πίεσης που λειτουργεί με κινητήρα, το οποίο παρέχει την ισχύ για τις υδραυλικές μονάδες ενεργοποίησης των βαλβίδων ψεκασμού καυσίμου και εξαγωγής σε κάθε κύλινδρο. Πριν από την εκκίνηση του κινητήρα, το υδραυλικό σύστημα ισχύος συμπιέζεται από μια μικρή ηλεκτρική αντλία υψηλής πίεσης. Το φιλτραρισμένο λιπαντικό του κύριου συστήματος χρησιμοποιείται ως μέσο ενεργοποίησης και παρέχεται σε πίεση 200 bar περίπου από αντλίες πολλαπλών εμβόλων που κινούνται με κινητήρα.



Σχ. 4. Εξαρτήματα ηλεκτρονικού συστήματος έγχυσης.



Σχ. 5. Τυπική σφράγιση τύπου ομπρέλας σε αντλία καυσίμου.

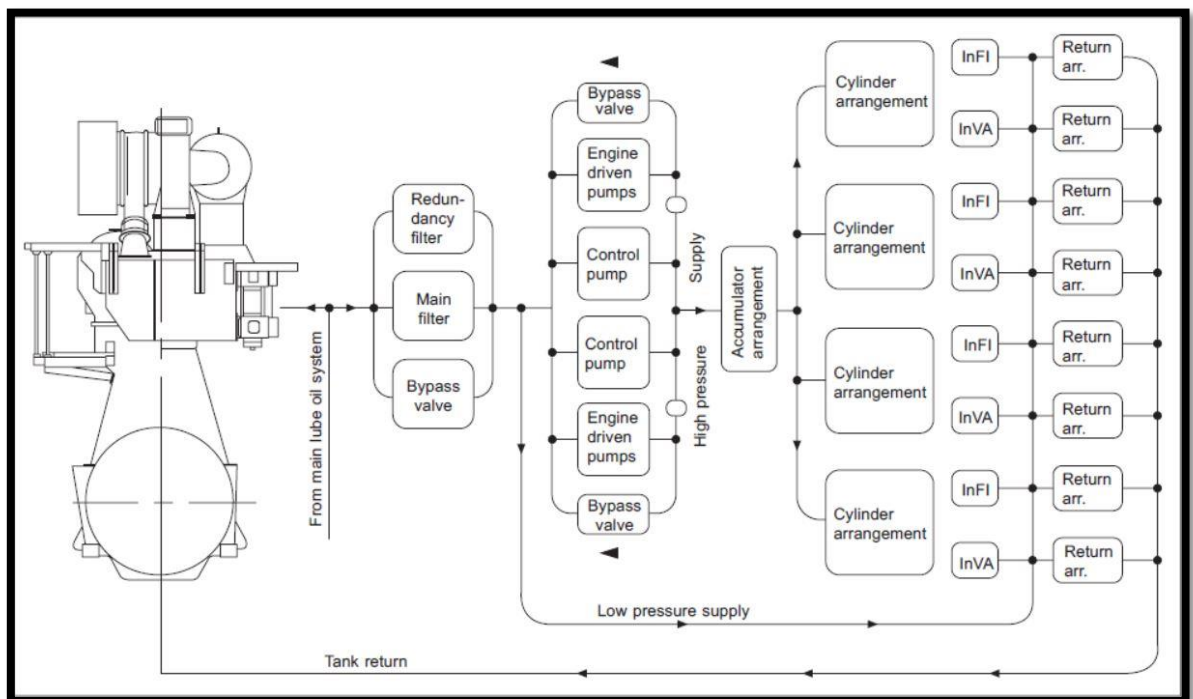


Σχήμα 6. Σχηματική διάταξη ηλεκτρονικού συστήματος έγχυσης καυσίμου.

2.5.5. Σύστημα ψεκασμού καυσίμου.

- Ένα σύστημα σερβομηχανισμό ελαίου common rail εφαρμόζει το χαμηλής θερμοκρασίας, καθαρό και υπό πίεση λιπαντικό για την τροφοδοσία των αντλιών του συστήματος έγχυσης καυσίμου κάθε κυλίνδρου.

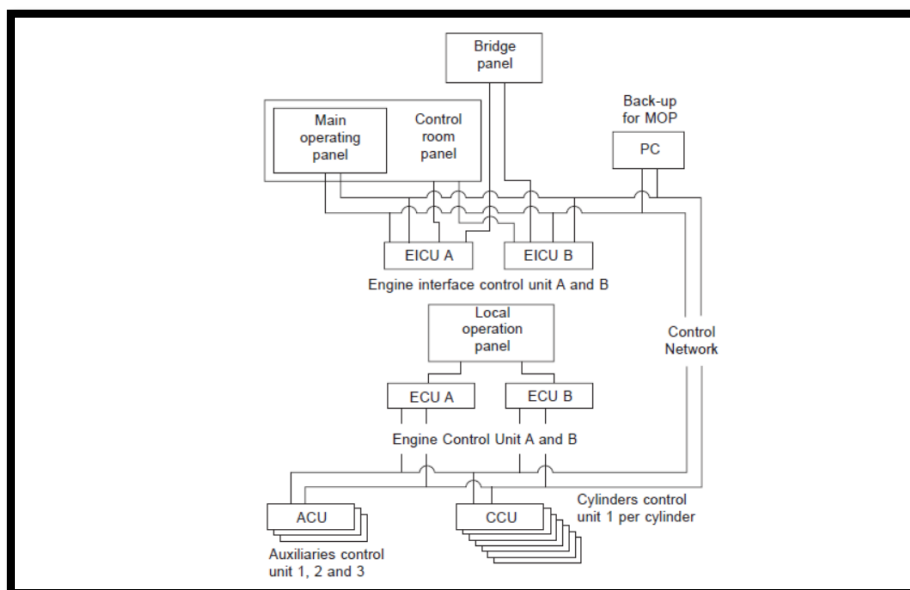
- Οι συσσωρευτές που παρέχονται για κάθε κύλινδρο διασφαλίζουν τη γρήγορη παράδοση του λαδιού σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος έγχυσης και για την αποφυγή έντονων ταλαντώσεων πίεσης στο σχετικό σύστημα σωλήνων λαδιού.
- Η κίνηση του εμβόλου της αντλίας ελέγχεται από μια ταχείας δράσης αναλογική βαλβίδα ελέγχου η οποία με τη σειρά της ελέγχεται από μηχανισμό ηλεκτροκινητήρα.
- Οι αντλίες έγχυσης καυσίμου μέσα σε κάθε κύλινδρο, έχουν ειδική σχεδίαση σχήματος ομπρέλλας και είναι σφραγισμένες για να αποτρέπεται η ανάμειξη του HFO με το σερβοέλαιο.
- Η αρχή της διαδρομής του εμβόλου της αντλίας ελέγχεται από μια βαλβίδα ταχείας δράσης η οποία ελέγχεται ηλεκτρονικά.
- Για την εξασφάλιση της βέλτιστης θερμικής απόδοσης, το καύσιμο θα πρέπει να ψεκάζεται μετά τη μέγιστη πίεση πυροδότησης.
- Η MAN diesel ισχυρίζεται ότι ο ψεκασμός καυσίμου στη σειρά ME μπορεί να εκτελέσει οποιοδήποτε αποδοτικό μοτίβο ψεκασμού που απαιτείται για τη λειτουργία του κινητήρα.



Σχ. 7. Διάγραμμα διανομής λαδιού σερβομηχανισμού

2.5.6. Σύστημα Ελέγχου των Κινητήρων ME

- Για τους σύγχρονους κινητήρες, η βέλτιστη διάρκεια ψεκασμού είναι περίπου 18-20 μοίρες γωνία στροφάλου με πλήρες φορτίο και η μέγιστη πίεση πυροδότησης επιτυγχάνεται στο δεύτερο μισό αυτής της περιόδου.
- Για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη θερμική απόδοση, το καύσιμο που εγχέεται μετά την επίτευξη της μέγιστης πίεσης πυροδότησης πρέπει να εγχυθεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα.
- Οι κινητήρες ME είναι τόσο ελεγχόμενοι που μπορούν να βελτιστοποιηθούν σε μεγάλο αριθμό συνθηκών φορτίου.
- Σχεδιασμός αντλίας έγχυσης καυσίμου. Η αντλία ψεκασμού καυσίμου διαθέτει αποδεδειγμένη τεχνολογία και οι βαλβίδες καυσίμου είναι τυπικού σχεδιασμού.



Σχ. 8. Σύστημα ελέγχου

2.5.7. Λειτουργία

Το λάδι από την κύρια παροχή κινητήρα ή από μια αποκλειστική υδραυλική παροχή διέρχεται μέσα από φίλτρα 6 micron πριν συμπιεστεί από τρεις αξονικές αντλίες εμβόλου που κινούνται με κινητήρα τύπου swash plate. Υπάρχουν επίσης δύο ηλεκτροκίνητες αντλίες για λόγους εκκίνησης και λειτουργίας έκτακτης ανάγκης.

Στους κινητήρες ΜΕ πλεονάζουσες υπολογιστικές μονάδες συνδεδεμένες σε δίκτυο για ελέγχουν τις λειτουργίες του εκκεντροφόρου. Ο Έξυπνος Κινητήρας αποτελείται από 4 κύριες μονάδες ελέγχου, οι οποίες είναι οι εξής:

- Μονάδα ελέγχου κινητήρα (Engine Control Unit , ECU).
- Μονάδα ελέγχου κυλίνδρου (Cylinder Control Unit, CCU).
- Μονάδα Ελέγχου Εξωτερικής Διασύνδεσης (External Interface Control Unit, EICU).
- Βοηθητική Μονάδα Ελέγχου (Auxiliary Control Unit, ACU).

Οι λειτουργίες των παραπάνω μονάδων είναι οι παρακάτω.

- ECU. Οι στροφές του κινητήρα ελέγχονται σύμφωνα με μια τιμή αναφοράς από το σύστημα ελέγχου εφαρμογών (ένας ολοκληρωμένος έλεγχος ρυθμιστή) για την προστασία κινητήρα (προστασία υπερφόρτωσης καθώς και βλάβες), την βελτιστοποίηση της καύσης για να ταιριάζει στις συνθήκες λειτουργίας, την εκκίνηση, διακοπή και αντιστροφή ακολουθίας του κινητήρα.
- ACU. Εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες: Παροχή υδραυλικού σερβομηχανισμού για το λιπαντικό έλαιο, βοηθητικοί φυσητήρες και υπερσυμπίεση.
- CCU. Η μονάδα ελέγχου κυλίνδρου συνδέεται με όλα τα λειτουργικά εξαρτήματα που ελέγχονται σε κάθε κύλινδρο. Ελέγχει τις ακόλουθες λειτουργίες: ενεργοποίηση ψεκασμού καυσίμου, λειτουργία βαλβίδας εξαγωγής, λειτουργία βαλβίδας αέρα εκκίνησης, λειτουργία για λίπανση κυλίνδρου για κάθε κύλινδρο

Σε περίπτωση βλάβης του κινητήρα μιας ECU, ένα μήνυμα εμφανίζεται στο χειριστήριο μέχρι την αποκατάσταση της.

Τόσο η ECU όσο και η CCU υλοποιούνται στον ίδιο τύπο υλικού. Εάν παρουσιαστεί βλάβη σε συνδεδεμένους αισθητήρες, ενεργοποιητές, καλώδια, το σύστημα θα εντοπίσει την περιοχή της βλάβης και θα βοηθήσει το προσωπικό χειρισμού του κινητήρα στην τελική αναγνώριση και αντιμετώπιση προβλημάτων των αποτυχημένων διαμερισμάτων.

Οι κινητήρες ΜΕ παρέχονται επίσης με οθόνη επιλογής διεπαφής ανθρώπου - μηχανής η οποία τοποθετείται στην αίθουσα ελέγχου και επιτρέπει στον χειριστή να επιλέξει

σχήμα οικονομίας καυσίμου και ελέγχου εκπομπών, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές NO_x σε σύγκριση με τον παραδοσιακό κινητήρα MC ελέγχου εκκεντροφόρου όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων.

- EICU. Εκτελεί το έργο της σύνδεσης των δεδομένων απόδοσης του κινητήρα και της κατάστασης μαζί με τον έλεγχο της γέφυρας.

2.6. Ηλεκτρονικός Έλεγχος Κινητήρων Diesel και Εκπομπές NO_x

Η ανάπτυξη θαλάσσιων κινητήρων ντίζελ χαμηλής ταχύτητας με χαμηλές εκπομπές καθοδηγείται κυρίως από τον κανονισμό MARPOL Παράρτημα VI (MARPOL, 2008) που εγκρίθηκε από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO). Το παράρτημα VI της MARPOL περιέχει κανονισμούς για τις εκπομπές NO_x, SO_x και σωματιδίων (Particulate Matter, PM). Το αναθεωρημένο παράρτημα VI MARPOL περιέχει νέα όρια για τις εκπομπές NO_x τόσο για τα νέα όσο και για τα υπάρχοντα πλοία καθώς και για μειωμένες εκπομπές SO_x και PM για όλα τα πλοία.

Οι επιτρεπόμενες εκπομπές NO_x μειώνονται στα 14,4 g/kWh για μεγάλους θαλάσσιους κινητήρες χαμηλής ταχύτητας (<130 rpm) που είναι εγκατεστημένοι σε πλοία που ναυπηγήθηκαν μετά το 2011, σύμφωνα με το πρότυπο Tier II, και σε 3,4 g/kWh για κινητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε πλοία που κατασκευάζεται το 2016 και μετά, σύμφωνα με το πρότυπο Tier III σε καθορισμένες περιοχές ελέγχου εκπομπών. Ο ευρέως χρησιμοποιούμενος δίχρονος κινητήρας ντίζελ χαμηλής ταχύτητας μπορεί να συνδυαστεί με μια μονάδα ανάκτησης απορριμμάτων θερμότητας και ενδεχομένως να προσφέρει μοναδικά υψηλή απόδοση καυσίμου και χαμηλές ειδικές εκπομπές για την πρόωση πλοίου με κινητήρα ντίζελ. Κατά το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση ενός τέτοιου συνδυασμένου ενεργειακού συστήματος, η εστίαση είναι στην αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων του συστήματος και όχι στη συμπεριφορά των εξαρτημάτων. Επιπλέον, ο πρόσφατα προσαρμοσμένος δείκτης σχεδίασης απόδοσης κινητήρα (Engine Efficiency Design Index, EEDI)¹, ενδέχεται να επιβάλει περαιτέρω περιορισμούς στη διάταξη του κινητήρα, των βοηθητικών εξαρτημάτων κ.λπ. Έτσι, ένας μοντέλο γρήγορου, αλλά θερμοδυναμικά ρεαλιστικού κινητήρα που μπορεί να ενσωματωθεί με ένα λογισμικό ανάλυσης ενεργειακού συστήματος είναι ιδιαίτερα επιθυμητό για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του κινητήρα σε συνδυασμό με την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας, για ελάχιστες εκπομπές NO_x καθώς και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Green House Gas, GHG).

¹ Energy Efficiency Measures, IMO, <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>

Η βιβλιογραφία προσφέρει διάφορες μεθοδολογίες μοντελοποίησης για τον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Το εύρος της εφαρμογής, η ακρίβεια και η απαίτηση χρόνου υπολογισμού, είναι οι καθοριστικές παράμετροι για την προσέγγιση μοντελοποίησης (Grimmelius et al., 2007). Τα μοντέλα μηδενικών διαστάσεων (Descieux & Feidt, 2007) με λίγες ζώνες καύσης είναι αποτελεσματικά εργαλεία για την παροχή λογικών εκτιμήσεων των εκπομπών NO_x ή/και της απόδοσης του κινητήρα με χαμηλή υπολογιστική προσπάθεια. Τα μοντέλα καύσης πολλαπλών ζωνών (Kulkarni et al., 2010) φαίνεται να προσφέρουν πιο ακριβείς προβλέψεις NO_x, μια πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση του ψεκασμού καυσίμου, καθώς και τη μοντελοποίηση άλλων εκπομπών, όπως η αιθάλη. Αυτά τα πλεονεκτήματα συνοδεύονται από το κόστος του αυξημένου υπολογιστικού χρόνου, πιθανώς χωρίς την παροχή πρόσθετων πληροφοριών απαραίτητων για την ανάλυση του ενεργειακού συστήματος.

Αναλυτικά μοντέλα για προσομοίωση κύκλου τετράχρονων κινητήρων έχουν περιγραφεί με κάποια επικύρωση (Rausen et al., 2005). Οι Lamaris et al. (2009) και Rakopoulos et al. (2007) ανέπτυξαν ένα μοντέλο καύσης πολλαπλών ζωνών για την πρόβλεψη απόδοσης και εκπομπών σε μεγάλης κλίμακας δίχρονους κινητήρες με συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα και οι Kowalski & Tarelko (2009a; 2009b) πρότειναν μια απλή μέθοδο για την προσομοίωση ενός δίχρονου κινητήρα πλοίου με κάποια επικύρωση εκπομπών NO_x. Επίσης οι Payri et al. (2011) δημοσίευσαν ένα μηδενικών διαστάσεων θερμοδυναμικό μοντέλο ενός τετράχρονου κινητήρα ντίζελ άμεσου ψεκασμού χωρίς να περιλαμβάνουν μοντελοποίηση εκπομπών.

Ενώ η ανάπτυξη και οι μεθοδολογίες που βρέθηκαν σε αυτά τα έγγραφα προσφέρουν σαφείς περιγραφές των μοντέλων με ορισμένες συγκεκριμένες επικυρώσεις σε πειραματικά δεδομένα, ελάχιστα μοντέλα μηδενικών διαστάσεων για ηλεκτρονικά ελεγχόμενους θαλάσσιους δίχρονους κινητήρες ντίζελ έχουν αναπτυχθεί και επικυρωθεί χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα για ρυθμίσεις κινητήρα, όπως π.χ. αλλαγή χρονισμού έγχυσης, χρονισμός κλεισίματος βαλβίδας εξαγωγής και πίεση σάρωσης (Benajes et al., 2009). Η δυνατότητα πρόβλεψης με εύλογη ακρίβεια των επιπτώσεων του συντονισμού του κινητήρα στην απόδοση και τις εκπομπές NO_x είναι ιδιαίτερης σημασίας για τους σύγχρονους ντίζελ κινητήρες θαλάσσης.

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Εφαρμογών Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Κινητήρων Ντίζελ

3.1. Έξυπνο Διαγνωστικό Εργαλείο Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Κινητήρα Ντίζελ

Με την αυξανόμενη επιδείνωση της ενεργειακής κρίσης και την αυστηρότητα της νομοθεσίας, το ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα για τα καυσαέρια έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε κινητήρες ντίζελ για βελτιστοποίηση της απόδοσης του κινητήρα καθώς και των οχημάτων που τον χρησιμοποιούν. Ωστόσο, ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας ντίζελ είναι ένα πολύ περίπλοκο σύστημα ελέγχου, το οποίο περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών θεμάτων, συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής, της υδροδυναμικής, της ηλεκτρονικής, της θεωρίας ελέγχου και της θεωρίας καύσης. Επομένως, όταν συμβαίνουν βλάβες, είναι πολύ δύσκολο για έναν τεχνικό συντήρησης, ο οποίος γενικά δεν έχει επαρκείς γνώσεις στους προαναφερθέντες τεχνικούς τομείς, να εντοπίσει και να επισκευάσει το ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα.

Γενικά, απαιτούνται οι ακόλουθες λειτουργίες στη συντήρηση του ηλεκτρονικά ελεγχόμενου κινητήρα ντίζελ: (1) Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συντήρησης, οι τεχνικοί συντήρησης πρέπει να είναι δυνατό να λαμβάνουν αναλογικά σήματα εισόδου και εξόδου, ψηφιακά σήματα εισόδου και εξόδου. (2) Οι μηχανικοί συντήρησης πρέπει επίσης να λαμβάνουν εσωτερικά δεδομένα και πληροφορίες κατάστασης συστήματος, αλλά αυτά τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μνήμη RAM σε αριθμητική μορφή και όχι σε φυσική μορφή (όπως τάση και ρεύμα), η οποία δεν μπορεί να αποκτηθεί με συμβατικές τεχνικές μέτρησης και δοκιμής. (3) Οι μηχανικοί συντήρησης χρειάζεται μερικές φορές να προγραμματίσουν δεδομένα σε Μονάδα Ελέγχου Κινητήρα (Engine Control Unit, ECU), όπως δεδομένα προγραμματισμού] και εγγραφή δεδομένων αντιστάθμισης έγχυσης στην ECU για αντικατάσταση εγχυτήρα.

Έχουν δημοσιευθεί αρκετές εργασίες για την επίλυση των ζητημάτων που τίθενται παραπάνω. Οι (Peiyu et al., 2006) εισήγαγαν ένα σχέδιο υλοποίησης για φορητό έξυπνο όργανο διάγνωσης σφαλμάτων, αλλά η επικοινωνία ήταν χαμηλή και ακατάλληλη για τον κινητήρα ντίζελ. Οι Geng et al. (2021) εισήγαγαν ένα κατανεμημένο διαγνωστικό σύστημα βασισμένο τον δίαυλο CAN και επικεντρώθηκαν στο αρχικό σύστημα σύνθεσης και στο πρωτόκολλο επικοινωνίας. Ο Zhang (2005), εισήγαγε μια έξυπνη

μέθοδο διάγνωσης για πετρελαιοκινητήρα θαλάσσης και επικεντρώθηκε στον αλγόριθμο τεχνητής ανοσίας (artificial immune). Οι Xi et al. (2018) εισήγαγαν ένα έξυπνο σύστημα διάγνωσης βλαβών για κινητήρα ντίζελ. Οι Zhang & Sun (2009), εισήγαγαν ένα έξυπνο σύστημα διάγνωσης για ναυτιλιακούς κινητήρες ντίζελ και εστίασε σε τρόπους εξέτασης και διάγνωσης για κινητήρες ντίζελ υψηλής ταχύτητας [6]. Οι Zhang & Sun (2009), εισήγαγαν μια έξυπνη διάγνωση σφαλμάτων για πετρελαιοκινητήρα θαλάσσης με χρήση RBF νευρωνικών δικτύων. Οι Wu et al. (2006), εισήγαγαν μια έξυπνη διάγνωση σφαλμάτων για τη βαλβίδα εξαγωγής κινητήρα ντίζελ χρησιμοποιώντας μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης. Οι Gao et al. (2008), εισήγαγαν τον αλγόριθμο και τη θεωρία του τεχνητού νευρωνικού δικτύου βάσει γενετικού αλγορίθμου που εφαρμόζεται στον κινητήρα ντίζελ.

Η εργασία των Wang et al. (2009), ανέπτυξε ένα έξυπνο διαγνωστικό εργαλείο, το λογισμικό και το υλικό μέρος του επιλέχθηκαν ειδικά για τη διαδικασία συντήρησης. Για το διαγνωστικό εργαλείο υιοθετήθηκε το διεθνές πρότυπο καθολικού πρωτοκόλλου KWP2000, σχεδιάστηκε διεπαφή υλικού επικοινωνίας και αναπτύχθηκε λογισμικό διαγνωστικής εφαρμογής. Το διαγνωστικό εργαλείο όχι μόνο μπορούσε να διαβάσει, να διαγράψει και να καταγράψει Κωδικούς Βλάβης Διαγνωστικού Ελέγχου (Universal diagnostic trouble codes, DTC), να διαβάσει δεδομένα, να μετρήσει τις παραμέτρους λειτουργίας, αλλά μπορούσε επίσης να προγραμματίσει δεδομένα σε ECU, γεγονός που επέτρεπε στον μηχανικό συντήρησης να δώσει μεγαλύτερη προσοχή στα μηχανικά εξαρτήματα. Επιπλέον, οι περισσότεροι μηχανικοί συντήρησης δεν είναι σε θέση να λειτουργήσουν με αποτελεσματικότητα όταν αντιμετωπίζουν προβλήματα στον κινητήρα, ενώ χρειάζονται περισσότερη καθοδήγηση στη συντήρηση. Οι Wang et al. (2009), σχεδίασαν έξι έξυπνες δοκιμές για τον κινητήρα και τα ληφθέντα αποτελέσματα δοκιμών βοήθησαν στην αναζήτηση της αιτίας των σφαλμάτων, δίνοντας σημαντική υποστήριξη στους μηχανικούς συντήρησης. Τελικά, χρησιμοποιώντας το έξυπνο διαγνωστικό εργαλείο η απόδοση συντήρησης βελτιώθηκε σημαντικά.

3.1.1. Εφαρμογή Διαγνωστικού Εργαλείου

Το έξυπνο διαγνωστικό εργαλείο των Wang et al. (2009), έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στον ηλεκτρονικά ελεγχόμενο κινητήρα ντίζελ υψηλής πίεσης common rail GD-1. Η κύρια διεπαφή του διαγνωστικού εργαλείου, σχεδιάστηκε με γλώσσες

LabVIEW και Visual C++. Οι δοκιμές, συμπεριλαμβανομένων δοκιμών προσομοίωσης, δοκιμών πάγκου κινητήρα, δοκιμών περιστροφικού τυμπάνου και θαλάσσιων δοκιμών, έδειξαν ότι αυτό το διαγνωστικό εργαλείο μπορούσε να πραγματοποιήσει ακριβή και γρήγορη επικοινωνία δεδομένων, ανανέωση διεπαφής σε πραγματικό χρόνο και δυναμική μέτρηση, δεδομένα διαδικτυακού προγραμματισμού και πρακτική λειτουργία GSS. Δεν υπήρχε μήνυμα σφάλματος σε όλες τις διαδικασίες. Σε αυτό το διαγνωστικό εργαλείο παρέχονται δύο λειτουργικές μονάδες που αντιστοιχούν σε έξι έξυπνες δοκιμές και επτά κουμπιά λειτουργιών: (1) Δοκιμή συμπίεσης. Χρησιμοποιείται για την εξέταση της συμπεριφοράς συμπίεσης. (2) Δοκιμή διακοπής λειτουργίας. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ομοιομορφίας των μπεκ και των κυλίνδρων. (3) Εκτέλεση δοκιμής. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της απόδοσης εργασίας και της συμβολής των κυλίνδρων. (4) Δοκιμή διαρροής καυσίμου. Χρησιμοποιείται κυρίως για τον έλεγχο διαρροής καυσίμου του συστήματος καυσίμου χαμηλής πίεσης. (5) Ηλεκτρική δοκιμή. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της πλεξούδας καλωδίωσης. (6) Δοκιμή υψηλής πίεσης. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της απόδοσης της μονάδας υψηλής πίεσης. (7) Σύνδεση. Χρησιμοποιείται για την υλοποίηση αρχικοποίησης επικοινωνίας και σύνδεσης μεταξύ του H/Y και της ECU. (8) Ανάγνωση κωδικών DTC Ανάγνωση κωδικών DTC από ECU και εμφάνισή τους στο επάνω μέρος της κύριας διεπαφής συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων στοιχείων όπως Αρ., κατάσταση, DTC, όνομα και χρόνοι κωδικών DTC. (9) Διαγραφή κωδικού DTC. Όταν τα σφάλματα ανακτηθούν και οι κωδικοί DTC και οι σχετικές πληροφορίες τους δεν χρειάζονται πλέον αποθήκευση στη μνήμη RAM, μπορούν να διαγραφούν με αυτό το κουμπί λειτουργίας. (10) Αποθήκευση κωδικού DTC. Οι κωδικοί DTC μπορούν να αποθηκευτούν στον υπολογιστή όταν είναι απαραίτητο, και μπορούν να βοηθήσουν στην ανάλυση και επίλυση προβλημάτων. (11) Μέτρηση. Αναλογικά και ψηφιακά σήματα, εσωτερικά δεδομένα και πληροφορίες κατάστασης συστήματος μπορούν να διαβαστούν από την ECU και εμφανίζονται στο κάτω μέρος της διεπαφής, συμπεριλαμβανομένων ονομάτων μεταβλητών, περιγραφής, τιμής μεταβλητής και μονάδας. (12) Αποθήκευση δεδομένων. Αποθήκευση των δεδομένων μέτρησης που αναφέρονται παραπάνω σε υπολογιστή για επεξεργασία εκτός σύνδεσης, ανάλυση και απομακρυσμένη επίλυση προβλημάτων. (13) Δεδομένα προγραμματισμού.

Χρησιμοποιείται για online προγραμματισμό δεδομένων είτε σε ολόκληρη τη μνήμη flash είτε σε μέρος της μνήμης όταν είναι απαραίτητο. ανάλυση και εξ αποστάσεως επίλυση προβλημάτων. (14) Δεδομένα προγραμματισμού. Χρησιμοποιείται για online προγραμματισμό δεδομένων είτε σε ολόκληρη τη μνήμη flash είτε σε μέρος της μνήμης όταν είναι απαραίτητο. ανάλυση και εξ αποστάσεως επίλυση προβλημάτων. (15) Δεδομένα προγραμματισμού. Χρησιμοποιείται για online προγραμματισμό δεδομένων είτε σε ολόκληρη τη μνήμη flash είτε σε μέρος της μνήμης όταν είναι απαραίτητο.

Ως εκ τούτου, το παρόν σύστημα παρείχε αξιόπιστη, ακριβή και γρήγορη επικοινωνία KWP2000 μεταξύ ECU και υπολογιστή, με ρυθμό μετάδοσης έως και $57,600\text{bit/s}$. Παρείχε επίσης μια φιλική, συμβατή και ευέλικτη διαγνωστική διεπαφή και τις λειτουργίες του διαδικτυακού προγραμματισμού και της μέτρησης σε πραγματικό χρόνο, γεγονός που έκανε την εργασία μετά την εξυπηρέτηση βολική στην αγορά μετά την εξυπηρέτηση. Αυτό το έξυπνο εργαλείο βελτίωσε σημαντικά την αποτελεσματικότητα της διάγνωσης. Επιπλέον, οι μηχανικοί σέρβις μπορούν να επιτύχουν μεγάλη βοήθεια από την εξαιρετική καθοδήγηση διάγνωσης, η οποία συντομεύει την περίοδο διάγνωσης και συντήρησης.

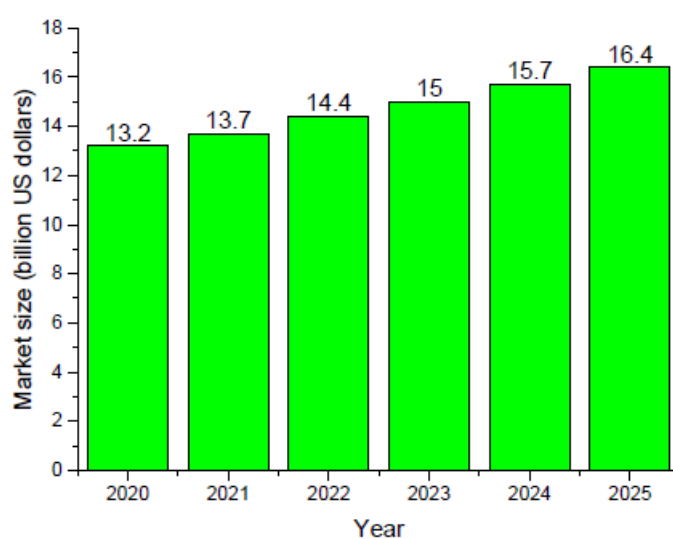
Η εργασία των Wang et al. (2009), περιέγραψε ένα διαδραστικό φιλικό προς τον χρήστη έξυπνο diagnostic εργαλείο βασισμένο στο KWP 2000. Σχεδίασε ειδική μονάδα επικοινωνίας και υλοποίησε τη φυσική σύνδεση μεταξύ της διαγνωστικής πλατφόρμας και της ECU. Με αυτόν τον τρόπο, το διαγνωστικό εργαλείο πραγματοποίησε ακριβή και γρήγορη επικοινωνία KWP2000 με ρυθμό έως $57,600\text{bit/s}$. Το διαγνωστικό λογισμικό υλοποίησε τη λειτουργική μονάδα GSS και τη βασική λειτουργική μονάδα με έξι έξυπνες δοκιμές και τέσσερις λειτουργίες: Οι έξυπνες δοκιμές, συμπεριλαμβανομένης της δοκιμής συμπίεσης, της δοκιμής διακοπής λειτουργίας, της δοκιμής λειτουργίας, της δοκιμής διαρροής καυσίμου, της ηλεκτρικής δοκιμής και της δοκιμής υψηλής πίεσης, προγραμματίστηκαν από Μονάδα λειτουργίας GSS με τη λογική διάγνωσης της καθημερινής σκέψης των επαγγελματιών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδωσαν μεγάλη βοήθεια στους μηχανικούς συντήρησης και επιτεύχθηκε εξαιρετική καθοδήγηση διάγνωσης. Η βασική λειτουργική μονάδα εκτελούσε τις ακόλουθες λειτουργίες: Η επικοινωνία υιοθέτησε τη λειτουργία γρήγορης προετοιμασίας. Η διαχείριση DTC μπορούσε να

διαβάσει, να διαγράψει και να αποθηκεύσει τους κωδικούς DTC με τη σχετική κατάστασή τους και να παγώσει τα δεδομένα. Η μέτρηση μπορούσε να διαβάσει και να αποθηκεύσει αναλογικά σήματα εισόδου και εξόδου, ψηφιακά σήματα εισόδου και εξόδου, εσωτερικά δεδομένα και πληροφορίες κατάστασης συστήματος, τα δεδομένα αυτά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για επεξεργασία, ανάλυση και αξιολόγηση εκτός σύνδεσης. Τα δεδομένα προγραμματισμού θα μπορούσαν να εγγράψουν δεδομένα είτε ολόκληρο το περιεχόμενο της μνήμης flash είτε μέρος των περιοχών μνήμης σε ECU. Όλες οι δοκιμές έδειξαν ότι αυτό το διαγνωστικό εργαλείο μπορούσε να πραγματοποιήσει ακριβή και γρήγορη επικοινωνία δεδομένων, ηλεκτρονική διαχείριση DTC, ανανέωση δεδομένων μέτρησης σε πραγματικό χρόνο και δυναμική ενημέρωση και δεδομένα διαδικτυακού προγραμματισμού. Βελτίωσε σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την ευκολία της διάγνωσης και συντόμευσε την περίοδο διάγνωσης και συντήρησης.

3.2.Τεχνολογία Ευφυούς Διάγνωσης Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Συστήματος Έγχυσης Καυσίμου Κινητήρα Diesel

Ο κινητήρας ντίζελ ξεχωρίζει ανάμεσα στις υπόλοιπες κινητήριες μηχανές καθώς παίζει σημαντικό ρόλο στις μεταφορές, τη βιομηχανία, τη γεωργία και τις κατασκευές εθνικής άμυνας λόγω των χαρακτηριστικών του υψηλής ισχύος, υψηλής θερμικής απόδοσης, υψηλής αξιοπιστίας, άνετης συντήρησης και μεγάλης διάρκειας ζωής (Gabdrāfikov, 2021). Ειδικά στις θαλάσσιες μεταφορές πλοίων, ο κινητήρας ντίζελ είναι η κύρια πηγή ενέργειας των πλοίων και κατέχει κυρίαρχη θέση. Σε μεγάλα και μεσαίου μεγέθους πολιτικά πλοία, περισσότερο από το 90% χρησιμοποιεί κινητήρα ντίζελ ως κύρια μονάδα ισχύος πρόωσης. Σύμφωνα με την πρόβλεψη του μελλοντικού Ινστιτούτου Έρευνας Βιομηχανικής Τεχνολογίας (Industrial Technology Research Institute), το μέγεθος της παγκόσμιας αγοράς κινητήρων ντίζελ από το 2020 έως το 2025 φαίνεται στο Σχ. 9, με αύξηση 30% σε σύγκριση με το 2019. Ο κινητήρας που παρέχει την ισχύ είναι η καρδιά του πλοίου και η οικονομία και το επίπεδο εκπομπών του ναυτικού κινητήρα ντίζελ επηρεάζουν άμεσα την αποτελεσματικότητα της ασφαλούς λειτουργίας ολόκληρου του πλοίου. Ωστόσο, ο κινητήρας ντίζελ θαλάσσης θα παράγει μεγάλη ποσότητα NO_x, PM και SO_x κατά τη λειτουργία, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Ni et al., 2020). Ειδικά, με την περαιτέρω επιδείνωση της έλλειψης ενέργειας και της περιβαλλοντικής

ρύπανσης σε παγκόσμιο επίπεδο, οι σχετικές συμβάσεις θέτουν αυστηρότερα όρια για την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων των κινητήρων ντίζελ πλοίων. Η απόδοση λειτουργίας του συστήματος έγχυσης καυσίμου ντίζελ παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της κατάστασης καύσης του κινητήρα ντίζελ, στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων. Το παραδοσιακό σύστημα ψεκασμού καυσίμου με ελεγχόμενο έκκεντρο, λόγω της επίδρασης του τύπου του έκκεντρου και της ταχύτητας του κινητήρα ντίζελ, δημιουργεί πρόβλημα στην ακρίβεια, την ευελιξία και τον έλεγχο του κινητήρα. Οι λόγοι για το πρόβλημα αυτό είναι κυρίως οι παράμετροι έγχυσης καυσίμου του κινητήρα ντίζελ, δηλαδή η ποσότητα έγχυσης καυσίμου, η πίεση έγχυσης καυσίμου, ο χρονισμός έγχυσης καυσίμου, ο ρυθμός έγχυσης καυσίμου. Επίσης η τεχνική δομή του κινητήρα ντίζελ είναι πολύπλοκη και το ποσοστό αστοχίας υψηλό, επομένως δημιουργούνται δυσκολίες στην προσπάθεια περαιτέρω των ολοένα και πιο αυστηρών απαιτήσεων εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης των εκπομπών ρύπων. Οι χαμηλές εκπομπές ρύπων, η χαμηλή κατανάλωση καυσίμου, η υψηλή αξιοπιστία, η μεγάλη ελευθερία ελέγχου και η άνετη λειτουργία και συντήρηση είναι οι στόχοι συνεχούς ανάπτυξης του πετρελαιοκινητήρα πλοίων. Λόγω της υψηλής ακρίβειας ελέγχου, της ευελιξίας και των πλήρων λειτουργιών του, το ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα ψεκασμού καυσίμου μπορεί να πραγματοποιήσει την καλύτερη απόδοση ψεκασμού καυσίμου του κινητήρα ντίζελ υπό πλήρες φορτίο,



Σχ. 9. Μέγεθος παγκόσμιας αγοράς κινητήρων ντίζελ 2020-2025

Το ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα έγχυσης καυσίμου περιλαμβάνει κυρίως ηλεκτρονικά ελεγχόμενη αντλία μονάδας, ηλεκτρονικά ελεγχόμενο ακροφύσιο αντλίας και σύστημα έγχυσης υψηλής πίεσης Common Rail (Wei et al., 2022). Μεταξύ αυτών, το σύστημα έγχυσης καυσίμου υψηλής πίεσης Common Rail, δηλαδή ο κοινός συσσωρευτής καυσίμου υψηλής πίεσης για όλα τα μπεκ ψεκασμού μιας σειράς κυλίνδρων έχει γίνει το κύριο μοντέλο θαλάσσιου κινητήρα ντίζελ λόγω του υψηλού τεχνικού περιεχομένου, της υψηλής προστιθέμενης αξίας και της εξαιρετικής επίδρασης της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης των εκπομπών. Προς το παρόν, υπάρχουν τρεις κύριοι κατασκευαστές θαλάσσιων κινητήρων ντίζελ χαμηλής ταχύτητας: Man, Wingd και Mitsubishi UE. Μεταξύ αυτών, η Man έχει τον υψηλότερο αριθμό κινητήρων ντίζελ χαμηλής ταχύτητας που αποστέλλονται τα τελευταία δέκα χρόνια, με μερίδιο αγοράς 84,6% και μερίδιο αγοράς ισχύος 80,9% (Yongzhi et al., 2017). Με βάση την ισχυρή παρουσία της Man στην αγορά θαλάσσιων κινητήρων χαμηλής ταχύτητας, η προοπτική αγοράς του ηλεκτρονικά ελεγχόμενου κινητήρα ντίζελ χαμηλής ταχύτητας Common Rail της σειράς ναυτιλιακών κινητηρων (marine engine, ME) είναι επίσης πολλά υποσχόμενη (Demir & Çitakoğlu, 2022). Επειδή ο θαλάσσιος κινητήρας ντίζελ λειτουργεί σε σκληρό περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα, είναι εύκολο να επηρεαστεί από τη διάβρωση του θαλασσινού νερού, τους κραδασμούς, τη φθορά, τη ρύπανση και άλλους παράγοντες, που θα προκαλέσουν βλάβη και θα επηρεάσουν την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του πλοίου. Η τιμή του πετρελαιοκινητήρα θαλάσσης αντιπροσωπεύει περίπου το 10% - 20% της τιμής κατασκευής ολόκληρου του πλοίου και το κόστος συντήρησης το αντιπροσωπεύει επίσης το μεγαλύτερο μέρος του κόστους λειτουργίας του πλοίου (Wang et al., 2021). Σύμφωνα με τα στατιστικά αποτελέσματα της Ένωσης μηχανικών και χρηστών ντίζελ (Association of diesel engineers and users), όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, οι βλάβες του συστήματος καυσίμου αντιπροσωπεύουν το 27% των συνολικών βλαβών των κινητήρων ντίζελ (Υαγού, 2012) και το σύστημα ψεκασμού καυσίμου επηρεάζει άμεσα την απόδοση λειτουργίας του κινητήρα, και στη συνέχεια επηρεάζει την ισχύ, την οικονομία, τις εκπομπές και την αξιοπιστία του πλοίου. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να γίνει διάγνωση της βλάβης του συστήματος ψεκασμού καυσίμου, ώστε να διασφαλιστεί η ασφάλεια του πλοίου.

Πίνακας 1. Ποσοστό αστοχίας εξαρτήματος κινητήρα ντίζελ

Θέση σφάλματος	Ποσοστό επίπτωσης%
Σύστημα καυσίμου	27
Σύστημα διανομής φυσικού αερίου	15.1
Διαρροή νερού	17.3
Βλάβη ρουλεμάν	7
Αστοχία σετ εμβόλου	6.6
Σφάλμα συστήματος λίπανσης και διαρροής λαδιού	5.2
Βλάβη υπερσυμπιεστή ρουλεμάν	4.4
Βλάβη συσκευής οδήγησης και ταχύτητας	3.9
Άλλα σφάλματα	13.5

Σε αρκετές εργασίες εξετάζονται το μελλοντικό σχέδιο ανάπτυξης ευφυών πλοίων. το ευρύτερο πλαίσιο οικοδόμησης της ευφυούς ναυτιλίας, και το περίγραμμα της ανάπτυξης ψηφιακών μεταφορών (Alop, 2019). Στη διαδικασία ανάπτυξης του ευφυούς πλοίου, η έξυπνη επιτήρηση και ο έλεγχος του πετρελαιοκινητήρα θαλάσσης αντιπροσωπεύουν καλύτερα την ανάπτυξη του ευφυούς μηχανοστασίου και η ασφάλεια, η αξιοπιστία και η οικονομία του επηρεάζουν άμεσα τη ναυσιπλοΐα του πλοίου (Melnyk et al., 2022).

Η έξυπνη τεχνολογία διάγνωσης του συστήματος έγχυσης καυσίμου ντίζελ που ενσωματώνει την τεχνολογία υπολογιστών, την τεχνολογία αυτομάτου ελέγχου, την τεχνολογία επεξεργασίας και ανάλυσης μεγάλων δεδομένων θα αντικατοπτρίζει άμεσα το επίπεδο κατασκευής και διαχείρισης του ευφυούς μηχανοστασίου του πλοίου.

3.2.1. Αρχή Λειτουργίας και Κοινές Βλάβες

Ο κινητήρας ME diesel είναι ένας έξυπνος κινητήρας ντίζελ χαμηλής ταχύτητας που κυκλοφόρησε από την εταιρεία Man. Έχει τα χαρακτηριστικά χαμηλών εκπομπών ρύπων, χαμηλής κατανάλωσης καυσίμου, απλής δομής, υψηλής αξιοπιστίας και εύκολης συντήρησης και απαιτεί μικρότερη μεταμόρφωση σε σχέση με το παραδοσιακό μοντέλο. Ως εκ τούτου, αντικαθιστά σταδιακά τον παραδοσιακό

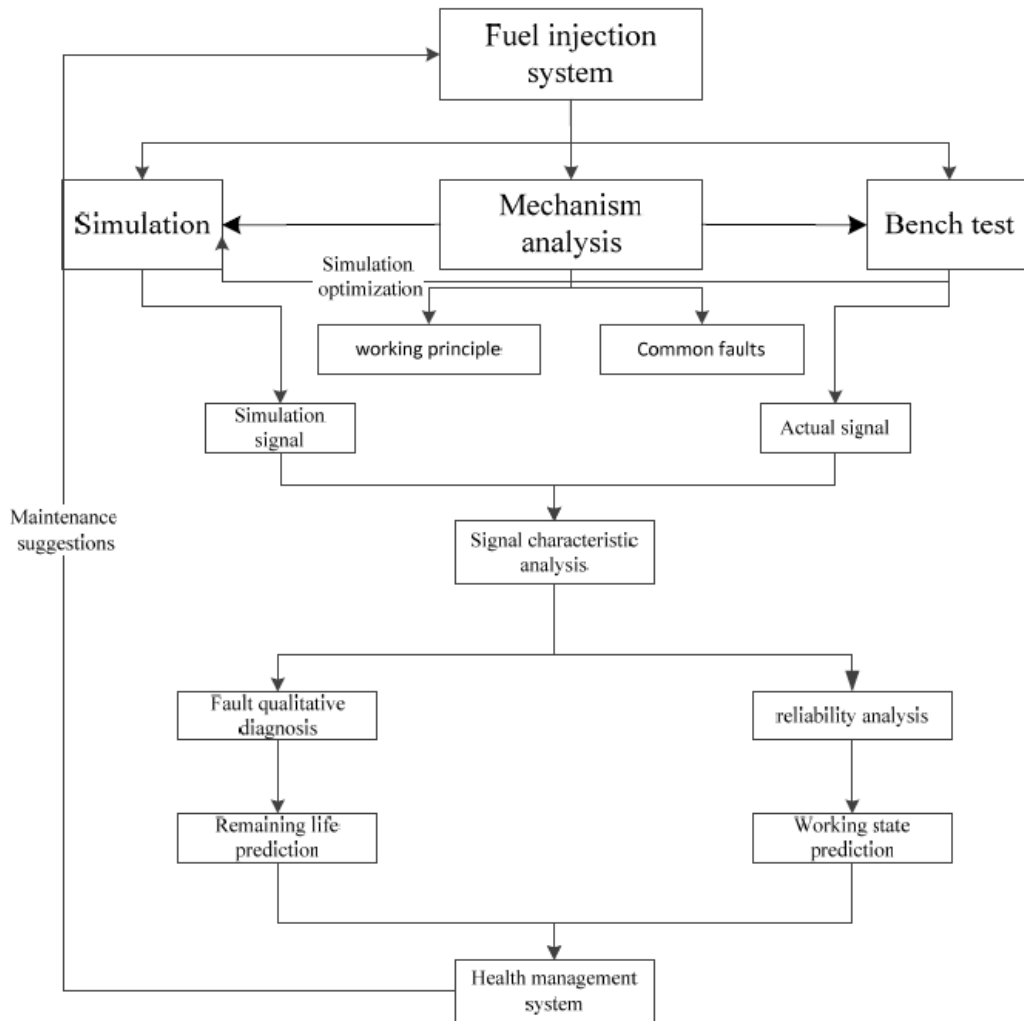
εκκεντροφόρο κινητήρα ντίζελ και γίνεται το προτιμώμενο μοντέλο θαλάσσιου κινητήρα ντίζελ χαμηλής ταχύτητας. Η μονάδα υδραυλικού ψεκασμού και η μονάδα έγχυσης καυσίμου μέσης πίεσης του κινητήρα ντίζελ αποτελούνται κυρίως από τη μονάδα υδραυλικής ισχύος που παρέχει μια κοινή ράγα λιπαντικού μέσης πίεσης με πίεση 200 bar μέσω της ενισχυτικής αντλίας λαδιού λίπανσης και στη συνέχεια κάθε κύλινδρος παρέχει καύσιμο υψηλής πίεσης μέσω του ελέγχου της μονάδας υδραυλικού κυλίνδρου.

Ο σύγχρονος ναυτιλιακός κινητήρας diesel ηλεκτρονικής έγχυσης καυσίμου (electronic fuel injection, EFI) είναι ένα προϊόν υψηλής τεχνολογίας με υψηλό τεχνικό περιεχόμενο και υψηλή προστιθέμενη αξία, που συμβάλλει στην ασφάλεια της ζωής και της περιουσίας στο πλοίο και στην προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Οι παραδοσιακές διαγνωστικές μέθοδοι δεν ανταποκρίνονται πλέον στις απαιτήσεις της υπάρχουσας τεχνολογίας, έτσι η σημερινή τεχνολογία ευφυούς διάγνωσης είναι ένα σύγχρονο διεπιστημονικό επίτευγμα που ενσωματώνει πολλές τεχνολογίες από τη μηχανολογία, την ηλεκτρονική, τους υπολογιστές, την επεξεργασία σήματος, την τεχνητή νοημοσύνη και την αναλυτική μεγάλων δεδομένων. Το κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι μπορεί αυτόματα να συλλέγει και να αναλύει δεδομένα, να προβλέπει τύπους βλαβών και τάσεις ανάπτυξης και να καθοδηγεί και να δίνει προτάσεις επισκευής. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας μπορεί να αλλάξει τον κινητήρα ντίζελ πλοίων από τακτική προληπτική συντήρηση σε συντήρηση βάσει συνθηκών, να αποτρέψει και να μειώσει το ποσοστό ατυχημάτων και να βελτιώσει τα οικονομικά οφέλη του κινητήρα ντίζελ κατά τη λειτουργία. Η έρευνα για την Τεχνολογία Έξυπνης Διάγνωσης του συστήματος έγχυσης καυσίμου κινητήρων θαλάσσιων πετρελαιοκινητήρων περιλαμβάνει κυρίως ανάλυση μηχανισμού σφαλμάτων, μέτρηση δεδομένων πολλαπλών συνθηκών και εξαγωγή χαρακτηριστικών, αναγνώριση προτύπων κατάστασης λειτουργίας και πρόβλεψη υπολειπόμενης ζωής. Η κύρια διαδικασία τεχνικής διάγνωσης φαίνεται στο Σχ. 10 και στη συνέχεια συνοψίζεται η ερευνητική κατάσταση τεσσάρων τεχνολογιών.

(1) Ανάλυση μηχανισμού σφάλματος: Η ανάλυση μηχανισμού είναι η βάση και η σημαντική βάση της διάγνωσης βλαβών, καθώς μπορεί να αποκαλύψει τα αίτια των βλαβών και να προβλέψει την τάση εξέλιξης τους. Έχει σημαντική καθοδηγητική σημασία για την ακριβή διάκριση των αιτιών βλάβης, τον προσδιορισμό των

χαρακτηριστικών σφαλμάτων και τον προσδιορισμό των τύπων και των επιπέδων κινδύνου. Οι Wang et al. (2021) χρησιμοποίησαν τη θεωρία γραφημάτων για να μοντελοποιήσουν και να προσομοιώσουν το σύστημα καυσίμου μιας θαλάσσιας μηχανής ντίζελ και ανέλυσαν τη δυναμική απόκριση της απόδοσης λειτουργίας του συστήματος καυσίμου σε διαφορετικές καταστάσεις σφάλματος. Οι Oefelein et al. (2012) χρησιμοποίησαν λογισμικό για να μοντελοποιήσουν και να προσομοιώσουν το σύστημα καυσίμου του common rail υψηλής πίεσης, και να παρέχουν αναφορές για τον σχεδιασμό παραμέτρων του συστήματος καυσίμου common rail υψηλής πίεσης. Με βάση το λογισμικό AVL BOOST και τα δεδομένα δοκιμών πάγκου, οι Yang & Fan (2018) προσομοίωσαν ορισμένα σφάλματα του ναυτικού κινητήρα ντίζελ χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μεταβλητής ελέγχου, η οποία παρέχει έναν νέο τρόπο για την έξυπνη τεχνολογία διάγνωσης σφαλμάτων του κινητήρα ντίζελ. Οι Bai et al. μελέτησαν τον νόμο επιρροής της διακύμανσης του ψεκασμού καυσίμου καθιερώνοντας ένα μοντέλο γραφήματος δεσμών ισχύος σε συνδυασμό με πολλαπλά φυσικά πεδία και μελέτησαν τους παράγοντες που επηρεάζουν τη σταθερότητα της διαδικασίας έγχυσης καυσίμου του συστήματος common rail υψηλής πίεσης με βάση το μοντέλο καταστάσεων μήτρας (Bai et al., 2021). Οι Mohebbi et al. (2017) πρότειναν μια μέθοδο πρόβλεψης ποσότητας έγχυσης καυσίμου σε κυκλοφορία που βασίζεται στην πτώση πίεσης common rail, αποκαλύπτοντας τη σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών παραμέτρων της στιγμιαίας πίεσης και της ποσότητας έγχυσης καυσίμου. Οι Ling Jian et al. εξήγαγαν τις χαρακτηριστικές παραμέτρους της στιγμιαίας κυματομορφής πίεσης common rail για την παρατήρηση της έγχυσης καυσίμου. Ο Ferrari & Paolicelli (2017) κατασκεύασαν το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος common rail υψηλής πίεσης και μελέτησαν την επίδραση του μήκους, της διαμέτρου και της βαλβίδας περιορισμού της αντλίας λαδιού υψηλής πίεσης στην απόδοση του συστήματος. Οι Su et al. (2019) μελέτησαν τον μηχανισμό του φαινομένου της υδροσφύρας (water hammer) στο σύστημα common rail υψηλής πίεσης και την επιρροή του στην πολλαπλή έγχυση του εγχυτήρα και της ακολουθίας έγχυσης και πρότειναν το σύνθετο φίλτρο τύπου H ως ένα ιδανικό φίλτρο για την εξάλειψη της διακύμανσης της πίεσης και της διακύμανσης του όγκου καυσίμου.



Σχ. 10. Συνήθεις βλάβες του συστήματος ηλεκτρονικού ελέγχου ψεκασμού καυσίμου ΜΕ.

(2) Μέτρηση δεδομένων και εξαγωγή χαρακτηριστικών: το σύστημα καυσίμου κινητήρα ντίζελ είναι ένα τυπικό πολύπλοκο φυσικό σύστημα πολλαπλών εισόδων και πολλαπλών εξόδων που ενσωματώνει μηχανικά, ηλεκτρικά, υδραυλικά και μαγνητικά πεδία. Η διαδικασία εργασίας περιλαμβάνει διάφορα σήματα όπως θερμοκρασία, πίεση, ροή, δόνηση, τριβή και φθορά. Οι Li et al. (2015) πραγματοποίησαν πείραμα προσομοίωσης σφάλματος σε τετράχρονο κινητήρα ντίζελ, μέτρησαν το στιγμιαίο σήμα ταχύτητας και εξήγαγαν χαρακτηριστικές παραμέτρους με t-Κατανομημένη Στοχαστική Ενσωμάτωση Γειτόνων (t-distributed stochastic neighbor embedding, T-sne). Οι Chiatti et al. (2014), χρησιμοποίησαν το σήμα δόνησης της κυλινδροκεφαλής

του κινητήρα ντίζελ για τη διάγνωση της κατάστασης καύσης. Οι Xi et al. (2018) μέτρησαν τα δεδομένα κραδασμών της κυλινδροκεφαλής του κινητήρα ντίζελ σε πέντε καταστάσεις αστοχίας: αστοχία βαλβίδας εισαγωγής, αστοχία βαλβίδας εξαγωγής, αστοχία διωστήρα, αστοχία πείρου εμβόλου και αστοχία δακτυλίου εμβόλου εγκαθιστώντας αισθητήρες κραδασμών σε τετράχρονο κινητήρα ντίζελ και διαχώρισαν τα δεδομένα που σχετίζονται με την αστοχία χρησιμοποιώντας βελτιωμένη ανάλυση ανεξάρτητων στοιχείων πυρήνα με επίβλεψη χρόνου-συχνότητας (improved time-frequency supervised kernel independent component analysis, tfski), και επίσης ο αλγόριθμος T-sne χρησιμοποιείται για εξαγωγή και εμφάνιση δεδομένων χαρακτηριστικών σφαλμάτων. Οι Hu et al. (2011), βελτίωσαν περαιτέρω τη διαγνωστική ακρίβεια συλλέγοντας τα σήματα δόνησης των κυλίνδρων διακοπής πυροδότησης και των παρακείμενων ζευγών κυλίνδρων και χρησιμοποιώντας το μοντέλο θορύβου Max. Ο Zhao et al. (2019), μείωσαν τη διάσταση του σήματος δόνησης της κεφαλής κυλίνδρου χρησιμοποιώντας ανάλυση κύριας συνιστώσας και επέλεξαν το χαρακτηριστικό σήμα από τα χαρακτηριστικά του τομέα χρόνου και συχνότητας. Οι Wang et al. (2020), μέτρησε την κυματομορφή πίεσης στον θάλαμο λαδιού υψηλής πίεσης μέσω του αισθητήρα σύσφιξης και εξήγαγε τα χαρακτηριστικά με μετασχηματισμό κυματιδίων (wavelet transform). Οι Jia et al. (2016), εξήγαγαν αποτελεσματικά τα δεδομένα κατάστασης λειτουργίας των περιστρεφόμενων μηχανημάτων χρησιμοποιώντας βαθύ νευρωνικό δίκτυο.

(3) Αναγνώριση προτύπου σφάλματος: Οι Xi et al. (2018), χρησιμοποίησαν ακραία μηχανή εκμάθησης (extreme learning machine, ELM) για την ταξινόμηση των σφαλμάτων, η οποία απέτρεψε το νευρωνικό δίκτυο BP να καταλήξει σε τοπικά ελάχιστα σημεία και βελτίωσε τον ρυθμό αναγνώρισης προτύπων. Οι Wei et al. (2018), παρακολούθησαν την κατάσταση του θαλάσσιου κινητήρα ντίζελ χαμηλής ταχύτητας χρησιμοποιώντας μοντέλο αυτόματης συσχέτισης παλινδρόμησης. Οι Xu et al. (2020), χρησιμοποίησαν τη μέθοδο σύντηξης πληροφοριών (information fusion) που συνδυάζει τη θεωρία ακατέργαστων συνόλων και αποδεικτικών στοιχείων για τον εντοπισμό των κρυφών κινδύνων από σφάλματα πλοίων. Ο Gu et al. (2018), χρησιμοποίησαν τη μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (support vector machine, SVM) για τη διάγνωση τυπικών βλαβών του κινητήρα ντίζελ, όπως αστοχία, σύγκρουση κυλίνδρου και φθορά μικρής κεφαλής, με ακρίβεια 98%. Ο Kluczyk &

Grządziela (2019), προσομοίωσαν και διέγνωσαν το σφάλμα εμπλοκής της βαλβίδας μέτρησης και του συστήματος λαδιού αντλίας της αντλίας λαδιού κοινής οδού υψηλής πίεσης θαλάσσης με βάση το σήμα πίεσης του θαλάμου αποθήκευσης πίεσης της αντλίας λαδιού υψηλής πίεσης. Οι Rubio et al. (2018) προσομοίωσαν την τάση αλλαγής παραμέτρων όταν το σύστημα καυσίμων του πλοίου απέτυχε στην πλατφόρμα προσομοίωσης. Οι Porteiro et al. (2011), προσδιόρισαν το φορτίο και την κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα ντίζελ χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία καυσαερίων και τα σήματα δόνησης μέσω τεχνολογίας πολυστρωματικών νευρωνικών δικτύων. Οι Nikzadfar & Shamekhi (2014), χρησιμοποίησαν νευρωνικό δίκτυο για τη μελέτη των επιπτώσεων διαφορετικών παραμέτρων διαφορετικών συστημάτων common rail υψηλής πίεσης στην απόδοση λειτουργίας και τις εκπομπές του κινητήρα ντίζελ.

(4) Πρόβλεψη υπολειπόμενης ζωής: Οι Ma et al. (2022), πρότειναν ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο νευρωνικού δικτύου για την πρόβλεψη της απόδοσης λειτουργίας του κινητήρα ντίζελ. Οι Gualeni et al. (2019), πρότειναν μια μέθοδο αξιολόγησης απόδοσης του κύριου κινητήρα ντίζελ πλοίου στο πραγματικό περιβάλλον δεδομένων πλοίου και τα αποτελέσματα της αξιολόγησης μπορούν να περιγράψουν τη διαδικασία υποβάθμισης της απόδοσης του κύριου κινητήρα ντίζελ. Οι Zhou & Liu (2011), ανέλυσαν την υποβάθμιση της απόδοσης του κινητήρα ντίζελ μέσω φασματικής ανάλυσης λαδιού. Ο Hountalas (2000), πρόβλεψε την απόδοση λειτουργίας του κινητήρα ντίζελ καθιερώνοντας ένα μοντέλο απόδοσης, ενώ οι Baskurko & Uriondo (2015), μελέτησαν την απόφαση συντήρησης βάσει συνθηκών του ναυτικού κινητήρα ντίζελ μέσης ταχύτητας.

Μέσα από την παραπάνω ανάλυση, διαφαίνεται ότι η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στον τετράχρονο κινητήρα ντίζελ, ενώ η έρευνα για το σύστημα ψεκασμού καυσίμου θαλάσσιου δίχρονου πετρελαιοκινητήρα χαμηλής ταχύτητας και υψηλής ισχύος είναι μικρότερη.

3.2.2. Προκλήσεις της Τεχνολογία Ευφυούς Διάγνωσης

Η τεχνολογία ευφυούς διάγνωσης περιλαμβάνει πολλούς κλάδους, όπως η μηχανολογία, η θερμική μηχανική, η μηχανική ρευστών, η μηχανική ελέγχου, η τεχνητή νοημοσύνη και τα μεγάλα δεδομένα. Στοχεύοντας στο ναυτικό σύστημα

ηλεκτρομηχανικής έγχυσης καυσίμου ντίζελ, η ανάπτυξη της έξυπνης τεχνολογίας διάγνωσης αντιμετωπίζει κυρίως τα ακόλουθα προβλήματα.

(1) Ο μηχανισμός σφάλματος είναι πολύπλοκος: το θαλάσσιο ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα έγχυσης καυσίμου εγκαθίσταται γενικά στον κύριο κινητήρα ντίζελ χαμηλής ταχύτητας, ο οποίος έχει τα χαρακτηριστικά υψηλής ισχύος, σύνθετης δομής, υψηλού κόστους κτήσης και λειτουργίας. Προς το παρόν, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του και τον μηχανισμό σφάλματος, ο υπολογισμός της προσομοίωσης πραγματοποιείται κυρίως μέσω αριθμητικής προσομοίωσης. Τα δεδομένα που λαμβάνονται μπορούν να αντικατοπτρίζουν τον εσωτερικό μηχανισμό και τον εσωτερικό νόμο του σφάλματος σε κάποιο βαθμό, αλλά η ακρίβεια είναι δύσκολο να επαληθευτεί στο πραγματικό πλοίο.

(2) Τα πειραματικά δεδομένα είναι ανεπαρκή και η δομή είναι ενιαία: επί του παρόντος, η πειραματική έρευνα στο ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα έγχυσης καυσίμου γίνεται κυρίως μέσω της ρύθμισης ορισμένων κοινών βλαβών στο εργαστήριο και στη συνέχεια της συλλογής των θερμικών παραμέτρων απόκρισης ή των σημάτων δόνησης για ανάλυση. Επειδή στο πραγματικό πλοίο, το σύστημα ψεκασμού καυσίμου αντιμετωπίζει πολλαπλές συνθήκες εργασίας και περίπλοκο και μεταβαλλόμενο περιβάλλον και ο τρόπος αστοχίας του συχνά έχει τα χαρακτηριστικά αβεβαιότητας, ταυτόχρονης χρήσης και σύζευξης, επομένως είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ανάλυση δεδομένων πολλαπλών πηγών.

(3) Η επεκτασιμότητα του αλγορίθμου δεν είναι ισχυρή: οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή χαρακτηριστικών δεδομένων περιλαμβάνουν κυρίως μετασχηματισμό Fourier, μετασχηματισμό κυματιδίων, ανάλυση στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, αποσύνθεση εμπειρικού τρόπου και διαχωρισμό τυφλών πηγών. Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και πεδία εφαρμογής, με αποτέλεσμα την έλλειψη ενός συνόλου προτύπων εφαρμογής. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση προτύπων, συμπεριλαμβανομένου του νευρωνικού δικτύου οπισθοδιάδοσης (back propagation, BP) και της μηχανής διανυσμάτων υποστήριξης, μπορούν να αντιμετωπίσουν μόνο μονοδιάστατα δεδομένα. Για πολύπλοκα δεδομένα σε πολλαπλές καταστάσεις σφάλματος, απαιτούνται πιο αποτελεσματικοί αλγόριθμοι.

(4) Η λειτουργία πρόβλεψης σφαλμάτων πρέπει να βελτιωθεί: για τους διαχειριστές πλοίων δεν χρειάζονται χαρακτηριστικές παραμέτρους μετά την εξαγωγή και ανάλυση των χαρακτηριστικών σήματος, αλλά ο τύπος σφάλματος, η αιτία σφάλματος, η τάση ανάπτυξης σφάλματος και τα μέτρα συντήρησης που πρέπει να ληφθούν. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα σύνολο συστημάτων διαχείρισης υγείας με πιο εξελιγμένες λειτουργίες για την κάλυψη διαφορετικού προσωπικού.

3.2.3. Μελλοντική Τάση Ανάπτυξης της Τεχνολογίας

Η ανάπτυξη έξυπνης τεχνολογίας διάγνωσης του ηλεκτρονικά ελεγχόμενου συστήματος έγχυσης καυσίμου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του κινητήρα ντίζελ πλοίων και στην προώθηση της ανάπτυξης ευφυούς πλοίου. Η αναπτυξιακή του τάση περιλαμβάνει κυρίως τις ακόλουθες πτυχές:

- **Έρευνα στη Στρατηγική Ελέγχου:** η στρατηγική ελέγχου είναι η βάση για το ηλεκτρονικό σύστημα ψεκασμού καυσίμου για να επιτύχει μέγιστη απόδοση. Η έρευνα σχετικά με τη στρατηγική προσαρμοστικού ευφυούς ελέγχου σύμφωνα με το εξωτερικό περιβάλλον και τις συνθήκες εργασίας έχει σημαντική καθοδηγητική σημασία για την κατανόηση του μηχανισμού σφάλματος και του τρόπου βλάβης του συστήματος ψεκασμού καυσίμου.
- **Βελτιστοποίηση της διάταξης των σημείων παρακολούθησης δεδομένων:** για να ληφθούν πιο ακριβή και αποτελεσματικά δεδομένα, είναι απαραίτητο να βελτιστοποιηθεί η τοποθέτηση και η ρύθμιση των αισθητήρων δειγματοληψίας δεδομένων για να παρέχεται υποστήριξη για ανάλυση συγχώνευσης δεδομένων πολλαπλών πηγών.
- **Βελτιστοποίηση ευφυούς αλγορίθμου:** κατά τη λειτουργία του συστήματος καυσίμου δημιουργείται μεγάλος όγκος δεδομένων, κάτι που απαιτεί ο αλγόριθμος επεξεργασίας δεδομένων να μπορεί να αναλύει προσαρμοστικά μεγάλα δεδομένα και να εξάγει αποτελεσματικές πληροφορίες για εξαγωγή χαρακτηριστικών. Ο αλγόριθμος αναγνώρισης προτύπων μπορεί να έχει ισχυρότερη ικανότητα γενίκευσης και αυτόνομη ικανότητα μάθησης και μπορεί να προσαρμόσει προσαρμοστικά τη δομή του αλγορίθμου σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των δεδομένων.
- **Ανάπτυξη συστήματος διαχείρισης υγείας:** η έξυπνη τεχνολογία διάγνωσης μπορεί να κάνει διάγνωση σε πραγματικό χρόνο και μέσω σύνδεσης

δεδομένων και έχει τις λειτουργίες εξαγωγής πρώιμων σημάτων σφάλματος, ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων πολλαπλών πηγών, ποσοτικής αναγνώρισης των τρόπων βλάβης, πρόβλεψης της υπολειπόμενης ζωής και προτάσεων συντήρησης, ώστε να αναπτυχθεί ένα πλήρες σύνολο συστημάτων διαχείρισης υγείας και να αναπτυχθεί η τακτική συντήρηση προς τη συντήρηση βάσει συνθηκών.

3.3.Πρόβλεψη Εκπομπών NO_x και Απόδοση Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Κινητήρα Ντίζελ

Η ανάπτυξη θαλάσσιων κινητήρων ντίζελ χαμηλής ταχύτητας με χαμηλότερες εκπομπές καθοδηγείται κυρίως από τον κανονισμό MARPOL Παράρτημα VI (IMO, 2008.) που εγκρίθηκε από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization, IMO). Το παράρτημα VI του MARPOL περιέχει κανονισμούς και ανώτατα επιτρεπτά όρια για τις εκπομπές NO_x, SO_x και τις εκπομπές σωματιδίων PM, τόσο για τα νέα όσο και για τα υπάρχοντα πλοία.

Οι επιτρεπόμενες εκπομπές NO_x μειώνονται σε 14.4 g/kWh για μεγάλους θαλάσσιους κινητήρες χαμηλής ταχύτητας ($\leq 130rpm$) που είναι εγκατεστημένοι σε πλοία που ναυπηγήθηκαν από την 1η Ιανουαρίου 2011 και μετά, σύμφωνα με το πρότυπο Tier II, και σε 3.4 g/kWh σε κινητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε πλοία κατασκευασμένα από την 1η Ιανουαρίου 2016 και μετά, σύμφωνα με το Tier III σε καθορισμένες περιοχές ελέγχου εκπομπών.

Ο ευρέως χρησιμοποιούμενος δίχρονος κινητήρας ντίζελ χαμηλής ταχύτητας μπορεί να συνδυαστεί με μια μονάδα ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας και με τον τρόπο αυτό είναι πιθανόν να προσφέρει μοναδικά υψηλή απόδοση καυσίμου και χαμηλές ειδικές εκπομπές για την πρόωση πλοίου με κινητήρα ντίζελ. Κατά το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση ενός τέτοιου συνδυασμένου ενεργειακού συστήματος, η εστίαση είναι στην αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων του συστήματος και όχι στη συμπεριφορά των εξαρτημάτων. Επιπλέον, ο πρόσφατα προσαρμοσμένος δείκτης σχεδίασης απόδοσης κινητήρα (Engine Efficiency Design Index, EEDI)², επιβάλλει περαιτέρω περιορισμούς στη διάταξη του κινητήρα, των

² IMO, Energy Efficiency Measures, <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/technical-and-operational-measures.aspx>

βοηθητικών εξαρτημάτων κ.λπ. Έτσι, ένα γρήγορο, αλλά θερμοδυναμικά ρεαλιστικό μοντέλο κινητήρα που μπορεί να ενσωματωθεί με λογισμικό ανάλυσης ενεργειακού συστήματος είναι ιδιαίτερα επιθυμητό για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του κινητήρα σε συνδυασμό με την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας για ελάχιστο NO_x καθώς και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Green House Gas, GHG).

Στη βιβλιογραφία έχουν δημοσιευθεί διάφορες μεθοδολογίες μοντελοποίησης για τον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Το εύρος της εφαρμογής, η ακρίβεια και η ζήτηση χρόνου υπολογισμού, είναι οι καθοριστικές παράμετροι για την προσέγγιση μοντελοποίησης (Sorenson, 2008). Τα μοντέλα μηδενικών διαστάσεων (Tauzia et al., 2006) με λίγες ζώνες καύσης είναι αποτελεσματικά εργαλεία για την παροχή λογικών εκτιμήσεων των εκπομπών NO_x ή/και της απόδοσης του κινητήρα με χαμηλή υπολογιστική προσπάθεια. Τα μοντέλα καύσης πολλαπλών ζωνών (Kulkarni et al., 2010), φαίνεται να προσφέρουν πιο ακριβείς προβλέψεις NO_x μια πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση του ψεκασμού καυσίμου, καθώς και να παρέχουν τη μοντελοποίηση άλλων εκπομπών όπως η αιθάλη. Αυτά τα πλεονεκτήματα συνοδεύονται από το κόστος του αυξημένου υπολογιστικού χρόνου, πιθανώς χωρίς την παροχή πρόσθετων πληροφοριών απαραίτητων για την ανάλυση του ενεργειακού συστήματος.

Αναλυτικά μοντέλα για προσομοίωση κύκλου τετράχρονων κινητήρων και κινητήρων που ονομάζονται Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) και αποτελούν ενδιαμέση λύση μεταξύ Diesel και Otto έχουν δημοσιευθεί (Shahbakhti & Koch, 2010). Οι Lamaris et al., (2009) ανέπτυξαν ένα μοντέλο καύσης πολλαπλών ζωνών για την πρόβλεψη απόδοσης και εκπομπών σε μεγάλης κλίμακας δίχρονους κινητήρες με συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα. Οι Kowalski & Tarelko (2009), πρότειναν μια απλή μέθοδο για την προσομοίωση ενός δίχρονου κινητήρα πλοίου με κάποια επικύρωση εκπομπής NO_x . Οι Payri et al. (2011), δημοσίευσαν ένα μηδενικών διαστάσεων θερμοδυναμικό μοντέλο ενός τετράχρονου κινητήρα ντίζελ άμεσου ψεκασμού με ομοιότητες με το μοντέλο που περιγράφεται στην εργασία των Scarpin et al. (2012) αν και δεν περιλαμβάνει μοντελοποίηση εκπομπών

Ενώ η ανάπτυξη και οι μεθοδολογίες που βρέθηκαν στις προαναφερόμενες εργασίες προσφέρουν σαφείς περιγραφές των μοντέλων με ορισμένες συγκεκριμένες επικυρώσεις σε πειραματικά δεδομένα, υπάρχουν ελάχιστα ή καθόλου μοντέλα για ηλεκτρονικά ελεγχόμενους θαλάσσιους δίχρονους κινητήρες ντίζελ που έχουν

αναπτυχθεί και επικυρωθεί χρησιμοποιώντας πειραματικά αποτελέσματα για ρυθμίσεις κινητήρα (π.χ. αλλαγή χρονισμού έγχυσης, χρονισμός κλεισίματος βαλβίδας εξαγωγής και πίεση καθαρισμού (Benajes et al., 2009). Η δυνατότητα πρόβλεψης με λογική ακρίβεια των επιπτώσεων του συντονισμού του κινητήρα στην απόδοση και τις εκπομπές ρύπων NO_x είναι ιδιαίτερης σημασίας για τους σύγχρονους πετρελαιοκινητήρες θαλάσσης.

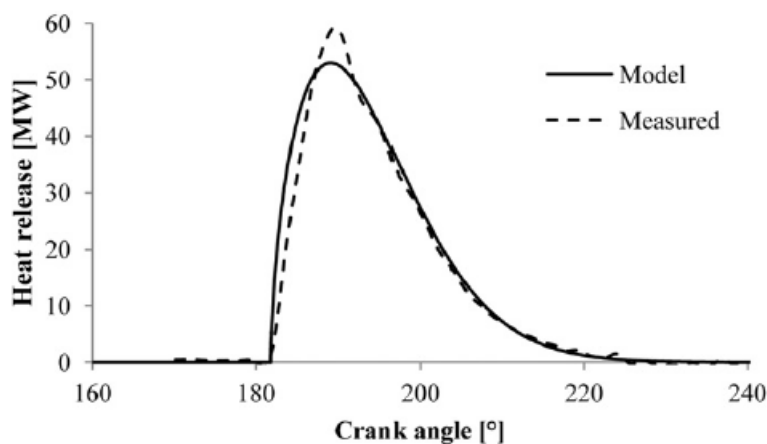
3.3.1. Μοντέλο Μηδενικών Διαστάσεων των Scarpin et al. (2012)

Η εργασία των Scarpin et al. (2012), περιγράφει ένα μοντέλο μηδενικών διαστάσεων, που αξιολογεί την απόδοση του κινητήρα μέσω ενός ενεργειακού ισοζυγίου και ενός μοντέλου καύσης δύο ζωνών χρησιμοποιώντας εξισώσεις νόμου ιδανικών αερίων σε έναν πλήρη κύκλο στροφάλου. Η διαδικασία καύσης χωρίζεται σε διαστήματα και η σύνθεση του προϊόντος και η θερμοκρασία της φλόγας υπολογίζονται σε κάθε διάστημα και οι εκπομπές NO_x προβλέπονται χρησιμοποιώντας τον εκτεταμένο μηχανισμό Zeldovich. Το μοντέλο επικυρώνεται χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα από δύο κινητήρες MAN B&W. Η μια περίπτωση είναι δεδομένα που υπόκεινται σε αλλαγές παραμέτρων κινητήρα που αντιστοιχούν σε προσομοίωση ηλεκτρονικά ελεγχόμενου κινητήρα. Η δεύτερη περίπτωση παρέχει δεδομένα που καλύπτουν σχεδόν όλες τις παραμέτρους εισόδου και εξόδου του μοντέλου. Η πρώτη περίπτωση επικύρωσης υποδηλώνει ότι το μοντέλο μπορεί να προβλέψει τη συγκεκριμένη κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές NO_x εντός των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% που δίνονται από τις πειραματικές μετρήσεις. Η δεύτερη επικύρωση επιβεβαιώνει την ικανότητα του μοντέλου να ταιριάζει με τις μετρούμενες παραμέτρους εξόδου του κινητήρα με βάση τις μετρημένες παραμέτρους εισόδου του κινητήρα με μέγιστη απόκλιση 5%.

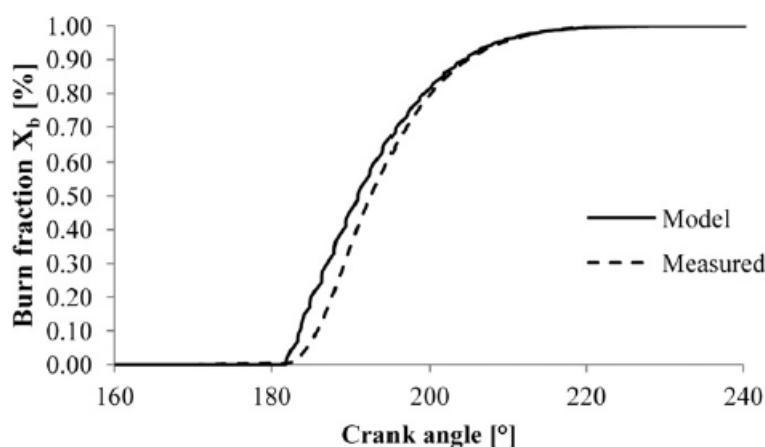
Στόχος της εργασίας των Scarpin et al. (2012), είναι η εξαγωγή μιας μεθοδολογίας κατάλληλης για την ανάλυση του ενεργειακού συστήματος και για την πρόβλεψη της απόδοσης και εκπομπών NO_x των δίχρονων κινητήρων ντίζελ χαμηλής ταχύτητας, και η επίδραση των ρυθμίσεων του κινητήρα, καθώς και η επικύρωση της μεθοδολογίας έναντι των πραγματικών μετρήσεων σε δύο κινητήρες.

Στα πειραματικά αποτελέσματα, αρχικά εμφανίζονται τα αποτελέσματα επικύρωσης μοντέλου χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του κινητήρα 4T50 ME-X και στη συνέχεια τα αποτελέσματα επικύρωσης χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του κινητήρα 7L70 MC.

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τη MAN Diesel & Turbo που παρέχουν τον μετρούμενο ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του χρονισμού έγχυσης και των παραμέτρων του σχήματος καύσης, βλέπε Σχ. 11 και 12. Η συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρούμενων τιμών για την απελευθέρωση θερμότητας θεωρείται αποδεκτή. Η απόκλιση στην κορυφή του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας δείχνει ότι το μοντέλο φαίνεται να προβλέπει περισσότερη ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τα πρώτα στάδια της καύσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 11 υπάρχει μεγάλη συμφωνία με το χρονοδιάγραμμα της απελευθέρωσης ενέργειας.



Σχ. 11. Απελευθέρωση θερμότητας έναντι γωνίας στροφάλου σε 75% φορτίο κινητήρα.



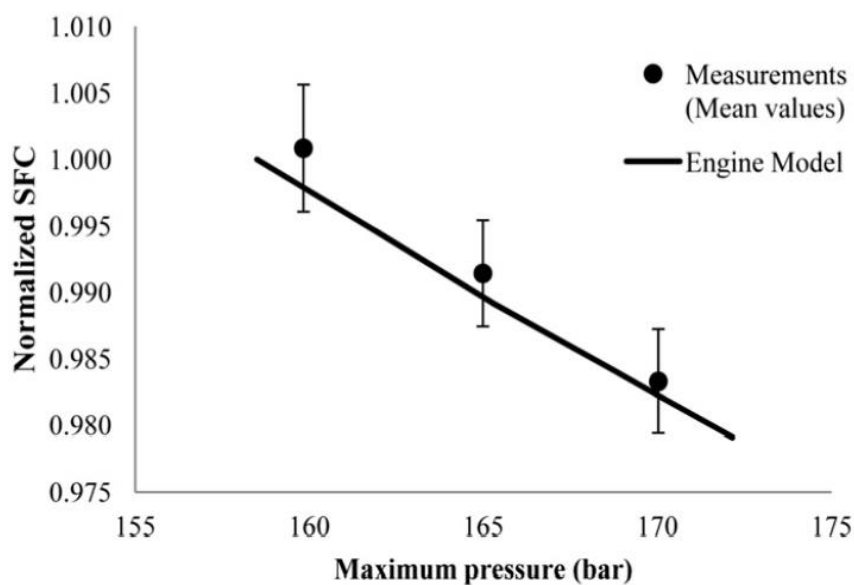
Σχ. 12. Κλάσμα καύσης έναντι γωνίας στροφάλου σε 75% φορτίο κινητήρα.

Πίνακας 2. Συνθήκες λειτουργίας κινητήρα.

Engine model	4T50 ME-X	7L70 MC
Cylinders	5	7
Bore [mm]	500	700
Stroke [mm]	2200	2268
Compression volume [m ³]	0.0252	N/A
Compression ratio	18.14	12.6 (effective)
Fuel LHV [kJ/kg]	42 700	42 700
Specific humidity of the charge air (ISO)	0.0107	0.0107
Load	75%	75%
Speed [Revs/min]	111.8	98.1
Maximum pressure [MPa]	16.0	12.6
Compression pressure [MPa]	14.1	10.1
Scavenge pressure [MPa]	0.29	0.28
Fuel per cylinder [kg/s]	0.06199	0.1009
Air per cylinder [kg/s]	3.26	5.885
Scavenge temperature [°C]	30.6	34.0
Cooling load [kW]	N/A	2400
Injection angle [degrees after BDC]	N/A	178.5

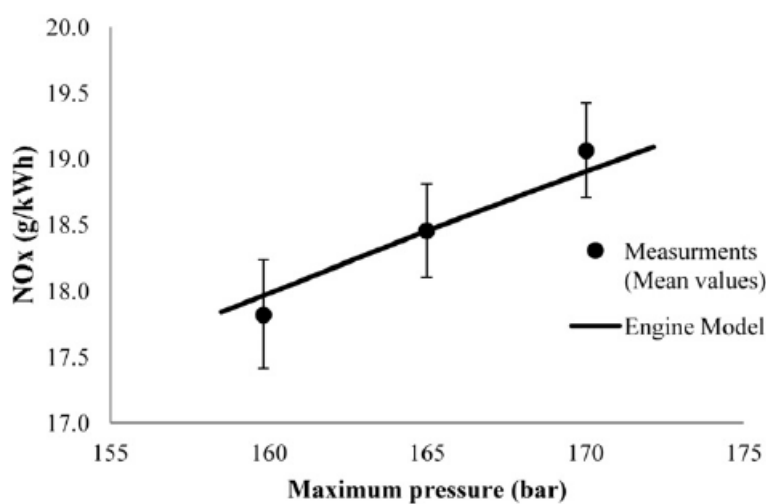
Πίνακας 3. Τα αποτελέσματα του μοντέλου κινητήρα 7L70 MC σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα.

	Experimental values	Engine model output	Deviation
Maximum pressure (MPa abs)	12.6	12.1	-3.9%
Compression pressure (MPa abs)	10.1	9.6	-4.9%
Specific fuel consumption (g/kWh)	171.1	172.1	+0.6%
Power output per cylinder (MW)	2.123	2.111	-0.5%
NO _x emissions (g/kWh)	17.6	17.6	0.0%

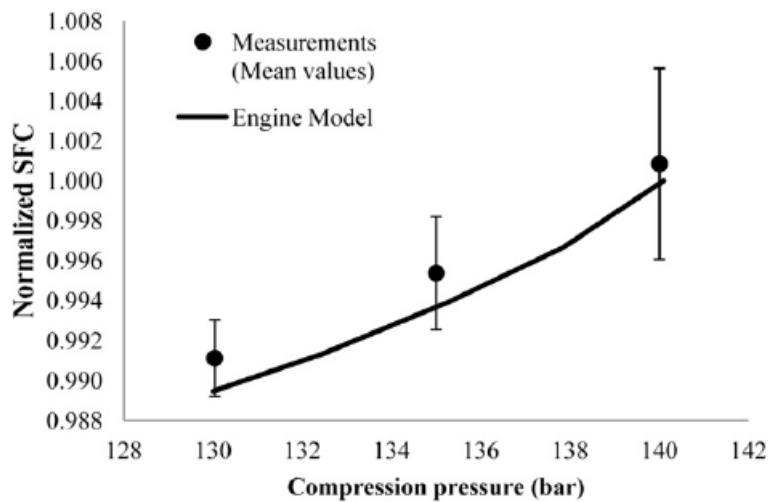


Σχ. 13. Κανονικοποιημένο SFC έναντι της μέγιστης πίεσης μεταβάλλοντας το χρόνο έγχυσης.

Οι Scappin et al. (2012), προκειμένου να διερευνήσουν περαιτέρω το μοντέλο κινητήρα, κατασκεύασαν ένα μοντέλο προσομοίωσης του κινητήρα 7L70 MC mk6 MAN B&W σύμφωνα με τα δεδομένα που παρέχονται στις εργασίες (Goldsworthy (2003a; Goldsworthy, 2003b), όπως φαίνεται στον Πίν. 2. Τα άρθρα παρέχουν ένα μεγάλο μέρος των παραμέτρων εισαγωγής του μοντέλου και των αποτελεσμάτων, και επομένως αυτά τα δεδομένα είναι κατάλληλα για σκοπούς επικύρωσης, επειδή θέτουν περιορισμούς στο μοντέλο, π.χ. υπάρχουν μόνο λίγες διαθέσιμες παράμετροι για προσαρμογές βαθμονόμησης που βοηθούν στην αντιστοίχιση των μετρήσεων. Ο Πίν. 3 δείχνει πώς οι μετρούμενες τιμές και τα αποτελέσματα του μοντέλου συμφωνούν ικανοποιητικά, δηλαδή εντός 5% των τιμών των μετρούμενων δεδομένων.



Σχ. 14. Εκπομπές NO_x σε σχέση με τη μέγιστη πίεση με τη μεταβολή του χρόνου έγχυσης.

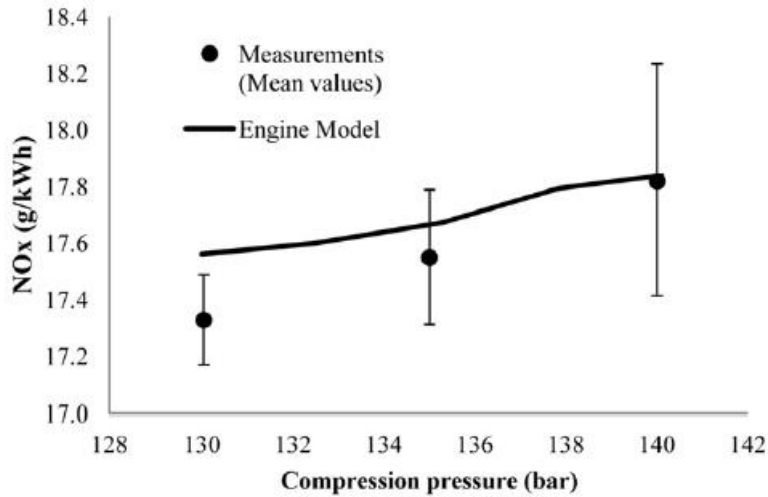


Σχ. 15. Κανονικοποιημένο SFC έναντι πίεσης συμπίεσης μεταβάλλοντας το χρονισμό EVC διατηρώντας σταθερή τη μέγιστη πίεση.

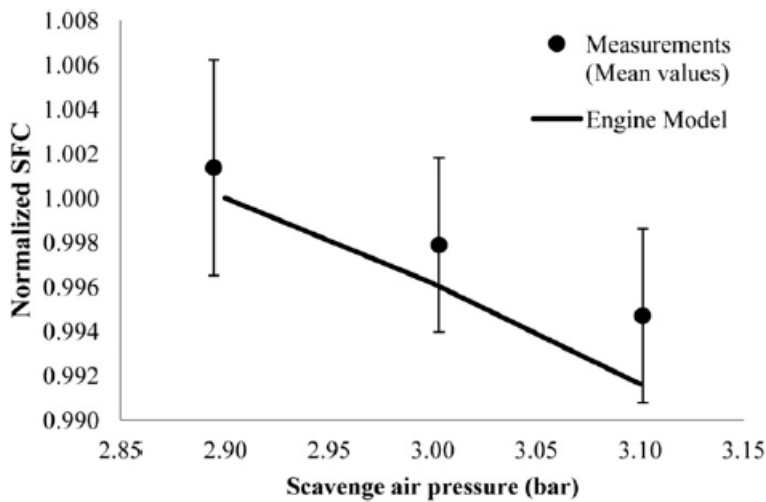
Εφόσον το μοντέλο των Scarpin et al. (2012), χρησιμοποιεί την εξίσωση κατάστασης ιδανικού αερίου (equation of state, EOS), είναι αναμενόμενες κάπως χαμηλότερες υπολογισμένες πιέσεις, σε σύγκριση με τις μετρήσεις. Η διερεύνηση περίπτωσης αδιαβατικής συμπίεσης χρησιμοποιώντας το ιδανικό αέριο και το πραγματικό αέριο EOS που αναπτύχθηκε από τους Lemmon et al. (2000), αντίστοιχα, οδήγησε σε περίπου 5% χαμηλότερη πίεση συμπίεσης, όταν υποτεθεί ιδανικό αέριο στις σχετικές συνθήκες σε σύγκριση με το πραγματικό αέριο EOS. Αυτό εξηγεί την απόκλιση στην πίεση συμπίεσης καθώς και στη μέγιστη πίεση που φαίνεται στον Πίν. 3, όπου φαίνεται επίσης από τον πίνακα ότι η μοντελοποιημένη εκπομπή NO_x και η ειδική κατανάλωση καυσίμου (specific fuel consumption, SFC) συμφωνούν άριστα με τα πειραματικά ευρήματα.

Οι τιμές των μετρούμενων παραμέτρων που παρέχονται είναι εκτενείς και έτσι μόνο μερικές παράμετροι είναι διαθέσιμες για βαθμονόμηση. Οι παράμετροι που σχετίζονται με την παρουσιαζόμενη μεθοδολογία, είναι: Γεωμετρία κινητήρα, αποτελεσματικός λόγος συμπίεσης, στροφές κινητήρα, σύνθεση αέρα εισαγωγής και ροές μάζας καυσίμου, θερμοκρασία και πίεση αέρα εισαγωγής, απώλεια πίεσης λόγω καθαρισμού και έναρξης του ψεκασμού. Οι παράμετροι που είναι διαθέσιμες για βαθμονόμηση είναι: Χρόνος λήξης της έγχυσης, χρονισμός ανοίγματος της βαλβίδας εξαγωγής και παράμετροι λειτουργίας απελευθέρωσης θερμότητας στη φάση διάχυτης

κάυσης. Στις επόμενες ενότητες το μοντέλο επικυρώνεται έναντι παραλλαγών παραμέτρων από 4T50ME-X.



Σχ. 17. Εκπομπές NO_x έναντι πίεσης συμπίεσης μεταβάλλοντας το χρονισμό EVC διατηρώντας σταθερή τη μέγιστη πίεση.



Σχ. 18. Κανονικοποιημένο SFC έναντι πίεσης αέρα καθαρισμού διατηρώντας τη μέγιστη πίεση σταθερές.

3.3.2. Επίδραση της Μέγιστης Πίεσης σε SFC και Εκπομπές NOX

Ο χρονισμός της έγχυσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη διαδικασία καύσης και το SFC και οι εκπομπές NO_x επηρεάζονται έντονα λόγω της επίδρασής του στη μέγιστη πίεση του κυλίνδρου και στο AFT. Η προώθηση του χρόνου έγχυσης αυξάνει τη θερμοκρασία προαναμεμιγμένης καύσης που οδηγεί σε υψηλότερο σχηματισμό NO_x (Sarvi & Zevenhoven, 2010). Εδώ, ο χρονισμός της έγχυσης χρησιμοποιείται ως

παράμετρος ελέγχου για τη μεταβολή της μέγιστης πίεσης και αξιολογείται η επίδραση στο SFC και τις εκπομπές NO_x. Όπως φαίνεται στα Σχ. 14 και 15, τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι το μοντέλο των Scarpin et al. (2012), είναι σε θέση να προβλέψει την επίδραση της μέγιστης πίεσης στο SFC και τις εκπομπές NO_x, όλα μέσα στα 95% διαστήματα εμπιστοσύνης (+/-2σ) μετρούμενων δεδομένων, που υποδεικνύονται από ράβδους σφάλματος στη μέση τιμή στο αποτέλεσμα στα Σχ. 14 - 18.

3.3.3. Επίδραση της Πίεσης Συμπίεσης στο SFC και στις Εκπομπές NO_x

Γενικά, όταν αυξάνεται η πίεση συμπίεσης, απαιτείται περισσότερη εργασία για τη διαδρομή συμπίεσης, με αποτέλεσμα υψηλότερο SFC και ειδικές εκπομπές. Η αύξηση της πίεσης συμπίεσης οδηγεί σε υψηλότερη μέγιστη πίεση που θα μπορούσε να υπερβεί τα δομικά όρια του κινητήρα (Dec & Canaan, 1998). Έτσι, κατά τη βαθμονόμηση της πίεσης συμπίεσης με το χρονισμό του EVC, η μέγιστη πίεση διατηρείται σταθερή σε ένα δομικό όριο αναφοράς των 160 bar, ρυθμίζοντας ανάλογα το χρονισμό της έγχυσης. σύκα. Τα Σχ. 16 και 17 δείχνουν πώς οι εκπομπές SFC και NO_x αυξάνονται με την αύξηση της πίεσης συμπίεσης. Μια σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου των Scarpin et al. (2012) και των δεδομένων μέτρησης υποδηλώνει ότι το μοντέλο είναι επίσης σε θέση να προβλέψει το SFC και το NO_x με 95% εμπιστοσύνη, αν και το μοντέλο φαίνεται να υπερπροβλέπει τις εκπομπές NO_x σε σχετικά χαμηλές πιέσεις συμπίεσης. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από το γεγονός ότι στο μοντέλο δεν περιλαμβάνονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία καθαρισμού. Επομένως, ενδέχεται να υπάρχουν κάποιες διαφορές στις πραγματικές ιδιότητες του κυλίνδρου τη στιγμή του EVC σε σύγκριση με τις υπολογιζόμενες ιδιότητες. Ένας άλλος παράγοντας που πιθανώς προκαλεί τις αποκλίσεις είναι η χρήση του νόμου του ιδανικού αερίου που υποτιμά την πραγματική πίεση στο τέλος της διαδρομής συμπίεσης. Αυτό μπορεί να βελτιωθεί με την εφαρμογή πραγματικής συμπεριφοράς αερίου.

3.3.4. Επίδραση Πίεσης Σάρωσης Κυλίνδρου στο SFC και στις Εκπομπές NO_x

Το Σχ. 18 απεικονίζει πώς οι αυξανόμενες πιέσεις σάρωσης (scavenge pressures) έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλές ειδικές εκπομπές NO_x και SFC (Heywood, 2018)).

Εδώ, η πίεση συμπίεσης και η αναλογία πυροδότησης (P_{max}/P_{comp}) διατηρήθηκαν σταθερές με προσαρμογή του χρονισμού του EVC και του χρονισμού έγχυσης. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι το μοντέλο των Scarpin et al. (2012), προβλέπει επίσης αυτό το αποτέλεσμα εντός των ορίων 95% του διαστήματος εμπιστοσύνης των δεδομένων μέτρησης.

Οι Scarpin et al. (2012), δημιούργησαν ένα μοντέλο μηδενικών διαστάσεων για ηλεκτρονικά ελεγχόμενους δίχρονους κινητήρες ντίζελ χαμηλής ταχύτητας. Ένα μοντέλο καύσης δύο ζωνών, ένα ενεργειακό ισοζύγιο και οι εξισώσεις του νόμου του ιδανικού αερίου εφαρμόστηκαν και συνδυάστηκαν με μια υπορουτίνα υπολογισμού καύσης και σχηματισμού NO_x χρησιμοποιώντας τον εκτεταμένο μηχανισμό Zeldovich. Οι αρχικές ιδιότητες του παγιδευμένου αερίου στον κύλινδρο κατά την έναρξη της συμπίεσης προσδιορίστηκαν από το μείγμα φρέσκου αέρα που εισήχθη στον κύλινδρο και των παγιδευμένων υπολειμματικών αερίων που αξιολογήθηκαν από την αποτελεσματικότητα σάρωσης και το κλάσμα υπολειπόμενου αερίου. Η μοντελοποιημένη απελευθέρωση θερμότητας βαθμονομήθηκε για να ταιριάζει με τα δεδομένα μέτρησης, επιλέγοντας το σωστό χρονισμό της έγχυσης καυσίμου και προσαρμόζοντας τις παραμέτρους του σχήματος καύσης.

Οι επιδράσεις των παραμέτρων ρύθμισης του κινητήρα και των εκπομπών SFC, NO_x στο 75% φορτίο του κινητήρα επικυρώθηκαν με δεδομένα από πειραματικές δοκιμές στον δοκιμαστικό κινητήρα MAN B&W 4T50 ME-X. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι τάσεις SFC και οι εκπομπές NO_x μεταβλητής μέγιστης πίεσης, που επιτυγχάνονται με αλλαγή χρονισμού έγχυσης, μπορούν να αποτυπωθούν εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% των μετρήσεων. Επίσης, οι επιπτώσεις στο SFC και στις εκπομπές NO_x της ρύθμισης της πίεσης συμπίεσης, με αλλαγή του χρονισμού του EVC, και της πίεσης σάρωσης, αντίστοιχα, προβλέφθηκαν εντός των ορίων των τιμών μέτρησης.

Το μοντέλο των Scarpin et al. (2012), επικυρώθηκε επίσης χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον κινητήρα MAN B&W 7L70 που περιλαμβάνουν παραμέτρους λειτουργίας κινητήρα και μετρημένες εξόδους κινητήρα. Υπήρχε καλή συμφωνία μεταξύ του μοντέλου και των μετρήσεων, αν και οι πιέσεις του μοντέλου ήταν χαμηλές λόγω της χρήσης του νόμου του ιδανικού αερίου, στην περιοχή μικρότερη 5% από την απόκλιση. Ωστόσο, συνιστάται η μελλοντική εργασία να περιλαμβάνει την

εφαρμογή ακριβέστερων εξισώσεων κατάστασης στη μεθοδολογία και ταχύτερες μεθόδους βελτιστοποίησης.

Συμπερασματικά, το μοντέλο που παρουσίασαν οι Scarpin et al. (2012), διαθέτει την επιθυμητή ταχύτητα εκτέλεσης και παρέχει επαρκή ακρίβεια, όσον αφορά τα βασικά χαρακτηριστικά απόδοσης του κινητήρα, ώστε να χρησιμοποιηθεί για μελλοντική ανάλυση ενεργειακού συστήματος. Το μοντέλο έχει αποδείξει την ικανότητα να ανταποκρίνεται καλά στη ρύθμιση των παραμέτρων του κινητήρα όσον αφορά και τις εκπομπές SFC και NO_x επιτρέποντας έτσι τη δυνατότητα χρήσης του μοντέλου για την εξερεύνηση διαφορετικών σεναρίων, π.χ. ελαχιστοποίηση SFC εντός των ορίων εκπομπών NO_x του IMO είτε ως αυτόνομος κινητήρας είτε σε συνδυασμό με σύστημα ανάκτησης θερμότητας από απόβλητα.

3.4. Πρόβλεψη Εκπομπών Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Κινητήρα Ντίζελ Βάσει Μοντελοποίησης Νευρωνικών Δικτύων

Οι εκπομπές καυσαερίων από πετρελαιοκινητήρες πλοίων είναι σημαντικές πηγές ρύπανσης του περιβάλλοντος. Οι ρύποι από τους κινητήρες ντίζελ περιλαμβάνουν το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα οξειδία του θείου (SO_x), τα οξειδία του αζώτου (NO_x), τον καπνό και τα σωματίδια (PM). Γενικά, η μείωση των εκπομπών NO_x πρέπει να οδηγήσει σε αύξηση των εκπομπών καπνού και PM. Διαφορετικά, για τη μείωση του καπνού και των εκπομπών PM πρέπει να αυξηθούν οι εκπομπές πετρελαιοκινητήρες. Καθώς η θερμοκρασία καύσης των ναυτικών κινητήρων ντίζελ είναι υψηλότερη από τη μηχανή ντίζελ του αυτοκινήτου και ο χρόνος του κύκλου καύσης είναι μεγαλύτερος από τον κινητήρα ντίζελ του οχήματος. Οι εκπομπές CO₂, CO και Hydrocarbon (HC) του πετρελαιοκινητήρα θαλάσσης είναι σχετικά χαμηλές, ενώ οι εκπομπές NO_x και οι εκπομπές καπνού αυξάνονται σημαντικά. Έτσι, ο έλεγχος εκπομπών κινητήρων ντίζελ Marine εστιάζεται σε NO_x και στον καπνό.

Ο έξυπνος πετρελαιοκινητήρας ναυτιλίας υιοθετεί την ηλεκτρονικά ελεγχόμενη τεχνολογία, ειδικά το common rail (CR), τον μεταβλητό χρόνο ψεκασμού (variable injection time, VIT) και τον μεταβλητό χρόνο καυσαερίων (variable exhaust time, VET), καθώς όλες αυτές οι νέες τεχνολογίες κάνουν τις λειτουργίες ελέγχου πιο ευέλικτες. Η χρήση του συστήματος έγχυσης common rail έχει ως αποτέλεσμα

αμελητέα παρουσία καπνού στην εξαγωγή καυσαερίων, γεγονός που πληροί τα ολόενα και πιο αυστηρά ρυθμιστικά όρια εκπομπών, ενώ και οι εκπομπές αιθάλης είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σύγκριση με τις συμβατικές.

Η τεχνολογία Common Rail (CR) προσφέρει αρκετές δυνατότητες ελέγχου του ψεκασμού καυσίμου, καθώς λόγω των διαφορών της από το συμβατικό σύστημα ψεκασμού, η ιδέα CR βασίζεται στη βελτιστοποίηση της άντλησης καυσίμου, του χρονισμού ψεκασμού και του ρυθμού ψεκασμού. Η τεχνολογία CR επιτρέπει την ελεύθερη ρύθμιση του χρονισμού ψεκασμού καυσίμου, της μέγιστης πίεσης του κυλίνδρου και της απόδοσης του κινητήρα στις επικρατούσες ανάγκες. Το σύστημα ψεκασμού καυσίμου CR έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, χαμηλότερο NO_x και δυνατότητες χρήσης διαφορετικών χαρακτηριστικών NO_x , χωρίς ορατό καπνό καυσαερίων σε οποιοδήποτε φορτίο. Ειδικά σε χαμηλό φορτίο, το CR παρέχει τη δυνατότητα εκκίνησης του κινητήρα χωρίς ορατό καπνό καυσαερίων, κύκλο φορτίου χωρίς καπνό καυσαερίων και εναλλάξιμα εξαρτήματα ειδικά για τον κύλινδρο (Egger et al., 2004). Για παράδειγμα, η καθυστέρηση ανάφλεξης εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας και θα είναι μεγαλύτερη όταν ο κινητήρας αυξάνει το φορτίο (επιτάχυνση) σε σύγκριση με την ταχύτητα σταθερής κατάστασης και τη λειτουργία φορτίου. Επιπλέον, στους υπερτροφοδοτούμενους κινητήρες, υπάρχει καθυστέρηση υπερσυμπιεστή κατά την αύξηση του φορτίου.

Οι στρατηγικές ελέγχου στα συστήματα CR επιτρέπουν την επιλογή του ελεύθερου χρονισμού ψεκασμού καυσίμου και του ρυθμού ψεκασμού καυσίμου ανεξάρτητα από τις στροφές και το φορτίο του κινητήρα. Μειώνοντας τόσο την πίεση του κυλίνδρου (με CR) όσο και τη μέση θερμοκρασία αερίου (με DWI), ο σχηματισμός NO_x μειώνεται στην περιοχή καύσης 10 σε 24°CA ATDC όπου εμφανίζεται ο υψηλότερος ρυθμός καύσης διάχυσης (Breitbach, 2002).

Η καθυστέρηση έγχυσης και η πίεση στο CR είναι σημαντικές παράμετροι. Η ποσότητα παροχής καυσίμου καθορίζεται από την πίεση ψεκασμού καυσίμου και τη διάρκεια του καυσίμου. Στο σύστημα CR, ο χρόνος έναρξης του ψεκασμού (start of injection, SOI) μπορεί να ελεγχθεί με ευελιξία, κάτι που είναι αδύνατο με τα συμβατικά συστήματα καυσίμου. Όσον αφορά την ποιότητα του καυσίμου και τις ποιοτικές διακυμάνσεις, το σύστημα ψεκασμού common rail παρουσιάζει ευελιξία, επειδή η πίεση και ο ρυθμός ψεκασμού ελέγχονται ανεξάρτητα από τις στροφές και

το φορτίο του κινητήρα, με παραμέτρους ελέγχου στον τοπικό χάρτη κινητήρα. Όλες οι σημαντικές παράμετροι απόδοσης του κινητήρα, συμπεριλαμβανομένης της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου, των στροφών του κινητήρα, της ισχύος του κινητήρα, των εκπομπών ρύπων NO_x, CO, CO₂, HC, PM και της μέγιστης πίεσης του κυλίνδρου, αποτελούν ισχυρή συνάρτηση του χρονισμού του ψεκασμού.

Όπως είναι αναμενόμενο, η δοκιμή του κινητήρα για τον προσδιορισμό του χάρτη απόδοσης του κινητήρα για διαφορετικές συνθήκες εργασίας απαιτεί σημαντικό χρόνο και πόρους. Ωστόσο, η πρόοδος των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (artificial neural networks, ANN) επέτρεψε στους ερευνητές να δημιουργήσουν μαθηματικά μοντέλα νευρώνων για την προσομοίωση της νευρικής συμπεριφοράς. Η προσέγγιση των ANN ήταν μια από τις γνωστές εξελικτικές μεθόδους υπολογισμού τις τελευταίες δεκαετίες. Τα ANN εξασφαλίζουν την πρόβλεψη των μεταβλητών του φυσικού συστήματος χωρίς να απαιτούνται μαθηματικές εκφράσεις. Οι τεχνικές ANN έχουν χρησιμοποιηθεί από ορισμένους ερευνητές για να προβλέψουν την απόδοση του κινητήρα και τις εκπομπές καυσαερίων μέσω των ιδιοτήτων του καυσίμου όπως ο αριθμός κετανίου, η πυκνότητα, η πτητικότητα, η περιεκτικότητα σε οξυγόνο και θείο (Thompson et al., 2000). Τα ANN έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και την πρόβλεψη της απόδοσης και των εκπομπών καυσαερίων των κινητήρων ντίζελ (Canakci et al., 2006). Τα αποτελέσματα που παρείχαν τα ANN έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη της απόδοσης και του ελέγχου των διαδικασιών καύσης. Στην εργασία του Kalogirou (2000), προσδιορίστηκε η απόδοση του κινητήρα και οι εκπομπές καυσαερίων ενός κινητήρα ντίζελ σε σχέση με την πίεση ψεκασμού, την ταχύτητα του κινητήρα και τη θέση του γκαζιού χρησιμοποιώντας ANN.

3.4.1. Το Μοντέλο BP ANN των Wang et al. (2010)

Ο στόχος της μελέτης των Wang et al. (2010), είναι να προβλέψει τις τιμές εκπομπών κινητήρων ντίζελ πλοίων, δημιουργώντας μια νέα προσέγγιση βασισμένη στα ANN οπισθοδιάδοσης (back propagation, BP) και διεξήχθη σε δύο στάδια: Στο πρώτο, τα πειραματικά δεδομένα λήφθηκαν με δοκιμή της εκπομπής ντίζελ κινητήρα θαλάσσης στο εργαστήριο. Στο δεύτερο η μοντελοποίηση ANN εκπαιδεύτηκε με επιτυχία σε πειραματικά δεδομένα και στη συνέχεια το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη των τιμών εκπομπών του κινητήρα. Το αποτέλεσμα έδειξαν ότι οι τιμές που

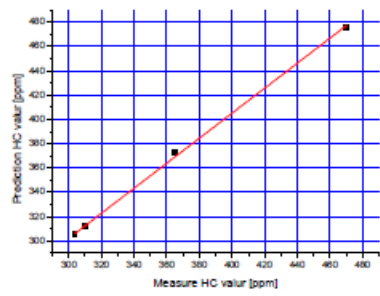
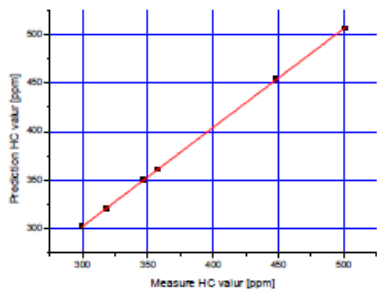
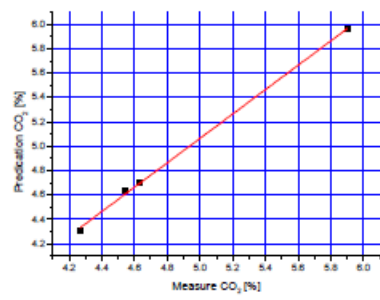
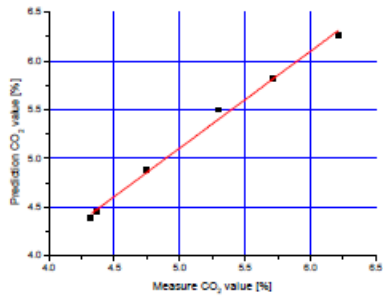
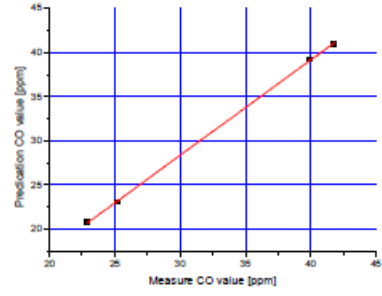
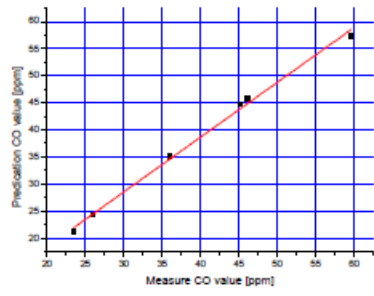
παράγονται από τα ANN ήταν παρόμοιες με τα πειραματικά αποτελέσματα. Για την εκπαίδευση των μοντέλων οι Wang et al. (2010), χρησιμοποίησαν τις μεθόδους Scaled conjugate gradient (SCG) and Levenberg–Marquardt (LM)

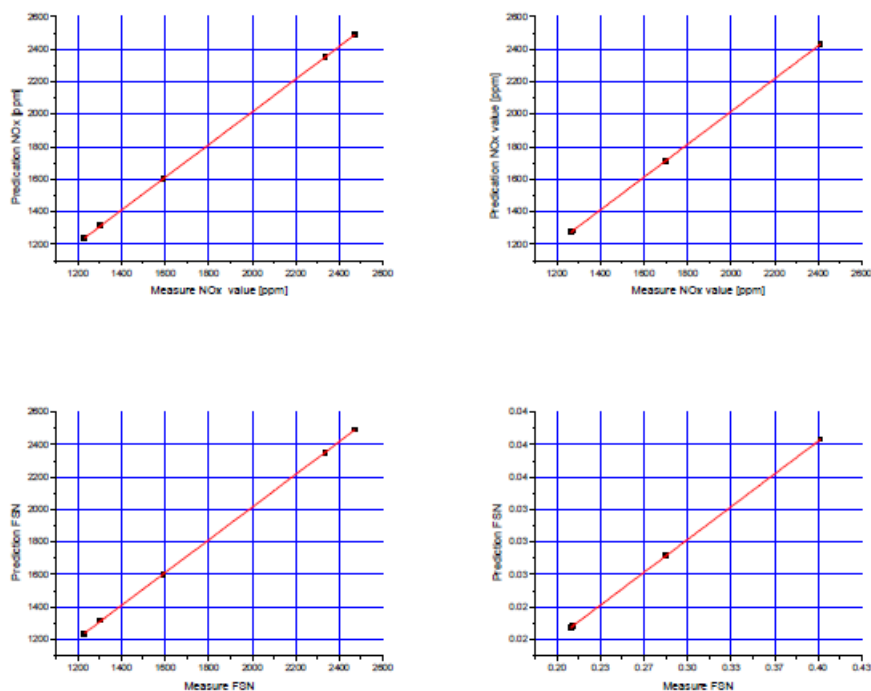
Οι στατιστικές τιμές των εξόδων εμφανίζονται ως δεδομένα εκπαίδευσης και δοκιμών όπως φαίνεται στον Πίν. 4, όπου παρουσιάζονται οι τιμές σφάλματος των εξόδων. Λαμβάνονται υψηλότεροι μέσοι όροι σφαλμάτων για τα δεδομένα δοκιμής, όπως οοαριθμός καπνού φίλτρου (Filter Smoke Number,FSN), αυτό προκαλείται από την πολυπλοκότητα της διαδικασίας καύσης και τα σφάλματα μέτρησης στο πείραμα. Οι τιμές είναι πολύ κοντά στη μονάδα και οι τιμές RMS είναι πολύ μικρές για όλες τις τιμές εκπομπών.

Πίνακας. 4. Στατιστικές τιμές των προβλέψεων με βάση το δίκτυο BP ANN

Έξοδοι	Εκπαίδευση RMS	Εκπαίδευση R^2	Μέσο % σφάλματος εκπαίδευσης	Δοκιμή RMS	Δοκιμή R^2	Μέσο % σφάλματος δοκιμής
CO(%)	0.0131	0.9985	4.0583	0.0305	0.9922	9.6212
CO ₂ (%)	0.0055	0.9999	0.7562	0.0210	0.9989	2.3332
HC(ppm)	0.0106	0.9994	2.1945	0.1167	0.9296	15.645
NO(ppm)	0.0183	0.9982	4.0093	0.0309	0.9955	6.5979
SOOT(FSN)	0.0110	0.9942	2.0141	0.1102	0.9991	3.4147
PM(%)	0.0120	0.9997	1.4615	0.0381	0.9971	4.5287

Στο Σχ. 19, συγκρίνονται οι πραγματικές και οι προβλεπόμενες τιμές για όλες τις εξόδους. Σε αυτά τα σχήματα, οι αριστερές στήλες υποδεικνύουν τα δεδομένα εκπαίδευσης και οι δεξιές στήλες υποδεικνύουν τα δεδομένα δοκιμής. Όπως φαίνεται στα σχήματα, οι πραγματικές και οι προβλεπόμενες τιμές είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη.





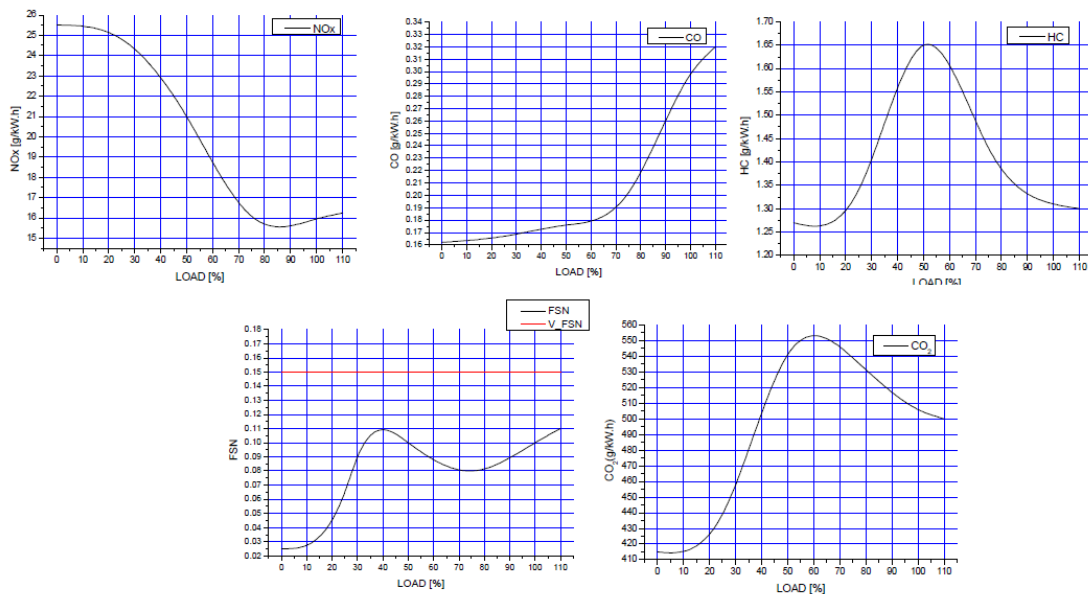
Σχ. 19. Σύγκριση των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων ANN και των πειραματικών (πραγματικών) αποτελεσμάτων της μελέτης των Wang et al. (2010), για CO, CO₂, HC και NO_x.

Τα αποτελέσματα πρόβλεψης των ANN δίνονται στο Σχ. 19. Οι ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενες παράμετροι όπως ο χρονισμός έγχυσης (Injection Timing, IT), πίεση ράγας καυσίμου (Fuel Rail Pressure, FRP), αριθμός ακροφυσίου ψεκασμού (Injection Nozzle's number, INN), γωνία ανοίγματος βαλβίδας εξαγωγής (Exhaust valve open Angle, EPA), γωνία κλεισίματος βαλβίδας εξαγωγής (Exhaust valve Close Angle, ECA), ιδιότητες καυσίμου όπως τιμή θέρμανσης, αριθμός κετανίων, κινηματικό ιξώδες, το ειδικό βάρος και οι περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν τις εκπομπές ρύπων.

Το NO_x είναι ένα σημαντικό προϊόν εκπομπών και επειδή είναι επιβλαβές για το περιβάλλον θα πρέπει να ελέγχεται. Στους κινητήρες ντίζελ, η κατανομή του καυσίμου στον κύλινδρο είναι γενικά ανομοιόμορφη. Η διαδικασία σχηματισμού των ρύπων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή του καυσίμου και το πώς αυτή η κατανομή αλλάζει με το χρόνο λόγω της ανάμειξης. Ο ρυθμός σύνθεσης NO_x προσδιορίστηκε από τη συγκέντρωση N₂, O₂ και τη θερμοκρασία καύσης. Προκειμένου να μειωθούν οι εκπομπές, θα πρέπει να μειωθεί η θερμοκρασία καύσης

ελαχιστοποιώντας την εξάπλωση του μίγματος καύσιμων αερίων στη φάση της προαναμεμιγμένης καύσης.

Τα πειραματικά αποτελέσματα NO_x δείχνουν επίσης ότι οι εκπομπές μειώθηκαν με την αύξηση του φορτίου του κινητήρα. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Τα χαμηλά ακροφύσια μειώνουν τον όγκο του θαλάμου πίεσης του ακροφυσίου και η διάρκεια του ψεκασμού του ακροφυσίου αλλάζει με τον θάλαμο πίεσης του ακροφυσίου, ενώ η μείωση του όγκου του θαλάμου πίεσης έγχυσης θα οδηγήσει στην αύξηση της διάρκειας του ψεκασμού του ακροφυσίου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών του πετρελαιοκινητήρα RT-flex60c έδειξαν ότι, εάν παραταθεί η διάρκεια του ψεκασμού κατά 10%, οι εκπομπές NO_x θα μειωθούν κατά 6%, επειδή κατά τη διάρκεια της επέκτασης θα μειωθεί η τάση εκτόνωσης. Επομένως οι κατάλληλες καθυστερήσεις ψεκασμού καυσίμου μειώνουν τις εκπομπές NO_x και επιπλέον όταν η παραδοσιακή ανάφλεξη του κινητήρα ντίζελ χαμηλής ταχύτητας βρίσκεται πριν από το άνω νεκρό σημείο (Before Top Dead Center, BTDC), το μείγμα αερίου που καίγεται συμπιέζεται περαιτέρω, προκαλώντας αιχμή υψηλής θερμοκρασίας και υψηλή πίεση εστίας που θα επιταχύνει τη σύνθεση NO_x . Η τυχόν καθυστέρηση στην έγχυση καυσίμου από επιβράδυνση του SOI, οδηγεί σε καθυστέρηση του χρόνου ανάφλεξης μετά το άνω νεκρό σημείο (After Top Dead Center, ATDC) για να μειωθεί η μέγιστη πίεση και την εμφάνιση της μέγιστης θερμοκρασίας των αερίων καύσης, μειώνοντας έτσι τη σύνθεση NO_x .



Σχ. 20. Οι προβλέψεις των εκπομπών καυσαερίων σε σχέση με το φορτίο του κινητήρα, από το νευρωνικό δίκτυο των Wang et al. (2010).

Όταν ο λόγος συμπίεσης του κινητήρα ντίζελ αυξηθεί, ο συντελεστής περίσσειας αέρα μπορεί να μειωθεί στον θάλαμο καύσης. Ως εκ τούτου, η πίεση διατηρείται βασικά αμετάβλητη και αυτό οδηγεί στη μείωση της καύσης κατά τη διαδικασία της συγκέντρωσης N, O, και σε μείωση της παραγωγής NO_x. Η αλλαγή του μεταβλητού χρόνου εξαγωγής, δηλαδή η καθυστέρηση του κλεισίματος της βαλβίδας εξαγωγής, μπορεί να αυξήσει τη συμπίεση του κινητήρα και η αύξηση του λόγου συμπίεσης μπορεί να αντισταθμίσει την καθυστέρηση που προκαλείται στον ψεκασμό καυσίμου. Ωστόσο, η αλλαγή του χρονισμού της εξαγωγής θα επιτρέψει την αύξηση του συντελεστή περίσσειας αέρα, ο οποίος είναι επιζήμιος για τον έλεγχο της σύνθεσης NO_x. Έτσι, το RT-Flex 60c χρησιμοποιώντας μια σειρά προηγμένων τεχνολογιών κάνει τις εκπομπές NO_x να ανταποκρίνονται στα διεθνή πρότυπα. Ωστόσο, η ποσότητα εκπομπών NO_x σε μερικά φορτία, είναι υψηλότερη από τα 17g/KW που είναι το πρότυπο του IMO. Οι χαμηλότερες στροφές του κινητήρα οδηγούν σε χαμηλότερη ταχύτητα ροής αέρα εισόδου ή επίπεδο στροβιλισμού και ο μικρότερος λόγος ψεκασμού προκαλεί τοπικά υψηλή θερμοκρασία καύσης, έτσι ώστε οι εκπομπές αυξάνονται. Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση του κινητήρα σε μερικό φορτίο, η υψηλότερη τιμή VIT κάνει την ποσότητα του προαναμεμιγμένου καυσίμου που ψεκάζεται στον κύλινδρο να αυξάνεται. Έτσι, η αύξηση της προαναμεμιγμένης καύσης παράγει εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες και υψηλότερη πίεση κορυφής της πίεσης έκρηξης, έτσι αυξάνονται οι εκπομπές NO_x.

Σύμφωνα με τους Wang et al. (2010), η αδιαφάνεια του καπνού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα αέρα στον κύλινδρο, ενώ και η σύνθεση του καυσίμου επηρεάζει την ποσότητα του καπνού που παράγεται από τον κινητήρα. Ειδικά, η περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο και οξυγόνο επηρεάζει τον σχηματισμό καπνού και την οξειδωση, αντίστοιχα. Γενικά, οι αρχές μέτρησης για τα φίλτρα καπνού και αιθάλης υποδηλώνουν ότι μέρος της ροής των καυσαερίων λαμβάνεται μέσω ενός καθετήρα στον σωλήνα εξάτμισης και διέρχεται από ένα διηθητικό χαρτί, όπου το προκύπτον μαύρισμα του διηθητικού χαρτιού μετράται με ανακλαστικό μετρητή και αντιπροσωπεύει ένα μέτρο της περιεκτικότητας αιθάλης στα καυσαέρια. Τα

αποτελέσματα έδειξαν ότι το FSN σχετίζεται στενά με τη μαύρη αιθάλη, τον άνθρακα σε (mg/m^3) εφόσον τα εκπεμπόμενα σωματίδια περιέχουν περισσότερα από 15% C. Τα ποσά FSN για το διαφορετικό εύρος φορτίου που απεικονίζεται στο Σχ. 20. Όπως φαίνεται το επίπεδο καπνού είναι πολύ χαμηλό ,κάτω από την ορατή γραμμή καπνού σε ολόκληρο το εύρος φορτίων. Ο κύριος σκοπός του 7RTFlex 60c που υιοθέτησε το σύστημα ψεκασμού High Pressure Common Rail είναι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων απόδοσης του ντίζελ με ελεύθερη επιλογή της πίεσης ψεκασμού και του μοντέλου ψεκασμού καυσίμου υπό την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι Κανόνες εκπομπών του IMO

Το 7RT-Flex60c λειτουργεί χωρίς καπνό σε όλο το εύρος φορτίου και αυτό μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: Η πίεση ψεκασμού καυσίμου (υψηλή ή χαμηλή) του κινητήρα ντίζελ έχει σημαντικό αντίκτυπο στις βασικές παραμέτρους απόδοσης σε διαφορετικό φορτίο. Το σύστημα ψεκασμού καυσίμου Common-Rail μπορεί να αλλάξει αυτόματα την πίεση ψεκασμού καυσίμου σε όλο το εύρος φορτίου μέσω του λογισμικού ελέγχου. Σε χαμηλό φορτίο όταν διατηρείται υψηλότερη πίεση ψεκασμού καυσίμου, τότε οι εκπομπές καπνού μειώνονται σημαντικά. Σε χαμηλό φορτίο, όταν το σύστημα ελέγχου διακόπτει αυτόματα μία από τις τρεις βαλβίδες έγχυσης ανά κύλινδρο, τότε προκαλείται μείωση των εκπομπών καπνού. Επίσης σε πολύ χαμηλό φορτίο όταν διακόπτονται δύο από τις τρεις βαλβίδες έγχυσης, παρουσιάζεται το ίδιο αποτέλεσμα μείωσης καπνού. Αυτό εξασφαλίζει βέλτιστο ψεκασμό και καύση, μειώνοντας την εκπομπή καπνού. Για ομοιόμορφη κατανομή του θερμικού φορτίου στο θάλαμο καύσης, το σύστημα ελέγχου αλλάζει την αποκοπή των τριών βαλβίδων έγχυσης σε τακτά χρονικά διαστήματα των 20 λεπτών. Αυτό μπορεί να καλύψει τις ανάγκες μιας μικρής ποσότητας ψεκασμού καυσίμου και ενός κατάλληλου ψεκασμού σε λειτουργία χαμηλού φορτίου. Η χρήση υψηλότερης πίεσης ψεκασμού και εύκαμπτου χρονισμού βαλβίδας εξαγωγής ευνοεί την υποστήριξη μιας λειτουργίας χωρίς καπνό. Επιπλέον, σύμφωνα με τη σειρά επιλογής του μπεκ ψεκασμού, η συνολική επιφάνεια ροής του μπεκ ψεκασμού μπορεί να μειωθεί σε αποτέλεσμα να βελτιωθεί η εξαέρωση του καυσίμου στη λειτουργία χαμηλού φορτίου, έτσι οι ορατές εκπομπές καπνού αποφεύχθηκαν στο χαμηλό φορτίο.

Οι εκπομπές CO στην εξαγωγή υποδηλώνουν τη χαμένη χημική ενέργεια που δεν χρησιμοποιείται πλήρως στον κινητήρα. Οι εκπομπές CO επηρεάζονται από την

αναλογία ισοδυναμίας, τον τύπο καυσίμου, την αναλογία ψεκασμού, το χρονισμό του ψεκασμού, την πίεση κοινής γραμμής, το φορτίο και την ταχύτητα του κινητήρα. Η πειραματική ποσότητα εκπομπών για διαφορετικό φορτίο παρουσιάζεται στο Σχ. 20, όπου οι εκπομπές αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου σε όλο το εύρος φορτίου (Wang et al. (2010)). Η πολύ χαμηλή ποσότητα εκπομπών στο μερικό φορτίο μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: η θύρα εξάτμισης διακόπτεται νωρίς από το VGC για να μειωθεί ο νέος αέρας που χάνεται στο μερικό φορτίο, επίσης χρησιμοποιήθηκαν ένα ή δύο μπεκ ψεκασμού καυσίμου αντί για τρία μπεκ ψεκασμού και υψηλότερη πίεση common rail για να καλυφθούν οι απαιτούμενες μικρές ποσότητες καυσίμου και ένας κατάλληλος ψεκασμός σε αυξήσεις της γωνίας προώθησης του ψεκασμού καυσίμου μερικού φορτίου προκειμένου να αυξηθεί η αναλογία της προαναμεμιγμένης καύσης σε μερικό φορτίο .

Ωστόσο, το CO₂ είναι ένα σημαντικό συστατικό, επιβλαβές και υπεύθυνο για την υπερθέρμανση του πλανήτη. Όπως φαίνεται στο Σχ. 20, σε χαμηλές στροφές κινητήρα, οι εκπομπές CO₂ είχαν αυξηθεί με την αύξηση του φορτίου του κινητήρα στην περιοχή χαμηλού φορτίου, ωστόσο οι εκπομπές είχαν μειωθεί όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο από το 65% του πλήρους φορτίου.

Μια άλλη εκπομπή που παράγεται από τους κινητήρες ντίζελ είναι το HC. Οι εκπομπές HC είναι κυρίως άκαυστα καύσιμα, που αποτελούνται από αποσυντιθέμενα μόρια καυσίμου, ανασυνδυασμένες ενδιάμεσες ενώσεις και λιπαντικό λάδι. Η ποσότητα του HC στα καυσαέρια εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, τις ιδιότητες του καυσίμου, τα χαρακτηριστικά ψεκασμού καυσίμου και την αλληλεπίδραση μεταξύ του ψεκασμού καυσίμου και του αέρα στο θάλαμο καύσης. Τα προβλεπόμενα ποσά HC για διαφορετικά φορτία κινητήρα φαίνονται επίσης στο Σχ. 20. Η ποσότητα HC στην εξαγωγή καυσαερίων είχε αυξηθεί με την αύξηση της ποσότητας κάτω από το 52% φορτίο, ωστόσο η ποσότητα HC αυξάνει με την αύξηση φορτίου άνω του 52%. Η εκπομπή HC είναι χαμηλή και οι ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενες παράμετροι βελτίωσαν τη διαδικασία παρέχοντας πληρέστερη καύση. Καθώς το φορτίο του κινητήρα αυξάνεται, η κάπως φθίνουσα αναλογία αέρα παράγει υψηλότερες συγκεντρώσεις καυσίμου στον πυρήνα ψεκασμού, προκαλώντας την εναπόθεση περισσότερου καυσίμου στα τοιχώματα. Αυτή η εκπομπή είναι πολύ χαμηλή και το πιο σημαντικό είναι ότι οι αυξημένες στροφές του κινητήρα

(μεγαλύτερο φορτίο) βελτιώνουν τις διαδικασίες ανάμειξης και οξείδωσης HC και τη θερμοκρασία καύσης. Για υψηλά φορτία καύσης HC, η θερμοκρασία είναι προφανώς πιο σημαντική από την ανάμειξη.

Στην εργασία των Wang et al. (2010), παρουσιάστηκε ένα σύστημα όπου οι τιμές εκπομπών καυσαερίων ενός κινητήρα ντίζελ θαλάσσης προβλέπονται με χρήση ANN για διαφορετικές συνθήκες φορτίου κινητήρα. Η πρόβλεψη των εκπομπών καυσαερίων ενός ευφυούς κινητήρα ντίζελ έχει κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας μοντέλο ANN για διαφορετικά φορτία κινητήρα. Οι τιμές εκπομπών καυσαερίων προβλέπονται ως αποδεκτά όρια εκτός από τα μέσα σφάλματα για τον καπνό. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας καύσης και τα σφάλματα μέτρησης στην πειραματική μελέτη οδήγησαν σε υψηλότερο μέσο όρο σφαλμάτων. Ωστόσο, οι πραγματικές και οι προβλεπόμενες εκπομπές καυσαερίων του κινητήρα δείχνουν ότι η συσχέτιση των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών είναι υψηλή. Ως εκ τούτου, η χρήση των ANN συνιστάται ιδιαίτερα για την πρόβλεψη των εκπομπών του κινητήρα αντί να χρειάζεται να αναληφθούν πολύπλοκες και χρονοβόρες πειραματικές μελέτες.

Σύγκριση Μεταξύ Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενου Ναυτιλιακού Κινητήρα Ντίζελ και Συμβατικού Κινητήρα

Ο ηλεκτρονικός έλεγχος κινητήρα πλοίου (Electronic ship engine control, ESEC) είναι ένα ψηφιακό σύστημα που αποτελείται από ηλεκτρονικά κυκλώματα (hardware) και λογισμικό (software) για τον έλεγχο και την παρακολούθηση της λειτουργίας των κύριων κινητήρων πρόωσης ενός πλοίου (Valkeejärvi, 2006). Τα συστήματα ESEC χρησιμοποιούνται συνήθως για τον έλεγχο κινητήρων ντίζελ, αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν με άλλους τύπους κινητήρων, όπως κινητήρες αεριοστροβίλου (Binns & Joby, 1973; Bilousov et al., 2020). Επιπλέον τα σύγχρονα συστήματα ESEC μπορούν να εξελιχθούν και να λειτουργούν μαζί με ελεγκτές τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης για περισσότερο βελτιωμένη επιτήρηση και έλεγχο λειτουργίας του κινητήρα (Planakis et al., 2022).

Ένα σύστημα ESEC περιλαμβάνει συνήθως μια κονσόλα ελέγχου, ένα σύνολο αισθητήρων και ενεργοποιητών και μια κεντρική μονάδα ελέγχου (central control unit, CCU) ή μονάδα ελέγχου κινητήρα (engine control module, ECM) (El Gohary & Abdou, 2011). Η κονσόλα ελέγχου χρησιμοποιείται από τον χειριστή για την εισαγωγή εντολών και την παρακολούθηση της κατάστασης του κινητήρα. Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση διαφόρων παραμέτρων του κινητήρα, όπως θερμοκρασία, πίεση και ταχύτητα, και για τον έλεγχο της ροής καυσίμου και αέρα του κινητήρα (He et al., 2019). Το CCU ή ECM είναι ο «εγκέφαλος» του συστήματος και είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία της εισόδου από τους αισθητήρες και την εκτέλεση των εντολών από την κονσόλα ελέγχου (Matulić et al., 2020).

Η CCU ή η ECM χρησιμοποιεί αλγόριθμους για τον έλεγχο του κινητήρα με βάση διάφορες εισόδους, όπως εντολές του χειριστή, μετρήσεις αισθητήρων για τον προσδιορισμό της κατάστασης του κινητήρα καθώς και προκαθορισμένες παραμέτρους (Sim et al., 2015). Έτσι αν για παράδειγμα ο χειριστής αυξήσει τις στροφές του κινητήρα, η CCU ή η ECM θα προσαρμόσουν τη ροή καυσίμου και αέρα στον κινητήρα για να αυξήσουν την ισχύ εξόδου του, ή αν ένας αισθητήρας εντοπίσει μια μη φυσιολογική κατάσταση, όπως υπερθέρμανση, η CCU ή η ECM θα προβούν στις κατάλληλες ενέργειες για την προστασία του κινητήρα, όπως μείωση της ταχύτητάς του ή διακοπή λειτουργίας (Zhou et al., 2010).

Τα συστήματα ESEC είναι συνήθως ενσωματωμένα με άλλα συστήματα πλοίων, όπως συστήματα πλοήγησης και επικοινωνιών, και μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες στο πλήρωμα για τη διαχείριση του πλοίου, όπως η κατανάλωση καυσίμου και η απόδοση του κινητήρα (Kambrath et al., 2017). Το ESEC επιτρέπει επίσης την απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο του συστήματος πρόωσης, το οποίο μπορεί να προσφέρει πρόσθετα οφέλη, όπως η βελτιστοποίηση της απόδοσης και η μείωση του κόστους συντήρησης (Xu & Xu, 2020).

Ένας ηλεκτρονικά ελεγχόμενος ναυτιλιακός κινητήρας (electronically controlled marine engine, ECME) χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά εξαρτήματα και λογισμικό υπολογιστή για τον έλεγχο και την παρακολούθηση της λειτουργίας του κινητήρα, ενώ ένας συμβατικός κινητήρας θαλάσσης χρησιμοποιεί μηχανικά ή υδραυλικά συστήματα για το σκοπό αυτό (Wang et al., 2020; Gerasidi, & Lisachenko, 2021). Η σύγκριση των ηλεκτρονικά ελεγχόμενων και των συμβατικών ναυτιλιακών κινητήρων ντίζελ πρέπει να γίνει στους επιμέρους τομείς της κατανάλωσης καυσίμου, της ισχύος εξόδου, των εκπομπών ρύπων, της αξιοπιστίας που περιλαμβάνει συντήρηση και έλεγχο βλαβών καθώς και στο οικονομικό κόστος.

4.1 Περιπτώσεις Κινητήρων Ντίζελ

Στην παρούσα ενότητα, θα προβούμε σε συγκριτική ανάλυση τεσσάρων κυρίαρχων ναυτιλιακών κινητήρων ντίζελ που έχουν αποκτήσει μεγάλη σημασία στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Οι κινητήρες που θα εξεταστούν περιλαμβάνουν τη σειρά 4000 της MTU, μια συμβατική μονάδα παραγωγής ισχύος που αναπτύχθηκε από τον όμιλο Rolls-Royce, και τον CAT 3516C, μια ηλεκτρονικά ελεγχόμενη καινοτομία που προωθήθηκε από την Caterpillar Inc. Θα εμβαθύνουμε επίσης στις προδιαγραφές του MAN 6L23/30H Mk3, μιας ακόμη προσθήκης στο χαρτοφυλάκιο ηλεκτρονικά ελεγχόμενων κινητήρων της MAN Energy Solutions, και τέλος, του Wärtsilä 31, μιας ευέλικτης και αποδοτικής λύσης που παρέχεται από την Wärtsilä. Η αξιολόγηση αυτή αποσκοπεί στην ολοκληρωμένη και λεπτομερή διερεύνηση των προδιαγραφών του κάθε κινητήρα, προσφέροντας κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με τα ποσοστά κατανάλωσης καυσίμου, τις δυνατότητες παραγωγής ισχύος, τα επίπεδα εκπομπών ρύπων, την αξιοπιστία και την οικονομική βιωσιμότητα.

Η Σειρά 4000 της MTU, γνωστή για την ευρωστία και την αξιοπιστία της, προσφέρει μεταβλητές διαμορφώσεις και εύρος ισχύος εξόδου για να ταιριάζει σε διαφορετικές

θαλάσσιες εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά, ο CAT 3516C αποτελεί απόδειξη των εξελίξεων στην τεχνολογία των ηλεκτρονικά ελεγχόμενων κινητήρων ντίζελ, διαθέτοντας σύστημα καυσίμου Common Rail και ένα τρομερό σύστημα ελέγχου, παράλληλα με εντυπωσιακές αποδόσεις ισχύος.

Στη συνέχεια, ρίχνουμε το βλέμμα μας στον MAN 6L23/30H Mk3, έναν κινητήρα που ευθυγραμμίζεται με τους κανονισμούς του IMO 2020 για το ανώτατο όριο θείου, αναδεικνύοντας τη δέσμευση για τη μείωση των εκπομπών ρύπων, διατηρώντας παράλληλα μια αξιόπαινη απόδοση ισχύος. Αυτή η δέσμευση αντανακλάται περαιτέρω στα χαρακτηριστικά του Wärtsilä 31, ο οποίος όχι μόνο πληροί τους αυστηρούς κανονισμούς IMO Tier 3 όταν λειτουργεί με φυσικό αέριο, αλλά παρουσιάζει επίσης μια εντυπωσιακή μέγιστη ισχύ, καταδεικνύοντας τα βήματα προόδου στην ισχύ και την απόδοση που έχουν επιτευχθεί τα τελευταία χρόνια.

Πριν εμβαθύνουμε στις περίπλοκες λεπτομέρειες που περιγράφονται στους παρακάτω πίνακες, είναι σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι οι συγκρίσεις που θα γίνουν θα χρησιμεύσουν ως ένα ζωτικό εργαλείο για τους ενδιαφερόμενους του κλάδου στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Αυτή η συγκριτική ανάλυση αποτελεί μια ευκαιρία για τη μέτρηση των δυνατοτήτων και των λειτουργιών αυτών των κινητήρων, θέτοντας μια σαφή πορεία για τους φορείς της ναυτιλίας ώστε να ευθυγραμμίσουν τις επιλογές τους τόσο με τις επιχειρησιακές απαιτήσεις όσο και με τις περιβαλλοντικές δεσμεύσεις.

Οι επόμενες ενότητες θα προσφέρουν μια πιο προσεκτική ματιά σε κάθε κινητήρα, παρέχοντας στους αναγνώστες αποχρώσεις των προδιαγραφών τους και των επιπτώσεών τους σε πραγματικές θαλάσσιες λειτουργίες. Μέσω μιας σχολαστικής διερεύνησης των προτύπων κατανάλωσης καυσίμου, των δυνατοτήτων ισχύος εξόδου, των επιπέδων εκπομπών, των προτύπων αξιοπιστίας και των οικονομικών εκτιμήσεων, η σύγκριση αυτή επιδιώκει να προσφέρει μια ολοκληρωμένη άποψη, διευκολύνοντας τη βαθύτερη κατανόηση του σημερινού τοπίου στην τεχνολογία των ναυτικών κινητήρων. Ας προχωρήσουμε στην εξέταση των προσφορών κάθε κινητήρα, όπως περιγράφονται στους πίνακες που ακολουθούν.

4.1.1. Η Σειρά 4000 της MTU

Στον τομέα της ναυτιλίας, η επιλογή ενός κινητήρα αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα ενός πλοίου.

Ξεκινώντας τη συγκριτική μας ανάλυση, ξεκινάμε με τη σειρά 4000 της MTU, έναν συμβατικό ναυτιλιακό πετρελαιοκινητήρα που φέρει τη σφραγίδα της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας, σήμα κατατεθέν του φημισμένου ομίλου Rolls-Royce. Αυτός ο κινητήρας έχει σχεδιαστεί για να ανταποκρίνεται στις αυστηρές απαιτήσεις του θαλάσσιου περιβάλλοντος, προσφέροντας ένα μείγμα ισχύος και σταθερότητας που δύσκολα μπορεί να παραλληλιστεί.

Οι προδιαγραφές της σειράς 4000 της MTU φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 5. Προδιαγραφές συμβατικού ναυτικού κινητήρα ντίζελ MTU Σειρά 4000

Πηγή: (Rolls-Royce Group, 2019).

Προδιαγραφές	Συμβατικός ναυτικός κινητήρας ντίζελ MTU Σειρά 4000 - Λεπτομέρειες
Κατανάλωση καυσίμου	Η κατανάλωση καυσίμου ποικίλλει ανάλογα με τη διαμόρφωση του κινητήρα και τον συντελεστή φορτίου: - Κινητήρας 12V: 200-400 λίτρα/ώρα σε πλήρες φορτίο - Κινητήρας 20V: 400-800 λίτρα/ώρα σε πλήρες φορτίο. Ο κινητήρας διαθέτει σύστημα ψεκασμού common rail και σωλήνες ψεκασμού υψηλής πίεσης διπλού τοιχώματος για αποτελεσματική παροχή καυσίμου.
Ισχύς εξόδου	Διατίθενται σε διαμορφώσεις 12V, 16V και 20V με ισχύ που κυμαίνεται από 1,851 kW έως 3,490 kW. Ειδικές αποδόσεις: - Κινητήρας 12V: 1.350 kW στις 1.500 σ.α.λ. - 1.560 kW στις 1.800 σ.α.λ. - Κινητήρας 20V: 2.700 kW στις 1.500 σ.α.λ. - 3.490 kW στις 1.800 σ.α.λ. Η απόδοση ισχύος ποικίλλει ανάλογα με τη διαμόρφωση, τον συντελεστή φορτίου και τις συνθήκες λειτουργίας.
Εκπομπή Ρύπων	Συμμορφώνεται με τους κανονισμούς IMO Tier II και EPA Tier 3. Επίπεδα εκπομπών: - Κινητήρας 12V: 1.000-2.000 mg/Nm ³ NO _x σε πλήρες φορτίο - Κινητήρας 20V: 2.000-4.000 mg/Nm ³ NO _x σε πλήρες φορτίο. Οι εκπομπές μπορεί να είναι υψηλότερες σε σύγκριση με τους ηλεκτρονικά ελεγχόμενους κινητήρες και ποικίλλουν ανάλογα με τη διαμόρφωση, τον συντελεστή φορτίου και τις συνθήκες λειτουργίας.
Αξιοπιστία	Γνωστός για την αξιοπιστία και την αντοχή του, με συνιστώμενο διάστημα επισκευής 24.000-30.000 ώρες, που ποικίλλει ανάλογα με τη διαμόρφωση και τις συνθήκες λειτουργίας. Προτιμάται για θαλάσσιες εφαρμογές λόγω της αξιόπιστης απόδοσής του.
Οικονομικές παράμετροι	Το αρχικό κόστος κυμαίνεται από 500.000 έως 1.500.000 δολάρια, με διακυμάνσεις ανάλογα με τη διαμόρφωση και τις πρόσθετες επιλογές. Παρά το υψηλότερο αρχικό κόστος, προσφέρει δυνητική εξοικονόμηση με την πάροδο του χρόνου λόγω της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και των

	μεγαλύτερων διαστημάτων γενικής επισκευής. Η διαθεσιμότητα ανακατασκευασμένων εξαρτημάτων μπορεί να συμβάλει περαιτέρω στη μείωση του κόστους συντήρησης.
--	---

4.1.2. Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας ντίζελ CAT 3516C

Στη συνέχεια αναλύεται η περίπτωση των πρωτοποριακών CAT 3516C, μιας πρότυπης σειράς ηλεκτρονικά ελεγχόμενων ναυτικών πετρελαιοκινητήρων, που προσφέρει η παγκοσμίως αναγνωρισμένη Caterpillar Inc. Αυτός ο κινητήρας αποτελεί φάρο τεχνολογικής προόδου και λειτουργικής αποδοτικότητας στον τομέα της ναυτιλίας, προσφέροντας ένα μείγμα ισχύος και καινοτομίας που στοχεύει στον επαναπροσδιορισμό των συστημάτων πρόωσης της ναυτιλίας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι βασικές του προδιαγραφές:

Πίνακας 6. Προδιαγραφές ηλεκτρονικά ελεγχόμενου κινητήρα ντίζελ CAT 3516C.

Πηγή: Caterpillar Inc. (2014).

Προδιαγραφές	Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας ντίζελ CAT 3516C
Μέγιστη ισχύς	3386 bkW (4540 bhp)
Ονομαστική ταχύτητα	1600-1800 rpm
Διάτρηση	170 mm (6.69 in)
Stroke	215 mm (8.46 in)
Μετατόπιση	78.08 L (4763.00 in ³)
Αναρρόφηση	TA (Turbocharged and Aftercooled)
Τύπος ρυθμιστή	ADEM™ A4
Εκπομπές	IMO II
Σύστημα καυσίμου	Common Rail
Σύστημα ελέγχου	Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος
Βάρος (κατά προσέγγιση)	16,330 kg (36,000 lb)

4.1.3 Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας ντίζελ MAN 6L23/30H Mk3

Στο εξελισσόμενο τοπίο των ναυτιλιακών πετρελαιοκινητήρων, ο MAN 6L23/30H Mk3 αποτελεί απόδειξη της δέσμευσης της MAN Energy Solutions για καινοτομία και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Αυτός ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας σηματοδοτεί ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός για την επίτευξη της λεπτής ισορροπίας μεταξύ ισχύος, αποδοτικότητας και περιβαλλοντικής ευθύνης, η οποία είναι ζωτικής σημασίας στις σύγχρονες ναυτιλιακές επιχειρήσεις. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ορισμένες από τις βασικότερες προδιαγραφές του.

Πίνακας 7. Προδιαγραφές ηλεκτρονικά ελεγχόμενου κινητήρα ντίζελ MAN 6L23/30H Mk3. Πηγή: (MAN Energy Solutions, 2019).

Προδιαγραφές	Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας ντίζελ MAN 6L23/30H Mk3
Μέγιστη ισχύς	1800 kW
Ονομαστική ταχύτητα	900 rpm
Διάτρηση	225 mm
Χτύπημα (Stroke)	300 mm
Μετατόπιση	1.73 L/cyl
Αναρρόφηση	TA (Turbocharged and intercooled)
Τύπος ρυθμιστή	Ηλεκτρονικά
Εκπομπές	Ανταποκρίνεται στους κανονισμούς IMO 2020 Sulphur Cap
Σύστημα καυσίμου	Common rail fuel injection
Σύστημα ελέγχου	Ηλεκτρονικό σύστημα διαχείρισης κινητήρα
Βάρος (κατά προσέγγιση)	20.7 - 24.5 Τόνους

4.1.4. Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας ντίζελ Wärtsilä 31

Ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος πετρελαιοκινητήρας Wärtsilä 31, τοποθετημένος στα όρια της καινοτομίας στην τεχνολογία πρόωσης της ναυτιλίας, αποτελεί την επιτομή της αριστείας στις επιδόσεις, την ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική ευσυνειδησία. Ένας αξιοσημείωτος άθλος της μηχανικής, αυτός ο κινητήρας στέκεται ψηλά με μια πρωτοποριακή μέγιστη απόδοση ισχύος 10,4 MW, παρέχοντας μια πρωτοφανή λύση πρόωσης που είναι τόσο ισχυρή όσο και περιβαλλοντικά υπεύθυνη.

Πίνακας 8. Προδιαγραφές ηλεκτρονικά ελεγχόμενου κινητήρα ντίζελ Wärtsilä 31.

Πηγή: (Wärtsilä, 2021).

Προδιαγραφές	Τιμή
Μέγιστη ισχύς	10.4 MW
Ονομαστική ταχύτητα	720/750 rpm
Διάτρηση	310 mm
Χτύπημα (Stroke)	430 mm
Μετατόπιση	31.1 L/ κύλινδρο
Αναρρόφηση	TA (Turbocharged and intercooled)
Τύπος ρυθμιστή	Ηλεκτρονική
Εκπομπές	Πληροί τους κανονισμούς IMO Tier 3 όταν λειτουργεί με φυσικό αέριο και με SCR όταν χρησιμοποιεί καύσιμο ντίζελ.
Σύστημα καυσίμου	Common rail
Σύστημα ελέγχου	Ηλεκτρονικό
Βάρος (κατά προσέγγιση)	57.5-93.2 τόνοι (ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα)

4.2. Σύγκριση στην Κατανάλωση Καυσίμου

Η σύγκριση της κατανάλωσης καυσίμου μεταξύ ηλεκτρονικά ελεγχόμενων ναυτιλιακών κινητήρων ντίζελ (electronically controlled diesel marine engines, ECDE) και συμβατικών πετρελαιοκινητήρων θαλάσσης (conventional diesel marine engines, CDE) μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, όπως ο σχεδιασμός του κινητήρα, η ζητούμενη ταχύτητα πλεύσης, οι συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα που εξαρτώνται από το φορτίο και τις συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Γενικά, οι ECDE μπορούν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους CDE όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου και την απόδοση. Οι ECDE παρέχουν πιο ακριβή έλεγχο των λειτουργιών του κινητήρα, όπως ο ελεγχόμενος ψεκασμός καυσίμου, η ροή αέρα και η ταχύτητα του κινητήρα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτιωμένη απόδοση καύσης και τη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Οι ECDE μπορούν να προσαρμόσουν και να διορθώσουν τη λειτουργία του κινητήρα με βάση τις συνθήκες φορτίου, προσαρμόζοντας την ταχύτητα και το φορτίο του κινητήρα, γεγονός που μπορεί επίσης να βελτιώσει την απόδοση καυσίμου (Hu et al., 2018).

Οι ECDE μπορούν να παρακολουθούν διάφορες παραμέτρους του κινητήρα και να παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την απόδοση του κινητήρα. Επιπλέον οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι ναυτιλιακοί κινητήρες ντίζελ έχουν δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα, τα οποία μπορούν να αναλυθούν για τον εντοπισμό τάσεων και την εξοικονόμηση καυσίμου (Matulić et al., 2020).

Σε ότι αφορά τους συμβατικούς κινητήρες CDE, είναι λιγότερο αποδοτικοί λόγω λιγότερο ακριβούς ελέγχου των λειτουργιών του κινητήρα και μπορεί να απαιτούν πιο συχνή συντήρηση. Επιπλέον είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πραγματική κατανάλωση καυσίμου και η απόδοση ενός ECDE και ενός CDE θα εξαρτηθεί από διάφορους παράγοντες, όπως ο ειδικός σχεδιασμός και η διαμόρφωση των κινητήρων, οι συνθήκες φορτίου και οι συνθήκες λειτουργίας. Παράγοντες όπως το προφίλ φορτίου και οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η κατάσταση της θάλασσας, ο άνεμος και η θερμοκρασία είναι σημαντικοί για την αξιολόγηση της απόδοσης και της κατανάλωσης καυσίμου. Ένα καλά συντηρημένο CDE, που λειτουργεί υπό ευνοϊκές συνθήκες, μπορεί να αποδώσει εξίσου καλά με ένα ECDE. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι ενώ οι ECDE μπορεί να έχουν χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου αλλά είναι

συνήθως πιο περίπλοκοι και ακριβοί στην αγορά, εγκατάσταση και αρχικές ρυθμίσεις από τους CDE (Zhou et al., 2010).

4.3. Σύγκριση Ισχύος Εξόδου

Η σύγκριση της ισχύος εξόδου μεταξύ ηλεκτρονικά ελεγχόμενων πετρελαιοκινητήρων (ECDE) και συμβατικών πετρελαιοκινητήρων θαλάσσης (CDE) μπορεί να εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως οι συνθήκες φορτίου και οι συνθήκες λειτουργίας.

Τα ECDE μπορούν να παρέχουν πιο ακριβή έλεγχο των λειτουργιών του κινητήρα, όπως η έγχυση καυσίμου, η ροή αέρα και η ταχύτητα του κινητήρα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση καύσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη απόδοση ισχύος σε σύγκριση με τα CDE. Τα ECDE μπορούν επίσης να παρακολουθούν διάφορες παραμέτρους του κινητήρα και να παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την απόδοση του κινητήρα, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στην έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων και στη μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας για επισκευές. Αυτό επιτρέπει στον κινητήρα να ρυθμίζεται με ακρίβεια και να λειτουργεί με βέλτιστη απόδοση, με αποτέλεσμα υψηλότερη απόδοση ισχύος όποτε οι συνθήκες το απαιτούν (Baldi et al., 2015).

Τα CDE, από την άλλη πλευρά, είναι λιγότερο αποδοτικά λόγω λιγότερο ακριβούς ελέγχου των λειτουργιών του κινητήρα και μπορεί να απαιτούν συχνότερη συντήρηση, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη απόδοση ισχύος (Varbanets, & Karianskiy, 2012). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πραγματική ισχύς εξόδου ενός ECDE και ενός CDE θα εξαρτηθεί από διάφορους παράγοντες, όπως ο ειδικός σχεδιασμός και η διαμόρφωση των κινητήρων, οι συνθήκες φορτίου και οι συνθήκες λειτουργίας. Επίσης, η προβλεπόμενη χρήση του σκάφους, οι ειδικές απαιτήσεις ισχύος του πλοίου και το σύστημα πρόωσης του πλοίου πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση της ισχύος εξόδου.

4.4. Σύγκριση Εκπομπών Ρύπων

Οι εκπομπές ρύπων στους ηλεκτρονικά ελεγχόμενους κινητήρες ντίζελ (ECDE) και στους συμβατικούς κινητήρες ντίζελ πλοίων (CDE) εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο ειδικός σχεδιασμός και η διαμόρφωση των κινητήρων, οι

συνθήκες φορτίου και οι συνθήκες λειτουργίας (Parlak et al., 2012). Γενικά όμως οι ECDE προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους CDE όσον αφορά τη ρύπανση, για τους ακόλουθους λόγους. Οι ECDE παρέχουν πιο ακριβή έλεγχο των λειτουργιών του κινητήρα, όπως ο ψεκασμός καυσίμου, η ροή αέρα και η ταχύτητα του κινητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα βελτιωμένη απόδοση καύσης, η οποία οδηγεί σε χαμηλότερες εκπομπές ρύπων όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NOx) και τα σωματίδια (particulate matter, PM) (Chen et al., 2012). Οι ECDE μπορούν επίσης να προσαρμόσουν τη λειτουργία του κινητήρα με βάση τις συνθήκες φορτίου, προσαρμόζοντας την ταχύτητα και το φορτίο του κινητήρα, γεγονός που μπορεί επίσης να βελτιώσει την απόδοση καύσης και να μειώσει τις εκπομπές ρύπων.

Επιπλέον οι ECDE αποθηκεύουν επίσης δεδομένα σχετικά με την απόδοση του κινητήρα, τα οποία μπορούν να αναλυθούν για τον εντοπισμό τάσεων και προβλημάτων και τη μείωση των εκπομπών ρύπων του κινητήρα. Αυτό επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση και τη λεπτομέρεια του κινητήρα για χαμηλότερες εκπομπές ρύπων (Schmid & Weisser, 2005).

Αντίθετα, οι συμβατικοί CDE μπορεί να είναι λιγότερο αποδοτικοί λόγω ελαττωμένου ελέγχου των λειτουργιών του κινητήρα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες εκπομπές ρύπων (Goldsworthy, 2012). Οι CDE επειδή δεν έχουν άμεσο έλεγχο και παρακολούθηση με ηλεκτρονικά συστήματα μπορεί για μεγάλο χρονικό διάστημα να έχουν αυξημένες εκπομπές ρύπων χωρίς αυτό να γίνει αντιληπτό από το προσωπικό του πλοίου ή της εταιρίας. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι πραγματικές εκπομπές από έναν ECDE και έναν CDE θα εξαρτηθούν από διάφορους παράγοντες, όπως ο ειδικός σχεδιασμός και η διαμόρφωση των κινητήρων, οι συνθήκες φορτίου και οι συνθήκες λειτουργίας. Εξαρτάται επίσης από την τεχνολογία ελέγχου των εκπομπών που χρησιμοποιείται, καθώς ορισμένα CDE μπορεί να έχουν μετασκευαστεί με τεχνολογίες μετεπεξεργασίας καυσαερίων (Goldsworthy, 2002). Συνολικά, τα ECDE έχουν τη δυνατότητα να παράγουν χαμηλότερες εκπομπές από τα CDE λόγω του ακριβούς ελέγχου των λειτουργιών του κινητήρα και της ικανότητας συνεχούς παρακολούθησης και βελτιστοποίησης της απόδοσης του κινητήρα. Ωστόσο, οι ειδικές εκπομπές ενός συγκεκριμένου κινητήρα θα εξαρτηθούν από

διάφορους παράγοντες, όπως ο σχεδιασμός, οι συνθήκες φορτίου και οι συνθήκες λειτουργίας

4.5. Σύγκριση στην Αξιοπιστία

Η σύγκριση της αξιοπιστία, των ενδεχόμενων βλαβών και των αναγκών σε συντήρηση και επισκευές μεταξύ ηλεκτρονικά ελεγχόμενων πετρελαιοκινητήρων (ECDE) και συμβατικών πετρελαιοκινητήρων θαλάσσης (CDE) εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο ειδικός σχεδιασμός και η διαμόρφωση των κινητήρων, οι συνθήκες λειτουργίας και το επίπεδο συντήρησης (Wang et al., 2009). Γενικά, οι ECDE μπορούν να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα CDE όσον αφορά την αξιοπιστία, τις βλάβες και τις ανάγκες συντήρησης και επισκευών, για τους ακόλουθους λόγους. Οι ECDE παρέχουν πιο ακριβή έλεγχο των λειτουργιών του κινητήρα, όπως ο ψεκασμός καυσίμου, η ροή αέρα και η ταχύτητα του κινητήρα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση καύσης, η οποία μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο αστοχίας ή δυσλειτουργίας του κινητήρα. Οι ECDE μπορούν επίσης να παρακολουθούν διάφορες παραμέτρους του κινητήρα και να παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την απόδοση του κινητήρα. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων και να μειώσει την πιθανότητα βλάβης ή δυσλειτουργίας του κινητήρα (Kluczyk, & Grządziela, 2019).

Ακόμα οι ECDE μπορούν επίσης να αποθηκεύσουν δεδομένα σχετικά με την απόδοση του κινητήρα, τα οποία μπορούν να αναλυθούν για τον εντοπισμό τάσεων και ζητημάτων και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του κινητήρα. Αυτό επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση και τη λεπτομέρεια της απόδοσης του κινητήρα και την πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων πριν συμβούν. Επιπλέον οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι κινητήρες έχουν τη δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης, η οποία επιτρέπει σε μια ομάδα μηχανικών που βρίσκονται στην ξηρά να παρακολουθεί και να ελέγχει την απόδοση του κινητήρα εξ αποστάσεως, κάτι που μπορεί να είναι ευεργετικό σε κρίσιμες καταστάσεις.

Αντίθετα, οι CDE μπορεί να είναι λιγότερο αποδοτικά λόγω λιγότερο ακριβούς ελέγχου των λειτουργιών του κινητήρα, γεγονός που μπορεί να αυξήσει την πιθανότητα αστοχίας ή δυσλειτουργίας του κινητήρα. Οι CDE μπορεί επίσης να απαιτούν πιο συχνή συντήρηση, γεγονός που μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο βλάβης

ή δυσλειτουργίας του κινητήρα κατά τη συντήρηση ή τις επισκευές (Kluczyk, & Grządziela, 2019). Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η πραγματική ασφάλεια ενός ECDE και ενός CDE θα εξαρτηθεί από διάφορους παράγοντες, όπως ο ειδικός σχεδιασμός και η διαμόρφωση των κινητήρων, οι συνθήκες λειτουργίας και το επίπεδο συντήρησης. Η σωστή συντήρηση και η τήρηση των συστάσεων του κατασκευαστή τόσο για τους ECDE όσο και για τους CDE είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφαλούς και βέλτιστης απόδοσης.

Συνολικά, τα ECDE έχουν τη δυνατότητα να είναι πιο αξιόπιστοι από τα CDE λόγω του ακριβούς ελέγχου των λειτουργιών του κινητήρα, της συνεχούς παρακολούθησης και της ικανότητας πρόβλεψης πιθανών προβλημάτων πριν αυτά συμβούν. Ωστόσο, η πραγματική αξιοπιστία ενός συγκεκριμένου κινητήρα θα εξαρτηθεί από διάφορους παράγοντες, όπως ο σχεδιασμός, οι συνθήκες φορτίου, οι συνθήκες λειτουργίας και το επίπεδο συντήρησης

4.6. Οικονομική Σύγκριση

Η σύγκριση των οικονομικών οφελών μεταξύ ηλεκτρονικά ελεγχόμενων πετρελαιοκινητήρων (ECDE) και συμβατικών πετρελαιοκινητήρων θαλάσσης (CDE) εξαρτάται από όλους τους παράγοντες που αναλύθηκαν στις προηγούμενες συγκρίσεις. Το συνολικό κόστος ενός ναυτιλιακού κινητήρα, αφορά το αρχικό κόστος κτήσης, το αρχικό κόστος εγκατάστασης και ρυθμίσεων, το κόστος λειτουργίας σε όλη τη διάρκεια ζωής του κινητήρα που περιλαμβάνει το κόστος κατανάλωσης καυσίμου, συντήρησης και επισκευών (Okazak et al., 2010).

Σε ότι αφορά το κόστος κτήσης και αρχικό κόστος εγκατάστασης και ρυθμίσεων, οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι ναυτιλιακοί κινητήρες είναι πιο δαπανηροί από τους συμβατικούς. Αυτό οφείλεται στις πρόσθετες δυνατότητες που περιλαμβάνουν, στους αισθητήρες παρακολούθησης της λειτουργίας, στην κύρια και τυχόν βοηθητικές μονάδες ελέγχου, στα συστήματα διασύνδεσης δεδομένων κ.α.

Σε ότι αφορά το κόστος λειτουργίας στη διάρκεια ζωής του κινητήρα, οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι κινητήρες είναι πολύ πιο οικονομικοί από τους συμβατικούς γιατί έχουν μικρότερη κατανάλωση καυσίμου, παράγουν την ισχύ εξόδου που απαιτείται κάθε φορά από τις συνθήκες φορτίου, θαλάσσιου περιβάλλοντος και ζητούμενης ταχύτητας πλοίου. Σε ότι αφορά τη συντήρηση και τις επισκευές, αυτές οι εργασίες στα ECDE

μπορεί να γίνονται όταν υπάρχει κάποια διάγνωση εξελισσόμενης βλάβης μειώνοντας με τον τρόπο αυτό τις σοβαρές βλάβες ακινητοποίησης του πλοίου για μεγάλο διάστημα. Στους CDE πρέπει να γίνεται τακτική συντήρηση άσχετα με την κατάσταση του κινητήρα και επίσης δε μπορούν να προβλεφθούν και να αντιμετωπισθούν πριν εμφανισθούν τυχόν σοβαρές βλάβες (Juric et al., 2022).

Συνολικά, οι ECDE έχουν τη δυνατότητα να είναι πιο οικονομικά από τους CDE λόγω της βελτιωμένης απόδοσης καυσίμου και των καλύτερων δυνατοτήτων παρακολούθησης και ελέγχου.

Μια επιπλέον παράμετρος με τις συνεχείς αυστηροποιήσεις των εκπομπών ρύπων είναι ότι οι συμβατικοί κινητήρες που είναι πιο ρυπογόνοι, θα πρέπει σε κάποιο χρονικό σημείο να αντικατασταθούν ή να μετασκευαστούν και να διαμορφωθούν ώστε να ικανοποιούν τις προδιαγραφές εκπομπών, αυτό είναι ένα επιπλέον σημαντικό κόστος για τους πλοιοκτήτες.

4.7. Συγκριτικός Πίνακας

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συγκριτική ανάλυση μεταξύ των Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενων Κινητήρων Ντίζελ και των Συμβατικών Κινητήρων Ντίζελ, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

Πίνακας 5. Συγκριτικός πίνακας μεταξύ Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενων Κινητήρων Ντίζελ και Συμβατικών Κινητήρων Ντίζελ

Χαρακτηριστικό Σύγκρισης	Ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι κινητήρες ντίζελ (ECDE)	Συμβατικοί κινητήρες ντίζελ (CDE)
Κατανάλωση καυσίμου	Ακριβέστερος έλεγχος των λειτουργιών του κινητήρα, βελτιωμένη απόδοση καύσης και χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου	Λιγότερο αποδοτικό λόγω της μικρότερης ακρίβειας ελέγχου των λειτουργιών του κινητήρα. Απαιτεί συχνότερη συντήρηση
Ισχύς εξόδου	Ακριβέστερος έλεγχος των λειτουργιών του κινητήρα, βελτιωμένη απόδοση καύσης και υψηλότερο δυναμικό εξόδου ισχύος	Λιγότερο αποδοτικός λόγω μικρότερης ακρίβειας ελέγχου των λειτουργιών του κινητήρα. Μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερη απόδοση ισχύος
Εκπομπές Ρύπων	Ακριβέστερος έλεγχος των λειτουργιών του κινητήρα, βελτιωμένη απόδοση	Λιγότερο αποδοτικό λόγω του μειωμένου ελέγχου των

Χαρακτηριστικό Σύγκρισης	Ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι κινητήρες ντίζελ (ECDE)	Συμβατικοί κινητήρες ντίζελ (CDE)
	καύσης και χαμηλότερες εκπομπές ρύπων	Λειτουργιών του κινητήρα. Υψηλότερες εκπομπές ρύπων
Αξιοπιστία	Ακριβέστερος έλεγχος των λειτουργιών του κινητήρα, συνεχής παρακολούθηση και δυνατότητα έγκαιρου εντοπισμού προβλημάτων	Λιγότερο αποτελεσματικός λόγω της μικρότερης ακρίβειας ελέγχου των λειτουργιών του κινητήρα. Δυνητικά υψηλότερος κίνδυνος αστοχίας ή δυσλειτουργίας. Απαιτεί συχνότερη συντήρηση
Οικονομική Σύγκριση	Υψηλότερο αρχικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης Χαμηλότερο κόστος λειτουργίας κατά τη διάρκεια ζωής του κινητήρα Χαμηλότερες ανάγκες συντήρησης	Χαμηλότερο αρχικό κόστος αγοράς και εγκατάστασης Υψηλότερο κόστος λειτουργίας κατά τη διάρκεια ζωής του κινητήρα Υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου Υψηλότερες ανάγκες συντήρησης

Συμπεράσματα

Με βάση όλες τις συγκρίσεις των επιμέρους παραμέτρων που έγιναν, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι κινητήρες παρέχουν τη δυνατότητα στο πλήρωμα και στους μηχανικούς ξηράς να παρακολουθούν και να ελέγχουν από το σκάφος ή από απόσταση τις λειτουργίες του κινητήρα, να προγραμματίζουν τη συντήρηση όποτε αυτή απαιτείται, να ενημερώνονται για βλάβες που εξελίσσονται πριν την ακινητοποίηση του πλοίου. Μια άλλη βασική διαφορά είναι η ικανότητα παρακολούθησης και διάγνωσης προβλημάτων κινητήρα, καθώς τα ECME μπορούν να παρακολουθούν συνεχώς διάφορες παραμέτρους του κινητήρα και να παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την απόδοση του κινητήρα. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στην έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων και στη μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας για επισκευές. Τα ECME αποθηκεύουν επίσης δεδομένα σχετικά με την απόδοση του κινητήρα, τα οποία μπορούν να αναλυθούν για τον εντοπισμό σφαλμάτων και αστοχιών. Σε ότι αφορά τους συμβατικούς κινητήρες, είναι πιο δύσκολο να διαγνωστούν προβλήματα και μπορεί να απαιτούν συχνότερη συντήρηση.

Επίσης ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος κινητήρας διορθώνει αυτόματα συνεχώς την λειτουργία του ώστε να παρέχει την απαιτούμενη από τις συνθήκες θαλάσσης και φορτίου ισχύ εξόδου, με βάση τη ζητούμενη ταχύτητα πλεύσης, οδηγώντας σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, στη βελτιωμένη λειτουργία και στις μειωμένες εκπομπές ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου.

Όσον αφορά την εγκατάσταση και το κόστος, οι ECME είναι πιο περίπλοκοι και ακριβοί από τους συμβατικούς κινητήρες. Τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου και οι αισθητήρες πρέπει να εγκατασταθούν και να βαθμονομηθούν σωστά, αυτή η διαδικασία είναι πιο χρονοβόρα και δαπανηρή από την εγκατάσταση ενός συμβατικού κινητήρα. Ωστόσο λόγω της μακροπρόθεσμης εξοικονόμησης κόστους και της βελτιωμένης απόδοσης, μακροπρόθεσμα οι ECME είναι πιο οικονομική επιλογή.

Συνολικά, οι ECME προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες θαλάσσης, όπως βελτιωμένη απόδοση μεγαλύτερη ακρίβεια στον έλεγχο του κινητήρα και καλύτερες διαγνωστικές δυνατότητες. Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορούν να οδηγήσουν σε χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και βελτιωμένη ασφάλεια για πλοία εξοπλισμένα με ECME. Για τους παραπάνω λόγους

όλα τα νέα σε ηλικία πλοία έχουν κατασκευασθεί με ηλεκτρονικά ελεγχόμενους ναυτιλιακούς κινητήρες.

Βιβλιογραφία

- Alop, A. (2019). The main challenges and barriers to the successful “smart shipping”. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 13(3).
- Arteconi, A., Brandoni, C., Evangelista, D., & Polonara, F. (2010). Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe. *Applied Energy*, 87(6), 2005-2013.
- Bai, Y., Fan, L. Y., Ma, X. Z., Peng, H. L., & Song, E. Z. (2016). Effect of injector parameters on the injection quantity of common rail injection system for diesel engines. *International Journal of Automotive Technology*, 17(4), 567-579.
- Bai, Y., Lan, Q., Fan, L., Ma, X., & Liu, H. (2021). Investigation on the fuel injection stability of high pressure common rail system for diesel engines. *International Journal of Engine Research*, 22(2), 616-631.
- Baldi, F., Theotokatos, G., & Andersson, K. (2015). Development of a combined mean value-zero dimensional model and application for a large marine four-stroke Diesel engine simulation. *Applied Energy*, 154, 402-415.
- Basurko, O. C., & Uriondo, Z. (2015). Condition-based maintenance for medium speed diesel engines used in vessels in operation. *Applied Thermal Engineering*, 80, 404-412.
- Benajes, J., Molina, S., Martín, J., & Novella, R. (2009). Effect of advancing the closing angle of the intake valves on diffusion-controlled combustion in a HD diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 29(10), 1947-1954.
- Benajes, J., Molina, S., Martín, J., & Novella, R. (2009). Effect of advancing the closing angle of the intake valves on diffusion-controlled combustion in a HD diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 29(10), 1947-1954.

- Bilousov, I., Bulgakov, M., & Savchuk, V. (2020). *Modern Marine Internal Combustion Engines*. Springer International Publishing.
- Binns, J. M., & Joby, M. J. (1973). Electronic Control of Marine Gas Turbine Engines. *IFAC Proceedings Volumes*, 6(3), 523-533.
- Breitbart, H. (2002). Fuel injection systems overview. *Delphi Corporation*.
- Canakci, M., Erdil, A., & Arcaklioglu, E. (2006). Performance and exhaust emissions of a biodiesel engine. *Applied energy*, 83(6), 594-605.
- Caterpillar Inc. (2014). Operation and maintenance manual for the 3500B Series II and 3500C marine propulsion engines (Publication No. SEBU7844-11). Peoria, IL: Caterpillar Inc. Retrieved from https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CDUQw7AJahcKEwiw-te-4qCBAxUAAAAAHQAAAAQAw&url=https%3A%2F%2Fs2b4aa72b8b1c7323.jimcontent.com%2Fdownload%2Fversion%2F1630133823%2Fmodule%2F11671963491%2Fname%2FCATERPILLAR%25203516C%2520HD%2520Operation%2520and%2520Maintenance%2520Manual_compressed.pdf&psig=AOvVaw0h5csyzZzCok0BjQYZVgmy&ust=1694460247677966&opi=89978449
- Chandler, K., & Kenneth Proc. (2004). *Norcal Prototype LNG truck fleet: Final results*. National Renewable Energy Laboratory (US).
- Cheenkachorn, K., Poompipatpong, C., & Ho, C. G. (2013). Performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fuelled with diesel and LNG (liquid natural gas). *Energy*, 53, 52-57.
- Chen, G. J., Liu, Z. M., Liu, T. T., Su, S. H., Yuan, G. J., & Cao, Y. J. (2012). Research on emission control of marine diesel engine. In *Advanced Materials Research* (Vol. 430, pp. 1198-1202). Trans Tech Publications Ltd.
- Chiatti, G., Chiavola, O., & Recco, E. (2014). Combustion diagnosis via block vibration signal in common rail diesel engine. *International Journal of Engine Research*, 15(6), 654-663.
- Dec, J. E., & Canaan, R. E. (1998). PLIF imaging of NO formation in a DI diesel engine. *SAE transactions*, 176-204.

- Demir, M. E., & Çitakoğlu, F. (2022). Design and modeling of a multigeneration system driven by waste heat of a marine diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(95), 40513-40530.
- Descieux, D., & Feidt, M. (2007). One zone thermodynamic model simulation of an ignition compression engine. *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9), 1457-1466.
- Dhole, A. E., Yarasu, R. B., Lata, D. B., & Priyam, A. (2014). Effect on performance and emissions of a dual fuel diesel engine using hydrogen and producer gas as secondary fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(15), 8087-8097.
- Dumitrescu, S., Hill, P. G., Li, G., & Ouellette, P. (2000). *Effects of injection changes on efficiency and emissions of a diesel engine fueled by direct injection of natural gas* (No. 2000-01-1805). SAE Technical Paper.
- Egger, K., Lingener, U., & Schoeppe, D., (2004). Die Möglichkeiten der Einspritzung mit einem Piezo-Common-Rail-Einspritzsystem fuer PWK, 22. Internationales Wiener Motorsymposium, Fortschritt-Berichte VDI. *VDI Verlag, Düsseldorf, Reihe, 12*, 279-294.
- El Gohary, M. M., & Abdou, K. M. (2011). Computer based selection and performance analysis of marine diesel engine. *Alexandria Engineering Journal*, 50(1), 1-11.
- Ferrari, A., & Paolicelli, F. (2017). An indirect method for the real-time evaluation of the fuel mass injected in small injections in Common Rail diesel engines. *Fuel*, 191, 322-329.
- Gabdrifikov, F. (2021). Increasing machine-tractor diesel efficiency positional regulation by fuel supply. *International Independent Scientific Journal*, (28), 67-78.
- Gao, M., Tian, J., Cao, L., & Xu, J. (2008, September). Fault diagnosis of oil pump based on high speed and precise genetic algorithm neural network. In *2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems* (pp. 965-970). IEEE.
- Geng, W., Fu, D., & Wu, M. (2021). Fault Diagnosis and CAN Bus/Ethernet Redundancy Design of a Monitoring and Control System. In *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Engineering and Networks* (pp. 1063-1070). Springer, Singapore.

- Gerasidi, V. V., & Lisachenko, A. V. (2021, October). Analysis of fuel consumption of modern electronically controlled high-speed marine engines. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2061, No. 1, p. 012057). IOP Publishing.
- Goldsworthy, L. (2002). Design of ship engines for reduced emissions of oxides of nitrogen. *Australian Maritime College*.
- Goldsworthy, L. (2003a). Reduced kinetics schemes for oxides of nitrogen emissions from a slow-speed marine diesel engine. *Energy & fuels*, 17(2), 450-456.
- Goldsworthy, L. (2003b). Real time model for oxides of nitrogen emissions from a slow speed marine diesel. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2(1), 3-12.
- Goldsworthy, L. (2012). Combustion behaviour of a heavy duty common rail marine Diesel engine fumigated with propane. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 42, 93-106.
- Grimmelius, H. T., Mesbahi, E., & Stapersma, D. (2007). The use of diesel engine simulation models in ship propulsion plant design and operation. In *25th CIMAC Congress*. Newcastle University.
- Gu, Y. K., Zhou, X. Q., Yu, D. P., & Shen, Y. J. (2018). Fault diagnosis method of rolling bearing using principal component analysis and support vector machine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(11), 5079-5088.
- Gualeni, P., Flore, G., Maggioncalda, M., & Marsano, G. (2019). Life cycle performance assessment tool development and application with a focus on maintenance aspects. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8), 280.
- Hashimoto H. (2016). Advanced Marine Engine which Reduces Environmental Load “The Wärtsilä X-series” Featuring a Fusion of Advanced Electronic Control Technologies. *IHI Engineering Review*, Vol. 49, No 1.
- He, Y., Zhou, P., Xie, L., & Zhang, J. (2019). Design and experimental development of a new electronically controlled cylinder lubrication system for the large two-stroke crosshead diesel engines. *International Journal of Engine Research*, 20(8-9), 986-1000.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education.

- Hountalas, D. T. (2000). Prediction of marine diesel engine performance under fault conditions. *Applied thermal engineering*, 20(18), 1753-1783.
- Hu, C., Li, A., & Zhao, X. (2011). Multivariate statistical analysis strategy for multiple misfire detection in internal combustion engines. *Mechanical systems and signal processing*, 25(2), 694-703.
- Hu, Y., Yang, J., Hu, N., Hu, L., Qian, Z., & Yu, Y. (2018). Research and development of electronic speed control strategies for medium-speed marine diesel engines. *International Journal of Engine Research*, 19(5), 584-596.
- IMO. (2008). Revised MARPOL Annex VI: Regulations for the prevention of air pollution from ships and NOx technical code.
- Jia, F., Lei, Y., Lin, J., Zhou, X., & Lu, N. (2016). Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data. *Mechanical systems and signal processing*, 72, 303-315.
- Jurić, Z., Kutija, R., Vidović, T., & Radica, G. (2022). Parameter Variation Study of Two-Stroke Low-Speed Diesel Engine Using Multi-Zone Combustion Model. *Energies*, 15(16), 5865.
- Kalogirou, S. A. (2000). Applications of artificial neural-networks for energy systems. *Applied energy*, 67(1-2), 17-35.
- Kambrath, J. K., Wang, Y., Yoon, Y. J., Alexander, A. A., Liu, X., Wilson, G., ... & Gupta, A. K. (2017). Modeling and control of marine diesel generator system with active protection. *IEEE Transactions on transportation electrification*, 4(1), 249-271.
- Kluczyk, M., & Grządziela, A. (2019). Marine diesel engine common rail injectors monitoring with vibration parameters. *Diagnostyka*, 20.
- Kluczyk, M., & Grządziela, A. (2019). Marine diesel engine common rail injectors monitoring with vibration parameters. *Diagnostyka*, 20.
- Kowalski, J., & Tarelko, W. (2009). NOx emission from a two-stroke ship engine. Part 1: Modeling aspect. *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), 2153-2159.
- Kowalski, J., & Tarelko, W. (2009a). NOx emission from a two-stroke ship engine. Part 1: Modeling aspect. *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), 2153-2159.

- Kowalski, J., & Tarelko, W. (2009b). NO_x emission from a two-stroke ship engine: Part 2: Laboratory test. *Applied thermal engineering*, 29(11-12), 2160-2165.
- Kulkarni, A. M., Shaver, G. M., Popuri, S. S., Frazier, T. R., & Stanton, D. W. (2010). Computationally efficient whole-engine model of a Cummins 2007 turbocharged diesel engine. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 132(2).
- Kulkarni, A. M., Shaver, G. M., Popuri, S. S., Frazier, T. R., & Stanton, D. W. (2010). Computationally efficient whole-engine model of a Cummins 2007 turbocharged diesel engine. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 132(2).
- Lamaris, V. T., Hountalas, D. T., Zannis, T. C., & Glaros, S. E. (2009, January). Development and validation of a multi-zone combustion model for predicting performance characteristics and NO_x emissions in large scale two-stroke diesel engines. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 43765, pp. 317-327).
- Lamaris, V. T., Hountalas, D. T., Zannis, T. C., & Glaros, S. E. (2009, January). Development and validation of a multi-zone combustion model for predicting performance characteristics and NO_x emissions in large scale two-stroke diesel engines. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 43765, pp. 317-327).
- Lemmon, E. W., Jacobsen, R. T., Penoncello, S. G., & Friend, D. G. (2000). Thermodynamic properties of air and mixtures of nitrogen, argon, and oxygen from 60 to 2000 K at pressures to 2000 MPa. *Journal of physical and chemical reference data*, 29(3), 331-385.
- Li, Y., Wang, Y., Zi, Y., & Zhang, M. (2015). An enhanced data visualization method for diesel engine malfunction classification using multi-sensor signals. *Sensors*, 15(10), 26675-26693.
- Lounici, M. S., Boussadi, A., Loubar, K., & Tazerout, M. (2014). Experimental investigation on NG dual fuel engine improvement by hydrogen enrichment. *International journal of hydrogen energy*, 39(36), 21297-21306.

- Ma, C., Yao, C., Song, E. Z., & Ding, S. L. (2022). Prediction and optimization of dual-fuel marine engine emissions and performance using combined ANN with PSO algorithms. *International Journal of Engine Research*, 23(4), 560-576.
- MAN Energy Solutions. (2019). MAN L23/30H Mk3 GenSet [PDF file]. Retrieved from <https://www.man-es.com/marine/products/four-stroke-engines/L23-30Hmk3/2021/06/10/webinar/uptime-anytime-the-new-l23-30h-mk.-3-and-l21-31-mk.-2-gensets>
- MARPOL Revised Annex VI. 2008. *Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships and NO_x Technical Code 2008*, International Maritime Organization, London, UK, 2009.
- Matulić, N., Radica, G., & Nižetić, S. (2020). Engine model for onboard marine engine failure simulation. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141(1), 119-130.
- Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Shumylo, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Voloshyn, A., & Cheredarchuk, N. (2022). Study of the risk assessment quality dependence on the ships accidents analysis. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, 25, 136-146.
- Mohebbi, M., Aziz, A. A., Hamidi, A., Hajjalimohammadi, A., & Hosseini, V. (2017). Modeling of pressure line behavior of a common rail diesel engine due to injection and fuel variation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(3), 661-669.
- Ni, P., Wang, X., & Li, H. (2020). A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel*, 279, 118477.
- Nikzadfar, K., & Shamekhi, A. H. (2014). Investigating the relative contribution of operational parameters on performance and emissions of a common-rail diesel engine using neural network. *Fuel*, 125, 116-128.
- Oefelein, J., Dahms, R., & Lacaze, G. (2012). Detailed modeling and simulation of high-pressure fuel injection processes in diesel engines. *SAE International Journal of Engines*, 5(3), 1410-1419.
- Okazak, K., Takasaki, K., Tajima, H., Shuto, S., Kawauchi, S., & Nagamura, N. (2010). Effects of electronically controlled fuel injection system (EFI) for marine diesel engines. *Marine Engineering*, 45(Special), 974-979.

- Papagiannakis, R. G., Hountalas, D. T., & Rakopoulos, C. D. (2007). Theoretical study of the effects of pilot fuel quantity and its injection timing on the performance and emissions of a dual fuel diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 48(11), 2951-2961.
- Park, S. H., & Lee, C. S. (2014). Applicability of dimethyl ether (DME) in a compression ignition engine as an alternative fuel. *Energy Conversion and Management*, 86, 848-863.
- Parlak, A., Ayhan, V., Üst, Y., Şahin, B., Cesur, I., Boru, B., & Kökkülünk, G. (2012). New method to reduce NO_x emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system. *Journal of the Energy Institute*, 85(3), 135-139.
- Payri, F., Olmeda, P., Martín, J., & García, A. (2011). A complete 0D thermodynamic predictive model for direct injection diesel engines. *Applied Energy*, 88(12), 4632-4641.
- Payri, F., Olmeda, P., Martín, J., & García, A. (2011). A complete 0D thermodynamic predictive model for direct injection diesel engines. *Applied Energy*, 88(12), 4632-4641.
- Peiyu, L., Dapeng, T., & Duanyang, L. (2006). Hand-held state monitoring and fault diagnosis system for oil field pouring and pick equipment. *Elect Meas Instrum* 43(483).
- Planakis, N., Papalambrou, G., & Kyrtatos, N. (2022). Ship energy management system development and experimental evaluation utilizing marine loading cycles based on machine learning techniques. *Applied Energy*, 307, 118085.
- Porteiro, J., Collazo, J., Patiño, D., & Míguez, J. L. (2011). Diesel engine condition monitoring using a multi-net neural network system with nonintrusive sensors. *Applied Thermal Engineering*, 31(17-18), 4097-4105.
- Rakopoulos, C. D., Antonopoulos, K. A., & Rakopoulos, D. C. (2007). Development and application of multi-zone model for combustion and pollutants formation in direct injection diesel engine running with vegetable oil or its bio-diesel. *Energy conversion and management*, 48(7), 1881-1901.

- Rausen, D. J., Stefanopoulou, A. G., Kang, J. M., Eng, J. A., & Kuo, T. W. (2005). A mean-value model for control of homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines.
- Rolls-Royce Group. (2019). MTU Series 4000: Oil & Gas GenDrive engines for the Oil & Gas Industry [PDF file]. Retrieved from [https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/commercial-marine/offshore-exploration---production/engines-and-gensets-for-power-generation/mtu-series-4000/3232511_OG_spec_4000-03.pdf/ jcr_content/renditions/original/3232511_OG_spec_4000-03.pdf](https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/commercial-marine/offshore-exploration---production/engines-and-gensets-for-power-generation/mtu-series-4000/3232511_OG_spec_4000-03.pdf/jcr_content/renditions/original/3232511_OG_spec_4000-03.pdf)
- Rubio, J. A. P., Vera-García, F., Grau, J. H., Cámara, J. M., & Hernandez, D. A. (2018). Marine diesel engine failure simulator based on thermodynamic model. *Applied Thermal Engineering*, 144, 982-995.
- Sarvi, A., & Zevenhoven, R. (2010). Large-scale diesel engine emission control parameters. *Energy*, 35(2), 1139-1145.
- Scappin, F., Stefansson, S. H., Haglind, F., Andreasen, A., & Larsen, U. (2012). Validation of a zero-dimensional model for prediction of NO_x and engine performance for electronically controlled marine two-stroke diesel engines. *Applied Thermal Engineering*, 37, 344-352.
- Schmid, H., & Weisser, G. (2005, April). Marine technologies for reduced emissions. In *Conference on Green Ship Technology, Amsterdam* (Vol. 12).
- Shahbakhti, M., & Koch, C. R. (2010). Physics based control oriented model for HCCI combustion timing. *J. Dyn. Sys., Meas., Control*. 132(2).
- Sim, H. S., Lee, M. K., & Lee, K. Y. (2015). A Development Study on an Engine Control Module of an Electronic Marine Diesel Engine. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 14(5), 134-140.
- Sorenson, S. C. (2008). *Engine principles and vehicles*. Technical University of Denmark. Department of Mechanical Engineering.
- Su, H. F., Luo, Y. Z., Qu, L. N., & Feng, G. S. (2019). 3D CFD Simulation of Water Hammer in High Pressure Common Rail System of Diesel Engine. *CSCBD*, 2019.

- Tarabet, L., Loubar, K., Lounici, M. S., Khiari, K., Belmrabet, T., & Tazerout, M. (2014). Experimental investigation of DI diesel engine operating with eucalyptus biodiesel/natural gas under dual fuel mode. *Fuel*, *133*, 129-138.
- Tauzia, X., Maiboom, A., Chesse, P., & Thouvenel, N. (2006). A new phenomenological heat release model for thermodynamical simulation of modern turbocharged heavy duty Diesel engines. *Applied Thermal Engineering*, *26*(16), 1851-1857.
- Thompson, G. J., Atkinson, C. M., Clark, N. N., Long, T. W., & Hanzevack, E. (2000). Neural network modelling of the emissions and performance of a heavy-duty diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, *214*(2), 111-126.
- Valkeejärvi, K. (2006). The ship's electrical network, engine control and automation. *Koninklijke Gallois Genootschap Magazine*.
- Varbanets, R., & Karianskiy, S. (2012). Analyse of marine diesel engine performance. *Journal of Polish CIMAC*, *7*(1), 269-276.
- Verbeek, R. P., Kadijk, G., Van Mensch, P., Wulffers, C., Van Den Beemt, B., Fraga, F., & Aalbers, A. D. A. (2011). *Environmental and Economic aspects of using LNG as a fuel for shipping in The Netherlands* (pp. 1-48). Delft: TNO.
- Wang, J., Mao, X., Zhu, K., Song, J., & Zhuo, B. (2009). An intelligent diagnostic tool for electronically controlled diesel engine. *Mechatronics*, *19*(6), 859-867.
- Wang, J., Mao, X., Zhu, K., Song, J., & Zhuo, B. (2009). An intelligent diagnostic tool for electronically controlled diesel engine. *Mechatronics*, *19*(6), 859-867.
- Wang, M., Zhang, J., Zhang, S., & Ma, Q. (2010, August). Predication emission of an intelligent marine diesel engine based on modeling of bp neural networks. In *2010 Sixth International Conference on Natural Computation* (Vol. 3, pp. 1290-1296). IEEE.
- Wang, R., Chen, H., & Guan, C. (2021). A Bayesian inference-based approach for performance prognostics towards uncertainty quantification and its applications on the marine diesel engine. *ISA transactions*, *118*, 159-173.
- Wang, X., Cai, Y., Li, A., Zhang, W., Yue, Y., & Ming, A. (2021). Intelligent fault diagnosis of diesel engine via adaptive VMD-Rihaczek distribution and graph regularized bi-directional NMF. *Measurement*, *172*, 108823.

- Wang, X., Zhang, H., Yao, B., Lei, Y., Sun, X., Wang, D., & Ge, Y. (2012). Experimental study on factors affecting lean combustion limit of SI engine fueled with compressed natural gas and hydrogen blends. *Energy*, 38(1), 58-65.
- Wang, Y. S., Liu, N. N., Guo, H., & Wang, X. L. (2020). An engine-fault-diagnosis system based on sound intensity analysis and wavelet packet pre-processing neural network. *Engineering applications of artificial intelligence*, 94, 103765.
- Wang, Y., Wang, Q., Qiao, H., & Su, J. (2020). Speed control of electronically controlled diesel engine based on automatic disturbance rejection control. *Journal of Coastal Research*, 103(SI), 346-350.
- Wärtsilä. (2021). Wärtsilä 31 [PDF file]. Retrieved from https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/wartsila-31-brochure.pdf?sfvrsn=22f3f345_24
- Wei, M., Qiu, B., Tan, X., Yang, Y., & Liu, X. (2018, June). Condition Monitoring for the Marine Diesel Engine Economic Performance Analysis with Degradation Contribution. In *2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)* (pp. 1-6). IEEE.
- Wei, Y., Fan, L., Wu, Y., Gu, Y., Xu, J., & Fei, H. (2022). Research on transmission and coupling characteristics of multi-frequency pressure fluctuation of high pressure common rail fuel system. *Fuel*, 312, 122632.
- Wiens, J., Addy, M., Leonard, J. H., Bogdanoff, M. A., & Frailey, M. R. (2002). LNG Truck Demonstration. *SAE Transactions*, 1429-1444.
- Wu, H., Li, Z., & Wu, J. (2006). Intelligent fault diagnosis for diesel engine exhaust valve using support machine. *Transactions of CSICE*, 24(5), 465-469.
- Xi, W., Li, Z., Tian, Z., & Duan, Z. (2018). A feature extraction and visualization method for fault detection of marine diesel engines. *Measurement*, 116, 429-437.
- Xu, C., & Xu, H. (2020). Self-tuning Method of Electronic Governor Parameters for Marine Medium-speed Diesel Engine. *Journal of Coastal Research*, 103(SI), 378-381.
- Xu, X., Zhao, Z., Xu, X., Yang, J., Chang, L., Yan, X., & Wang, G. (2020). Machine learning-based wear fault diagnosis for marine diesel engine by fusing multiple data-driven models. *Knowledge-Based Systems*, 190, 105324.

- Yang, K., & Fan, H. (2018, February). Research on Fault Diagnosis Method of Diesel Engine Thermal Power Conversion Process. In *2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017)* (pp. 1445-1450). Atlantis Press.
- Yanyou, C. (2012). Research on fault diagnosis of marine diesel engine based on nuclear learning theory [D]. *Harbin Engineering University*.
- Yongzhi, C., Xuekuan, Y., & Yuhai, H. (2017, December). Review of the Present Situation and Development of Marine Diesel Engine. In *2017 International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII)* (pp. 351-354). IEEE.
- Zhang, X. (2005). Realization of intelligent diagnosis of locomotive engine. *Jisuanji Celiang yu Kongzhi/Computer Measurement & Control(China)*, 13(5), 428-430.
- Zhang, X., & Sun, J. B. (2009, May). Fault diagnosis of marine diesel engine by means of immune-rough sets and RBF neural network. In *2009 Second International Conference on Information and Computing Science* (Vol. 4, pp. 174-177). IEEE.
- Zhao, H., Zheng, J., Xu, J., & Deng, W. (2019). Fault diagnosis method based on principal component analysis and broad learning system. *IEEE Access*, 7, 99263-99272.
- Zhou, J., Ouyang, G., & Wang, M. (2010, May). Hardware-in-the-Loop testing of electronically-controlled common-rail systems for marine diesel engine. In *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation* (Vol. 2, pp. 421-424). IEEE.
- Zhou, P., & Liu, D. (2011, May). Research on marine diesel's fault prognostic and health management based on oil monitoring. In *2011 Prognostics and System Health Management Confernece* (pp. 1-4). IEEE.