



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΝΤΗΖΕΛ
ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**



**Ανδρουλάκη-Καλφόγλου
Ελεάνα**

Επιβλέπων

Ε. Λόης, Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διλωματική εργασία με τίτλο «Αξιολόγηση προσθέτων πετρελαίου ντήζελ σε κινητήρα» εκπονήθηκε από τον Νοέμβριο του 2016 μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2017 στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ε. Λόη για την ανάθεση της εργασίας, καθώς και για τις γνώσεις που αποκόμισα από αυτόν. Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την Χημικό Μηχανικό και Υποψήφιο Διδάκτορα Ατζέμη Μαίρη για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε και τον χρόνο που μου αφιέρωσε καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης εργασίας. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου για την άψογη συνεργασία.

Τέλος, ευχαριστώ ιδιαιτέρως την Ιωάννα Καναβέλη για την πολύτιμη βοήθεια της, τον Σπύρο Κοντολάτη και τη μητέρα μου για την αμέριστη συμπαράσταση, υποστήριξη και κατανόηση τους, καθώς και συνολικά τους φίλους και την οικογένεια μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	8
ABSTRACT	10
ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	12
1 ΝΤΗΖΕΛ.....	14
1.1 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΤΗΖΕΛ.....	14
1.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΤΗΖΕΛ ΚΙΝΗΣΗΣ	15
1.3 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ.....	18
1.4 ΙΞΩΔΕΣ.....	19
1.5 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΘΕΙΟ	20
1.6 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΤΕΦΡΑ.....	20
1.7 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΑΡΩΜΑΤΙΚΑ	20
1.8 ΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑ.....	21
1.9 ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΜΑ	21
1.10 ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΤΗΤΑ	22
1.11 ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ.....	22
1.12 ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ.....	23
1.13 ΡΟΗ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ (ΣΗΜΕΙΟ ΘΟΛΩΣΗΣ/ ΣΗΜΕΙΟ ΡΟΗΣ/CFPP).....	23
1.14 ΑΠΟΣΤΑΣΗ	24
1.15 ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ.....	25
1.16 ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ.....	26
1.17 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ.....	27
2 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΝΤΗΖΕΛ.....	28
2.1 ΤΟ ΚΥΚΛΟ DIESEL	28

2.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ.....	29
2.3	ΤΕΤΡΑΧΡΟΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ.....	31
2.4	ΔΙΧΡΟΝΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	33
2.5	ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ	34
2.6	ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ.....	35
3	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΝΤΗΖΕΛ.....	37
3.1	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO ₂	38
3.2	ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO.....	38
3.3	ΑΚΑΥΣΤΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ HC.....	38
3.4	ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ-PM.....	39
3.5	ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ SO _x	40
3.6	ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ NO _x	40
3.7	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΥΠΟΓΩΝΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ.....	42
3.7.1	ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ, DOC.....	43
3.7.2	ΠΑΓΙΔΑ ΑΙΘΑΛΗΣ, DPF	43
3.7.3	ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΟΣ ΑΝΑΓΩΓΙΚΟΣ ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ, SCR	44
3.7.4	ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ, EGR.....	45
3.7.5	ΠΑΓΙΔΑ ΦΤΩΧΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ NO _x , LNT	45
3.8	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ.....	46
4	ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΕΤΑΝΙΟΥ.....	48
4.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ.....	48
4.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ.....	50

4.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ- ΑΙΘΑΛΗΣ.....	51
4.4	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΚΑΥΣΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ.....	52
4.5	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	53
5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	54
5.1	ΔΕΙΓΜΑΤΑ.....	54
5.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	56
5.2.1	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΙΞΩΔΕΣ	56
5.2.2	ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ	58
5.2.3	ΑΠΟΣΤΑΣΗ	59
5.2.4	ΣΗΜΕΙΟ ΑΠΟΦΡΑΞΗΣ ΨΥΧΡΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ/POUR/CLOUD.....	60
5.2.5	ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ CCI	61
5.2.6	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ DCN.....	62
5.2.7	FTIR ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ	63
5.2.8	ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ.....	64
5.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	65
5.3.1	ΔΙΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΝΤΗΖΕΛ.....	65
5.3.2	ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	66
5.3.3	ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....	68
6	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ.....	70
6.1	ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΒΑΣΗΣ	70
6.2	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ.....	72
6.3	ΙΞΩΔΕΣ.....	73
6.4	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ	75

6.5	ΑΠΟΣΤΑΣΗ.....	78
7	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ.....	83
7.1	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	83
7.2	ΛΟΓΟΣ ΑΕΡΑ/ΚΑΥΣΙΜΟΥ	85
7.3	ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (BSFC)	91
7.4	ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂	96
7.5	ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO	101
7.6	ΕΚΠΟΜΠΕΣ NO _x	107
7.7	ΕΚΠΟΜΠΕΣ HC.....	112
7.8	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΜ	115
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	120
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	133

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για πολλές δεκαετίες η χρήση του κινητήρα ντήζελ περιοριζόταν κυρίως σε οχήματα μεγάλου κυβισμού και γενικώς στις μεταφορές. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια οι κινητήρες ντήζελ κερδίζουν ολοένα και περισσότερο έδαφος και στα επιβατηγά οχήματα λόγω των πλεονεκτημάτων τους έναντι των βενζινοκινητήρων, κυρίως ως προς την κατανάλωση του καυσίμου αλλά και τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα και άκαυστων υδρογονανθράκων. Παρόλαυτα, σημαντικό πρόβλημα προς επίλυση για τον κινητήρα ντήζελ αποτελούν οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου και σωματιδίων που παραμένουν σε υψηλά επίπεδα, αλλά και γενικά η περαιτέρω μείωση των συνολικών εκπομπών, γεγονός που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον διάφορων ερευνητών παγκοσμίως.

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση προσθέτων στο πετρέλαιο ντήζελ, τα οποία υποβοηθούν την καύση σε ντηζελοκινητήρες, τόσο στη μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου, όσο και στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας παρασκευάστηκαν και μελετήθηκαν τρεις σειρές καυσίμων. Η καθεμία αποτελούνταν από ένα καύσιμο βάσης, πετρέλαιο ντήζελ, στο οποίο προστέθηκαν, σε συγκεκριμένες αναλογίες, τρία διαφορετικά βελτιωτικά του αριθμού κετανίου και ένα βιοκτόνο.

Αρχικά, μελετήθηκαν οι φυσικοχημικές ιδιότητες των τριών καυσίμων βάσης και η επίδραση των προσθέτων σε αυτές. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν η πυκνότητα, το ιξώδες, η οξειδωτική σταθερότητα, το σημείο απόφραξης ψυχρού φίλτρου, ο αριθμός κετανίου, η καμπύλη απόσταξης, και ενδεικτικά για ορισμένα καύσιμα ο δείκτης κετανίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα για τις φυσικοχημικές ιδιότητες επιβεβαίωσαν το γεγονός ότι τα βελτιωτικά του αριθμού κετανίου δεν επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στην πυκνότητα, στο σημείο απόφραξης ψυχρού φίλτρου, στην οξειδωτική σταθερότητα, στην καμπύλη απόσταξης και φυσικά στο δείκτη κετανίου. Αντίθετα, με την χρήση προσθέτων διαπιστώθηκε άνοδος του αριθμού κετανίου και ορισμένες

αυξομειώσης του ιξώδους των καυσίμων ανάλογα με την εκάστοτε αρχική τιμή του.

Τόσο τα τρία καύσιμα βάσης, όσο και τα καύσιμα που περιείχαν βελτιωτικά, δοκιμάστηκαν σε δίκυλινδρο κινητήρα και μετρήθηκε η κατανάλωση καυσίμου, η θερμοκρασία καυσαερίων και οι εκπομπές σε CO₂, CO, NO_x, HC και PM. Επίσης, υπολογίστηκαν η ειδική κατανάλωση καυσίμου και ο λόγος αέρα/καυσίμου. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις επαναλήψεις, στην άφορτη λειτουργία του κινητήρα και σε 20%, 45%, 65% και 80% του πλήρους φορτίου.

Από τις πειραματικές μετρήσεις φάνηκε ότι οι θερμοκρασίες των καυσαερίων των καυσίμων δεν μεταβάλλονται από την προσθήκη βελτιωτικών. Ο λόγος αέρα καυσίμου αυξάνεται, ενώ η ειδική κατανάλωση ακολουθεί την αντίστροφη πορεία και μειώνεται. Τάσεις μείωσης από την προσθήκη βελτιωτικών διακρίνονται και στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που συνάδει με τη συμπεριφορά της ειδικής κατανάλωσης των καυσίμων.

Σημαντική μείωση, με την χρήση βελτιωτικών, εμφανίζεται στις εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα, ενώ η αύξηση του αριθμού κετανίου με την αύξηση της περιεκτικότητας των προσθέτων μειώνει περαιτέρω το ποσοστό των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα. Ταυτόχρονα, συνολική τάση μείωσης με την αύξηση του αριθμού κετανίου παρατηρείται και στις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου.

Παράλληλα, το ποσοστό των άκαυστων υδρογονανθράκων είναι πολύ χαμηλό έως και αμελητέο και δεν παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένη τάση με την προσθήκη των βελτιωτικών. Τέλος, όσον αφορά στις εκπομπές των σωματιδίων, διακρίνεται μία τάση μείωσης τους με την χρήση προσθέτων, αλλά δεν ακολουθούν συγκεκριμένη συμπεριφορά για τις διάφορες περιεκτικότητες των βελτιωτικών.

ABSTRACT

In the past, diesel engine usage was limited mainly to high-cubic-capacity vehicles and transportations in general. However, during the last few years, diesel engines are gaining increasingly more ground to passenger vehicles as well. That turn of people to diesel engines can be explained by the significant advantages they have against petrol engines as far as fuel consumption, CO and unburnt hydrocarbon emissions are concerned. Nevertheless, nitrogen oxide (NO_x) and particle emissions still constitute a great issue to be addressed. The above, and the further reduction of emissions in general, are areas that have attracted the interest of many researchers throughout the world.

This thesis aims at evaluating the effect of additives, which help combustion inside diesel engines, on the reduction of fuel consumption as well as the restriction of emitted pollutants. During this thesis, three fuel series were produced and examined. Each one of them consisted of a diesel base fuel, in which three different cetane improvers and a biocidal product were added at certain ratios.

In the beginning, the physicochemical properties of the three base fuels were measured, as was the additives' effect on them. Specifically, the measured properties were the density, viscosity, cold filter plugging point, oxidation stability, cetane number, distillation curve and, for some fuels, the cetane index. The examined results confirmed the fact that cetane number improvers do not significantly affect the density, cold filter plugging point, oxidation stability, distillation curve and, as was expected, the cetane index. On the contrary, additive usage resulted in an increase of cetane number, and in some fluctuation of the fuel viscosity, depending on its initial value.

The three base fuels, as well as the fuels containing improvers, were tested on a bicylinder engine and fuel consumption, exhaust gas temperature, and CO₂, CO, NO_x, HC and PM emissions were measured. In addition to that, BSFC and air to

fuel ratio were calculated. Measurements were taken four times, at the idle engine load, as well as the 20%, 45%, 65% and 80% of the full engine load.

Experimental measurements showed that exhaust gas temperature was not affected by improver addition. Air to fuel ratio was increased while BSFC was decreased. Improver's addition also showed a reduction tendency to CO₂ emissions, a fact that is in line with the fuels' BSFC behaviour.

A significant reduction in CO emissions, when using improvers, was observed, while increasing cetane number by increasing additive concentration led to a further reduction of the CO emission percentage. Simultaneously, a reduction tendency was also observed as far as NO_x were concerned, when cetane number was increased.

Furthermore, the unburnt hydrocarbon percentage was very low, or in some cases insignificant and there was no specific tendency when improvers were added. Last but not least, as far as particle emissions were concerned, there existed a reduction tendency when using additives, however, there was no specific behaviour for the different improver concentrations.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

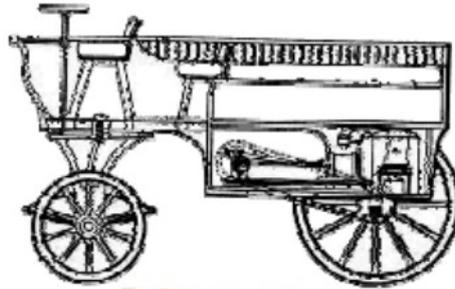
Η Δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση στα τέλη του 19^{ου} αιώνα με την αντικατάσταση των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (υδατόπτωση, αιολική ενέργεια κ.λ.π.) από νέες, όπως γαιάνθρακας, πετρέλαιο, άλλαξε τη μορφή του κόσμου τον 20^ο αιώνα σε όλες τις εκφάνσεις της ζωής των ανθρώπων των τότε κοινωνιών. Εφευρέσεις και τεχνολογικά επιτεύγματα, που κατά κύριο λόγο ξεκίνησαν στην Αγγλία και στη συνέχεια επεκτάθηκαν σε διάφορες χώρες της Ευρώπης και στις ΗΠΑ, είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση των ρυθμών παραγωγής και ανάπτυξης και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου.

Ιδιαίτερο τεχνολογικό επίτευγμα που έμελλε να ανατρέψει τα μέχρι τότε δεδομένα στις μεταφορές και στη βιομηχανία ήταν η εφεύρεση της πρώτης μηχανής εσωτερικής καύσης από τον Ζαν Ετιέν Λενουάρ το 1860. Η εφεύρεση του πρώτου κινητήρα εσωτερικής καύσης αποτέλεσε ένα επαναστατικό βήμα, καθώς ήταν η πρώτη μηχανή η οποία μετέτρεπε την αποθηκευμένη στο καύσιμο χημική ενέργεια άμεσα σε κινητική, εν αντιθέσει με τις ως τότε χρησιμοποιούμενες ατμομηχανές. Η εξέλιξή του πραγματοποιήθηκε σε τρεις φάσεις περνώντας από τον Λενουάρ στον πρώτο βενζινοκινητήρα του Νικολάους Όττο και τέλος στην εφεύρεση του πρώτου κινητήρα ανάφλεξης με συμπίεση από τον Ρούντολφ Ντήζελ.

Τη δεκαετία του 1890, το εγχείρημα του Ντήζελ δεν ήταν εφικτό να υλοποιηθεί λόγω των υψηλών πιέσεων που αναπτύσσονται στον κινητήρα. Αποτέλεσμα αυτού ήταν, το 1893, να σημειωθεί έκρηξη ενός από τους πρώτους ντηζελοκινητήρες κατά την οποία κινδύνευσε σοβαρά και ο ίδιος. Οι μελέτες και οι προσπάθειες για τη βελτίωση του συγκεκριμένου κινητήρα συνεχίστηκαν και το 1908 κατασκευάστηκαν ο πρώτος μικρού μεγέθους κινητήρας για ελαφριά οχήματα, το πρώτο όχημα βαρέων μεταφορών και η πρώτη σιδηροδρομική μηχανή έλξης με κινητήρα ντήζελ.

Κατά τη φάση ανάπτυξης του κινητήρα, ο Ντήζελ είχε δοκιμάσει μια πληθώρα υγρών καυσίμων, τα οποία όμως δημιουργούσαν προβλήματα στις

αντλίες της έκχυσης του καυσίμου. Εν τέλει, κατέληξε σε ένα κλάσμα αποστάξεως ορυκτού πετρελαίου, το οποίο ονομάστηκε επίσης ντήζελ [1,2].



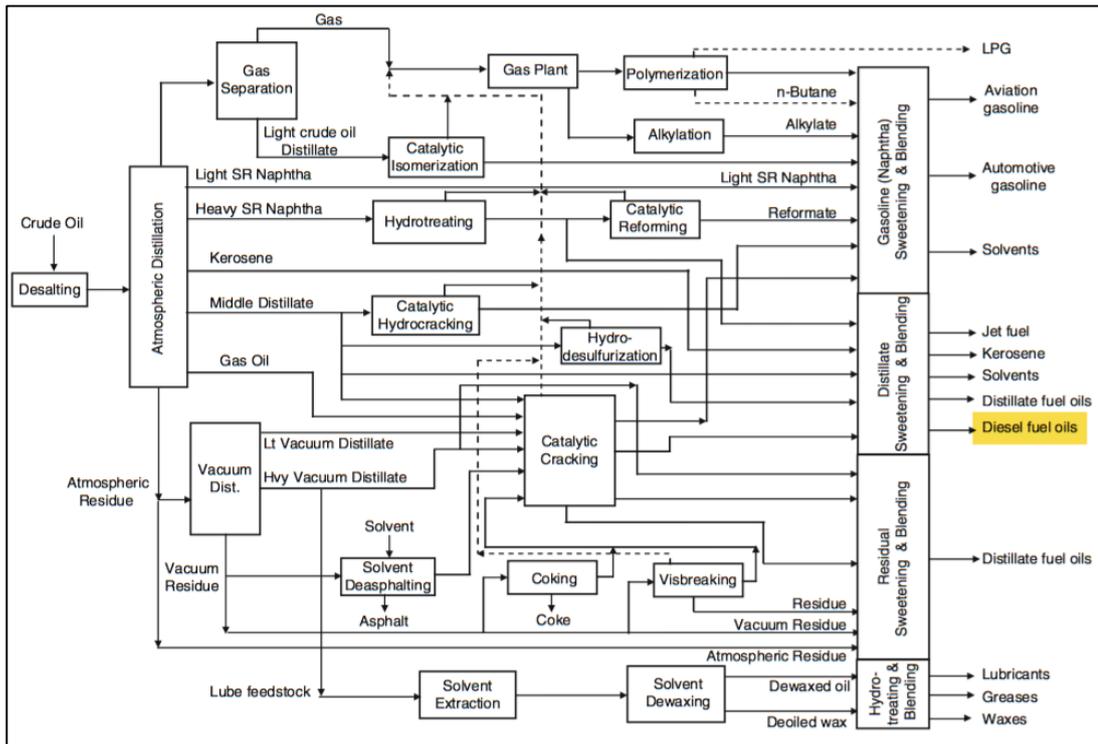
To όχημα του Lenoir

1 ΝΤΗΖΕΛ

Το πετρέλαιο ντήζελ είναι ένα πετρελαϊκό προϊόν, το οποίο κατατάσσεται στην κατηγορία των μέσων αποσταγμάτων του αργού πετρελαίου μαζί με την κηροζίνη και τα καύσιμα αεροπορίας (jet fuel). Αποτελείται από 8 έως 24 άτομα άνθρακα, ενώ έχει υψηλότερο σημείο βρασμού από την βενζίνη και χαμηλότερο από το gasoil. Το πετρέλαιο ντήζελ είναι το καύσιμο που χρησιμοποιείται στους κινητήρες εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη λόγω συμπίεσης. Πήρε το όνομά του από τον Γερμανό Rudolf Diesel, ο οποίος στα τέλη του 19^{ου} αιώνα κατοχύρωσε, τον κινητήρα ντήζελ [3,4].

1.1 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΤΗΖΕΛ

Τα καύσιμα ντήζελ παρασκευάζονται με την ανάμειξη διαφόρων ρευμάτων gasoil του διυλιστηρίου με σημεία βρασμού, που κυμαίνονται από 150 έως 380 °C, τα οποία κατά κανόνα είναι προϊόντα της ατμοσφαιρικής απόσταξης του αργού πετρελαίου. Η ατμοσφαιρική απόσταξη είναι μία φυσική διεργασία κατά την οποία το αργό πετρέλαιο διαχωρίζεται σε κλάσματα με συγκεκριμένες περιοχές σημείων βρασμού. Τα κλάσματα διαχωρισμού αποτελούνται από τα προϊόντα κορυφής, συνήθως αέρια και νάφθα, τα μέσα αποστάγματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του ντήζελ και το υπόλειμμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ωστόσο, χρησιμοποιούνται και ρεύματα gasoil προερχόμενα από άλλες διεργασίες, όπως απόσταξη υπό κενό, θερμική πυρόλυση, καταλυτική πυρόλυση και υδρογονοπυρόλυση, με σκοπό την αύξηση της παραγωγής του ντήζελ. Στο σχήμα 1-1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η διεργασία δύλισης πετρελαίου [3-6].



Σχήμα 1-1: Σύγχρονη Διεργασία Διύλισης Πετρελαίου

1.2 ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΤΗΖΕΛ ΚΙΝΗΣΗΣ

Τα καύσιμα ντήζελ είναι μίγματα υδρογονανθράκων C₁₀-C₂₀, τα οποία αποτελούνται από παραφινικούς, ναφθενικούς, αρωματικούς και σε μικρές συγκεντρώσεις ολεφινικούς υδρογονάνθρακες, ενώ περιέχονται, επίσης, ενώσεις θείου και αζώτου. Ανάλογα με τη σύσταση του εκάστοτε ντήζελ στις διάφορες κατηγορίες υδρογονανθράκων, το μήκος της υδρογονανθρακικής αλυσίδας και την περιεκτικότητα σε ενώσεις ετεροατόμων, τροποποιούνται και τα χαρακτηριστικά του. Το ντήζελ κίνησης, που προορίζεται για χρήση σε κινητήρα, οφείλει να πληρεί συγκεκριμένες προδιαγραφές, με βάση τα Ευρωπαϊκά πρότυπα που ορίζονται από το EN 590:2013, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1-1 [3,7].

Πίνακας 1-1: Προδιαγραφές κατά EN 590:2013

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΟΡΙΑ		ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	
		MIN	MAX	ISO/EN	ASTM/IP
Αριθμός Κετανίου	-	51,0	-	EN ISO 5165 EN 15195 EN 16144	D-613
Δείκτης Κετανίου	-	46,0	-	EN ISO 4264	D-4737
Πυκνότητα, 15°C	kg/m ³	820,0	845,0	EN ISO 3675 EN ISO 12185	D-1298 D-4052
Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες	% m/m	-	8,0	EN 12916	IP- 391/95
Περιεκτικότητα σε Θείο	mg/kg	-	10,0	ENISO 20846 ENISO 20884 ENISO 13032	D-4294

Σημείο Ανάφλεξης	°C	55,0	-	EN ISO 2719	D-93
Ανθρακούχο Υπόλειμμα (στο υπόλειμμα 10% απόσταξης)	% m/m	-	0,30	EN ISO 10370	D-189 D-4530
Περιεκτικότητα σε Τέφρα	% m/m	-	0,010	EN ISO 6245	D-482
Περιεκτικότητα σε Νερό	mg/kg	-	200	EN ISO 12937	D-1744
Περιεκτικότητα σε FAME	% v/v	-	7,0	EN 14078	-
Οξειδωτική Σταθερότητα	g/m ³	-	25	EN ISO 12205	D-2274
(περιεκτικότητα σε FAME>2%)	h	20	-	EN 15751	-
Διάβρωση Χάλκινου Ελάσματος (3h, 50 °C)	-	ΚΛΑΣΗ 1		EN ISO 2160	D-130
Λιπαντική Ικανότητα (διορθωμένη διάμετρος φθοράς σφαιριδίου (wsd 1,4) στους 60°C)	μm	-	460	EN ISO 12156-1	-

Ιξώδες, 40°C	mm ² /s	2,000	4,500	EN ISO 3104	D-445
Απόσταξη, 250°C	% v/v	-	65	EN 3924	D-86
Απόσταξη, 350°C	% v/v	85	-		
Απόσταξη, 95% v/v	°C	-	360		
CFPP 1/10-31/3	°C	-	-5	EN 116	IP-309
CFPP 1/4-30/9		-	+5		

1.3 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Η πυκνότητα ορίζεται ως μάζα ανά μονάδα όγκου και στο ντήζελ σχετίζεται άμεσα, τόσο με το είδος των υδρογονανθράκων (παραφινικοί, ναφθениκοί, αρωματικοί), όσο και με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα που περιέχονται σε αυτό. Συχνά η πυκνότητα εκφράζεται είτε ως ειδικό βάρος, που είναι ο λόγος της πυκνότητας προς αυτής ίσου όγκου νερού στην ίδια θερμοκρασία, είτε ως βάρος API το οποίο είναι ένα αυθαίρετο μέγεθος που ορίστηκε από το American Petroleum Institute και υπολογίζεται από την σχέση 1-1:

$$API = \frac{141,5}{SG_{60F}} - 131,5 \quad [1-1]$$

Η αύξηση του αριθμού των ατόμων άνθρακα στο μόριο οδηγεί στην αύξηση της πυκνότητας, ενώ λόγω της αντίστροφης σχέσης του βάρους API με το ειδικό βάρος, όσο υψηλότερο είναι το βάρος API, τόσο ελαφρύτερο είναι το καύσιμο. Η πυκνότητα, λοιπόν, είναι μια ιδιότητα η οποία μπορεί να δώσει πληροφορίες για την σύσταση και τα χαρακτηριστικά του καυσίμου, ενώ μπορεί να χρησιμεύσει και στον υπολογισμό άλλων ιδιοτήτων [3,4].

1.4 ΙΞΩΔΕΣ

Το ιξώδες ορίζεται ως το μέτρο της αντίστασης στη ροή ενός ρευστού και αποτελεί πολύ σημαντική ιδιότητα ενός καυσίμου, καθώς επηρεάζει άμεσα τη σωστή λειτουργία του κινητήρα. Συγκεκριμένα, μεγάλο ιξώδες, άρα και μεγάλη αντίσταση στη ροή, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία μεγάλων σταγονιδίων, και κατ' επέκταση πίδακα κατά τον ψεκασμό του καυσίμου, έναντι του επιθυμητού νέφους από μικρά σταγονίδια. Έτσι, το καύσιμο δεν αναμειγνύεται επαρκώς με τον απαιτούμενο για την καύση αέρα, με αποτέλεσμα η καύση να είναι ατελής, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική απώλεια ισχύος και φθορά του κινητήρα. Ωστόσο, το χαμηλό ιξώδες δημιουργεί με την σειρά του προβλήματα, καθώς κατά τον ψεκασμό παράγεται εκνέφωμα χωρίς την κατάλληλη διεισδυτικότητα. Παράλληλα, το ιξώδες επηρεάζει σημαντικά την λιπαντική ικανότητα του καυσίμου και κατά συνέπεια τη λειτουργία του κινητήρα, καθώς το καύσιμο αποτελεί το μόνο λιπαντικό μέσο των κινητών εξαρτημάτων του συστήματος ψεκασμού [8,9].

1.5 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΘΕΙΟ

Το θείο είναι μία από τις κυριότερες ενώσεις ετεροατόμων που περιέχονται στο ντήζελ. Είναι ενωμένο με την υδρογονανθρακική αλυσίδα είτε ευθύγραμμα είτε σε δακτύλιους και η περιεκτικότητα του εξαρτάται κυρίως από το είδος του αργού πετρελαίου από το οποίο προέρχεται το ντήζελ. Η μεγάλη σημασία του έγκειται στην παραγωγή οξειδίων του θείου κατά την καύση του ντήζελ και ως εκ τούτου η περιεκτικότητά του δεν πρέπει να ξεπερνά τα 10 ppm στο καύσιμο σύμφωνα με το πρότυπο EN 590:2013 [3,7].

1.6 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΤΕΦΡΑ

Με τον όρο τέφρα χαρακτηρίζονται μικρές ποσότητες άκαυτων υλικών, όπως αιωρούμενα στερεά και οργανομεταλλικές ενώσεις, που βρίσκονται στο ντήζελ συνήθως ως επιμόλυνση και οδηγούν στο σχηματισμό τέφρας κατά την καύση του ντήζελ. Είναι δυνατόν να προξενήσουν προβλήματα αποθέσεων στο σύστημα ψεκασμού, αλλά και φθορά στο έμβολο και τα ελατήρια [3,4].

1.7 ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΑΡΩΜΑΤΙΚΑ

Στην κατηγορία των αρωματικών εντάσσονται όλες οι ενώσεις που στην αλυσίδα τους περιλαμβάνεται τουλάχιστον ένας αρωματικός δακτύλιος. Η περιεκτικότητά τους στο ντήζελ επηρεάζει τόσο τον αριθμό κετανίου, όσο και τις εκπομπές σε ρύπους και το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 590 θέτει ως μέγιστο όριο το

8% m/m. Η ανίχνευση των αρωματικών στο ντήζελ γίνεται χρωματογραφικά [3,4].

1.8 ΕΞΑΝΘΡΑΚΩΜΑ

Το εξανθράκωμα ή ανθρακούχο υπόλειμμα είναι ένας δείκτης της τάσης του καυσίμου να σχηματίσει ανθρακούχες αποθέσεις υπό την επίδραση θερμότητας. Στο ντήζελ υπάρχει μια μικρή ποσότητα βαρέων συστατικών, τα οποία κατά την καύση δεν οξειδώνονται πλήρως αλλά δημιουργούν ένα είδος αιθάλης [3,4].

1.9 ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΜΑ

Στο ντήζελ περιέχονται ποσότητες νερού, καθώς δεν είναι δυνατή η καθολική απομάκρυνση του νερού που εισέρχεται στο ντήζελ κατά τις διεργασίες παραγωγής του, αλλά και κατά την μεταφορά και αποθήκευσή του. Λόγω του νερού ευνοείται η ανάπτυξη μικροοργανισμών, με αποτέλεσμα τη φραγή των φίλτρων καυσίμου. Παράλληλα, ανόργανα σωματίδια μετάλλων και σκουριά από τις δεξαμενές αποθήκευσης, οργανικά από τη συσσωμάτωση ολεφίνων από πυρολυμένα gasoil και από βακτηριακή δράση εμφανίζονται στο ντήζελ ως απόστημα. Το νερό και το απόστημα μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα διάβρωσης και φθοράς του συστήματος ψεκασμού [8].

1.10 ΔΙΑΒΡΩΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η διαδικασία της αποθείωσης στα πετρελαϊκά προϊόντα δεν απομακρύνει πλήρως τις θειούχες ενώσεις που περιέχονται σε αυτά, με αποτέλεσμα κάποιες να παραμένουν στο καύσιμο και να έχουν διαβρωτική δράση στα διάφορα μεταλλικά μέρη με τα οποία έρχονται σε επαφή, όπως για παράδειγμα το σύστημα διανομής, αποθήκευσης, τροφοδοσίας και ψεκασμού του καυσίμου στον κινητήρα. Η διαβρωτικότητα αυτή δεν είναι απαραίτητως άμεσα εξαρτώμενη από τη συνολική περιεκτικότητα του καυσίμου σε θειούχες ενώσεις και η δράση της είναι δυνατόν να εξαρτάται και από τα ποικίλα χημικά είδη που είναι παρόντα σε αυτό. Η μέθοδος με την οποία ελέγχεται η διαβρωτικότητα του καυσίμου είναι η μέθοδος διάβρωσης χάλκινου ελάσματος (ASTM D130), η οποία είναι σχεδιασμένη να εκτιμά τη σχετική διαβρωτικότητα του καυσίμου [3,10].

1.11 ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ

Ο όρος θερμογόνος δύναμη αναφέρεται στη μέτρηση της ενέργειας, η οποία απελευθερώνεται κατά την καύση του καυσίμου. Αποτελεί μια πολύ βασική ιδιότητα του καυσίμου, αφού είναι δείκτης για τον υπολογισμό της θερμικής του απόδοσης. Ανάλογα με τη φυσική κατάσταση των υδρατμών που παράγονται κατά την καύση, η θερμογόνος δύναμη χωρίζεται σε ανώτερη και κατώτερη. Η διαφορά τους έγκειται στην περιεκτικότητα του καυσίμου σε υδρογόνο. Το θείο, το νερό και η τέφρα που περιέχονται στο καύσιμο επηρεάζουν άμεσα τη θερμογόνο δύναμη [3].

1.12 ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

Ως σημείο ανάφλεξης (flash point) του ντήζελ ορίζεται η κατώτερη θερμοκρασία στην οποία, αν θερμανθεί το καύσιμο, θα δημιουργηθεί αναφλέξιμο μίγμα αέρα- ατμών πάνω από το υγρό καύσιμο, όταν αυτό εκτεθεί σε ανοικτή φλόγα. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τη μέτρηση του σημείου ανάφλεξης είναι η ASTM D 93/ EN ISO 2712 κατά Pensky – Martens. Το σημείο ανάφλεξης είναι ένας δείκτης ασφαλείας για την αποθήκευση και τη μεταφορά του καυσίμου, ενώ μπορεί να αποτελέσει και ένα δείγμα για την ύπαρξη επιμόλυνσης με κάποιο ελαφρύτερο συστατικό, όπως είναι η βενζίνη [3,11,12].

1.13 ΡΟΗ ΣΕ ΧΑΜΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ **(ΣΗΜΕΙΟ ΘΟΛΩΣΗΣ/ ΣΗΜΕΙΟ ΡΟΗΣ/CFPP)**

Το ντήζελ περιέχει παραφινικές ενώσεις, οι οποίες είναι επιθυμητές, επειδή προσδίδουν στο ντήζελ καλύτερη ποιότητα ανάφλεξης. Ωστόσο, σε χαμηλές θερμοκρασίες παρατηρείται διαχωρισμός των μορίων τους. Αυτό οδηγεί σε προβλήματα ροής του καυσίμου, γεγονός που δυσχεραίνει τη λειτουργικότητα των οχημάτων, καθώς προκαλούνται προβλήματα στο σύστημα διανομής του καυσίμου.

Μέθοδοι πρόβλεψης του ορίου λειτουργικότητας, το οποίο είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία με ικανοποιητική λειτουργία του κινητήρα, είναι αντίστοιχα το σημείο θόλωσης και το σημείο ροής. Το σημείο θόλωσης είναι η υψηλότερη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται διαχωρισμός κρυστάλλων παραφίνης, ενώ το σημείο ροής είναι η θερμοκρασία στην οποία ο διαχωρισμός της παραφίνης δεν επιτρέπει πλέον στο καύσιμο να είναι ρευστό. Πρακτικά, τα καύσιμα παραμένουν λειτουργικά σε θερμοκρασίες μικρότερες από το σημείο

θόλωσης ενώ είναι πλήρως δυσλειτουργικά σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από το σημείο ροής.

Τις αστοχίες πρόβλεψης αυτών των μεθόδων επιχειρεί να διορθώσει η μέθοδος Σημείου Απόφραξης Ψυχρού Φίλτρου (CFPP), κατά την οποία προσδιορίζεται η χαμηλότερη θερμοκρασία κατά την ψύξη, στην οποία ποσότητα καυσίμου 20 ml είναι δυνατόν να περάσει μέσω ενός φίλτρου σε λιγότερο από 60s. Αυτή η μέθοδος δίνει μια καλύτερη πρόβλεψη για το σημείο λειτουργίας, καθώς οι συνθήκες της προσομοιάζουν αρκετά τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα [3].

1.14 ΑΠΟΣΤΑΞΗ

Το εύρος βρασμού του καυσίμου, το οποίο απεικονίζεται μέσω της καμπύλης απόσταξης, είναι ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρος, γιατί επηρεάζει πολλές από τις ιδιότητες του καυσίμου, όπως το ιξώδες, το σημείο ανάφλεξης, τον αριθμό κετανίου κ.α. Παράλληλα αποτελεί δείκτη ασφαλείας, καθώς η πτητικότητα καθορίζει την τάση του μίγματος υδρογονανθράκων να σχηματίζει εκρηκτικά μίγματα. Η περιοχή βρασμού δίνει πληροφορίες για την σύσταση, τις ιδιότητες και την συμπεριφορά του καυσίμου κατά την αποθήκευση και την χρήση. Γενικά, η περιοχή βρασμού είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει αρνητικά το σημείο ανάφλεξης, την ποιότητα καύσης, το ενεργειακό περιεχόμενο ή το ιξώδες του καυσίμου [4,8].

1.15 ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ

Ο αριθμός κετανίου είναι ένα μέτρο εκτίμησης της καθυστέρησης στην ανάφλεξη του καυσίμου, όταν το καύσιμο εισέρχεται στον θάλαμο καύσης του κινητήρα και αποτελεί μία από τις σπουδαιότερες ιδιότητες του ντήζελ. Μεγάλος αριθμός κετανίου υποδηλώνει μικρή καθυστέρηση στην ανάφλεξη, ενώ σχετίζεται άμεσα με το είδος των υδρογονανθράκων του καυσίμου. Ειδικότερα, μεγάλο αριθμό κετανίου προσδίδουν οι παραφινικοί υδρογονάνθρακες, ακολουθούν οι ισοπαραφινικοί και οι ναφθενικοί, ενώ τον μικρότερο αριθμό κετανίου έχουν οι αρωματικοί.

Για τον προσδιορισμό του αριθμού κετανίου ενός καυσίμου, η ποιότητα ανάφλεξης συγκρίνεται σε πρότυπο κινητήρα με την ποιότητα ανάφλεξης δύο καυσίμων αναφοράς. Συγκεκριμένα, του κανονικού δεκαεξανίου που έχει αριθμό κετανίου 100 και αρχικά της αμεθυλοναφθαλίνης με αριθμό κετανίου 0, η οποία αντικαταστάθηκε από το επταμεθυλοεννεάνιο με αριθμό κετανίου 15, λόγω της δυσκολίας που παρουσίαζε στην ανάφλεξη. Ως αριθμός κετανίου ενός καυσίμου ορίζεται ο πλησιέστερος στην ποιότητα ανάφλεξης αριθμός κετανίου μίγματος κετανίου και επταμεθυλοεννεανίου και δίνεται από τη σχέση 1-2 για τους αντιστοιχούς όγκους [3,4]:

$$\text{Αριθμός Κετανίου} = [\% \text{κετάνιο}] + 0,15[\% \text{επταμεθυλοεννεάνιο}] \quad [1-2]$$

1.16 ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ

Ο δείκτης κετανίου αποτελεί μια μέθοδο προσέγγισης του αριθμού κετανίου, καθώς η διαδικασία μέτρησης του αριθμού με την χρήση πρότυπου κινητήρα λόγω του ειδικού εξοπλισμού που απαιτείται, έχει μεγάλο κόστος και είναι χρονοβόρα.

Ο δείκτης κετανίου προσεγγίζει καλά τον αριθμό κετανίου, εφόσον, όταν ο τελευταίος κυμαίνεται από 32,5 έως 56,5, η αναμενόμενη διαφορά μεταξύ αριθμού και δείκτη κετανίου είναι μικρότερη από ± 2 για τα περισσότερα καύσιμα. Ωστόσο, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε καύσιμα που περιέχουν βελτιωτικά του αριθμού κετανίου [8,13].

Η σχέση υπολογισμού του δείκτη κετανίου εξαρτάται από την πυκνότητα και την καμπύλη απόσταξης του καυσίμου και δίνεται σύμφωνα με την μέθοδο ASTM D4737 από τη σχέση 1-3 [11]:

$$\begin{aligned}CCI = & 45,5 + 0,0892 \cdot T_{10N} + [0,131 + (0,901 \cdot B)] \cdot T_{50N} \\ & + [0,0523 - (0,420 \cdot B)] \cdot T_{90N} + 0,00049 \cdot [T_{10N}^2 - T_{90N}^2] \\ & + 107 \cdot B + 60 \cdot B^2\end{aligned}$$

[1-3]

Όπου:

$$T_{10N} = T_{10} - 215$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310$$

T_{10} = Θερμοκρασία ανάκτησης του 10% (ASTM D-86), °C

T_{50} = Θερμοκρασία ανάκτησης του 50% (ASTM D-86), °C

T_{90} = Θερμοκρασία ανάκτησης του 90% (ASTM D-86), °C

$$B = \exp(-3,5 \cdot DN) - 1$$

$$DN = D - 0,85$$

D = Πυκνότητα στους 15 °C, gr/cm³

1.17 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Κατά την καύση του ντήζελ σε κινητήρα εκπέμπονται διάφοροι τύποι καυσαερίων, το είδος και η ποσότητα των οποίων σχετίζεται άμεσα με ιδιότητες του ντήζελ όπως η πυκνότητα, το ιξώδες, ο αριθμός κετανίου, η θερμοκρασία, καθώς και ο λόγος αέρα καυσίμου. Κυριότεροι ρύποι από την καύση του ντήζελ θεωρούνται τα οξείδια του αζώτου και τα σωματίδια, ενώ λόγω της ατελούς καύσης του ντήζελ εκπέμπονται ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από το μείγμα καυσίμου/αέρα. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εξαρτώνται από τον αριθμό κετανίου και οι εκπομπές διοξειδίου του θείου από την περιεκτικότητα του καυσίμου σε θείο, κάτι που έχει περιορισθεί σημαντικά λόγω των αυστηρών προδιαγραφών για το ντήζελ [3,4].

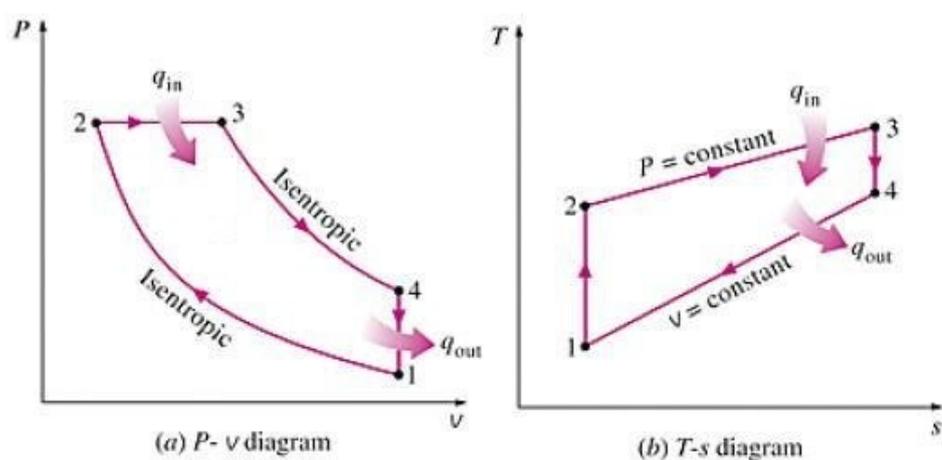
2 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΝΤΗΖΕΛ

Οι κινητήρες ντήζελ είναι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης, οι οποίες μετατρέπουν την χημική ενέργεια σε μηχανική μέσω ενός θερμοδυναμικού κύκλου. Ανακαλύφθηκαν από τον Rudolf Diesel και χρησιμοποιούν σύστημα ανάφλεξης με συμπίεση και ως καύσιμο πετρέλαιο ή και βιοκαύσιμα με παρόμοιες ιδιότητες με αυτές του πετρελαίου κίνησης. Ο χρόνος λειτουργίας του κύκλου μπορεί να είναι είτε τετράχρονος είτε δίχρονος [15,16].

2.1 ΤΟ ΚΥΚΛΟ DIESEL

Το κύκλο diesel τόσο για δίχρονη, όσο και για τετράχρονη λειτουργία αποτελείται από τέσσερις εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες. Συγκεκριμένα, μία ισεντροπική συμπίεση (1-2), μία ισοβαρή θέρμανση (2-3), μία ισεντροπική εκτόνωση (3-4) και μία ισόχωρη ψήξη (4-1), οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω στα διαγράμματα $p-v$ και $T-s$ του σχήματος 2-1 [17,18].

Διάγραμμα 2-1: Καμπύλες $p-v$ και $T-s$ για το κύκλο Diesel



Το κύκλο ντήζελ περιγράφεται μαθηματικά από τις ακόλουθες σχέσεις για τα διάφορα μεγέθη:

Η εισερχόμενη θερμότητα q_{in} :

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad [2-1]$$

Η απορριπτόμενη θερμότητα q_{out} :

$$q_{out} = u_1 - u_4. \quad [2-2]$$

Το καθαρό έργο που παράγεται w_{th} :

$$w_{th} = (h_3 - h_2) - (u_4 - u_1). \quad [2-3]$$

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

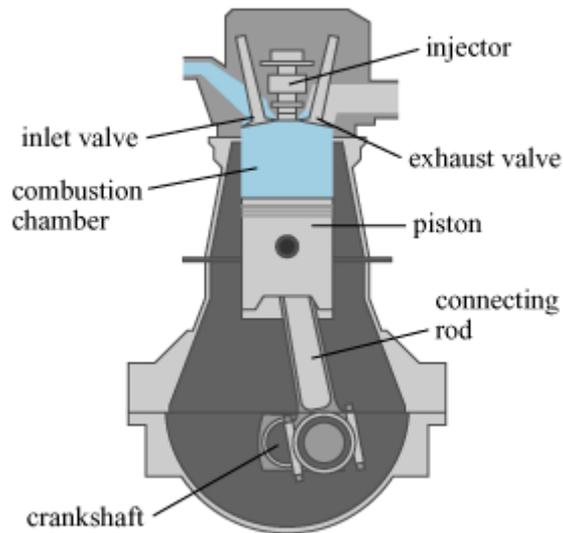
ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ

Ένας τυπικός κινητήρας ντήζελ αποτελείται από έναν κύλινδρο, όπου πραγματοποιείται η καύση του καυσίμου μέσω της παλινδρομικής κίνησης ενός εμβόλου, το οποίο μετατρέπει την ενέργεια των διαστελλόμενων αερίων σε μηχανική ενέργεια. Στο έμβολο υπάρχουν μερικά μεταλλικά ελατήρια, ώστε να μειωθούν οι τριβές και να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη λίπανση ανάμεσα στο έμβολο και στον κύλινδρο. Το έμβολο ενώνεται με έναν στροφαλοφόρο άξονα μέσω του διωστήρα. Ο στροφαλοφόρος άξονας μετατρέπει την γραμμική κίνηση του εμβόλου σε περιστροφική, η οποία μεταδίδεται στο φορτίο και διαθέτει ορισμένα αντίβαρα, για να εξισορροπείται το βάρος των συνδεδεμένων διωστήρων, ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλότερη δυναμική λειτουργία κατά την περιστροφή.

Στην κορυφή του κυλίνδρου βρίσκονται βαλβίδες, οι οποίες ανοιγοκλείνουν επιτρέποντας την είσοδο και την έξοδο των αερίων. Το καύσιμο

εγχύεται στον κύλινδρο μηχανικά σε υψηλή πίεση ως νέφος σταγονιδίων μέσω του εγχυτήρα καυσίμου, ώστε το καύσιμο να διασπαστεί σε λεπτά σταγονίδια. Υπάρχουν δύο τρόποι έγχυσης του καυσίμου στους κινητήρες ντήζελ, η άμεση έγχυση (direct injection DI) και η έμμεση έγχυση (indirect injection IDI). Στην άμεση έγχυση, το καύσιμο εγχέεται απευθείας στον κύλινδρο επάνω από το έμβολο. Αντίθετα στην έμμεση έγχυση, το καύσιμο εγχέεται εφαπτομενικά σε ένα μικρό προθάλαμο (prechamber), ο οποίος συνδέεται με τον κύλινδρο μέσω μίας στενής διόδου. Κατά το χρόνο συμπίεσης, ο αέρας ωθείται μέσω αυτής της διόδου, η οποία παράγει μία έντονα στροβιλισμένη κίνηση στον προθάλαμο. Τότε, εγχέεται το καύσιμο στον προθάλαμο και η ανάφλεξη πραγματοποιείται εκεί. Η έμμεση έγχυση υπερτερεί έναντι της άμεσης στους υψηλούς ρυθμούς ανάμειξης που επιτυγχάνει, χάρη στο συνδυασμό του έντονα στροβιλισμένου αέρα στον προθάλαμο και της εκτόνωσης των αερίων καύσης με τη μορφή στροβίλου από τον προθάλαμο προς τον κύλινδρο. Ωστόσο, δημιουργούνται και προβλήματα, τα οποία σχετίζονται κυρίως με τις απώλειες θερμότητας κατά την συμπίεση, αλλά και με δυσκολίες εκκίνησης.

Τέλος, μέσω ενός εκκεντροφόρου άξονα που είναι συνδεδεμένος κατάλληλα με τις βαλβίδες και τον εγχυτήρα επιτυγχάνεται ο έλεγχος της σωστής λειτουργίας του κινητήρα ντήζελ, ρυθμίζοντας τις χρονικές στιγμές για το άνοιγμα και το κλείσιμο των βαλβίδων σε σχέση με την κίνηση του εμβόλου. Η κίνηση του εκκεντροφόρου άξονα γίνεται από τον στροφαλοφόρο άξονα μέσω σειράς γραναζιών. Στο σχήμα 2-1 παρουσιάζονται τα βασικά τμήματα ενός κινητήρα ντήζελ [15,17–20].



Σχήμα 2-1: Βασικά μέρη ενός ντηζελοκινητήρα

2.3 ΤΕΤΡΑΧΡΟΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ **ΝΤΗΖΕΛ**

Η λειτουργία ενός τετράχρονου ντηζελοκινητήρα χαρακτηρίζεται από τέσσερις διακριτούς χρόνους κατά τους οποίους πραγματοποιούνται τέσσερις κινήσεις του εμβόλου, κάτι που αντιστοιχεί σε δύο πλήρεις περιστροφές του στροφαλοφόρου άξονα [15,20,21].

1ος ΧΡΟΝΟΣ: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βαλβίδα εισαγωγής είναι ανοιχτή, ενώ η βαλβίδα εξαγωγής και ο εγχυτήρας είναι κλειστά. Το έμβολο κινείται από το Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) προς το Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ), προκαλώντας αναρρόφηση του αέρα μέσα στον κύλινδρο μέσω της βαλβίδας εισαγωγής. Όταν το έμβολο φτάνει στο ΚΝΣ, η

βαλβίδα εισαγωγής κλείνει εγκλωβίζοντας τον αέρα μέσα στον κύλινδρο [15,20,21].

2ΟΣ ΧΡΟΝΟΣ: ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής παραμένουν κλειστές και το έμβολο κινείται από το ΚΝΣ στο ΑΝΣ συμπιέζοντας τον εγκλωβισμένο στον κύλινδρο αέρα. Ο αέρας λόγω της συμπίεσης θερμαίνεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας αυτανάφλεξης του καυσίμου [15,20,21].

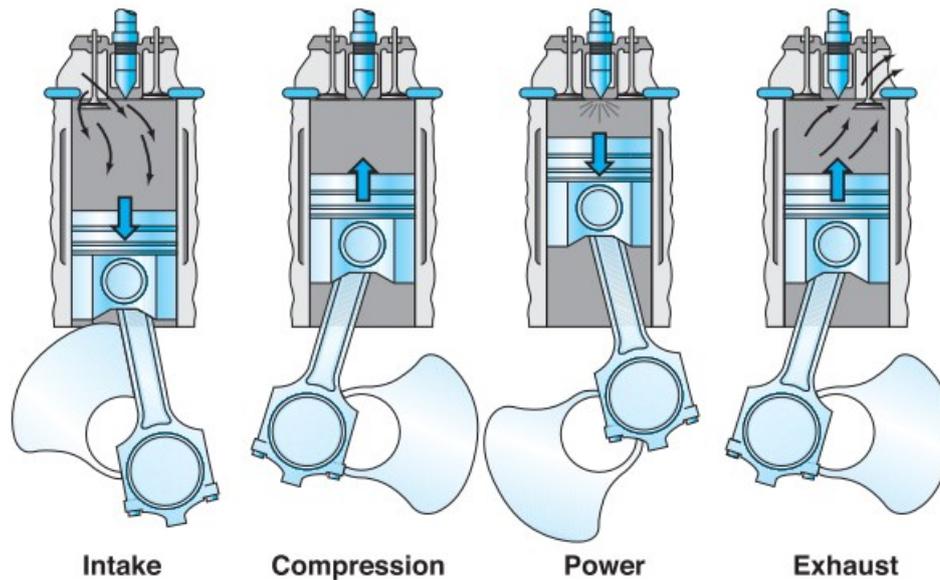
3ΟΣ ΧΡΟΝΟΣ: ΚΑΥΣΗ ΚΑΙ ΕΚΤΟΝΩΣΗ

Οι δύο βαλβίδες παραμένουν κλειστές, και, όταν το έμβολο φτάνει στο ΑΝΣ, πραγματοποιείται η έγχυση του καυσίμου. Το καύσιμο αναμειγνύεται με το θερμό αέρα στον κύλινδρο και καθώς η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη της θερμοκρασίας αυτανάφλεξης του, αυταναφλέγεται εκκινώντας έτσι την καύση του. Κατά την καύση του καυσίμου παράγονται αέρια σε υψηλή πίεση, τα οποία ωθούν προς τα κάτω το έμβολο κάτι που οδηγεί στην περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή κινητήριου έργου [8,15,21].

4ΟΣ ΧΡΟΝΟΣ: ΕΞΑΓΩΓΗ

Η βαλβίδα εισαγωγής και ο εγχυτήρας είναι κλειστά, ενώ η βαλβίδα εξαγωγής ανοιχτή. Το έμβολο κινείται από το ΚΝΣ προς το ΑΝΣ αναγκάζοντας τα καυσαέρια να εξέλθουν από τον κύλινδρο μέσω της βαλβίδας εξόδου. Η βαλβίδα εξόδου κλείνει και η βαλβίδα εισόδου ανοίγει, μόλις το έμβολο φτάσει στο ΑΝΣ, ώστε να εισαχθεί στον κύλινδρο εκ νέου αέρας και να ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος λειτουργίας [15,20,21].

Στο σχήμα 2-2 παρουσιάζονται οι τέσσερις χρόνοι λειτουργίας του κινητήρα ντήζελ.



Σχήμα 2-2: Οι χρόνοι λειτουργίας του κινητήρα Diesel

2.4 ΔΙΧΡΟΝΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η λειτουργία του δίχρονου κύκλου είναι παρόμοια με αυτή του τετράχρονου, με βασική διαφορά το γεγονός ότι η εισαγωγή του αέρα πραγματοποιείται ταυτόχρονα με την εξαγωγή των καυσαερίων στο τέλος του χρόνου εκτόνωσης και στο πρώτο μισό του χρόνου συμπίεσης. Σε ένα πλήρη κύκλο ενός δίχρονου κινητήρα παράγεται ισχύς σε κάθε χρόνο. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα του δίχρονου κινητήρα έναντι του τετράχρονου, ωστόσο έχει υψηλότερες εκπομπές σε ρύπους και η απόδοση του καυσίμου είναι σχετικά μικρότερη [3].

2.5 ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

ΝΤΗΖΕΛ

Η καύση στους κινητήρες ντήζελ πραγματοποιείται σε τρία στάδια, τα οποία περιλαμβάνουν φυσικές και χημικές διεργασίες, ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν τέλεια καύση και να περιοριστούν οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα, άκαυστων υδρογονανθράκων και αιθάλης [3].

- **1ο ΣΤΑΔΙΟ:** Από την έγχυση των σταγονιδίων του καυσίμου μέχρι την ανάφλεξη του μεσολαβεί ένας μικρός χρόνος γνωστός ως καθυστέρηση ανάφλεξης. Σε αυτό το χρονικό διάστημα πραγματοποιείται περεταίρω διάσπαση των σταγονιδίων του καυσίμου, ο σχηματισμός του μίγματος καυσίμου/αέρα και οι προφλογικές αντιδράσεις [3].
- **2ο ΣΤΑΔΙΟ:** Η φλόγα διαδίδεται στο μίγμα καυσίμου/αέρα και προκαλείται ανεξέλεγκτη καύση και απότομη αύξηση της πίεσης, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την ποσότητα του καυσίμου στο θάλαμο καύσης [3].
- **3ο ΣΤΑΔΙΟ:** Η καύση ελέγχεται από το ρυθμό έγχυσης του καυσίμου και συνεχίζεται μέχρι να καεί όλο το διαθέσιμο καύσιμο. Η πίεση του κυλίνδρου αυξάνεται σταθερά και στη συνέχεια μειώνεται [3].

2.6 ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ

Η λειτουργία ενός κινητήρα ντήζελ μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση τον υπολογισμό ορισμένων μεγεθών όπως:

- **Ο ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ:**

Ο λόγος του θεωρητικού καθαρού έργου προς την θερμότητα που παράγεται κατά το κύκλο του κινητήρα, δίνεται από τη σχέση 2-4 [8,15]:

$$n_{th} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2} \quad [2-4]$$

- **Ο ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ:**

Ο πραγματικός βαθμός απόδοσης είναι το γινόμενο του βαθμού ποιότητας (n_g) επί τον θεωρητικό βαθμό απόδοσης ιδανικού κύκλου αέρα επί τον μηχανικό βαθμό απόδοσης, περιλαμβάνει, δηλαδή, όλες τις απώλειες, θερμοδυναμικές και μηχανικές, που παρουσιάζονται στον κινητήρα και δίνεται από την σχέση 2-5 [19,20,22] :

$$n_e = \frac{W_e}{Q_B} = n_m \cdot n_g \cdot n_{th} \quad [2-5]$$

- **Ο ΒΑΘΜΟΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ:**

Ο λόγος του όγκου του κυλίνδρου τη στιγμή που το έμβολο βρίσκεται στο ΚΝΣ προς τον όγκο του κυλίνδρου, όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΑΝΣ. Όσο μεγαλύτερη είναι η σχέση συμπίεσης, τόσο υψηλότερη θερμοκρασία αποκτά ο αέρας και επομένως επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμικές αποδόσεις και καλύτερη οικονομία στο καύσιμο. Γενικά, οι κινητήρες ντήζελ λειτουργούν σε υψηλές σχέσεις συμπίεσης, έτσι ώστε να επιτευχθεί θέρμανση του

αέρα στις επιθυμητά υψηλές θερμοκρασίες και να μπορέσει να αυταναφλεγεί το καύσιμο [20,21].

- **Η ΙΣΧΥΣ:**

Το έργο που παράγεται ανά μονάδα χρόνου υπολογίζεται από τη σχέση 2-6 [17,19,20,22]:

$$P_e = n_e \cdot \dot{m}_B \cdot H_u \quad [2-6]$$

όπου \dot{m}_B είναι η παροχή του καυσίμου και H_u η θερμογόνος δύναμή του.

- **Η ΜΕΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ:**

Είναι η διαφορά της μέγιστης πίεσης κατά την καύση και της μέγιστης πίεσης κατά την συμπίεση. Με αυτό τον τρόπο συσχετίζεται το έργο που καταναλώνεται από το έμβολο κατά την συμπίεση, με το έργο που παράγεται από το έμβολο κατά την εκτόνωση και δίνεται μία προσέγγιση της πίεσης μέσα στον κύλινδρο, η οποία δύναται να μετατραπεί σε ροπή [20,21].

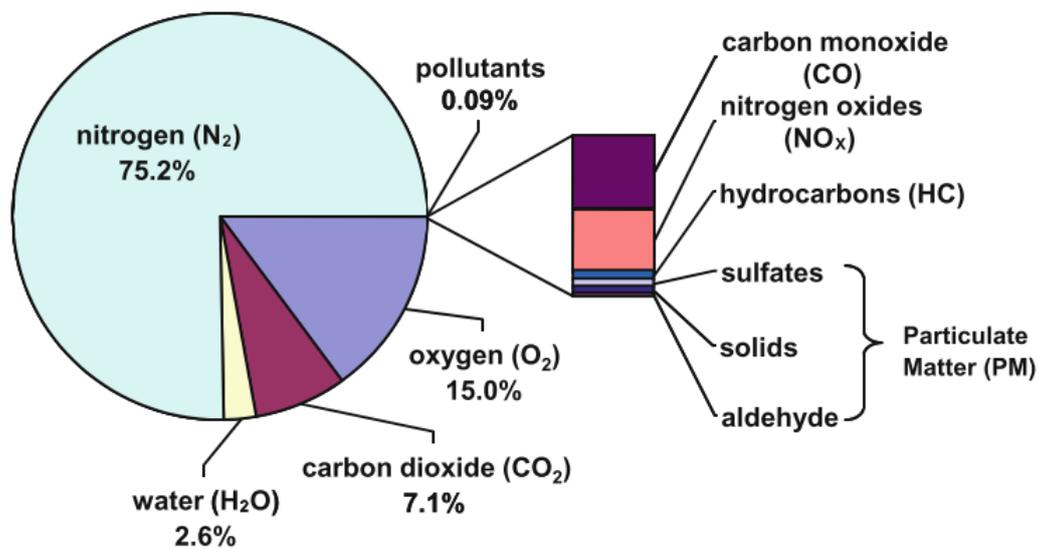
- **Η ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ:**

Ο λόγος της παροχής του καυσίμου με την πραγματική ισχύ του κινητήρα. Αποτελεί μία έκφραση της απόδοσης του κινητήρα, δίνοντας μία σχέση μεταξύ της απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου και της ενέργειας που αυτή παράγει [19,20,22]. Ορίζεται από τη σχέση 2-7:

$$BSFC = \frac{\dot{m}_B}{P_e} \quad [2-7]$$

3 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΝΤΗΖΕΛ

Αποτέλεσμα της διεργασίας της καύσης σε έναν κινητήρα ντήζελ είναι η παραγωγή και απελευθέρωση αζώτου, οξυγόνου, υδρατμών και διαφόρων ρύπων με κυριότερους το διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου, μονοξείδιο του άνθρακα, άκαυστους υδρογονάνθρακες και αιθάλη. Στο σχήμα 3-1 παρουσιάζεται ενδεικτικά μία τυπική κατανομή των ποσοστών των εκπεμπόμενων ρύπων από κινητήρα ντήζελ [20].



Σχήμα 3-1: Κατά βάρος σύσταση εκπομπών κινητήρων Diesel[22]

3.1 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO₂

Ένα από τα κύρια προϊόντα της καύσης σε ένα κινητήρα ντήζελ είναι το διοξείδιο του άνθρακα, ένα διαφανές και άοσμο αέριο το οποίο, αν και δεν θεωρείται ρύπος, η μείωση των εκπομπών του κρίνεται απαραίτητη, εφόσον είναι ένα από τα αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου [20].

3.2 ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ CO

Το μονοξείδιο του άνθρακα είναι ένα άοσμο και άχρωμο αέριο και αποτελεί βασικό παράγωγο της ατελούς καύσης. Ο βασικός παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται το ποσοστό εκπομπής μονοξειδίου του άνθρακα σε κινητήρα ντήζελ, είναι ο λόγος αέρα καυσίμου. Συγκεκριμένα, τα ποσοστά εκπομπής του αυξάνονται με την εισαγωγή πλούσιων σε καιόμενο καύσιμο μειγμάτων. Ο έλεγχος των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα είναι απαραίτητος, αφού πρόκειται για ένα άκρως επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία αέριο, το οποίο εισερχόμενο στον οργανισμό αντιδρά με την αιμοσφαιρίνη, εμποδίζοντας έτσι την σωστή μεταφορά του οξυγόνου μέσω του κυκλοφορικού συστήματος και κατ'επέκταση επηρεάζει την σωστή λειτουργία διάφορων οργάνων, ενώ σε μεγάλες ποσότητες είναι θανατηφόρο [6,20,21,23].

3.3 ΑΚΑΥΣΤΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ HC

Κατά το κύκλο λειτουργίας ενός κινητήρα ντήζελ είναι δυνατόν να εμφανιστούν μικρές ποσότητες καυσίμου, οι οποίες δεν κάηκαν και εκπέμπονται

ως καυσαέρια. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται κυρίως, όταν το μίγμα αέρα καυσίμου στο θάλαμο καύσης είναι είτε πολύ φτωχό είτε πολύ πλούσιο σε καύσιμο. Το ποσοστό των υδρογονανθράκων στα καυσαέρια εξαρτάται άμεσα από το φορτίο λειτουργίας του κινητήρα, το σύστημα έγχυσης του καυσίμου, αλλά και τις συνθήκες περιβάλλοντος [20,21,23].

3.4 ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ-PM

Με τον όρο σωματίδια καλούνται τα αιωρούμενα στερεά στα καυσαέρια του κινητήρα ντήζελ. Η χημική τους σύσταση ποικίλει και αποτελούνται από οργανικά και από ανόργανα συστατικά, όπως ο στοιχειακός άνθρακας, το θείο, διάφορα νιτρικά, ίχνη μετάλλων και νερό. Τα σωματίδια ταξινομούνται ανάλογα με το μέγεθός τους σε τρεις κατηγορίες:

- PM₁₀: σωματίδια με διάμετρο <10 μm
- PM_{2,5}: σωματίδια με διάμετρο <2,5μm (fine particles)
- PM₁: σωματίδια με διάμετρο <1μm (ultrafine particles)

Το μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί κρίσιμη παράμετρος όσον αφορά στην επίδραση τους στην ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και στην ανθρώπινη υγεία. Ιδιαίτερα τα πολύ μικρά σωματίδια έχουν την δυνατότητα να διέρχονται από το φράγμα αέρα-αίματος του πνεύμονα και να εισέρχονται στην κυκλοφορία του αίματος μέσω του οσφρητικού νεύρου, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει ποικίλα προβλήματα στον οργανισμό.

Ο σχηματισμός των σωματιδίων οφείλεται κυρίως στην ατελή καύση του καυσίμου και σχετίζεται άμεσα με την αναλογία αέρα/καυσίμου και το φορτίο λειτουργίας του κινητήρα. Επιπρόσθετα, αύξηση του φορτίου συνεπάγεται και αύξηση των παραγόμενων σωματιδίων. Ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι οι εκπομπές των σωματιδίων ακολουθούν αντίστροφη πορεία από τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου

καύσης επιφέρει μείωση της παραγωγής σωματιδίων και ταυτόχρονη αύξηση των οξειδίων του αζώτου [6,20–29].

3.5 ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΘΕΙΟΥ SO_x

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες ντήζελ, παρά τις αυστηρές προδιαγραφές, περιέχουν μικρές ποσότητες θείου. Κατά τη διεργασία της καύσης αυτό οδηγεί στο σχηματισμό και την εκπομπή οξειδίων του θείου, τα οποία είναι επιβλαβή για το περιβάλλον, εφόσον εντείνουν το φαινόμενο της όξινης βροχής [6,28].

3.6 ΟΞΕΙΔΙΑ ΤΟΥ ΑΖΩΤΟΥ NO_x

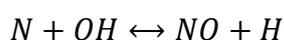
Ως οξείδια του αζώτου NO_x αναφέρονται κυρίως το διοξείδιο του αζώτου NO₂ και το μονοξείδιο του αζώτου NO, τα οποία παράγονται από την οξείδωση του αζώτου σε κατάλληλες συνθήκες κατά την καύση στο κινητήρα ντήζελ. Τα οξείδια του αζώτου συμβάλουν σε μεγάλο ποσοστό στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι ένας από τους ρύπους που ευθύνονται για το φαινόμενο της όξινης βροχής, του φωτοχημικού νέφους και της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Παράλληλα, είναι επιβλαβή για τον ανθρώπινο οργανισμό και ιδιαίτερα για άτομα με αναπνευστικά προβλήματα. Ειδικότερα, το διοξείδιο του αζώτου προκαλεί μολύνσεις στους πνεύμονες και αλλεργίες του αναπνευστικού λόγω της ικανότητάς του να διαχέεται μέσω των βρόγχων και των τριχοειδών αγγείων των πνευμόνων καταστρέφοντας την δομή τους, ενώ ταυτόχρονα

αποτελεί πρόδρομο για το σχηματισμό του τροποσφαιρικού όζοντος, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί ποικίλα αναπνευστικά προβλήματα [20,22–24,30].

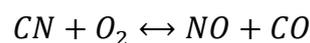
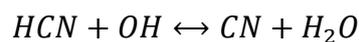
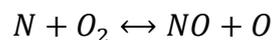
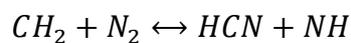
Οι παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου κατά τη διεργασία της καύσης στο θάλαμο καύσης του κινητήρα ντίζελ είναι κατά κύριο λόγο η θερμοκρασία του μείγματος του καυσίμου, ο λόγος αέρα/καυσίμου και ο χρόνος παραμονής του καυσίμου σε υψηλές θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου σε υψηλές θερμοκρασίες και σε μεγαλύτερη καθυστέρηση στην ανάφλεξη, η οποία συνεπάγεται την αύξηση της εκπεμπόμενης θερμότητας, σχηματίζεται μεγαλύτερη ποσότητα NOx. Συνεπώς, το σύστημα χρονισμού έγχυσης του καυσίμου, ο αριθμός κετανίου, ο λόγος αέρα/καυσίμου και ο μηχανισμός της καύσης είναι οι βασικοί παράμετροι που καθορίζουν την οξείδωση του αζώτου και σχετίζονται άμεσα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του καυσίμου.

Το άζωτο σε ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι αδρανές, ενώ οξειδώνεται σε ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης σύμφωνα με δύο βασικούς προτεινόμενους μηχανισμούς, το μηχανισμό Zeldovic και το μηχανισμό Fenimore [6,20,23,29–31]:

- **ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ZELDOVIC:** Ο συγκεκριμένος μηχανισμός είναι κυρίαρχος στους κινητήρες ντίζελ. Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο ο σχηματισμός των οξειδίων οφείλεται στην οξείδωση του αζώτου του ατμοσφαιρικού αέρα λόγω υψηλών θερμοκρασιών εντός του θαλάμου καύσης. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σύμφωνα με αυτό το μηχανισμό είναι οι εξής:



- **ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ FENIMORE:** Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μηχανισμό το ατμοσφαιρικό άζωτο αντιδρά με ρίζες C, CH, CH₂ σχηματίζοντας NH, HCN και H₂CN, τα οποία στην συνέχεια οξειδώνονται προς NO. Λόγω του σημαντικού ρόλου που διαδραματίζουν τα CH και τα CH₂, ο σχηματισμός των NO_x επηρεάζεται άμεσα από τον αριθμό των ατόμων άνθρακα σε κάθε μονάδα ανά μονάδα όγκου. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα είναι οι εξής:



3.7 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΥΠΟΓΩΝΩΝ

ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα ελέγχου καυσαερίων, τα οποία εφαρμόζονται στους κινητήρες ντήζελ, με σκοπό την μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων και ιδιαίτερα των οξειδίων του αζώτου που αποτελούν και το μεγαλύτερο ποσοστό των ρύπων, ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές για τα όρια εκπομπής. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες ελέγχου ρυπογόνων εκπομπών είναι ο οξειδωτικός καταλύτης DOC για την αντιμετώπιση των CO και HC, η παγίδα αιθάλης DPF, ο αναγωγικός καταλύτης SCR για τα οξείδια του αζώτου, το σύστημα ανακυκλοφορίας καυσαερίων

(exhaust gas recirculation, EGR), η παγίδα φτωχού μείγματος NO_x (lean NO_x trap, LNT) [20,23].

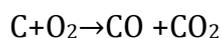
3.7.1 ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ, DOC

Οι οξειδωτικοί καταλύτες είναι συσκευές τύπου μονολίθου με διαμήκη κανάλια υποστρώματος οξειδίου του αργιλίου στα οποία εμποτίζεται καταλυτικό υλικό (λευκόχρυσος, παλλάδιο). Με τη χρήση του καταλύτη επιτυγχάνεται η οξείδωση των CO και HC σε CO₂ και H₂O, τα οποία δεν αποτελούν ρύπους, ενώ παράλληλα μειώνονται οι εκπομπές σωματιδίων, αυξάνεται η θερμοκρασία του καυσαερίου και το ποσοστό του διοξειδίου του αζώτου, γεγονός που βοηθάει στην αναγέννηση της παγίδας αιθάλης [20,21,23].

3.7.2 ΠΑΓΙΔΑ ΑΙΘΑΛΗΣ, DPF

Οι παγίδες αιθάλης είναι κυψελωτοί μονόλιθοι με κλειστά κανάλια εναλλάξ από κεραμικά υλικά, όπως ο κορδιερίτης και το καρβίδιο του πυριτίου. Τα σωματίδια λόγω των κλειστών καναλιών περνούν μέσα από τα πορώδη τοιχώματα του υποστρώματος, το οποίο δρα ως μηχανικό φίλτρο, καθώς τα σωματίδια προσκολλώνται σε αυτά. Η συγκεκριμένη διάταξη παρέχει εξαιρετικό φιλτράρισμα. Ωστόσο η απορρόφηση των σωματιδίων από τα φίλτρα έχει ως συνέπεια τη δημιουργία αντίθλιψης, η οποία προκαλεί μία σειρά από επιπτώσεις, όπως αύξηση της κατανάλωσης του καυσίμου, βλάβη στον κινητήρα και καταστροφή των φίλτρων, γι αυτό είναι κρίσιμη η καίρια αναγέννηση της παγίδας αιθάλης μέσω της καύσης των σωματιδίων [6,20,21,25,28,32].

Υπάρχουν δύο είδη αναγέννησης, η ενεργητική και η παθητική. Η οξείδωση πραγματοποιείται είτε σε θερμοκρασία 550 °C σύμφωνα με την αντίδραση:

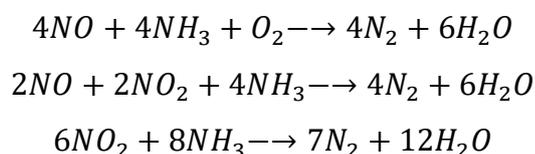


είτε σε θερμοκρασία περίπου 300°C, όπου η αιθάλη αντιδρά με το NO₂ με βάση την αντίδραση:



3.7.3 ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΟΣ ΑΝΑΓΩΓΙΚΟΣ ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ, SCR

Ο επιλεκτικός αμαγωγικός καταλύτης χρησιμοποιείται κυρίως για οχήματα υψηλού φορτίου και τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται και στα επιβατηγά. Η ελαχιστοποίηση των NO_x επιτυγχάνεται με τη χρήση της αμμωνίας ως αναγωγικό μέσο, η οποία λόγω τοξικότητας παρέχεται ως υδατικό διάλυμα. Με αυτόν τον τρόπο απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα νερό και άζωτο N₂ σύμφωνα με τις αντιδράσεις [6,33]:



3.7.4 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ,

EGR

Στο συγκεκριμένο σύστημα, κατά τον χρόνο εισαγωγής, τα καυσαέρια επιστρέφουν στον θάλαμο καύσης όπου αναμειγνύονται με φρέσκο αέρα, μειώνοντας έτσι την αποδοτικότητα της καύσης άρα και την θερμοκρασία εντός του θαλάμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην ευνοείται ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται ευρέως στα επιβατιγά οχήματα ντήζελ, ωστόσο μειονεκτεί στα βαρέα οχήματα, καθώς δεν είναι εφικτή η ταυτόχρονη υψηλή μετατροπή των οξειδίων του αζώτου και η μείωση ώστε να πληρεί τις προδιαγραφές. Επιπλέον, η μείωση της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου καύσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα και των άκαυστων υδρογονανθράκων [28].

3.7.5 ΠΑΓΙΔΑ ΦΤΩΧΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ NO_x, LNT

Το σύστημα LNT αποθηκεύει τα οξείδια του αζώτου σε συνθήκες φτωχής λειτουργίας του κινητήρα, τα οποία απελευθερώνονται και αντιδρούν στην πλήρη λειτουργία του. Ο καταλυτικός μετατροπέας LNT αποτελείται από τρία βασικά υλικά, έναν οξειδωτικό καταλύτη από λευκόχρυσο, ο οποίος χρησιμοποιείται λόγω της ικανότητας του να μειώνει τα οξείδια του αζώτου σε χαμηλές θερμοκρασίες και λόγω της σταθερότητάς του στο νερό και στο θείο, από ένα υλικό αποθήκευσης των οξειδίων του αζώτου, συνήθως βάριο, και από έναν αναγωγικό καταλύτη από ρόδιο [6,28].

3.8 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Λόγω των αρνητικών επιπτώσεων που επιφέρουν τα καυσαέρια, τα οποία εκπέμπονται από τους κινητήρες ντίζελ στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία, έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες ορισμένοι κανονισμοί που αφορούν τον περιορισμό των εκπεμπόμενων ρύπων. Ειδικότερα, στην Ευρώπη από το 1993 εφαρμόζονται τα πρότυπα Euro, τα οποία διαρκώς μέχρι σήμερα γίνονται ολοένα και πιο αυστηρά στα επιτρεπτά όρια εκπομπών. Στον πίνακα 3-1 παρουσιάζονται τα πρότυπα Euro για επιβατηγά οχήματα με κινητήρες ντίζελ [20,25,32,34].

Πίνακας 3-1: Προδιαγραφές Ε.Ε. εκπομπών επιβατηγών οχημάτων με κινητήρα diesel.

Πρότυπο	Ημερομηνία	Οδηγία	CO	HC+NOx	NOx	PM	PN
			g/km	g/km	g/km	g/km	-
Euro 1	7/1992	91/441/E EC 93/59/EE C	2,72	0,97	-	0,14	-
Euro 2, IDI	1/1996	94/12/EC	1,0	0,7	-	0,08	-
Euro 2, DI	1/1996	96/69/EC	1,0	0,9	-	0,10	-

Euro 3	1/2000	98/69/EC	0,64	0,56	0,50	0,05	-
Euro 4	1/2005	2002/80/ EC	0,50	0,30	0,25	0,025	-
Euro 5a	9/2009	715/2007 /EC 692/1008 /EC	0,50	0,23	0,18	0,005	-
Euro 5b	9/2011		0,50	0,23	0,18	0,005	$6 \cdot 10^{11}$
Euro 6	9/2014		0,50	0,17	0,08	0,005	$6 \cdot 10^{11}$

4 ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΕΤΑΝΙΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αριθμός κετανίου αποτελεί ίσως την σημαντικότερη ιδιότητα του ντήζελ, καθώς είναι το βασικό μέσο εκτίμησης της καθυστέρησης στην ανάφλεξη του καυσίμου, η οποία σχετίζεται άμεσα και επηρεάζει την ποιότητα της καύσης, την ειδική κατανάλωση του καυσίμου και τις εκπομπές των ρύπων. Ο αριθμός κετανίου είναι άλλωστε μία από τις βασικές προδιαγραφές όσον αφορά στον περιορισμό των εκπομπών. Συνεπώς, η αύξηση του αριθμού κετανίου του ντήζελ είναι κύριος στόχος και πραγματοποιείται είτε με υδρογονοκατεργασία είτε με την προσθήκη βελτιωτικών του αριθμού κετανίου [3].

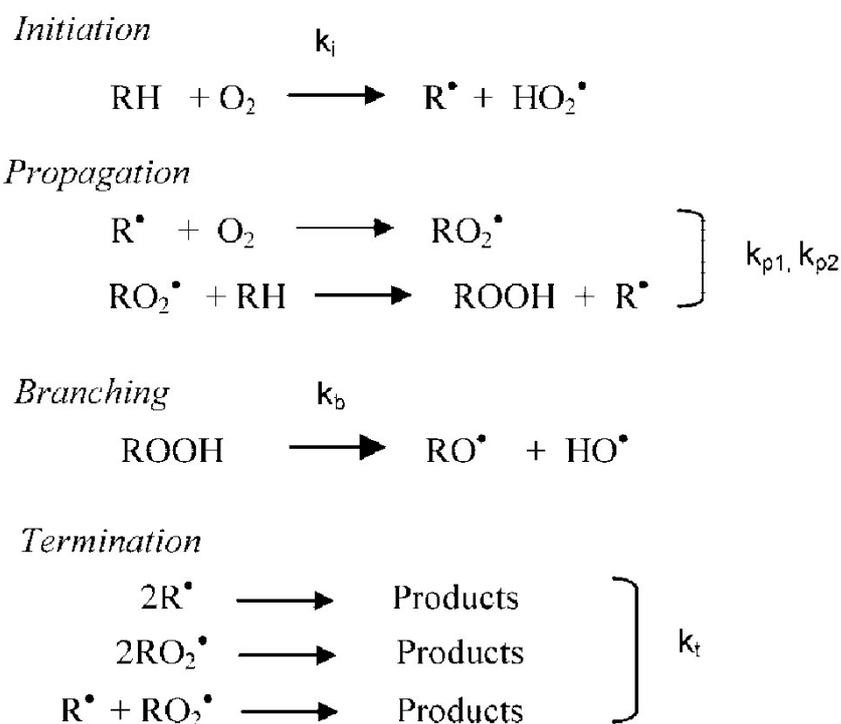
4.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ

Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για την αύξηση του αριθμού κετανίου είναι γενικά ενώσεις με συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως η σχετικά εύκολη αποσύνθεση τους. Επιδρούν στο καύσιμο και αυξάνουν την ταχύτητα έναρξης των αλυσιδωτών αντιδράσεων, ενώ προάγουν την ταχεία οξειδωση του καυσίμου συντελώντας με αυτόν τον τρόπο στη βελτίωση της ποιότητας ανάφλεξης του καυσίμου. Ως βελτιωτικά του αριθμού κετανίου χρησιμοποιούνται ποικίλες ενώσεις με κυριότερες νιτρικούς αλκυλεστέρες, νιτρικούς αιθέρες, δινιτρικές πολυαιθυλενογλυκόλες και ορισμένα υπεροξειδία [3].

Για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα βελτιωτικά αυξάνουν τον αριθμό κετανίου είναι απαραίτητη η ποιοτική απεικόνιση των

κινητικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την αυτανάφλεξη του καυσίμου στον κινητήρα. Η αυτανάφλεξη είναι χημικά μία αντίδραση ελεύθερων ριζών, η οποία περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια. Αυτά είναι, το στάδιο της εκκίνησης κατά το οποίο δημιουργούνται ελεύθερες ρίζες, το στάδιο της διάδοσης, όπου μία ρίζα μετατρέπεται σε μία άλλη, το στάδιο της διακλάδωσης κατά το οποίο δημιουργείται πληθώρα ριζών και το στάδιο τερματισμού όπου οι ελεύθερες ρίζες μετατρέπονται σε μη ριζικά προϊόντα.

Στο στάδιο εκκίνησης περιλαμβάνεται συνήθως η αντίδραση του καυσίμου με το οξυγόνο, στο στάδιο διάδοσης δημιουργούνται υπεροξειδία του υδρογόνου, στο στάδιο διακλάδωσης τα τελευταία αποσυντίθενται, ενώ στο τελικό στάδιο ανασχηματίζονται καινούριες ρίζες. Η ισορροπία αυτών των τεσσάρων σταδίων είναι εκείνη που καθορίζει την αυτανάφλεξη του ντίζελ. Μία γενική σχηματική παρουσίαση των αντιδράσεων ελεύθερων ριζών που πραγματοποιούνται σε κάθε στάδιο φαίνεται στο σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1: Αντιδράσεις ελεύθερων ριζών στα στάδια καύσης κινητήρων Diesel[35]

Η καθυστέρηση της ανάφλεξης βασίζεται στον ρυθμό ανάπτυξης των ελευθέρων ριζών, ο οποίος εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα του σταδίου της εκκίνησης. Συμπερασματικά, ο αριθμός κετανίου είναι δυνατό να αυξηθεί επιταχύνοντας το στάδιο εκκίνησης και αυτό στην ουσία επιτελεί η προσθήκη των βελτιωτικών. Απόντως του βελτιωτικού η ταχύτητα των αντιδράσεων του σταδίου της εκκίνησης ελέγχεται αποκλειστικά από την αντίδραση του καυσίμου με το οξυγόνο. Αντίθετα, με την προσθήκη βελτιωτικού στο καύσιμο, οι ρίζες που δημιουργούνται από το βελτιωτικό ευνοούν τη δημιουργία ενός επιπρόσθετου μονοπατιού εκκίνησης, του οποίου η ταχύτητα είναι πολύ μεγαλύτερη. Ένα ταχύτερο στάδιο εκκίνησης οδηγεί σε ταχύτερη δημιουργία ριζών καυσίμου και με αυτόν τον τρόπο σε μικρότερη καθυστέρηση αυτανάφλεξης και συνεπώς στην αύξηση του αριθμού κετανίου.

Τα υπόλοιπα στάδια της ανάφλεξης καθορίζονται κυρίως από τα μόρια των υδρογονανθράκων του καυσίμου. Γενικά, μείγματα υδρογονανθράκων με υψηλότερο αριθμό κετανίου ευνοούνται περισσότερο από την προσθήκη βελτιωτικών απ' ό,τι αντίστοιχα με χαμηλότερο. Τελικά, η προσθήκη βελτιωτικών επενεργεί κατά κύριο λόγο στο στάδιο της εκκίνησης βελτιώνοντας την ταχύτητά του [35,36].

4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ **ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΟΞΕΙΔΙΩΝ ΤΟΥ** **ΑΖΩΤΟΥ**

Η μείωση στα επίπεδα των οξειδίων του αζώτου με την βελτίωση του αριθμού κετανίου με την χρήση προσθέτων οφείλεται κυρίως στην μείωση της θερμοκρασίας του καυσίμου στο θάλαμο καύσης του κινητήρα ντήζελ. Συγκεκριμένα, η αύξηση του αριθμού κετανίου συνοδεύεται από την μείωση της

καθυστέρησης στην ανάφλεξη, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου αέρα καυσίμου που οδηγεί στην μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας καυσίμου εντός του κυλίνδρου και συνεπώς στο μικρότερο ποσοτικά σχηματισμό οξειδίων του αζώτου.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι σε καύσιμα με σχετικά μικρό αριθμό κετανίου ο ρυθμός έγχυσης του καυσίμου σχεδόν δεν επηρεάζει τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου. Αντίθετα σε καύσιμα με υψηλό αριθμό κετανίου οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου φαίνεται να εξαρτώνται άμεσα από τον ρυθμό έγχυσης [37].

4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ-ΑΙΘΑΛΗΣ

Με την αύξηση του αριθμού κετανίου ο λόγος του καιόμενου καυσίμου μειώνεται αισθητά και γενικώς ο λόγος αέρα καυσίμου σχετίζεται άμεσα με τον σχηματισμό αιθάλης. Ωστόσο, ερευνητικά δεν είναι σαφής η επίδραση της αύξησης του αριθμού κετανίου στο σχηματισμό αιθάλης. Σε ορισμένες ερευνητικές μελέτες αναφέρεται ότι ο σχηματισμός αιθάλης αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού κετανίου. Στον αντίποδα αυτού υπάρχουν μελέτες που συμπεραίνουν ότι με την αύξηση του αριθμού κετανίου μειώνεται ο σχηματισμός αιθάλης, καθώς μειώνεται το ποσοστό του καιόμενου καυσίμου στο θάλαμο καύσης. Αυτά τα διαμετρικά αντίθετα αποτελέσματα πιθανώς εξηγούνται από το γεγονός ότι ο σχηματισμός αιθάλης επηρεάζεται άμεσα και από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα και από τις συνθήκες λειτουργίας και από τον τύπο βελτιωτικού που χρησιμοποιήθηκε στην κάθε μελέτη [37].

4.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ

ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΚΑΥΣΤΩΝ

ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Στο θάλαμο καύσης ενός κινητήρα ντήζελ υπάρχουν ορισμένες περιοχές στις οποίες το μίγμα αέρα καυσίμου είναι είτε πιο πλούσιο είτε πιο φτωχό σε καύσιμο, γεγονός το οποίο είτε επιβραδύνει είτε προωθεί την καύση, με αποτέλεσμα στις εκπομπές του κινητήρα να περιέχονται οξειδωμένοι, άκαυστοι υδρογονάνθρακες.

Οι εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων φαίνεται να μειώνονται με την αύξηση του αριθμού κετανίου, ιδιαίτερα όταν το καθαρό καύσιμο έχει σχετικά μικρό αριθμό κετανίου. Η επίδραση του αριθμού κετανίου στις εκπομπές υδρογονανθράκων πιθανώς να σχετίζεται με την διακύμανση στην καθυστέρηση ανάφλεξης. Συγκεκριμένα, μεγάλη καθυστέρηση στην ανάφλεξη αυξάνει το χρονικό διάστημα μέχρι την πλήρη ανάμειξη του εγχεόμενου καυσίμου με τον αέρα στο θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα σε αυτό το χρονικό διάστημα το μείγμα αέρα καυσίμου να έχει περιεκτικότητες μικρότερες από τα επιτρεπτά όρια.

Εκτός όμως από την υπερβολική αραίωση του εγχεόμενου καυσίμου, μία μεγάλη καθυστέρηση στην ανάφλεξη μπορεί να επιτρέψει την περαιτέρω διείσδυση του καυσίμου στον θάλαμο καύσης, σε βαθμό που αυτό να προσκρούει στα τοιχώματα του θαλάμου, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση των εκπεμπόμενων άκαυστων υδρογονανθράκων. Συνεπώς, η αύξηση του αριθμού κετανίου και η μείωση στην καθυστέρηση της ανάφλεξης οδηγεί στην μείωση των εκπεμπόμενων άκαυστων υδρογονανθράκων [37–39].

4.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΟΥ

ΚΕΤΑΝΙΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΜΟΝΟΞΕΙΔΙΟΥ

ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Η χαμηλή οξειδωση των ατόμων του άνθρακα στο θάλαμο καύσης του κινητήρα λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο, η χαμηλή θερμοκρασία εντός του κυλίνδρου και οι πλούσιες σε καύσιμο περιοχές του κυλίνδρου έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα, ως προϊόν της ατελούς καύσης των υδρογονανθράκων. Έχει φανεί πειραματικά ότι οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα μειώνονται κυρίως στα υψηλά φορτία λειτουργίας του κινητήρα με την προσθήκη βελτιωτικών του αριθμού κετανίου, λόγω της επίδρασης των τελευταίων στις ιδιότητες του καυσίμου, αλλά και στην διεργασία της καύσης εντός του κινητήρα [40,41].

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5.1 ΔΕΙΓΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των βελτιωτικών του αριθμού κετανίου στην καύση του ντήζελ κίνησης σε κινητήρα. Γι αυτό το λόγο στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν ως καύσιμα βάσης τρία διαφορετικά ντήζελ κίνησης και τρία βελτιωτικά του αριθμού κετανίου και ένα πρόσθετο βιοκτόνο, τα οποία προστέθηκαν σε διάφορες αναλογίες και στα τρία καύσιμα.

Μελετήθηκαν οι φυσικοχημικές ιδιότητες των καθαρών καυσίμων, των μειγμάτων και οι εκπομπές ρύπων κατά την καύση τους σε κινητήρα ντήζελ, η θερμοκρασία των καυσαερίων και η ειδική κατανάλωση των καυσίμων. Τα καύσιμα βάσης που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-1, τα βελτιωτικά στον Πίνακα 5-2, ενώ τα μείγματα που παρασκευάστηκαν και μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3.

Πίνακας 5-1: Καύσιμα βάσης¹

<u>Καύσιμο</u>	<u>Ονομασία</u>	<u>Συμβολισμός</u>
Ντήζελ κίνησης	Diesel 1	D1
Ντήζελ κίνησης	Diesel 2	D2
Ντήζελ κίνησης	Diesel 2	D3

¹ Πληροφορίες για την προέλευση των καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαθέσιμες στο εργαστήριο τεχνολογίας καυσίμων και λιπαντικών της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πίνακας 5-2: Πρόσθετα που χρησιμοποιήθηκαν²

<u>Πρόσθετο</u>	<u>Ονομασία</u>	<u>Συμβολισμός</u>
Βελτιωτικό αριθμού κετανίου	Βελτιωτικό 1	Opt
Βελτιωτικό αριθμού κετανίου	Βελτιωτικό 2	Ωm
Βελτιωτικό αριθμού κετανίου	Βελτιωτικό 3	E
Βιοκτόνο	Βιοκτόνο	B

Πίνακας 5-3: Μείγματα που παρασκευάστηκαν

<u>Καύσιμο</u>	<u>Προσθετο</u>	<u>Περιεκτικότητα (ppm)</u>	<u>Συμβολισμός</u>
Diesel 1	E/B	450/50	D1-E450/B50
Diesel 1	E/B	900/100	D1-E900/B100
Diesel 1	E	4500	D1-E4500
Diesel 1	Opt	5000	D1-Opt5000
Diesel 1	Ωm	1700	D1-Ωm1700
Diesel 2	E/B	450/50	D2-E450/B50
Diesel 2	E	4500	D2-E4500
Diesel 2	Opt	5000	D2-Opt5000
Diesel 2	Ωm	1700	D2-Ωm1700

² Πληροφορίες για την εμπορική ονομασία και την προέλευση των προσθέτων είναι διαθέσιμες στο εργαστήριο τεχνολογίας καυσίμων και λιπαντικών της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Diesel 3	E/B	900/100	D3-E450/B50
Diesel 3	E	4500	D3-E4500
Diesel 3	Opt	5000	D3-Opt5000
Diesel 3	Ωm	1700	D3-Ωm1700

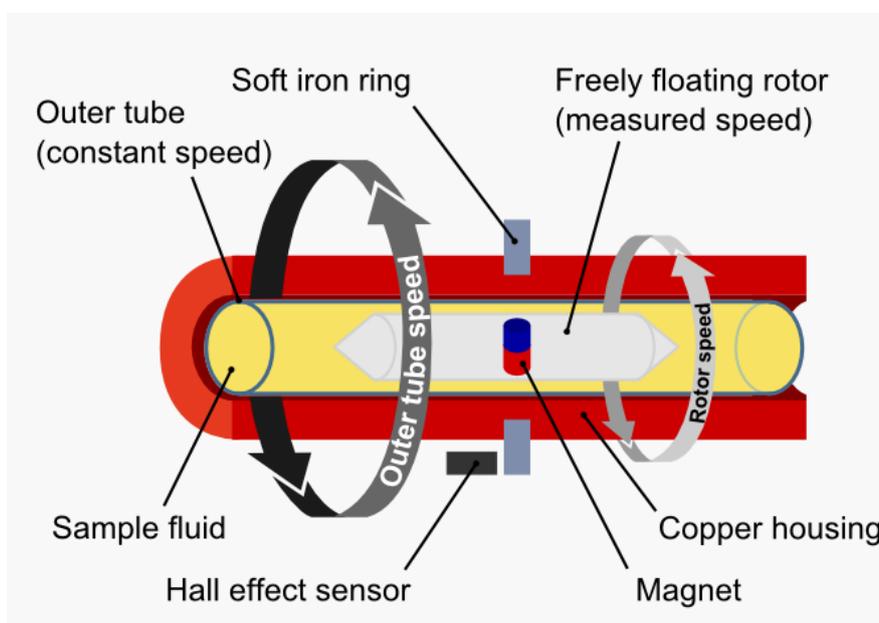
Επιπλέον, μελετήθηκαν φυσικοχημικές ιδιότητες δύο μειγμάτων, τα οποία περιείχαν diesel 1 και E σε περιεκτικότητα 450 ppm το ένα και diesel 1 και B σε περιεκτικότητα 50 ppm το άλλο, με σκοπό την καλύτερη διερεύνηση της επίδρασης του καθενός προσθέτου χωριστά στις φυσικοχημικές ιδιότητες του καυσίμου βάσης.

5.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

5.2.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΙΞΩΔΕΣ

Η μέτρηση της πυκνότητας και του ιξώδους των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στη συσκευή SVM 3000 Stabinger Viscometer της Anton Paar σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ανάλυσης ASTM D7042 για την πυκνότητα και το ιξώδες. Η συγκεκριμένη συσκευή αποτελείται από ένα περιστροφικό ιξωδόμετρο με κυλινδρική γεωμετρία, περιλαμβάνει έναν εξωτερικό σωλήνα, ο οποίος περιστρέφεται με σταθερή και γνωστή ταχύτητα και έναν εσωτερικό κύλινδρο (ρότορα) μέτρησης, ο οποίος δεν περιστρέφεται. Με τη χρήση ενός μαγνήτη, ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω στον ρότορα, παράγονται ρεύματα δινών στο χάλκινο περίβλημα. Με αυτόν το τρόπο, το ιξώδες μετράται μέσω της

ταχύτητας περιστροφής του ρότορα από την ισορροπία μεταξύ της ροπής κίνησης από τις ιξώδεις δυνάμεις και της ροπής υστέρησης των δινορευμάτων. Η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα μετράται με τη χρήση του αισθητήρα επίδρασης Hall.



Σχήμα 5-1: Σχηματική αναπαράσταση κελιού μέτρησης ιξώδους

Η μέτρηση της πυκνότητας γίνεται μέσω ενός ψηφιακού αναλυτή, ο οποίος χρησιμοποιεί ένα ταλαντούμενο σωλήνα σε σχήμα U. Το δείγμα διέρχεται μέσα από αυτόν το σωλήνα και με τη βοήθεια των συστημάτων ηλεκτρονικής διέγερσης και μέτρησης της συχνότητας γίνεται προσδιορισμός της πυκνότητας.



Σχήμα 5-2: Συσκευή μέτρησης πυκνότητας - ιξώδους Anton Paar SVM 3000 Stabinger Viscometer

Για κάθε δείγμα μετρήθηκε η πυκνότητα στους 15 °C και το κινηματικό ιξώδες στους 40 °C, ενώ για κάθε μέτρηση χρησιμοποιείθηκαν περίπου 5 ml δείγματος [8,42,43].

5.2.2 ΣΗΜΕΙΟ ΑΝΑΦΛΕΞΗΣ

Ο προσδιορισμός του σημείου ανάφλεξης έγινε σύμφωνα με την μέθοδο ASTM D93 κατά Pensky-Martens. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο το δείγμα του καυσίμου θερμαίνεται με συνεχή ανάδευση και σταθερή ταχύτητα, ενώ σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα εισάγεται στο δοχείο δοκιμαστική φλόγα. Η πειραματική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τη δοκιμή στην οποία η εισαγωγή της φλόγας επιφέρει την ανάφλεξη των ατμών του δείγματος. Η θερμοκρασία στην οποία θα συμβεί αυτό ορίζεται ως το σημείο ανάφλεξης του καυσίμου [44,45].

5.2.3 ΑΠΟΣΤΑΞΗ

Η απόσταξη των μειγμάτων έγινε σε συσκευή αυτόματης απόσταξης σε ατμοσφαιρική πίεση ADU5 της Anton Paar, σύμφωνα με την μέθοδο ASTM D 86. Για κάθε μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν 100 ml διηθημένου δείγματος. Σε κάθε απόσταξη έγινε καταγραφή του αρχικού σημείου ζέσεως, του τελικού σημείου ζέσεως, και των θερμοκρασιών στις οποίες είχε γίνει ανάκτηση ανά 5% του δείγματος και του υπολείμματος [20,46,47].

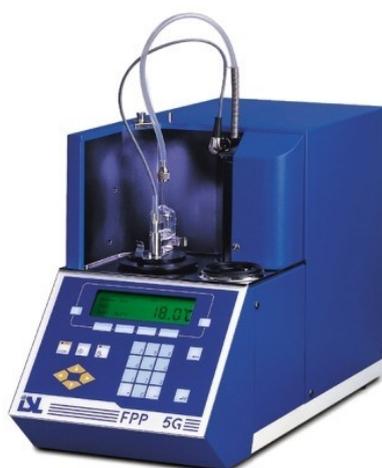


Σχήμα 5-3: Συσκευή ατμοσφαιρικής απόσταξης

5.2.4 ΣΗΜΕΙΟ ΑΠΟΦΡΑΞΗΣ ΨΥΧΡΟΥ

ΦΙΛΤΡΟΥ/POUR/CLOUD

Η μέτρηση του σημείου απόφραξης ψυχρού φίλτρου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την μέθοδο EN 116 με χρήση της συσκευής ISL FFP 5Gs. Τα βασικά μέρη της συσκευής παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-6.



Σχήμα 5-4: FFP 5G

Για την μέτρηση του CFPP χρησιμοποιήθηκαν 45 ml δείγματος. Κατά την μέτρηση το δείγμα ψύχεται με σταθερό ρυθμό. Το δείγμα αναρροφάται ανά ένα βαθμό κελσίου σε μια πιπέτα μέσα από φίλτρο. CFPP θεωρείται η θερμοκρασία στην οποία η ρόφηση και η εκρόφηση του δείγματος που διέρχεται διαμέσου του μεταλλικού φίλτρου ξεπερνά σε χρόνο τα 60 sec.



Σχήμα 5-5: Πιπέτα CFPP

Η πρώτη μέτρηση γίνεται στους 10°C, εάν το σημείο θόλωσης είναι άγνωστο ή σε θερμοκρασία κατά 5°C μεγαλύτερη από το σημείο θόλωσης, εάν είναι γνωστό. Σε περίπτωση που δεν έχει βρεθεί το σημείο απόφραξης, όταν το δείγμα φτάσει τους -20°C, η θερμοκρασία του λουτρού ψύξης πέφτει αυτόματα από τους -34°C στους -51°C. Τέλος, αν

ακόμα και όταν φτάσει στους -51°C δεν έχει βρεθεί το σημείο απόφραξης, σταματά η μέτρηση [20,48].

Το σημείο θόλωσης (cloud), δηλαδή η υψηλότερη θερμοκρασία στην οποία παρατηρείται διαχωρισμός κρυστάλλων παραφίνης, προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο ASTM D2500 με την ψύξη του καυσίμου σε ειδικές συνθήκες, ενώ το σημείο ροής (pour), η θερμοκρασία στην οποία ο διαχωρισμός της παραφίνης δεν επιτρέπει πλέον στο καύσιμο να είναι ρευστό, προσδιορίστηκε με την μέθοδο ASTM D97 [3,49,50].

5.2.5 ΔΕΙΚΤΗΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ CCI

Η σχέση υπολογισμού του δείκτη κετανίου εξαρτάται από την πυκνότητα και την καμπύλη απόσταξης του καυσίμου και δίνεται σύμφωνα με την μέθοδο ASTM D4737 από τη σχέση 5-1 [14]:

$$\begin{aligned}CCI = & 45,5 + 0,0892 \cdot T_{10N} + [0,131 + (0,901 \cdot B)] \cdot T_{50N} \\ & + [0,0523 - (0,420 \cdot B)] \cdot T_{90N} + 0,00049 \cdot [T_{10N}^2 - T_{90N}^2] \\ & + 107 \cdot B + 60 \cdot B^2\end{aligned}$$

[5-1]

Όπου:

$$T_{10N} = T_{10} - 215$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310$$

T_{10} = Θερμοκρασία ανάκτησης του 10% (ASTM D-86), $^{\circ}\text{C}$

T_{50} = Θερμοκρασία ανάκτησης του 50% (ASTM D-86), $^{\circ}\text{C}$

T_{90} = Θερμοκρασία ανάκτησης του 90% (ASTM D-86), $^{\circ}\text{C}$

$$B = \exp(-3,5 \cdot DN) - 1$$

$$DN = D - 0,85$$

D = Πυκνότητα στους 15°C , gr/cm^3

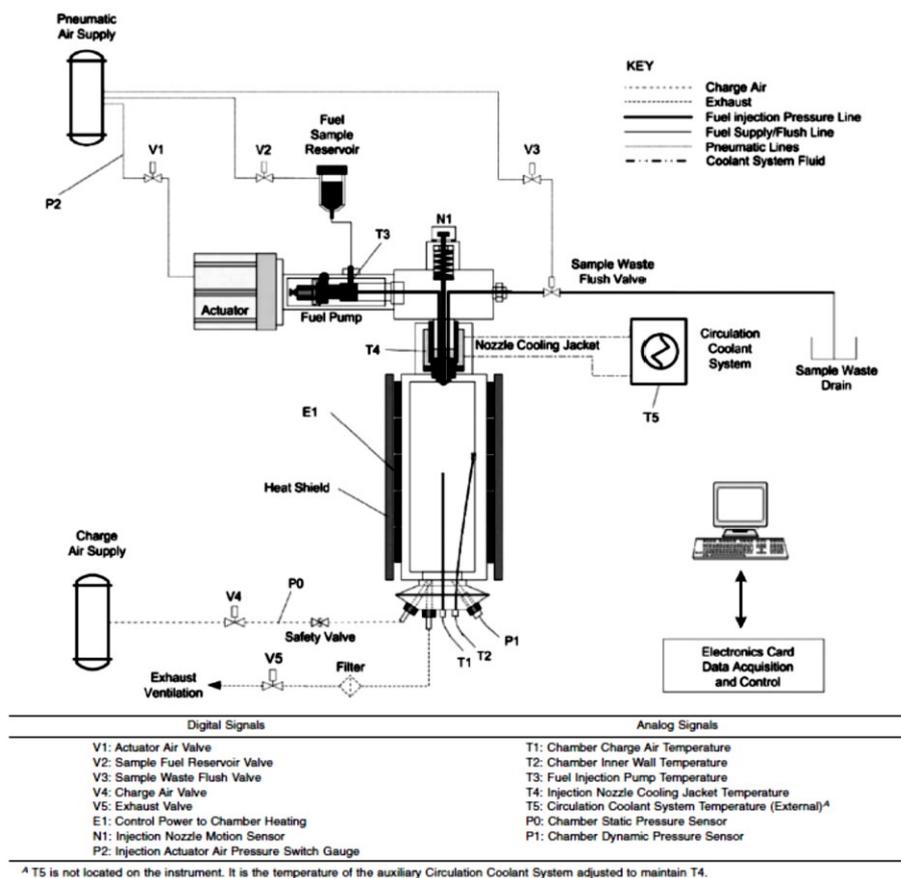
5.2.6 ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ DCN

Η μέτρηση του αριθμού κετανίου έγινε με το Fuel Ignition Tester (FIT) της Compass Instruments, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D7170-14. Ο αριθμός κετανίου υπολογίζεται με βάση την καθυστέρηση ανάφλεξης (ignition delay, ID) του καυσίμου, δηλαδή τον χρόνο σε ms από την έναρξη της έγχυσης του καυσίμου μέχρι την έναρξη της ανάφλεξης. Τα βασικά μέρη της συσκευής παρουσιάζονται στο σχήμα 4-6. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να μετρήσει καύσιμα με αριθμό κετανίου που να κυμαίνεται από 35.0 (ID= 4.89 ms) έως 59.6 (ID=2.87 ms).

Στόχος της συσκευής είναι η προσομοίωση των συνθηκών που επικρατούν στο εσωτερικό του κυλίνδρου μηχανής ντήζελ. Για να επιτευχθεί αυτό, η συσκευή διαθέτει ένα θάλαμο καθορισμένου όγκου, ο οποίος πληρώνεται με τυποποιημένο ατμοσφαιρικό αέρα σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία και το καύσιμο τοποθετείται σε ειδικό δοχείο εντός της συσκευής. Όταν η πίεση και η θερμοκρασία προσεγγίσουν τα επιθυμητά όρια, ξεκινά η έγχυση του καυσίμου. Στη συνέχεια, το καύσιμο αναφλέγεται και με την χρήση ενός αισθητήρα πίεσης υψηλού ρυθμού δειγματοληψίας καταγράφονται οι τιμές πίεσης και χρόνου. Από το αντίστοιχο διάγραμμα προσδιορίζεται η καθυστέρηση ανάφλεξης. Από τον ID προσδιορίζεται ο αριθμός κετανίου από τη σχέση 5-2:

$$DCN = \frac{150,4}{ID} + 5,3 \quad [5-2]$$

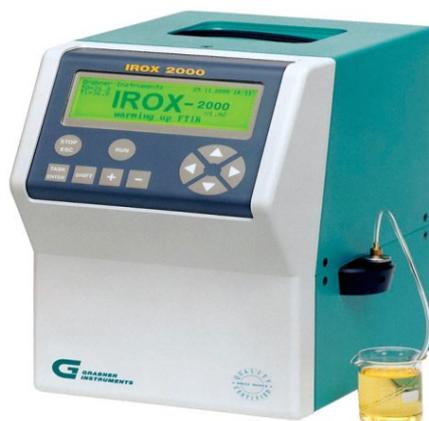
Στην παραπάνω σχέση, ως ID χρησιμοποιείται ο μέσος όρος 25 μετρήσεων ID του ίδιου δείγματος[6,20,51,52].



Σχήμα 5-6: Σχηματική αναπαράσταση FIT

5.2.7 FTIR ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

Για τον προσδιορισμό διαφόρων φυσικοχημικών ιδιοτήτων των δειγμάτων ντήζελ χρησιμοποιήθηκε η συσκευή IROX DIESEL της εταιρείας Grabner. Η συσκευή χρησιμοποιεί παντεταρισμένα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία βασίζονται στην ανάλυση κατά συστάδες. Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτός ο προσδιορισμός βασικών ιδιοτήτων του ντήζελ, όπως ο αριθμός και ο δείκτης κετανίου, η περιεκτικότητα σε βελτιωτικά, οι ολικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες και το ποσοστό του βιοντήζελ (FAME), που τυχόν περιέχεται στο δείγμα, με βάση το πρότυπο για το FAME EN14078 [53,54].



Σχήμα 5-7: IROX DIESEL

5.2.8 ΟΞΕΙΔΩΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ

Η οξειδωτική σταθερότητα των δειγμάτων μετρήθηκε με την μέθοδο PetroOxy με βάση το πρότυπο ASTM D7545. Το δείγμα θερμαίνεται στους 140 °C σε πίεση 700 kPa, ώστε να οξειδωθεί. Το χρονικό διάστημα από την αρχή του πειράματος μέχρι να παρατηρηθεί πτώση πίεσης 10% σε σχέση με τη μέγιστη πίεση ορίζεται ως περίοδος επαγωγής [20,55,56].



Σχήμα 5-8: PetroOxy

5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

5.3.1 ΔΙΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΝΤΗΖΕΛ

Η πειραματική καύση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση δικύλινδρου κινητήρα ντήζελ άμεσης εγχύσεως και φυσικής αναπνοής με σχέση συμπίεσης 18,5:1 της εταιρείας Lister Petter, του 2008. Ο συγκεκριμένος κινητήρας αποδίδει ισχύ $7,5 \text{ kW}_m$ ή $10,1 \text{ hp}$, στις 1500 rpm και συνδέεται με ηλεκτρική γεννήτρια της ίδιας εταιρείας με ονομαστική ισχύ $5,6 \text{ kW}_e$ και με συσκευή ρύθμισης φορτίου Avtron K490 με ενσωματωμένες αντιστάσεις για τον έλεγχο της παραγόμενης, από την γεννήτρια, ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς της φόρτισης μπορεί να φτάσει μέχρι τα 10 kW και τα βήματα που υποστηρίζονται είναι $0,25$, $0,5$, 1 , 2 και 3 kW . Επειδή βοηθητικά στοιχεία του ρυθμιστή φορτίου απαιτούν τροφοδοσία 110 V , η συσκευή ρύθμισης φορτίου συνδέεται με το δίκτυο μέσω μετασχηματιστή [20,57].



Σχήμα 5-9: Κινητήρας Ντήζελ και γεννήτρια Lister Pitter



Σχήμα 5-10: Συσκευή ρύθμισης φορτίου Avtron K490 (αριστερά) και μετασχηματιστής(δεξιά)

5.3.2 ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Για την μέτρηση των εκπομπών καυσαερίων από τον κινητήρα χρησιμοποιήθηκε αναλυτής καυσαερίων Quintox Flue Gas Analyser της Kane 9206. Ο αναλυτής συνδέεται μέσω σωλήνα με την έξοδο των καυσαερίων του κινητήρα και προσδιορίζει τις εκπομπές σε CO₂, HC, NO_x, O₂, CO, SO₂ και H₂S, ενώ μετράται και η θερμοκρασία των καυσαερίων με τη χρήση ενός θερμοστοιχείου που βρίσκεται μετά την πολλαπλή εξαγωγή του κινητήρα.

Το είδος και η ποσότητα των ρύπων ταυτοποιούνται από τον αναλυτή με την βοήθεια ενός ανιχνευτή καύσης με αποσπώμενο άξονα από ανοξείδωτο χάλυβα, ο οποίος διαθέτει θερμοστοιχεία και ηλεκτροχημικούς αισθητήρες υπέρυθρης τεχνολογίας. Τέλος, στον αναλυτή έχουν τοποθετηθεί παγίδες νερού και ένας αποξηραντήρας, ώστε να ελατώνονται τα ποσοστά υγρασίας στα καυσαέρια [4,15,50]. Στον Πίνακα 5-4 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αναλυτή [51].

Πίνακας 5-4: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρων KANE9206

Αισθητήρας	Εύρος	Ακρίβεια	
HC	0-5000 ppm	-	±5%
CO ₂	0-20%	-	±5%
CO	0-10000 ppm	-	±5%
NO (high range)	0-1000 ppm	<100 ppm	±5 ppm
		100-1000 ppm	±5%
		1000-5000 ppm	±10%
NO (low range)	0-100 ppm	<100 ppm	±5 ppm
		100-300 ppm	±10%
NO ₂	0-100 ppm	<100 ppm	±5 ppm
		100-1000 ppm	±10%



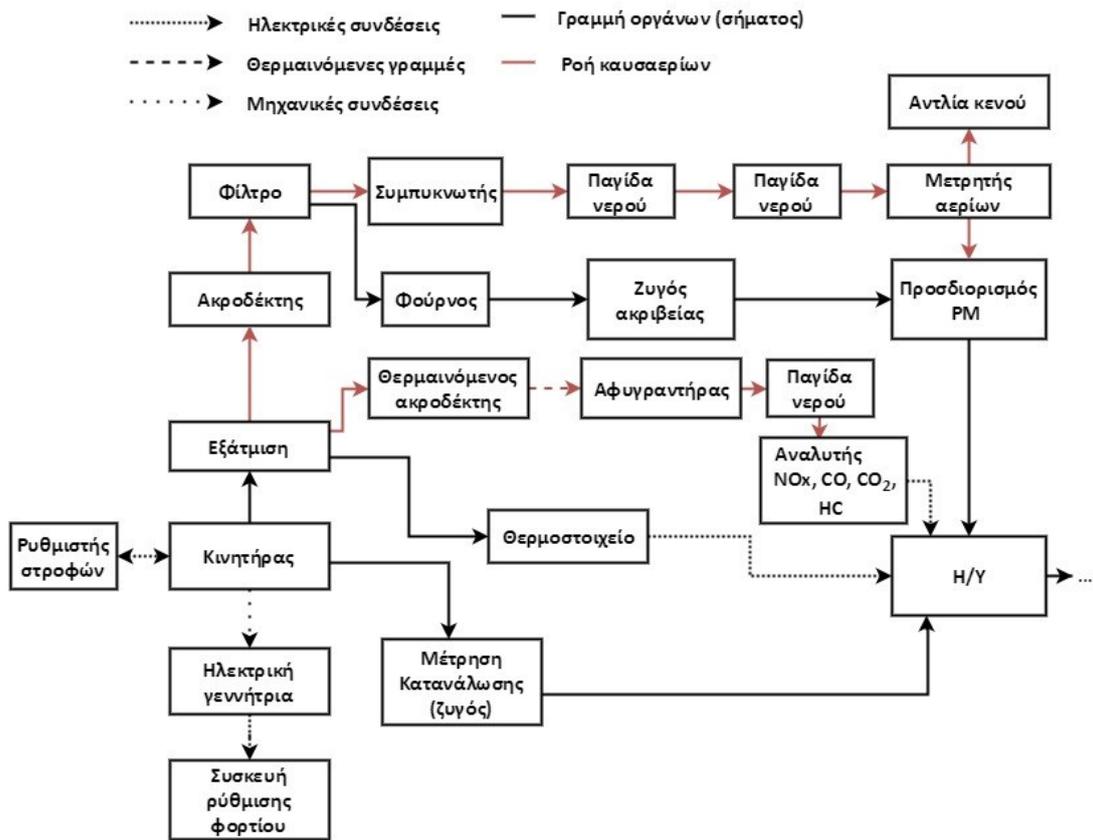
Σχήμα 5-11: Αναλυτής Καυσαερίων KANE9206 Quintox (δεξιά) και ανιχνευτής καύσης (αριστερά).

5.3.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η μέτρηση των σωματιδίων πραγματοποιείται μέσω μίας ειδικά διαμορφωμένης διάταξης που διαθέτει το εργαστήριο. Συγκεκριμένα, ένα φίλτρο κατακράτησης σωματιδίων με διάμετρο 70 mm τοποθετείται στην έξοδο των καυσαερίων του κινητήρα και με την χρήση αντλίας αναρροφώνται τα καυσαέρια κατά τη διάρκεια της μέτρησης, τα οποία οδηγούνται σε ένα μεταλλικό συμπυκνωτήρα, με σκοπό την συγκράτηση της υγρασίας των καυσαερίων. Στη συνέχεια, τα καυσαέρια οδηγούνται σε έναν μετρητή Ritter για τη μέτρηση του όγκου που αναρροφήθηκε. Τα φίλτρα τοποθετούνται σε φούρνο πριν και μετά από κάθε μέτρηση, ώστε ελεύθερα υγρασίας να ζυγιστούν και να γίνει ο προσδιορισμός της μάζας των σωματιδίων που κατακρατήθηκε.



Σχήμα 5-12: Διάταξη μέτρησης σωματιδίων του εργαστηρίου



Σχήμα 5-1: Διάγραμμα ροής διάταξης κινητήρα ντήζελ

6 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

6.1 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΒΑΣΗΣ

Στον Πίνακα 6-1 παρουσιάζονται οι φυσικοχημικές ιδιότητες των τριών καυσίμων βάσης που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 6-1: Φυσικοχημικές Ιδιότητες Καυσίμων Βάσης

<i>Ιδιότητα</i>		<i>Μέθοδος</i>	<i>Diesel 1</i>	<i>Diesel 2</i>	<i>Diesel 3</i>
Πυκνότητα (15° C)	g/ml	ASTM D7042	0.8421	0.8402	0.8249
Ιξώδες (40° C)	cSt	ASTM D7042	3.3225	3.0899	2.5807
CFPP	°C	ASTM D93	-3	-5	-8
Pour	°C	ASTM D97	-3	-12	-12
Cloud	°C	ASTM D2500	-14	-6	-7

Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες	vol%	FTIR	19.3	26.6	20.6
Πολυαρωματικοί Υδρογονάνθρακες	vol%	FTIR	1.7	3.3	3.6
FAME	vol %	EN 14078	6.8	0	0
Αριθμός Κετανίου	-	ASTM D7170-14	51.7	52,3	53,4
Δείκτης Κετανίου	-	ASTM D4737	54.7	54.3	56.3
Οξειδωτική Σταθερότητα	h	ASTM D7545	1.25	2.60	2.42
Flash	°C	ASTM D93	65	62	61

Από τον Πίνακα 6-1 και τον Πίνακα 1-1 φαίνεται ότι και τα τρία καύσιμα βάσης είναι εντός προδιαγραφών κατά EN 590:2013.

6.2 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Στους Πίνακες 6-2,6-3 και 6-4 παρουσιάζονται οι πυκνότητες των μειγμάτων συγκριτικά με το εκάστοτε καύσιμο βάσης για το diesel 1, diesel 2 και diesel 3 αντίστοιχα.

Πίνακας 6-2: Πυκνότητα μειγμάτων με βάση το diesel 1

<u>Καύσιμο</u>	<u>Πυκνότητα g/cm³</u>
D1	0,8421
D1-E450/B50	0,8421
D1-E900/B100	0,8422
D1-E4500	0,8424
D1-Opt5000	0,8421
D1-Ωm1700	0,8420
D1-E450	0,8421
D1-B50	0,8421

Πίνακας 6-3: Πυκνότητα μειγμάτων με βάση το diesel 2

<u>Καύσιμο</u>	<u>Πυκνότητα g/cm³</u>
D2	0,8402
D2-E450/B50	0,8402
D2-E4500	0,8403
D2-Opt5000	0,8392
D2-Ωm1700	0,8400

Πίνακας 6-4: Πυκνότητα μειγμάτων με βάση το diesel 3

<u>Καύσιμο</u>	<u>Πυκνότητα g/cm³</u>
D3	0,8249
D3-E450/B50	0,8253
D3-E4500	0,8254
D3-Opt5000	0,8268
D3-Ωm1700	0,8248

Όπως φαίνεται από τους πίνακες των μετρήσεων, η πυκνότητα των καυσίμων δεν επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη βελτιωτικών, καθώς οι διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο. Εξάιρεση σε αυτό αποτελεί το πρόσθετο Opt σε περιεκτικότητα 5000 ppm στο diesel 2 και το diesel 3, όπου φαίνεται να μεταβάλλει την πυκνότητα του αρχικού καυσίμου.

6.3 ΙΞΩΔΕΣ

Στους Πίνακες 6-5,6-6 και 6-7 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για το ιξώδες των μειγμάτων σε σχέση με το ιξώδες των καθαρών καυσίμων.

Πίνακας 6-5: Ιξώδες μειγμάτων με βάση το diesel 1

<u>Καύσιμο</u>	<u>Ιξώδες cSt</u>
D1	3,3225
D1-E450/B50	3,3275
D1-E900/B100	3,3216

D1-E4500	3,3081
D1-Opt5000	3,2937
D1-Ωm1700	3,3256
D1-E450	3,3229
D1-B50	3,3258

Πίνακας 6-6: Ιξώδες μειγμάτων με βάση το diesel 2

<u>Καύσιμο</u>	<u>Ιξώδες cSt</u>
D2	3,0899
D2-E450/B50	3,0884
D2-E4500	3,0800
D2-Opt5000	3,0514
D2-Ωm1700	3,0921

Πίνακας 6-7: Ιξώδες μειγμάτων με βάση το diesel 3

<u>Καύσιμο</u>	<u>Ιξώδες cSt</u>
D3	2,5807
D3-E450/B50	2,5921
D3-E4500	2,5731
D3-Opt5000	2,6466
D3-Ωm1700	2,5853

Όπως φαίνεται από τους πίνακες των αποτελεσμάτων, αλλά όπως επιβεβαιώνεται και από βιβλιογραφικές αναφορές, η προσθήκη βελτιωτικών στο diesel προκαλεί σχετικά μικρές αυξομειώσεις στο ιξώδες του εκάστοτε καυσίμου βάσης [60]. Είναι δυνατό να παρατηρηθεί ότι στα diesel 1 και 2, των οποίων τα αρχικά ιξώδη έχουν μικρή απόκλιση στην τιμή, η προσθήκη βελτιωτικών εμφανίζει την ίδια, περίπου, συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, η προσθήκη E450/B50 στα ανωτέρω καύσιμα διατηρεί το ιξώδες οριακά σταθερό. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται και από την προσθήκη Ωm1700, ενώ τόσο το E4500, όσο και το Opt5000 προκαλούν σχετική μείωση του ιξώδους.

Αντίθετα, η προσθήκη των περισσότερων βελτιωτικών επιφέρει διαφορετικά αποτελέσματα στο diesel 3, προκαλώντας σχετική αύξηση του ιξώδους του. Εξαίρεση σε αυτό αποτελεί το E4500, το οποίο σε όλα τα καύσιμα προκαλεί σχετική μείωση του ιξώδους. Η αύξηση που παρατηρείται ενδεχομένως οφείλεται στην διαφορά που εμφανίζει το ιξώδες του diesel 3 σε σχέση με των δύο άλλων, το οποίο είναι εμφανώς μικρότερο.

Πειραματικές μελέτες αναφέρουν ότι η προσθήκη βελτιωτικών στο diesel έχει την τάση να μεταβάλλει το ιξώδες εντός του εύρους προδιαγραφών [61]. Κατ' αυτόν τον τρόπο ενδεχομένως εξηγούνται τα διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ των τριών καυσίμων, καθώς τα diesel 1 και 2 έχουν ιξώδες κοντά στον μέσο όρο των επιτρεπτών ορίων, ενώ το diesel 3 πιο κοντά στο κάτω όριο.

6.4 ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΤΑΝΙΟΥ

Στους Πίνακες 6-8,6-9 και 6-10 παρουσιάζονται οι μετρήσεις για τον αριθμό κετανίου των μειγμάτων για τα τρία καύσιμα με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες σε πρόσθετα και οι αποκλίσεις τους.

Πίνακας 6-8: Αριθμός Κετανίου μειγμάτων με βάση το diesel 1

<u>Καύσιμο</u>	<u>Αριθμός Κετανίου</u>	<u>Απόλυτη διαφορά</u>	<u>Μεταβολή %</u>
D1	51,7	-	-
D1-E450/B50	53,8	2,1	4,1%
D1-E900/B100	54,9	3,22	6,2%
D1-E4500	57,9	6,17	11,9%
D1-Opt5000	59,2	7,48	14,5%
D1-Ωm1700	53,4	1,63	3,2%
D1-E450	54,3	2,6	5,0%
D1-B50	51,7	0	4,1%

Πίνακας 6-9: Αριθμός Κετανίου μειγμάτων με βάση το diesel 2

<u>Καύσιμο</u>	<u>Αριθμός Κετανίου</u>	<u>Απόλυτη διαφορά</u>	<u>Μεταβολή % από το καύσιμο βάσης</u>
D2	52,3	-	-
D2-E450/B50	53,1	0,75	1,4%
D2-E4500	56,5	4,15	7,9%
D2-Opt5000	58,1	5,77	11,0%
D2-Ωm1700	54,6	2,3	4,4%

Πίνακας 6-10: Αριθμός Κετανίου μειγμάτων με βάση το diesel 3

<u>Καύσιμο</u>	<u>Αριθμός Κετανίου</u>	<u>Απόλυτη διαφορά</u>	<u>Μεταβολή % από το καύσιμο βάσης</u>
D3	53,4	-	-
D3-E450/B50	54,5	1,1	2,1%
D3-E4500	58,6	5,25	9,8%
D3-Opt5000	61,1	7,68	14,4%
D3-Ωm1700	54,6	1,25	2,3%

Από τους πίνακες για τους αριθμούς κετανίων των καυσίμων με τα πρόσθετα, παρατηρείται ότι η αναλογία προσθέτων E450/B50 αυξάνει τον αριθμό κετανίου για το diesel 1 κατά 2,1, 0,75 για το diesel 2 και 1,1 για το diesel 3, η κατά μέσο όρο αύξηση που επιφέρει στα τρία καύσιμα είναι 1,3. Η αναλογία E900/B100 αυξάνει τον αριθμό κετανίου του diesel 1 κατά 3,22, ενώ το πρόσθετο E4500, 6,17 για το diesel 1, 4,15 για το diesel 2 και 5,25 για το diesel 3 και επιφέρει κατά μέσο όρο αύξηση στα τρία καύσιμα 5,19 μονάδες. Το πρόσθετο Opt5000 αυξάνει τον αριθμό κετανίου του diesel 1 7,48 μονάδες, του diesel 2 5,77 και του diesel 3 7,68, η κατά μέσο όρο αύξηση για τα τρία καύσιμα βάσης είναι 6,98. Το πρόσθετο Ωm1700 οδηγεί σε άνοδο του αριθμού κετανίου κατά 1,63 για το diesel 1, 2,3 για το diesel 2 και 1,25 για το diesel 3, κατά μέσο όρο για τα τρία καύσιμα προκαλεί αύξηση του αριθμού κετανίου κατά 1,73. Τέλος το E450 στο diesel 1 επιφέρει αύξηση κατά 2,6, ενώ το B50 δεν επηρεάζει τον αριθμό κετανίου του diesel 1, όπως ήταν αναμενόμενο.

Από τα τρία καύσιμα βάσης αυτό που επηρεάζεται ποσοστιαία περισσότερο από την προσθήκη βελτιωτικών είναι το diesel 1, το οποίο έχει το μικρότερο αριθμό κετανίου. Παράλληλα, η μεγαλύτερη αύξηση του αριθμού

κετανίου και στα τρία καύσιμα επιτυγχάνεται με την προσθήκη του Orp σε περιεκτικότητα 5000ppm και του E σε περιεκτικότητα 4500 ppm, ενώ συνολικά διακρίνεται μία τάση αύξησης του αριθμού κετανίου με την αύξηση της περιεκτικότητας των προσθέτων στο καύσιμο. Τέλος, κάθε αναλογία προσθέτων ακολουθεί παρόμοια συμπεριφορά ως προς την μεταβολή του αριθμού κετανίου στο κάθε καύσιμο βάσης.

6.5 ΑΠΟΣΤΑΞΗ

Στον Πίνακα 6-11 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόσταξης των τριών καυσίμων βάσης και στον Πίνακα 6-12 φαίνονται συγκριτικά οι καμπύλες απόσταξης δύο μειγμάτων του diesel 1 με την χρήση των προσθέτων E σε περιεκτικότητα 450 ppm και B 50 ppm στο ένα και E σε περιεκτικότητα 4500 ppm στο άλλο, σε σχέση με το καθαρό diesel 1. Παρακάτω παρατίθενται και τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Πίνακας 6-11: Καμπύλες απόσταξης καυσίμων βάσης

Ανάκτηση (%)	Θερμοκρασία °C		
	DIESEL 1	DIESEL 2	DIESEL 3
IBP	176,4	175,5	171,0
5	215,8	213,3	192,0
10	231,7	225,9	200,0
15	242,9	236,4	209,0
20	248,0	244,8	218,0
25	254,3	252,7	228,0

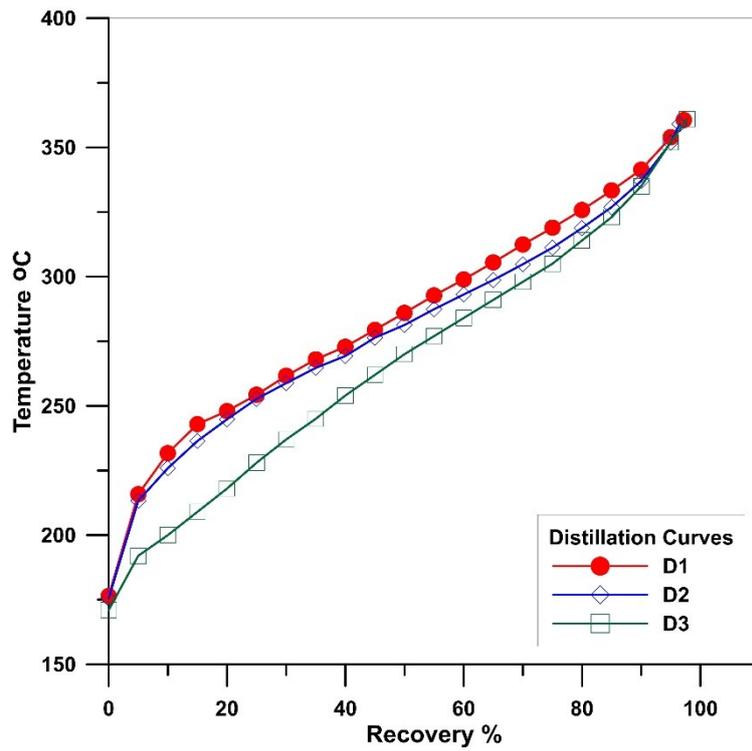
30	261,6	258,8	237,0
35	268,0	264,7	245,0
40	272,9	269,3	254,0
45	279,4	276,4	262,0
50	286,0	281,3	270,0
55	292,7	287,4	277,0
60	298,9	293,1	284,0
65	305,5	298,7	291,0
70	312,4	304,8	298,0
75	318,9	311,2	305,0
80	325,8	318,8	314,0
85	333,3	326,9	323,0
90	341,4	337,0	335,0
95	353,9	351,8	352,0
FBP	360,6	359,0	361,0
Ανάκτηση(%)	99,6	98,1	99,1
Υπόλειμμα(%)	0,4	1,9	0,6

Πίνακας 6-12: Καμπύλες απόσταξης του diesel 1 με προσθήκη βελτιωτικών

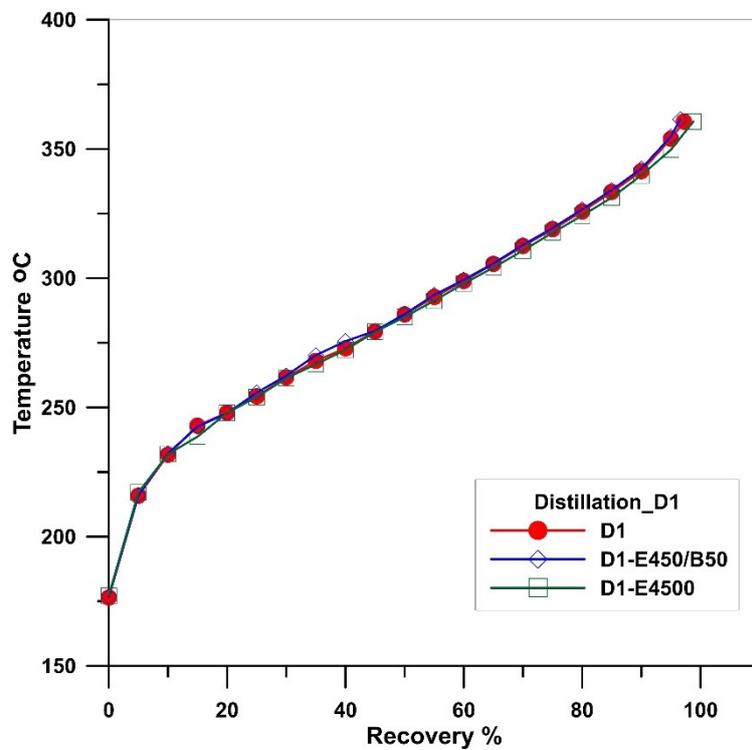
Ανάκτηση (%)	Θερμοκρασία °C		
	DIESEL 1	D1-E450/B50	D1-E4500
IBP	176,4	176,8	177,2
5	215,8	216,1	217,1

10	231,7	232,2	231,9
15	242,9	242,6	238,7
20	248,0	247,7	247,9
25	254,3	255,7	254,0
30	261,6	262,3	261,3
35	268,0	270,2	266,7
40	272,9	275,6	272,3
45	279,4	279,6	279,2
50	286,0	286,1	285,0
55	292,7	293,5	291,3
60	298,9	299,4	297,9
65	305,5	305,7	304,1
70	312,4	312,9	310,7
75	318,9	319,4	317,6
80	325,8	326,6	324,2
85	333,3	334,1	331,2
90	341,4	342,4	339,8
95	353,9	354,8	349,7
FBP	360,6	361,5	360,6
Ανάκτηση(%)	99,6	99,3	99,1
Υπόλειμμα(%)	0,4	0,6	0,5

Διάγραμμα 6-1: Καμπύλη απόσταξης καυσίμων βάσης



Διάγραμμα 6-2: Καμπύλες απόσταξης για μείγματα του diesel 1 με προσθέτα



Από τους πίνακες και από τα αντίστοιχα διαγράμματα για τα καύσιμα με τις αναλογίες προσθέτων επιβεβαιώνεται το ήδη γνωστό από την βιβλιογραφία γεγονός ότι η προσθήκη βελτιωτικών στο ντήζελ δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την καμπύλη απόσταξης του, εφόσον, όπως φαίνεται, οι αποκλίσεις είναι οριακές και πιθανώς οφείλονται στην επαναληψιμότητα της μεθόδου. Συνεπώς, λόγω αυτού ο δείκτης κετανίου δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως πρόβλεψη του αριθμού κετανίου, όταν έχουν προστεθεί βελτιωτικά στο καύσιμο. Ενδεικτικά υπολογίστηκαν, με βάση τις καμπύλες απόσταξης, ορισμένοι δείκτες κετανίου καυσίμων diesel 1 με πρόσθετα, οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-13.

Πίνακας 6-13: Δείκτες κετανίου του diesel 1 με προσθήκη βελτιωτικών

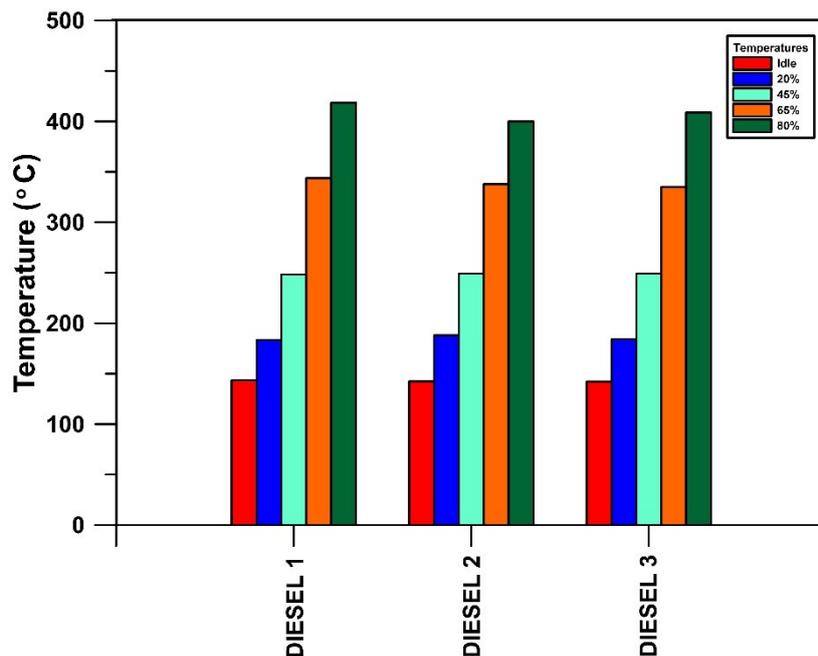
Καύσιμο	Δείκτης Κετανίου
Diesel 1	54,7
D1-E450/B50	54,8
D1E4500	54,4

7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΝΤΗΖΕΛ

7.1 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Στο Διάγραμμα 7-1 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των καυσαερίων των τριών καυσίμων βάσης, οι οποίες μετρήθηκαν με τη χρήση ενός θερμοστοιχείου στην πολλαπλή εξαγωγή του κινητήρα. Οι θερμοκρασίες είναι ενδεικτικές για τις θερμοκρασιακές συνθήκες που επικρατούν μέσα στο θάλαμο καύσης, οι οποίες επηρεάζουν τις εκπομπές καυσαερίων. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, η θερμοκρασία των καυσαερίων των τριών καυσίμων βάσης είναι παραπλήσια σε όλα τα φορτία. Στους Πίνακες 7-1, 7-2 και 7-3 εμφανίζονται οι θερμοκρασίες καυσαερίων των καυσίμων με τις αναλογίες προσθέτων για το diesel 1, 2 και 3 αντίστοιχα.

Διάγραμμα 7-1: Θερμοκρασίες καυσαερίων καυσίμων βάσης



Πίνακας 7-1: Θερμοκρασίες καυσαερίων και % απόκλιση από Diesel 1

Θερμοκρασίες καυσαερίων και % απόκλιση από Diesel 1										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 1	143	-	183	-	248	-	344	-	419	-
D1-E450/B50	143	0%	183	0%	248	0%	344	0%	419	0%
D1-E900/B100	142	-1%	184	1%	250	0%	338	-2%	413	-1%
D1-E4500	142	0%	187	2%	249	-1%	339	-1%	407	-3%
D1-Opt5000	140	-2%	190	4%	252	2%	339	-1%	413	-1%
D1-Ωm1700	140	-2%	183	0%	244	-2%	334	-3%	407	-3%

Πίνακας 7 -2: Θερμοκρασίες καυσαερίων και % απόκλιση από Diesel 2

Θερμοκρασίες καυσαερίων και % απόκλιση από Diesel 2										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 2	142	-	188	-	249	-	338	-	400,0	-
D2-E450/B50	140	-2%	184	-2%	246	-1%	341	1%	404	1%
D2-E4500	144	1%	185	-2%	242	-3%	332	-2%	405	1%
D2-Opt5000	141	-1%	191	1%	246	-1%	330	-2%	405	1%
D2-Ωm1700	152	7%	184	-2%	243	-2%	331	-2%	402	0%

Πίνακας 7-3: Θερμοκρασίες καυσαερίων και % απόκλιση από Diesel 3

Θερμοκρασίες καυσαερίων και % απόκλιση από Diesel 3										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 3	142	-	184	-	249	-	335	-	409	-
D3-E450/B50	151	6%	188	2%	249	0%	339	1%	411	1%
D3-E4500	140	-2%	183	-1%	242	-3%	327	-3%	400	-2%
D3-Opt5000	139	-2%	178	-4%	247	-1%	334	0%	411	0%
D3-Ωm1700	141	-1%	184	0%	244	-2%	334	0%	409	-2%

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που παρατίθενται στους συγκεκριμένους πίνακες είναι δυνατό να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι θερμοκρασίες των καυσαερίων δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από την προσθήκη βελτιωτικών στο καύσιμο, καθώς οι αποκλίσεις που καταγράφηκαν είναι οριακές σε όλα τα καύσιμα και φορτία, σε όλες τις αναλογίες προσθέτων. Και συγκεκριμένα, κυμαίνονται από -4% έως 6% για το diesel 3, από -2% έως 7% για το diesel 2 και -3% έως 4% για το diesel 1. Παράλληλα, οι θερμοκρασίες των τριών καυσίμων βάσης είναι αρκετά παραπλήσιες με μικρές διαφοροποιήσεις του diesel 1, οι οποίες είναι αναμενόμενες, εφόσον περιέχει 6,8% FAME [62].

7.2 ΛΟΓΟΣ ΑΕΡΑ/ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, ο λόγος αέρα/καυσίμου εντός του θαλάμου καύσης του κινητήρα ντίζελ είναι μία κρίσιμη παράμετρος, όσον αφορά στις εκπομπές του κινητήρα. Η μαζική παροχή του καυσίμου υπολογίστηκε με βάση τις καταναλώσεις, οι οποίες μετρήθηκαν κατά

την διάρκεια των πειραμάτων ,ενώ ο υπολογισμός της μαζικής παροχής του αέρα που αναρροφάται σε κάθε κύκλο λειτουργίας έγινε με βάση τις σχέσεις που αναγράφονται παρακάτω και με δεδομένο ότι ο κινητήρας είναι δικύλινδρος με bore=86mm, stroke=80mm και λειτουργεί στις 1500 rpm.

$$V_{\pi\lambda} = \frac{bore^2}{4} * \pi * stroke \quad [7-1]$$

$$V_{\pi\lambda.total} = 2 * V_{\pi\lambda} \quad [7-2]$$

$$\dot{V} = V_{\pi\lambda} * \frac{RPM}{2} \quad [7-3]$$

$$\dot{V}_{air} = \dot{V} * 0.9 \quad [7-4]$$

$$\dot{m}_{air} = \rho * \dot{V}_{air} \quad [7-5]$$

Όπου:

$V_{\pi\lambda}$: ο διαθέσιμος όγκος του θαλάμου καύσης

$V_{\pi\lambda.total}$: ο διαθέσιμος όγκος του θαλάμου καύσης για τους δύο κύλινδρους του κινητήρα

\dot{V} : η ογκομετρική παροχή αέρα που εισέρχεται στον κύλινδρο κάθε RPM/2

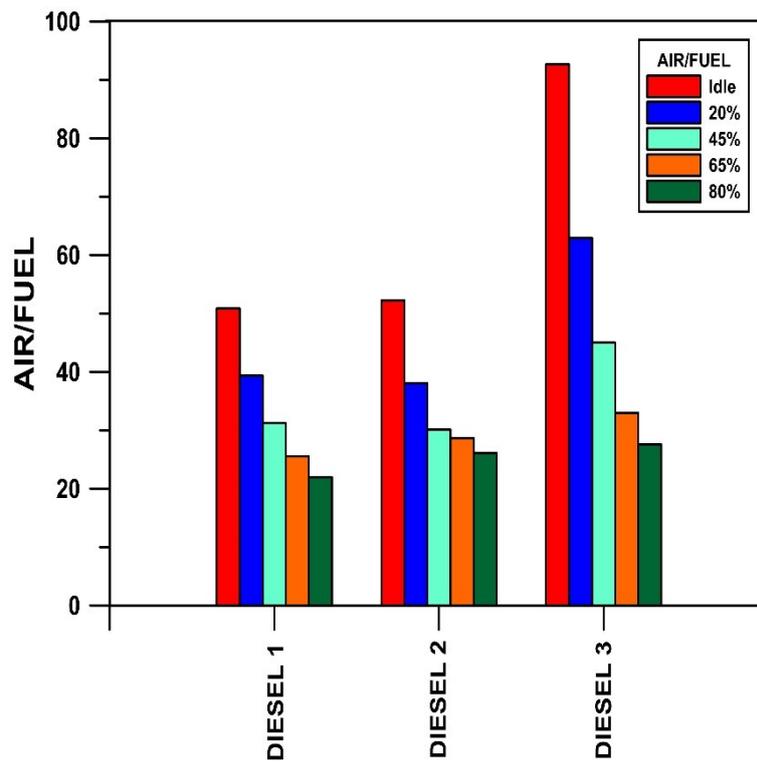
\dot{V}_{air} : η πραγματική παροχή αέρα που εισέρχεται στον κύλινδρο θεωρώντας συντελεστή απωλειών 0.9

\dot{m}_{air} = η μαζική παροχή αέρα που εισέρχεται στον κύλινδρο

Τελικά : $\dot{m}_{air} = 752.4 \text{ g/min}$.

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίστηκε για κάθε καύσιμο και τις αναλογίες προσθέτων του, για όλα τα φορτία, ο λόγος αέρα/καυσίμου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 7-4 για τα καύσιμα με βάση το diesel 1, 7-5 για τα καύσιμα με βάση το diesel 2 και 7-6 για τα καύσιμα με βάση το diesel 3 και τα αντίστοιχα διαγράμματα 7-3, 7-4 και 7-5. Στο Διάγραμμα 7-2 φαίνεται συγκριτικά ο λόγος αέρα καυσίμου για τα τρία καύσιμα βάσης σε όλα τα φορτία λειτουργίας του κινητήρα.

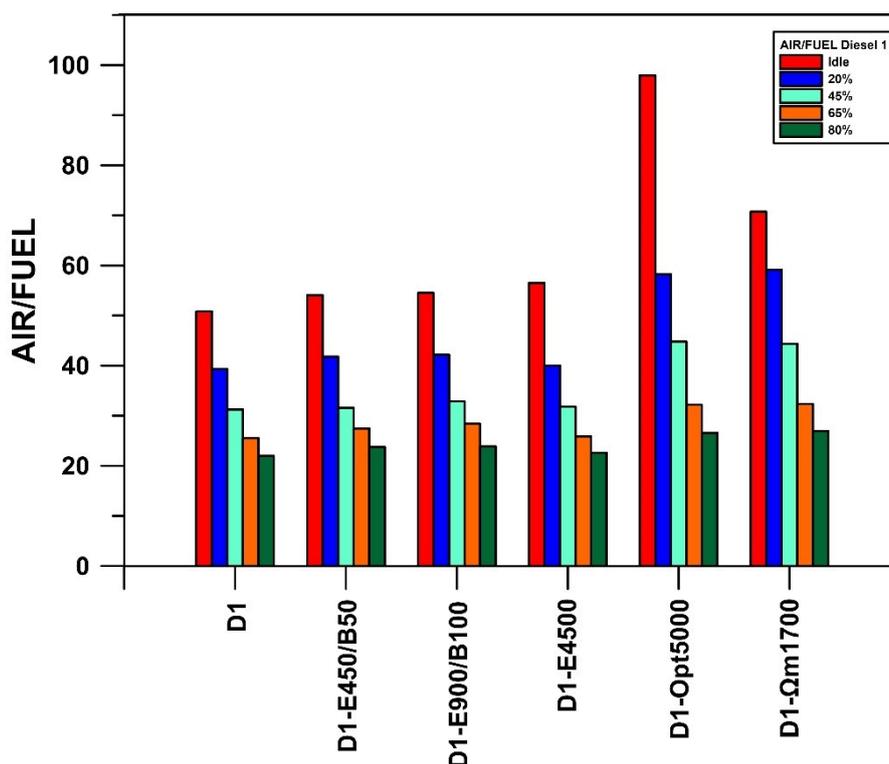
Διάγραμμα 7-2: Λόγος αέρα/καυσίμου καυσίμων βάσης



Πίνακας 7-4: Λόγος αέρα/ καυσίμου και % απόκλιση από το diesel 1

Λόγος A/F και % απόκλιση από Diesel 1										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 1	50,84	-	39,35	-	31,25	-	25,56	-	21,97	-
D1-E450/B50	54,05	6%	41,80	6%	31,56	1%	27,46	7%	23,77	8%
D1-E900/B100	54,52	7%	42,17	7%	32,88	5%	28,40	11%	23,87	9%
D1-E4500	56,49	11%	40,02	2%	31,83	2%	25,87	1%	22,61	3%
D1-Opt5000	97,97	93%	58,24	48%	44,79	43%	32,21	26%	26,57	21%
D1-Ωm1700	70,71	39%	59,15	50%	44,36	42%	32,38	27%	26,95	23%

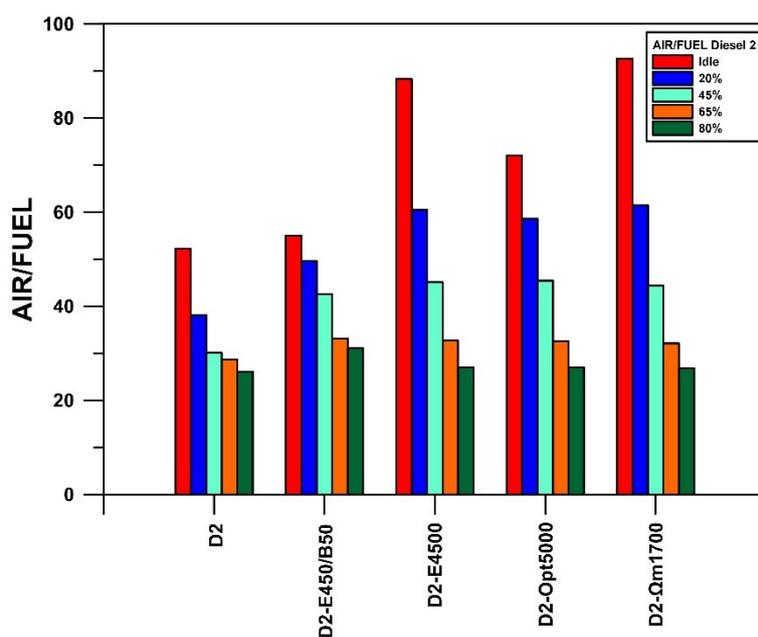
Διάγραμμα 7-3: Λόγος αέρα/καυσίμου προσθέτων με βάση το diesel 1



Πίνακας 7-5: Λόγος αέρα/ καυσίμου και % απόκλιση από το diesel 2

Λόγος A/F και % απόκλιση από Diesel 2										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 2	52,25	-	38,08	-	30,10	-	28,67	-	26,09	-
D2-E450/B50	55,00	5%	49,63	30%	42,56	41%	33,12	15%	31,14	19%
D2-E4500	88,31	69%	60,48	59%	45,11	50%	32,71	14%	27,03	4%
D2-Opt5000	72,07	38%	58,60	54%	45,43	51%	32,60	14%	26,99	3%
D2-Ωm1700	92,66	77%	61,47	61%	44,36	47%	32,10	12%	26,83	3%

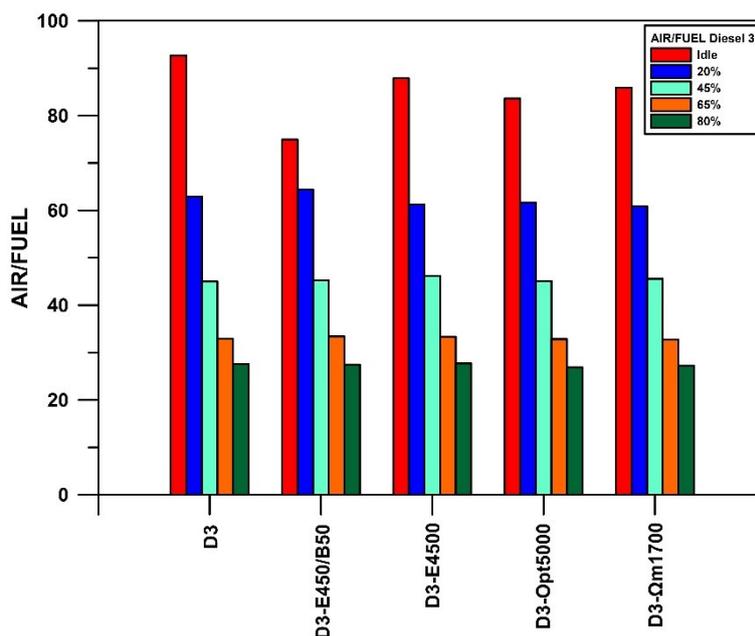
Διάγραμμα 7-4: Λόγος αέρα/καυσίμου προσθέτων με βάση το diesel 2



Πίνακας 7-6: Λόγος αέρα/ καυσίμου και % απόκλιση από το diesel 3

Λόγος A/F και % απόκλιση από Diesel 3										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 3	92,66	-	62,91	-	45,00	-	32,94	-	27,58	-
D3-E450/B50	74,94	-19%	64,42	2%	45,22	0%	33,41	1%	27,46	0%
D3-E4500	87,90	-5%	61,27	-3%	46,22	3%	33,35	1%	27,70	0%
D3-Opt5000	83,60	-10%	61,67	-2%	45,11	0%	32,83	0%	26,91	-2%
D3-Ωm1700	85,89	-7%	60,87	-3%	45,54	1%	32,77	-1%	27,26	-1%

Διάγραμμα 7-5: Λόγος αέρα/καυσίμου προσθέτων με βάση το diesel 3



Με βάση τους πίνακες για τα τρία καύσιμα φαίνεται ότι το πρόσθετο E4500/B50 αυξάνει το λόγο αέρα καυσίμου κατά 5,84% μέσο όρο των φορτίων λειτουργίας για το diesel 1 και 22% για το diesel 2, ενώ μειώνει κατά μέσο όρο κατά 3,05% για το diesel 3. Το πρόσθετο E4500 αυξάνει το λόγο αέρα καυσίμου κατά 3,76% για το diesel 1, 39,08% για το diesel 2 και μειώνει κατά 0,67% για το diesel 3. Το Opt5000 αυξάνει κατά μέσο όρο 46,16% για όλα τα φορτία για το diesel 1, 32% για το diesel 2 και μειώνει κατά 2,86% για το diesel 3. Η χρήση του προσθέτου Ωm1700 αυξάνει το λόγο αέρα καυσίμου 36,14% στο diesel 1, 40% στο diesel 2 και τον μειώνει 2,2% στο diesel 3. Τέλος, το πρόσθετο E900/B100, που χρησιμοποιήθηκε μόνο στο diesel 1, αύξησε το λόγο αέρα καυσίμου κατά 7,88%, μέσο όρο όλων των φορτίων.

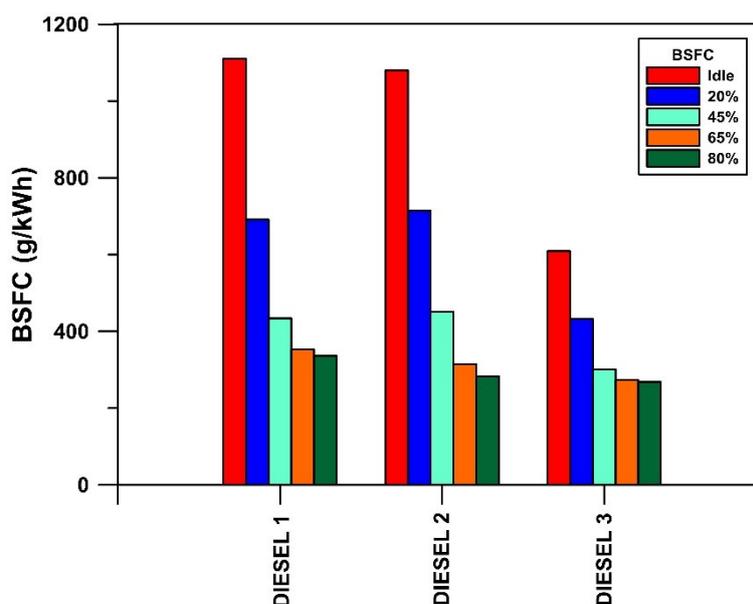
Επιπρόσθετα, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα παρατηρείται ότι η προσθήκη βελτιωτικών στο diesel 1 και στο diesel 2 αυξάνει σε όλα τα φορτία τον λόγο αέρα καυσίμου, χωρίς όμως να διατηρείται κάποιο σταθερό μοτίβο στις διάφορες αναλογίες προσθέτων. Αντίθετα, στο diesel 3 η προσθήκη βελτιωτικών μειώνει οριακά τον λόγο αέρα καυσίμου σε σχέση με το καθαρό καύσιμο. Γεγονός το οποίο ενδεχομένως οφείλεται στη μεγάλη διαφορά που εμφανίζει το καθαρό

diesel 3, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 7-2, καθώς ιδιαίτερα στα μικρά φορτία το diesel 3 ξεκινά με πολύ μεγάλο λόγο αέρα καυσίμου, της τάξης του 92,66.

7.3 ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ (BSFC)

Στους Πίνακες 7-7, 7-8 και 7-9 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της ειδικής κατανάλωσης για τα καύσιμα με βάση το diesel 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα φαίνονται και στα αντίστοιχα Διαγράμματα 7-7, 7-8 και 7-9, ενώ στο Διάγραμμα 7-6 παρουσιάζονται συγκριτικά για τα τρία καύσιμα βάσης. Η ειδική κατανάλωση καυσίμου υπολογίστηκε με βάση τη μαζική παροχή των καυσίμων για όλα τα φορτία και την αντίστοιχη ισχύ που αποδίδει ο κινητήρας για κάθε φορτίο λειτουργίας του.

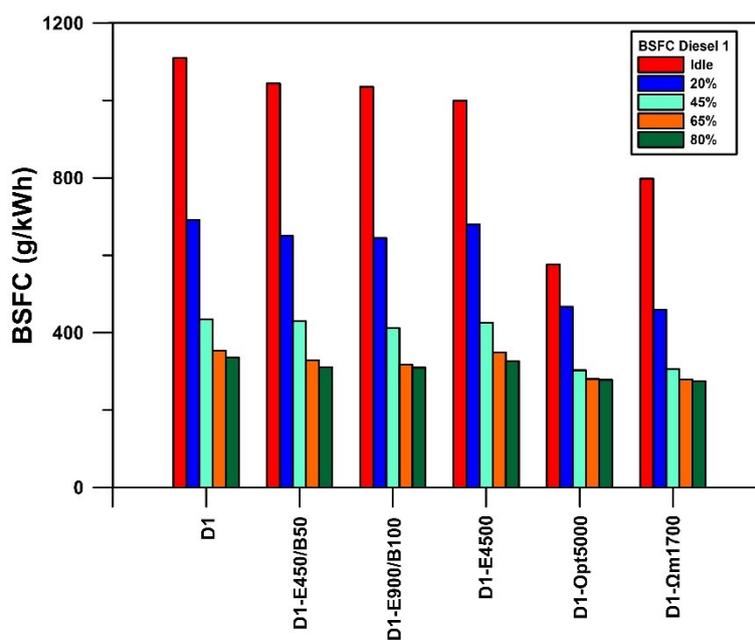
Διάγραμμα 7-6: Ειδική κατανάλωση καυσίμων βάσης



Πίνακας 7-7: Ειδική κατανάλωση και % απόκλιση καυσίμων με βάση το diesel 1

BSFC (g/kWh) και % απόκλιση από Diesel 1										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 1	1110,0	-	691,1	-	433,9	-	353,3	-	336,2	-
D1-E450/B50	1044,0	-6%	650,6	-6%	429,5	-1%	328,8	-7%	310,7	-8%
D1-E900/B100	1035,0	-7%	644,8	-7%	412,3	-5%	317,5	-10%	309,5	-8%
D1-E4500	999,0	-10%	679,5	-2%	425,9	-2%	349,0	-1%	326,8	-3%
D1-Opt5000	576,0	-48%	467,0	-32%	302,7	-30%	280,3	-21%	278,1	-17%
D1-Ωm1700	798,0	-28%	459,8	-33%	305,6	-30%	278,9	-21%	274,2	-18%

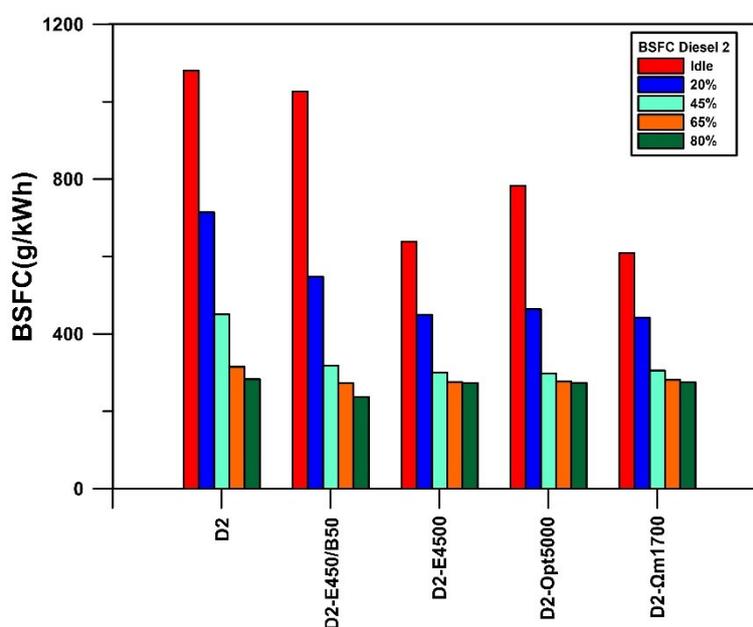
Διάγραμμα 7-7: Ειδική κατανάλωση καυσίμων με βάση το diesel 1



Πίνακας 7-8: Ειδική κατανάλωση και % απόκλιση καυσίμων με βάση το diesel 2

BSFC (g/kWh) και % απόκλιση από Diesel 2										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 2	1080,00	-	714,22	-	450,45	-	314,88	-	283,21	-
D2-E450/B50	1026,00	- 5 %	547,95	-23%	318,56	-29%	272,64	-13%	237,25	-16%
D2-E4500	639,00	-41%	449,64	-37%	300,54	-33%	276,00	-12%	273,39	- 3 %
D2-Opt5000	783,00	-28%	464,10	-35%	298,38	-34%	276,96	-12%	273,78	- 3 %
D2-Ωm1700	609,00	-44%	442,41	-38%	305,59	-32%	281,28	-11%	275,35	- 3 %

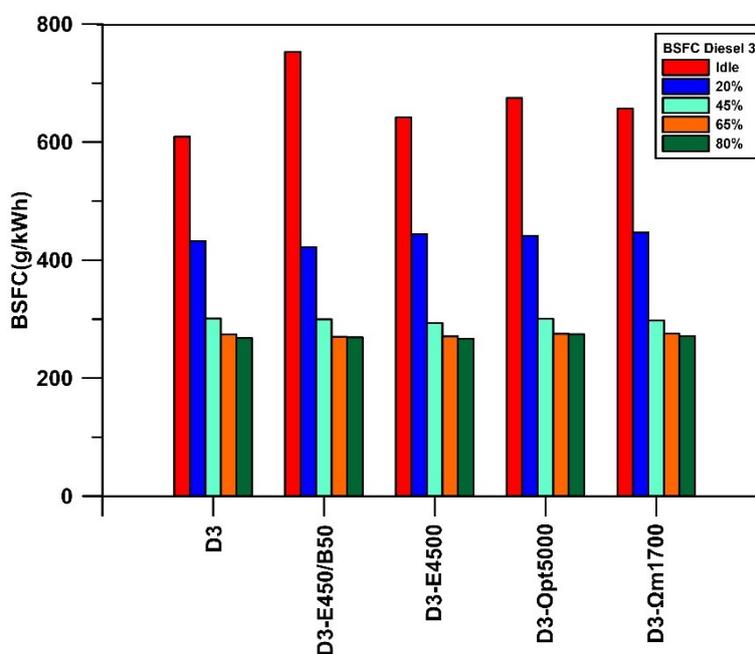
Διάγραμμα 7-8: Ειδική κατανάλωση καυσίμων με βάση το diesel 2



Πίνακας 7-9: Ειδική κατανάλωση και % απόκλιση καυσίμων με βάση το diesel 3

BSFC (g/kWh) και % απόκλιση από Diesel 3										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 3	609,00	-	432,29	-	301,26	-	274,08	-	267,89	-
D3-E450/B50	753,00	24%	422,17	-2%	299,82	0%	270,24	-1%	269,07	0%
D3-E4500	642,00	5%	443,86	3%	293,33	-3%	270,72	-1%	266,71	0%
D3-Opt5000	675,00	11%	440,96	2%	300,54	0%	275,04	0%	274,57	2%
D3-Ωm1700	657,00	8%	446,75	3%	297,66	-1%	275,52	1%	271,03	1%

Διάγραμμα 7-9: Ειδική κατανάλωση καυσίμων με βάση το diesel 3



Από τους ανωτέρω πίνακες παρατηρείται ότι το πρόσθετο E450/B50 μειώνει την ειδική κατανάλωση του diesel 1 κατά 5,46%, μέσο όρο των πέντε φορτίων λειτουργίας του κινητήρα, του diesel 2 κατά 17,44%, ενώ αυξάνει του diesel 3 κατά 4%. Το πρόσθετο E4500 μειώνει την ειδική κατανάλωση κατά μέσο όρο, 3,51% για το diesel 1, 25% για το diesel 2 και την αυξάνει κατά 1% για το diesel 3. Το Opt5000 την μειώνει 29,74% για το diesel 1, 22% για το diesel 2 και την αυξάνει κατά 3% για το diesel 3. Το Ωm1700 μειώνει την ειδική κατανάλωση του diesel 1 κατά 26,13%, του diesel 2 κατά 25% και αυξάνει του diesel 3 κατά 2%. Παράλληλα, το πρόσθετο E900/B100 μειώνει την ειδική κατανάλωση του diesel 1 κατά 7,3% μέσο όρο των φορτίων λειτουργίας.

Επιπλέον, με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στους πίνακες, είναι φανερό ότι υπάρχει μία γενική τάση μείωσης της ειδικής κατανάλωσης με την αύξηση του φορτίου σε όλα τα καύσιμα. Από αυτό μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η ποσοστιαία αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση της κατανάλωσης του καυσίμου. Επιπλέον, στα φορτία 65% και 80% η ειδική κατανάλωση σχεδόν σταθεροποιείται στα κατώτερα επιπεδά της, ενώ στο 45% σε όλα τα καύσιμα σημειώνεται η μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση της ειδικής κατανάλωσης σε σχέση με την άφορτη λειτουργία. Συνεπώς αυτό είναι το βέλτιστο φορτίο λειτουργίας του συγκεκριμένου κινητήρα. Οι παραπάνω παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται και από άλλες μελέτες στον συγκεκριμένο κινητήρα [6,20].

Όσον αφορά στην επίδραση των βελτιωτικών στην ειδική κατανάλωση των καυσίμων βάσης, από τα αποτελέσματα για το diesel 1 και 2 φαίνεται συνολική μείωση της ειδικής κατανάλωσης σε όλα τα φορτία. Το diesel 2 συνολικά επηρεάζεται περισσότερο ως προς την ειδική κατανάλωση από την προσθήκη βελτιωτικών, επειδή τα ποσοστά μείωσης είναι γενικά αυξημένα σε σχέση με το diesel 1. Επιπλέον, τόσο για το diesel 2, όσο και για το diesel 1, τα πρόσθετα με τη μεγαλύτερη αναλογία και τους μεγαλύτερους αριθμούς κετανίου, επιφέρουν μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση της ειδικής κατανάλωσης. Συγκεκριμένα, τα καλύτερα αποτελέσματα για το diesel 2 δίνονται από τα καύσιμα D2-Opt5000, D2-Ωm1700 και D2-E4500, ενώ αντίστοιχα για το diesel 1 από τα D1-Opt5000 και D1-Ωm1700. Η συγκεκριμένη τάση συμφωνεί και με ερευνητικές μελέτες, οι

οποίες συμπεραίνουν ότι η αύξηση του αριθμού κετανίου μειώνει την ειδική κατανάλωση του καυσίμου [63].

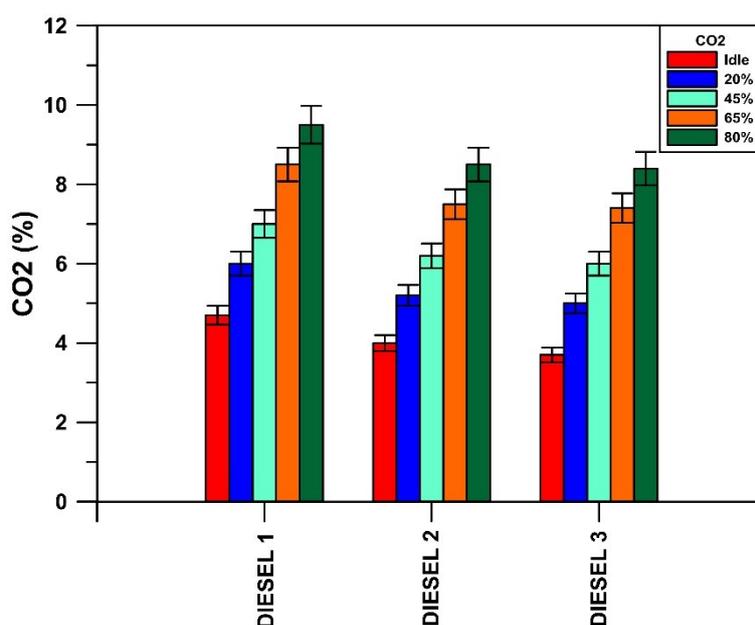
Αντίθετα, στο diesel 3 δεν διαφαίνεται κάποια ιδιαίτερη επίδραση των βελτιωτικών, συνολικά παρατηρείται μία οριακή αύξηση της ειδικής κατανάλωσης που φτάνει μέχρι το 4%. Το γεγονός αυτό σχετίζεται με τον αυξημένο λόγο αέρα καυσίμου που έχει το καθαρό diesel 3, καθώς και με το χαμηλό ιξώδες του.

Γενικά και για τα τρία καύσιμα οι μεταβολές που παρατηρούνται στην ειδική κατανάλωση, είναι πολύ πιο έντονες σε μικρά φορτία λειτουργίας. Τέλος, σε όλα τα καύσιμα και σε όλα τα φορτία η ειδική κατανάλωση ακολουθεί ευθέως αντίστροφη πορεία από αυτήν του λόγου αέρα καυσίμου.

7.4 ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO₂

Στους Πίνακες 7-10, 7-11 και 7-12 και στα Διαγράμματα 7-11, 7-12 και 7-13 παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της επί τοις εκατό περιεκτικότητας σε διοξείδιο του άνθρακα των εκπομπών καυσαερίων για τα καύσιμα με βάση το diesel 1, diesel 2 και diesel 3 αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 7-10 παρουσιάζονται οι εκπομπές των τριών καυσίμων βάσης.

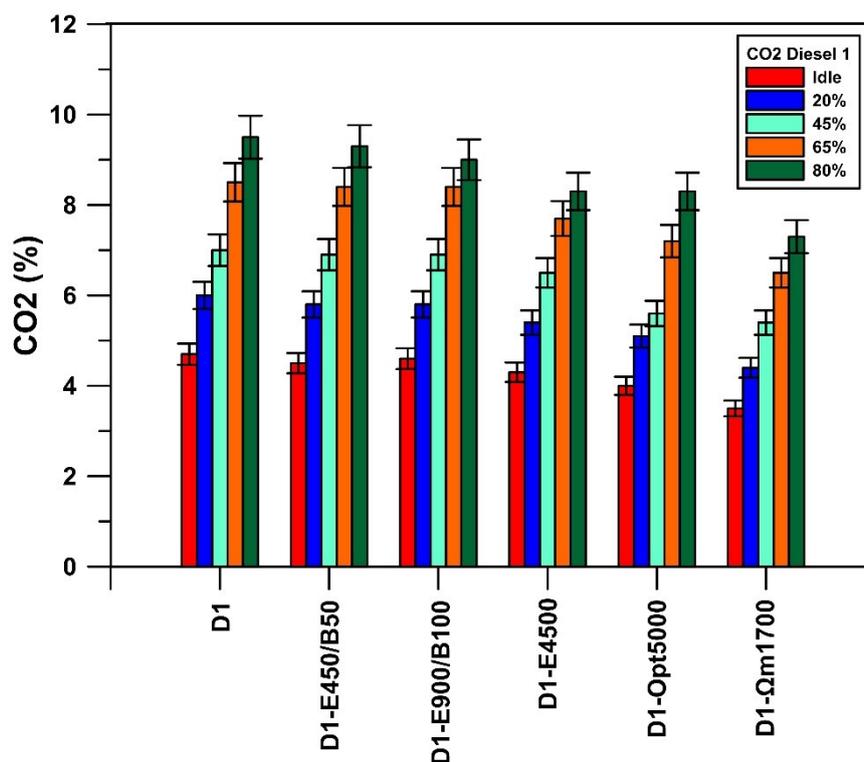
Διάγραμμα 7-10: Εκπομπές CO₂ καυσίμων βάσης



Πίνακας 7-10: Εκπομπές CO₂ και % απόκλιση από Diesel 1

Εκπομπές CO ₂ και % απόκλιση από Diesel 1										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 1	4,70	-	6,00	-	7,00	-	8,50	-	9,50	-
D1-E450/B50	4,50	-4%	5,80	-3%	6,90	-1%	8,40	-1%	9,30	-2%
D1-E900/B100	4,60	-2%	5,80	-3%	6,90	-1%	8,40	-1%	9,00	-5%
D1-E4500	4,30	-9%	5,40	-10%	6,50	-7%	7,70	-9%	8,30	-13%
D1-Opt5000	4,00	-15%	5,10	-15%	5,60	-20%	7,20	-15%	8,30	-13%
D1-Ωm1700	3,50	-26%	4,40	-27%	5,40	-23%	6,50	-24%	7,30	-23%

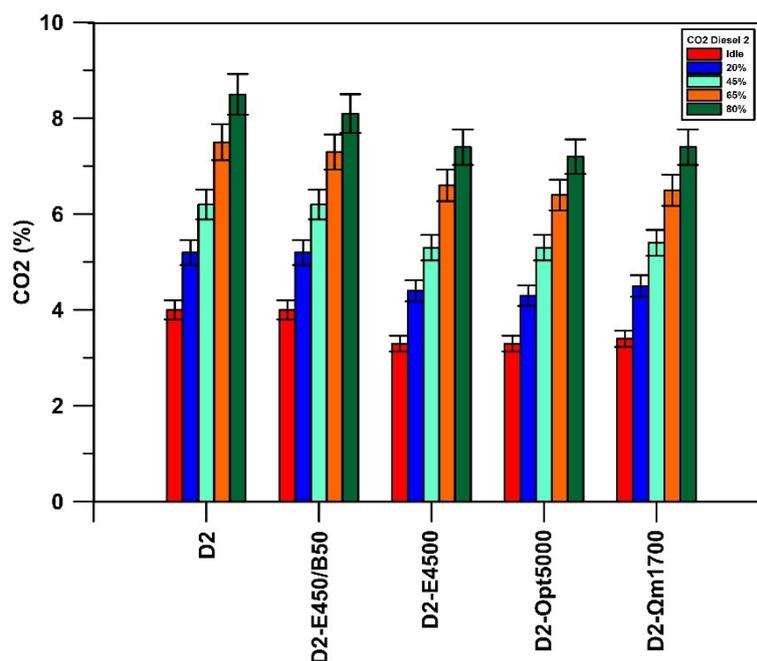
Διάγραμμα 7-11: Εκπομπές CO₂ καυσίμων με βάση το diesel 1



Πίνακας 7-11: Εκπομπές CO₂ και % απόκλιση από Diesel 2

Εκπομπές CO ₂ και % απόκλιση από Diesel 2										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 2	4,0	-	5,2	-	6,2	-	7,5	-	8,5	-
D2-E450/B50	4,0	0%	5,2	0%	6,2	0%	7,3	-3%	8,1	-5%
D2-E4500	3,3	-18%	4,4	-15%	5,3	-15%	6,6	-12%	7,4	-13%
D2-Opt5000	3,3	-18%	4,3	-17%	5,3	-15%	6,4	-15%	7,2	-15%
D2-Ωm1700	3,4	-15%	4,5	-13%	5,4	-13%	6,5	-13%	7,4	-13%

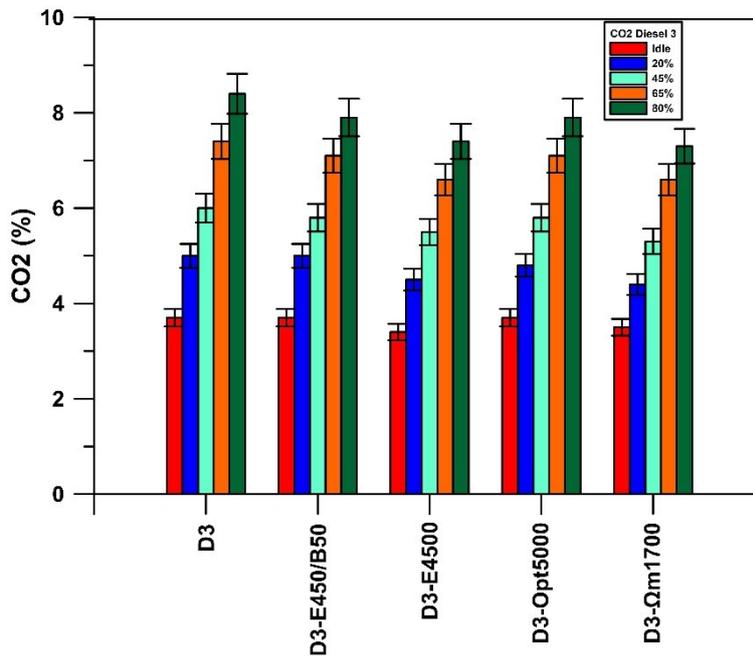
Διάγραμμα 7-12: Εκπομπές CO₂ καυσίμων με βάση το diesel 2



Πίνακας 7-12: Εκπομπές CO₂ και % απόκλιση από Diesel 3

Εκπομπές CO ₂ και % απόκλιση από Diesel 3										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 3	3,7	-	5,0	-	6,0	-	7,4	-	8,4	-
D3-E450/B50	3,7	0%	5,0	0%	5,8	-3%	7,1	-4%	7,9	-6%
D3-E4500	3,4	-8%	4,5	-10%	5,5	-8%	6,6	-11%	7,4	-12%
D3-Opt5000	3,7	0%	4,8	-4%	5,8	-3%	7,1	-4%	7,9	-6%
D3-Ωm1700	3,5	-5%	4,4	-12%	5,3	-12%	6,6	-11%	7,3	-13%

Διάγραμμα 7-13: Εκπομπές CO₂ καυσίμων με βάση το diesel 3



Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, φαίνεται ότι το πρόσθετο E450/B50 μειώνει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα κατά 2%, μέσο όρο των εκπομπών που καταγράφηκαν στα πέντε φορτία λειτουργίας, για το diesel 1, 1% για το diesel 2 και 3% για το diesel 3. Το E4500 μειώνει τις εκπομπές κατά 10% για το diesel 1, 14% για το diesel 2 και 10% για το diesel 3. Το πρόσθετο Opt5000 μειώνει κατά 16% για το diesel 1, 16% για το diesel 2 και κατά 3% για το diesel 3. Το Ωm1700 μειώνει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα κατά 24% για το diesel 1, 14% για το diesel 2 και 11% για το diesel 3. Παράλληλα το πρόσθετο E900/B100 μειώνει τις εκπομπές του diesel 1 σε διοξείδιο του άνθρακα κατά 3% μέσο όρο.

Από τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στους πίνακες και στα διαγράμματα, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η αύξηση του φορτίου συνολικά οδηγεί σε αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, γεγονός που επιβεβαιώνεται και βιβλιογραφικά [63].

Οι αναλογίες βελτιωτικών που έχουν προστεθεί τόσο στο diesel 1, όσο και στο diesel 2, φαίνεται να επιδρούν σχεδόν με τον ίδιο τρόπο, αν και εντονότερα

αποτελέσματα διαπιστώνονται στο diesel 2. Συγκεκριμένα, σε όλες τις αναλογίες και όλα τα φορτία υπάρχει μία τάση μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, με την μεγαλύτερη μείωση να σημειώνεται στα καύσιμα με τις μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε βελτιωτικά και μεγαλύτερους αριθμούς κετανίου, ενώ οι μικρές περιεκτικότητες επηρεάζουν σε μικρότερο ποσοστό.

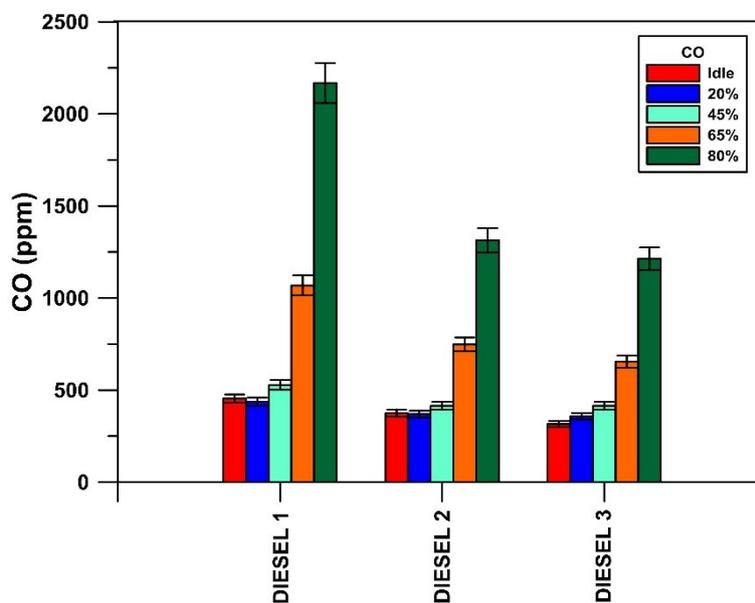
Το diesel 3 φαίνεται να επηρεάζεται συνολικά από τα βελτιωτικά, ως προς τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, σε μικρότερο ποσοστό, ωστόσο ακολουθεί και αυτό την ίδια τάση μείωσης και συνολικής συμπεριφοράς, με εξαίρεση το καύσιμο που περιέχει το πρόσθετο Opt σε περιεκτικότητα 5000 ppm, το οποίο, ενώ στα υπόλοιπα καύσιμα βάσης οδηγεί σε σημαντική μείωση του διοξειδίου του άνθρακα (τουλάχιστον 13%), στο diesel 3, αν και μειώνει, δεν δίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αυτό σχετίζεται με την επίδραση του Opt 5000 ppm στην ειδική κατανάλωση του diesel 3 που αυξάνεται και με την περαιτέρω μείωση που προκαλεί το συγκεκριμένο πρόσθετο στο αρχικό ιξώδες του καυσίμου.

Η συνολική τάση μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με την αύξηση του αριθμού κετανίου που παρατηρήθηκε στα πλαίσια των πειραμάτων επιβεβαιώνεται και από ερευνητικές μελέτες [64]. Ωστόσο, άλλες βιβλιογραφικές πηγές αναφέρουν αντίθετα αποτελέσματα και συμπεραίνουν ότι οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα ακολουθούν αντίστροφη πορεία από τις εκπομπές του μονοξειδίου [63].

7.5 ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO

Στους Πίνακες 7-13, 7-14 και 7-15 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα για τα καύσιμα 1,2 και 3 με την προσθήκη βελτιωτικών αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα φαίνονται και στα αντίστοιχα Διαγράμματα 7-15, 7-16 και 7-17, ενώ στο Διάγραμμα 7-14 παρουσιάζονται συγκριτικά για τα τρία καύσιμα βάσης.

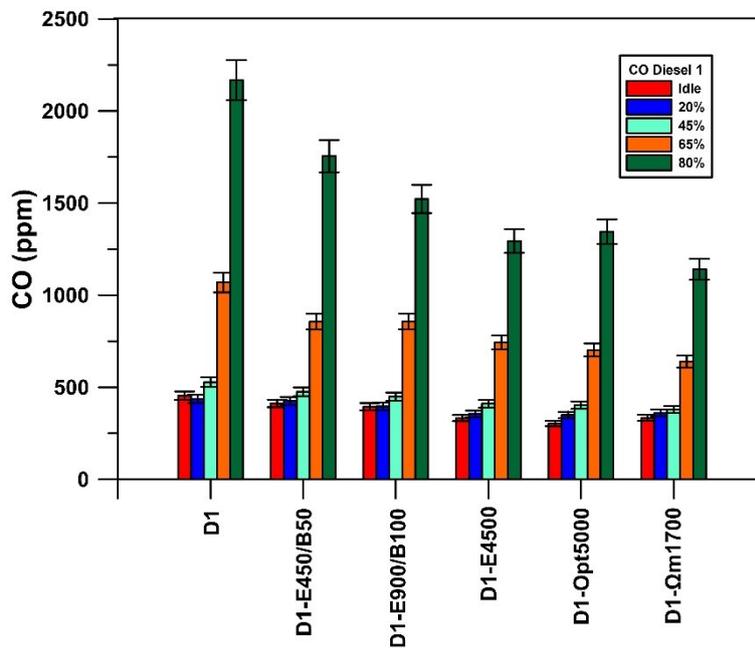
Διάγραμμα 7-14: Εκπομπές CO καυσίμων βάσης



Πίνακας 7-13: Εκπομπές CO και % απόκλιση από Diesel 1

Εκπομπές CO και % απόκλιση από Diesel 1										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 1	454	-	437	-	528	-	1069	-	2168	-
D1-E450/B50	412	-9%	426	-3%	476	-10%	856	-20%	1755	-19%
D1-E900/B100	395	-13%	396	-9%	449	-15%	858	-20%	1522	-30%
D1-E4500	333	-27%	355	-19%	411	-22%	744	-30%	1294	-40%
D1-Opt5000	303	-33%	349	-20%	403	-24%	702	-34%	1345	-38%
D1-Ωm1700	334	-26%	361	-17%	380	-28%	640	-40%	1141	-47%

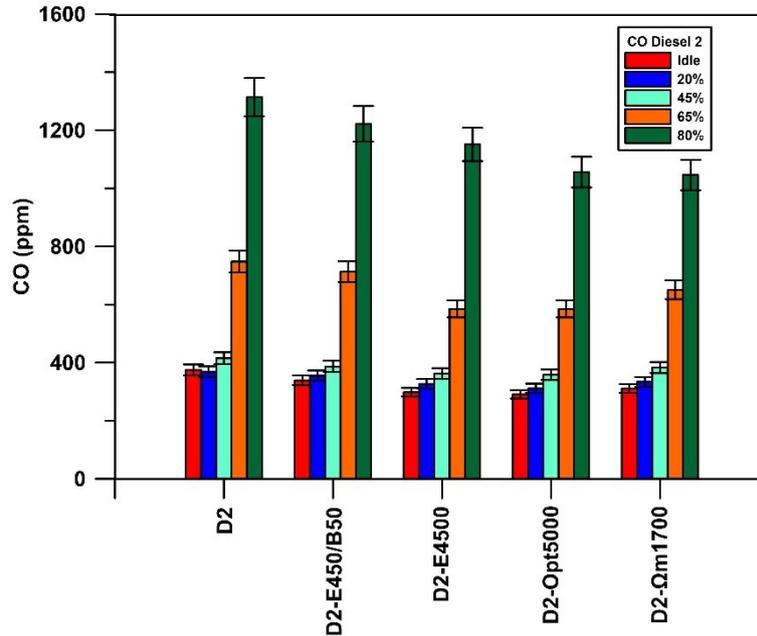
Διάγραμμα 7-15: Εκπομπές CO καυσίμων με βάση το diesel 1



Πίνακας 7-14: Εκπομπές CO και % απόκλιση από Diesel 2

Εκπομπές CO και % απόκλιση από Diesel 2										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 2	375	-	369	-	415	-	748	-	1314	-
D2-E450/B50	339	-10%	355	-4%	387	-7%	713	-5%	1222	-7%
D2-E4500	298	-21%	327	-11%	363	-13%	585	-22%	1151	-12%
D2-Opt5000	291	-22%	312	-15%	358	-14%	585	-22%	1056	-20%
D2-Ωm1700	311	-17%	334	-9%	383	-8%	651	-13%	1046	-20%

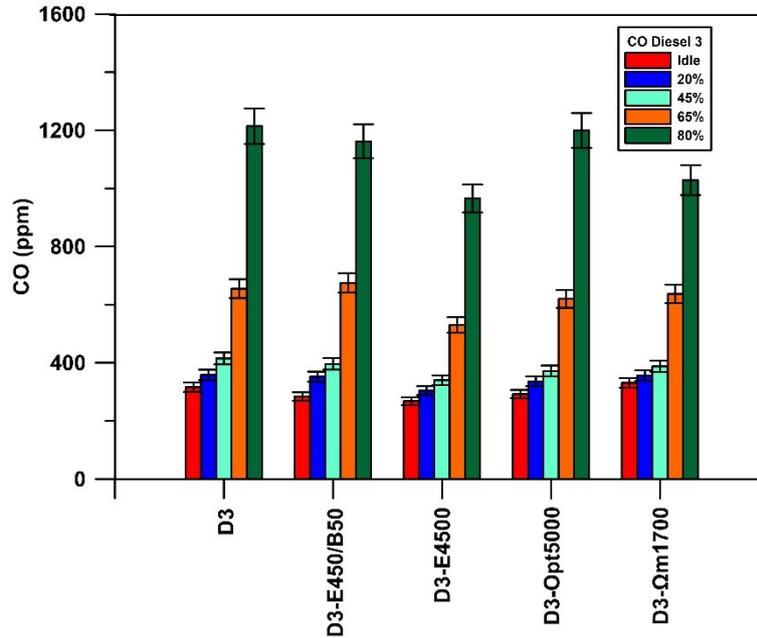
Διάγραμμα 7-16: Εκπομπές CO καυσίμων με βάση το diesel 2



Πίνακας 7-15: Εκπομπές CO και % απόκλιση από Diesel 3

Εκπομπές CO και % απόκλιση από Diesel 3										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 3	316	-	358	-	415	-	655	-	1214	-
D3-E450/B50	284	-10%	352	-2%	396	-5%	675	3%	1162	-4%
D3-E4500	268	-15%	304	-15%	340	-18%	530	-19%	965	-21%
D3-Opt5000	292	-8%	336	-6%	372	-10%	620	-5%	1199	-1%
D3-Ωm1700	331	5%	356	-1%	388	-7%	637	-3%	1028	-15%

Διάγραμμα 7-17: Εκπομπές CO καυσίμων με βάση το diesel 3



Τα πειραματικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι το πρόσθετο E450/B50 μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα κατά 12% στο diesel 1, κατά 6% στο diesel 2 και κατά 4% στο diesel 3 κατά μέσο όρο στα πέντε φορτία λειτουργίας. Αντίστοιχα, το E4500 μειώνει τις εκπομπές κατά 28% στο diesel 1, κατά 16 % στο diesel 2 και κατά 18% στο diesel 3. Παρόμοια συμπεριφορά έχει και το Opt5000, το οποίο μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα κατά 30% στο diesel 1, κατά 19% στο diesel 2 και κατά 6% στο diesel 3. Όσον αφορά στο Ωm1700, αυτό μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου κατά 32%, 14%, 4 % για τα diesel 1 , 2 και 3 αντίστοιχα. Τέλος, το E900/B100 μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα κατά 17% στο diesel 1.

Από τα πειραματικά δεδομένα διακρίνεται ξεκάθαρα το γεγονός ότι οι εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται όσο αυξάνεται το φορτίο λειτουργίας και σε ιδιαιτέρως μεγάλα ποσοστά, ειδικά στο 80% λειτουργίας του κινητήρα, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται συνολικά από την βιβλιογραφία [40,41,63–65].

Όσον αφορά στην επίδραση των βελτιωτικών του αριθμού κετανίου στις εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα, για το diesel 1 διαπιστώνεται με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα συνολική μείωση και στα περισσότερα φορτία σημαντική, μεγαλύτερη του 20%. Η μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών με όλα τα πρόσθετα παρατηρείται στο 80%, όπου οι αρχικές εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα είναι ιδιαίτερα μεγάλες, της τάξης των 2000 ppm. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας των προσθέτων αυξάνεται και το ποσοστό της μείωσης των εκπομπών. Τα βέλτιστα αποτελέσματα συνολικά δίνονται για το καύσιμο που περιέχει το πρόσθετο Opt 5000 ppm.

Το diesel 2 φαίνεται να ακολουθεί την ίδια τάση με αυτή του diesel 1, ωστόσο η μείωση των εκπομπών που καταγράφεται είναι ποσοστιαία μικρότερη. Και στο diesel 2 η μεγαλύτερη μείωση επιτυγχάνεται με το πρόσθετο Opt σε περιεκτικότητα 5000 ppm.

Τάση μείωσης των εκπομπών με την προσθήκη βελτιωτικών διαφαίνεται και στο diesel 3, αλλά είναι αισθητά μικρότερη από τα άλλα δύο καύσιμα βάσης, ενώ δεν ακολουθείται η ίδια συμπεριφορά για τις περιεκτικότητες των

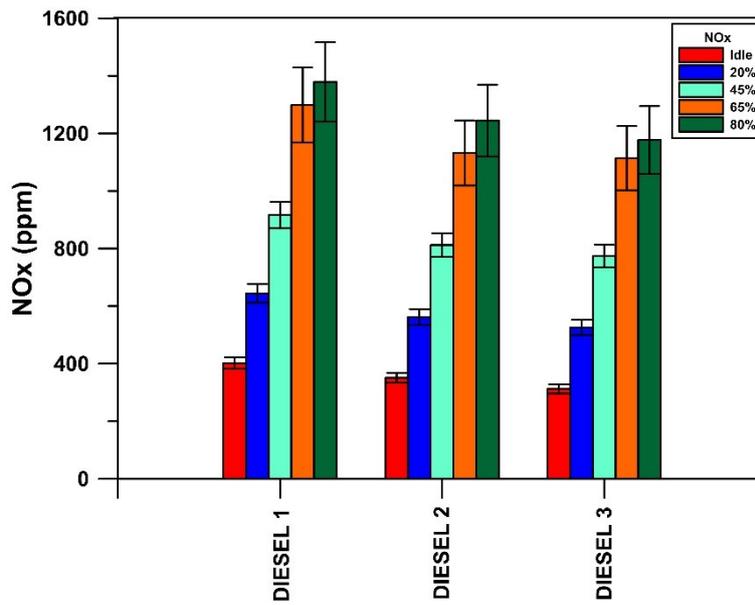
προσθέτων. Συνολικά οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα του diesel 3 επηρεάζονται λιγότερο από τα πρόσθετα, ενώ την μεγαλύτερη μείωση εμφανίζει το καύσιμο με περιεκτικότητα 4500 ppm στο πρόσθετο E. Οι διαφορές που εμφανίζονται μεταξύ του diesel 3 και των άλλων δύο καυσίμων βάσης στις εκπομπές και στην συμπεριφορά των προσθέτων, ενδεχομένως οφείλονται στη διαφορά του κινηματικού ιξώδους τους, η οποία επιφέρει μεγάλες αποκλίσεις και στην ειδική κατανάλωση.

Η γενική μείωση των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα με την χρήση βελτιωτικών αριθμού κετανίου, η οποία εξάγεται με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων, επιβεβαιώνεται βιβλιογραφικά, καθώς από έρευνες συμπεραίνεται ότι η αύξηση του αριθμού κετανίου στο diesel επιφέρει μείωση των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα [40,41,63,64].

7.6 ΕΚΠΟΜΠΕΣ NO_x

Στους Πίνακες 7-16,7-17 και 7-18 και στα αντίστοιχα Διαγράμματα 7-19, 7-20 και 7-21 παρουσιάζονται οι περιεκτικότητες των οξειδίων του αζώτου στις εκπομπές των καυσαερίων για τα καύσιμα με βάση το diesel 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Παράλληλα, στο Διάγραμμα 7-18 απεικονίζονται συγκριτικά η περιεκτικότητα σε NO_x στις εκπομπές καυσαερίων των τριών καυσίμων βάσης.

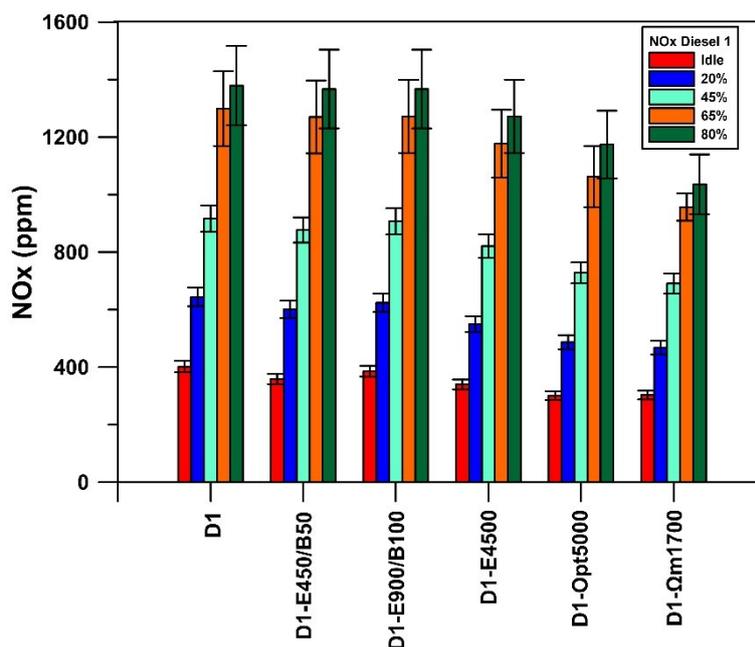
Διάγραμμα 7-18: Εκπομπές NOx καυσίμων βάσης



Πίνακας 7-16: Εκπομπές NOx και % απόκλιση από Diesel 1

Εκπομπές NOx και % απόκλιση από Diesel 1										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 1	402	-	644	-	916	-	1299	-	1379	-
D1-E450/B50	359	-11%	601	-7%	877	-4%	1270	-2%	1367	-1%
D1-E900/B100	386	-4%	624	-3%	907	-1%	1272	-2%	1367	-1%
D1-E4500	340	-15%	550	-15%	821	-10%	1177	-9%	1272	-8%
D1-Opt5000	301	-25%	487	-24%	728	-21%	1063	-18%	1174	-15%
D1-Ωm1700	303	-25%	468	-27%	691	-25%	957	-26%	1036	-25%

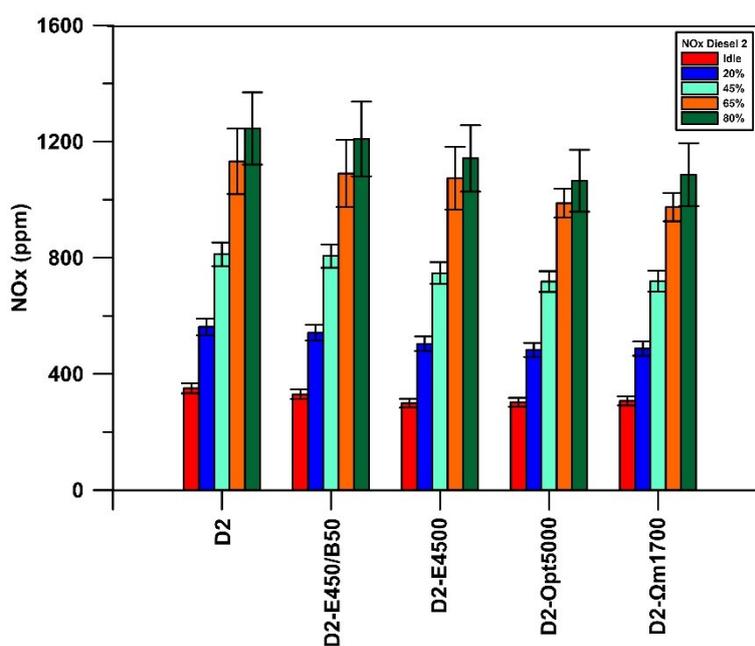
Διάγραμμα 7-19: Εκπομπές NOx καυσίμων με βάση το diesel 1



Πίνακας 7-17: Εκπομπές NOx και % απόκλιση από Diesel 2

Εκπομπές NOx και % απόκλιση από Diesel 2										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 2	351	-	562	-	812	-	1132	-	1245	-
D2-E450/B50	330	-6%	542	-4%	806	-1%	1090	-4%	1209	-3%
D2-E4500	300	-15%	504	-10%	747	-8%	1074	-5%	1142	-8%
D2-Opt5000	303	-14%	483	-14%	718	-12%	988	-13%	1065	-14%
D2-Ωm1700	307	-13%	487	-13%	719	-11%	974	-14%	1086	-13%

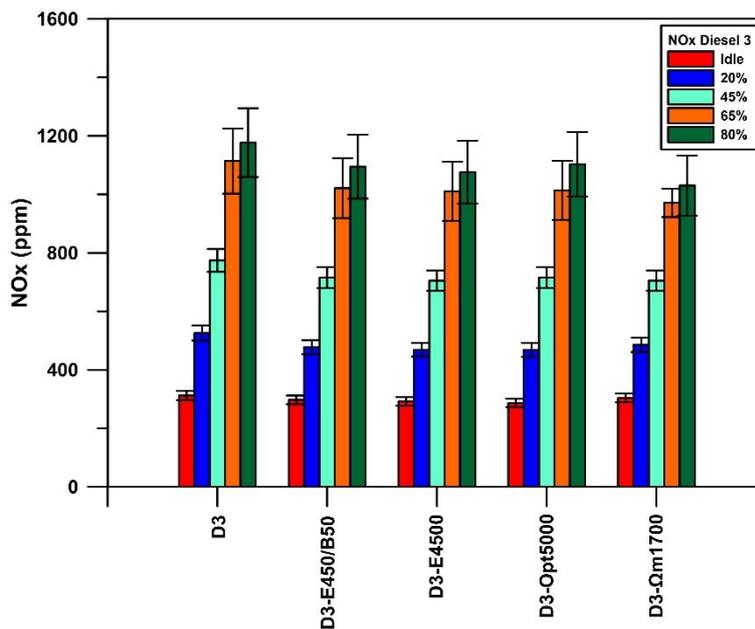
Διάγραμμα 7-20: Εκπομπές NOx καυσίμων με βάση το diesel 2



Πίνακας 7-18: Εκπομπές NOx και % απόκλιση από Diesel 3

Εκπομπές NOx και % απόκλιση από Diesel 3										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 3	312	-	526	-	774	-	1114	-	1177	-
D3-E450/B50	297	-5%	478	-9%	715	-8%	1021	-8%	1095	-7%
D3-E4500	292	-6%	469	-11%	705	-9%	1010	-9%	1076	-9%
D3-Opt5000	287	-8%	468	-11%	716	-7%	1014	-9%	1103	-6%
D3-Ωm1700	304	-3%	485	-8%	705	-9%	971	-13%	1030	-12%

Διάγραμμα 7-21: Εκπομπές NOx καυσίμων με βάση το diesel 3



Όσον αφορά στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου, παρατηρείται από τα πειραματικά δεδομένα ότι το E450/B50 προκαλεί μείωση τους κατά 5% στο diesel 1, 3 % στο diesel 2 και 7% στο diesel 3, κατά μέσο όρο των πέντε φορτίων λειτουργίας. Παράλληλα, το E4500 προκαλεί μείωση 12% στο diesel 1, 9% στο diesel 2 και 9% στο diesel 3. Αντιστοίχως, το Opt5000 μειώνει τις εκπομπές NOx κατά 21 % για το diesel 1, 13% για το diesel 2 και 8% για το diesel 3. Το Ωm1700 προκαλεί μείωση εκπομπών κατά 26% για το diesel 1, κατά 13% για το diesel 2 και κατά 9% για το diesel 3. Τέλος, το E900/B100 προκαλεί μικρή μείωση 2% στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου του diesel 1.

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, η αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα συνοδεύεται από ταυτόχρονη αύξηση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου, γεγονός που επαληθεύουν τα πειραματικά αποτελέσματα [37,63–65].

Από τον Πίνακα 7-16 για το diesel 1 και τον Πίνακα 7-17 για το diesel 2 διαφαίνεται μία συνολική τάση μείωσης των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου με την προσθήκη βελτιωτικών. Σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες προσθέτων σημειώνεται μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών, σε αντίθεση με τις μικρές περιεκτικότητες, όπου διακρίνεται μία τάση και όχι αξιοσημείωτη ποσοστιαία

μείωση. Τα βέλτιστα αποτελέσματα εντοπίζονται στα καύσιμα που περιέχουν 5000rpm Opt, στα οποία υπάρχει σαφής μείωση των εκπομπών σε όλα τα φορτία λειτουργίας. Η μείωση των εκπομπών είναι εντονότερη στο diesel 1, το οποίο εμφανίζει και τις μεγαλύτερες ποσοτικά εκπομπές, κάτι που σχετίζεται άμεσα από το γεγονός ότι το diesel 1 περιέχει 6,8% FAME, το οποίο αυξάνει τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας εντός του θαλάμου καύσης σε σχέση με το καθάρο diesel, όπως αναφέρεται σε ερευνητικές μελέτες [66,67].

Από τον Πίνακα 7-18 για το diesel 3, είναι εμφανές ότι επηρεάζεται λιγότερο από την προσθήκη βελτιωτικών συγκριτικά με τα υπόλοιπα καύσιμα βάσης, ωστόσο παρουσιάζονται και σε αυτό τάσεις μείωσης των εκπομπών με το ίδιο σχεδόν μοτίβο.

Συνοψίζοντας και στα τρία καύσιμα υπάρχει μία συγκεκριμένη τάση μείωσης των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου με την αύξηση του αριθμού κετανίου με χρήση βελτιωτικών. Η μείωση όμως που είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη μείωση των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από ερευνητικές μελέτες [37,63]. Στον αντίποδα αυτού, άλλες βιβλιογραφικές πηγές αναφέρουν ότι η αύξηση του αριθμού κετανίου οδηγεί σε μικρή αύξηση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου [65], κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε στα πλαίσια των πειραματικών μετρήσεων για κανένα καύσιμο σε κανένα φορτίο, παρόλο που σε ορισμένα δείγματα η μείωση ήταν οριακή.

7.7 ΕΚΠΟΜΠΕΣ HC

Στους Πίνακες 7-19, 7-20 και 7-21 παρουσιάζονται οι εκπομπές των άκαυστων υδρογονανθράκων για τα καύσιμα με βάση το diesel 1, diesel 2 και diesel 3 αντίστοιχα.

Πίνακας 7-19: Εκπομπές HC καυσίμων με βάση το Diesel 1

Εκπομπές HC καυσίμων με βάση το Diesel 1					
	Idle	20%	45%	65%	80%
Diesel 1	1	1	8	16	25
D1-E450/B50	1	9	5	8	19
D1-E900/B100	1	1	12	18	10
D1-E4500	2	8	14	12	24
D1-Opt5000	4	10	4	9	14
D1-Ωm1700	1	4	9	1	5

Πίνακας 7-20: Εκπομπές HC καυσίμων με βάση το Diesel 2

Εκπομπές HC καυσίμων με βάση το Diesel 2					
	Idle	20%	45%	65%	80%
Diesel 2	7	2	9	12	11
D2-E450/B50	1	7	5	0	12
D2-E4500	0	3	7	8	11
D2-Opt5000	0	0	1	7	16
D2-Ωm1700	4	11	6	9	6

Πίνακας 7-21: Εκπομπές HC καυσίμων με βάση το Diesel 3

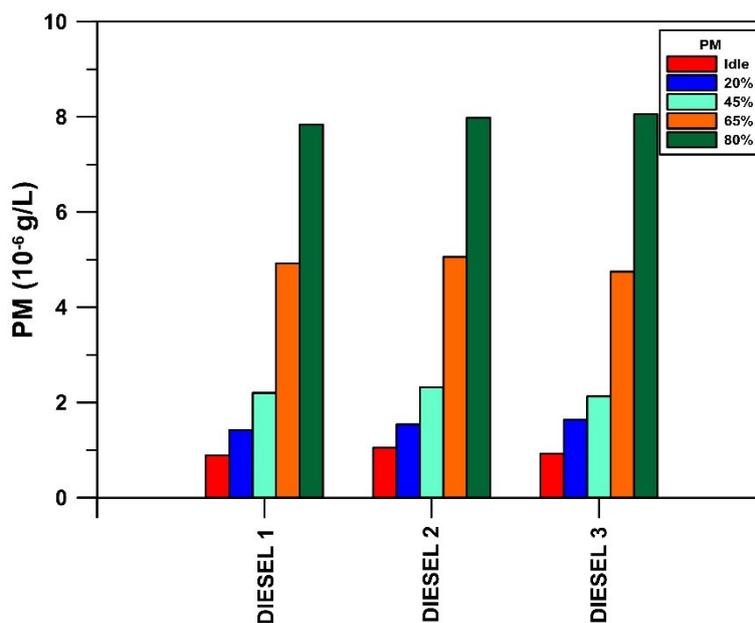
Εκπομπές HC καυσίμων με βάση το Diesel 3					
	Idle	20%	45%	65%	80%
Diesel 3	2	7	5	4	9
D3-E450/B50	1	4	11	6	5
D3-E4500	6	12	4	17	8
D3-Opt5000	0	3	8	21	13
D3-Ωm1700	0	0	5	15	18

Ερευνητικές μελέτες αναφέρουν ότι οι εκπομπές άκαυστων υδρογονανθράκων αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας και μειώνονται με την αύξηση του αριθμού κετανίου [37-39,63,65]. Ωστόσο, από τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων δεν διαφαίνεται καμία συγκεκριμένη τάση των εκπομπών, τόσο των καυσίμων βάσης όσο και των καυσίμων με την προσθήκη βελτιωτικών. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην πολύ μικρή περιεκτικότητα των άκαυστων υδρογονανθράκων στις συνολικές εκπομπές, η οποία κυμαίνεται από 1 έως 25 ppm για το diesel 1, από 0 έως 16 ppm για το diesel 2 και από 0 έως 21 ppm για το diesel 3. Γι αυτόν τον λόγο δεν παρουσιάζονται στους πίνακες οι αποκλίσεις και παραθέτονται μόνο οι πειραματικές τιμές.

7.8 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΜ

Στους Πίνακες 7-22, 7-23 και 7-24 και στα Διαγράμματα 7-23, 7-24 και 7-25 παρουσιάζονται οι εκπομπές σωματιδίων των καυσίμων με βάση το diesel 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 7-22 απεικονίζονται συγκριτικά οι εκπομπές σωματιδίων των τριών καυσίμων βάσης.

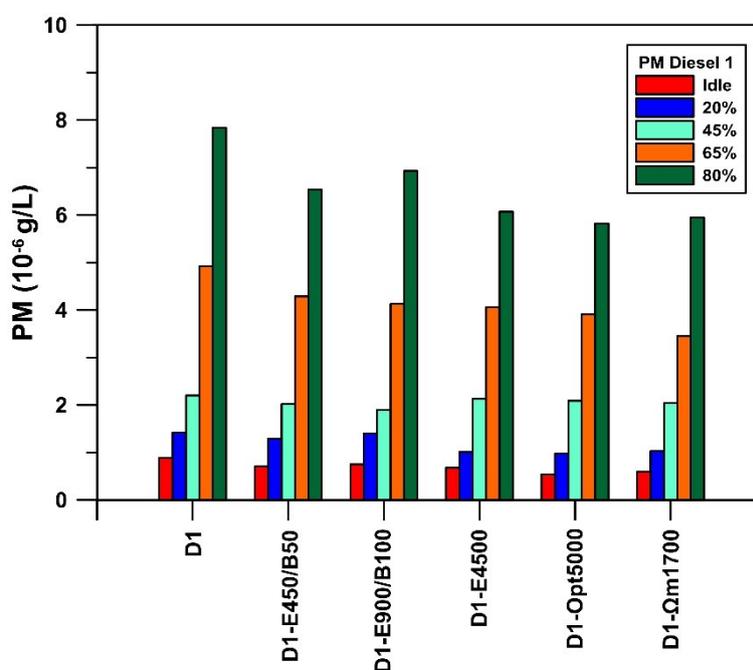
Διάγραμμα 7-22: Εκπομπές ΡΜ καυσίμων βάσης



Πίνακας 7-22: Εκπομπές PM και % απόκλιση από Diesel 1

Εκπομπές PM και % απόκλιση από Diesel 1										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 1	0,89	-	1,42	-	2,20	-	4,92	-	7,84	-
D1-E450/B50	0,71	-20%	1,29	-9%	2,02	-8%	4,29	-13%	6,54	-17%
D1-E900/B100	0,75	-16%	1,40	-1%	1,90	-14%	4,13	-16%	6,93	-12%
D1-E4500	0,68	-24%	1,01	-29%	2,13	-3%	4,06	-17%	6,07	-23%
D1-Opt5000	0,54	-39%	0,98	-31%	2,09	-5%	3,91	-21%	5,82	-26%
D1-Ωm1700	0,60	-33%	1,03	-27%	2,04	-7%	3,45	-30%	5,95	-24%

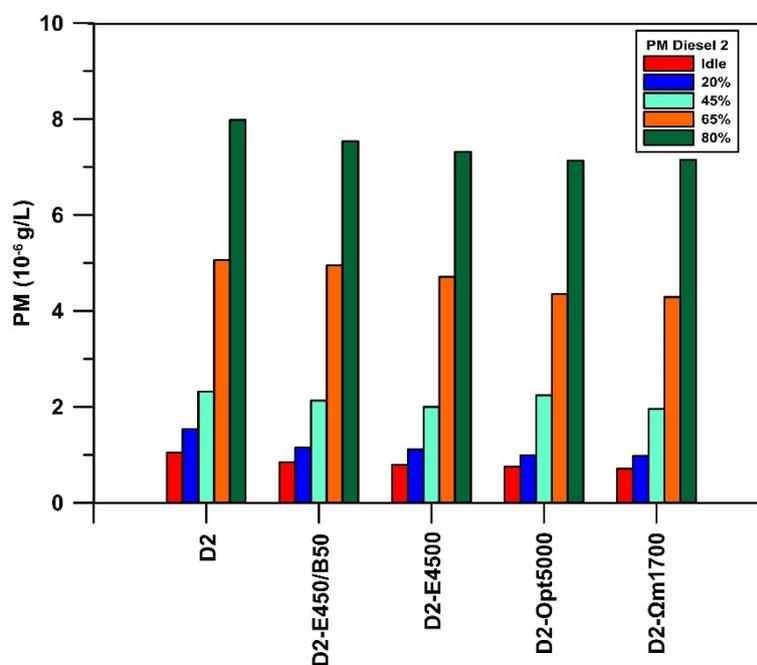
Διάγραμμα 7-23: Εκπομπές PM καυσίμων με βάση το diesel 1



Πίνακας 7-23: Εκπομπές PM και % απόκλιση από Diesel 2

Εκπομπές PM και % απόκλιση από Diesel 2										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 2	1,05	-	1,54	-	2,32	-	5,06	-	7,98	-
D2-E450/B50	0,85	-19%	1,15	-25%	2,13	-8%	4,95	-2%	7,54	-6%
D2-E4500	0,79	-25%	1,11	-28%	2,00	-14%	4,71	-7%	7,32	-8%
D2-Opt5000	0,75	-29%	0,99	-36%	2,24	-3%	4,35	-14%	7,13	-11%
D2-Ωm1700	0,71	-32%	0,98	-36%	1,96	-16%	4,29	-15%	7,15	-10%

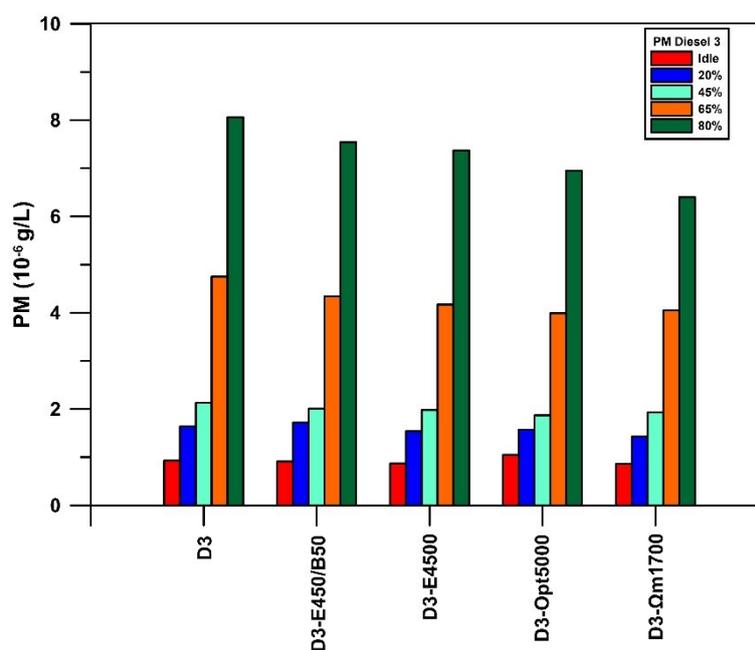
Διάγραμμα 7-24: Εκπομπές PM καυσίμων με βάση το diesel 2



Πίνακας 7-24: Εκπομπές PM και % απόκλιση από Diesel 3

Εκπομπές PM και % απόκλιση από Diesel 3										
	Idle		20%		45%		65%		80%	
Diesel 3	0,93	-	1,64	-	2,13	-	4,75	-	8,06	-
D3-E450/B50	0,91	-2%	1,72	5%	2,01	-6%	4,34	-9%	7,54	-6%
D3-E4500	0,87	-6%	1,54	-6%	1,98	-7%	4,17	-12%	7,37	-9%
D3-Opt5000	1,05	13%	1,57	-4%	1,87	-12%	3,99	-16%	6,95	-14%
D3-Ωm1700	0,86	-8%	1,43	-13%	1,93	-9%	4,05	-15%	6,40	-21%

Διάγραμμα 7-25: Εκπομπές PM καυσίμων με βάση το diesel 3



Όσον αφορά στις εκπομπές σωματιδίων, παρατηρείται από τους πίνακες ότι το E450/B50 μειώνει κατά 13% στο diesel 1, κατά 12% στο diesel 2 και 4% στο diesel 3 κατά μέσο όρο των εκπομπών των πέντε φορτίων λειτουργίας του κινητήρα. Παράλληλα το πρόσθετο E4500 μειώνει τις εκπομπές αιθάλης κατά 19% για το diesel 1, 16% για το diesel 2 και 8% για το diesel 3. Το Opt5000 μειώνει με τη σειρά του τις εκπομπές σωματιδίων κατά 24% για το diesel 1, 18% για το diesel 2 και 7% για το diesel 3. Το Ωm1700 μειώνει και αυτό τις εκπομπές κατά 24% στο diesel 1, 22% στο diesel 2 και 13% στο diesel 3. Τέλος, το E900/B100 μειώνει τις εκπομπές του diesel 1 κατά 12%.

Όπως είναι εμφανές από τα πειραματικά αποτελέσματα δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα για την συνολική συμπεριφορά των εκπομπών σωματιδίων με την προσθήκη βελτιωτικών, παρά μόνο ότι υπάρχει μία τάση μείωσης και ότι οι εκπομπές των σωματιδίων αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα. Τα δύο αυτά συμπεράσματα συμφωνούν με ερευνητικές μελέτες στις οποίες αναφέρεται ότι η αύξηση του αριθμού κετανίου συνεισφέρει στη μείωση του ποσοστού αιθάλης [37].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η πυκνότητα των καυσίμων βάσης δεν επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη βελτιωτικών, επειδή οι διαφοροποιήσεις που παρατηρήθηκαν είναι στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο.
- Η προσθήκη βελτιωτικών προκαλεί σχετικά μικρές αυξομειώσεις στο κινηματικό ιξώδες του diesel βάσης, οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από την αρχική τιμή του. Το diesel 3 παρουσιάζει το μικρότερο ιξώδες από τα τρία καύσιμα, γεγονός που φαίνεται να επηρεάζει τη συμπεριφορά του όσον αφορά στις εκπομπές καυσαερίων.
- Ο αριθμός κετανίου αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας των βελτιωτικών στα καύσιμα βάσης σε όλα τα δείγματα. Επιπλέον, και στα τρία καύσιμα βάσης η προσθήκη ίδιας αναλογίας ενός βελτιωτικού μεταβάλλει με παρόμοιο τρόπο τον αρχικό αριθμό κετανίου των καυσίμων.
- Η προσθήκη βελτιωτικών στο diesel δεν μεταβάλλει ιδιαίτερα την καμπύλη απόσταξης του καυσίμου βάσης, οι αποκλίσεις και στις τρεις σειρές μετρήσεων είναι οριακές και εντοπίζονται κυρίως στην θερμοκρασία έναρξης της απόσταξης. Ως εκ τούτου, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι ο δείκτης κετανίου δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ως μέσο πρόβλεψης του αριθμού κετανίου, όταν έχουν προστεθεί βελτιωτικά στο καύσιμο.

- Οι θερμοκρασίες των καυσαερίων των καυσίμων δεν επηρεάζονται από την προσθήκη βελτιωτικών αριθμού κετανίου. Οι αποκλίσεις που καταγράφηκαν είναι οριακές σε όλα τα καύσιμα και φορτία, σε όλες τις περικτικότητες των προσθέτων. Το diesel 1 παρουσιάζει οριακά πιο αυξημένες θερμοκρασίες καυσαερίων, καθώς περιέχει ορισμένη ποσότητα FAME.

- Ο λόγος αέρα καυσίμου αυξάνεται με την προσθήκη βελτιωτικών στα diesel 1 και 2, ενώ παραμένει πρακτικά σταθερός στο 3, λόγω του ιδιαίτερου υψηλού λόγου αέρα καυσίμου που παρουσιάζει το αρχικό καύσιμο.

- Η ειδική κατανάλωση του καυσίμου έχει μία γενική τάση μείωσης με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας σε όλα τα καύσιμα. Συνεπώς, η ποσοστιαία αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ποσοστιαία αύξηση της κατανάλωσης του καυσίμου.

- Στα φορτία 65% και 80% η ειδική κατανάλωση του καυσίμου σχεδόν σταθεροποιείται στα μικρότερα επίπεδά της, ενώ στο 45% της λειτουργίας του κινητήρα, σε όλα τα καύσιμα, σημειώνεται η μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση της ειδικής κατανάλωσης. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το 45% είναι το βέλτιστο φορτίο λειτουργίας του συγκεκριμένου κινητήρα.

- Η προσθήκη βελτιωτικών στα καύσιμα βάσης φαίνεται να μειώνει γενικά την ειδική κατανάλωση. Οι μεταβολές που παρατηρούνται είναι πολύ πιο έντονες σε μικρά φορτία λειτουργίας. Η μείωση της ειδικής κατανάλωσης

είναι εντονότερη στα diesel 1 και 2, ενώ είναι οριακή στο diesel 3, γεγονός που σχετίζεται με το χαμηλό ιξώδες του.

- Η ειδική κατανάλωση μεταβάλλεται με την προσθήκη βελτιωτικών, ακολουθώντας αντίστροφη πορεία από αυτήν της μεταβολής του λόγου αέρα καυσίμου.
- Η αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα οδηγεί συνολικά σε αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα.
- Με την προσθήκη βελτιωτικών στα καύσιμα βάσης, διακρίνεται τάση μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Η μεγαλύτερη μείωση σημειώνεται στα καύσιμα με τις μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε βελτιωτικά και τους μεγαλύτερους αριθμούς κετανίου. Αντίθετα, οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα καυσίμων με μικρότερες περιεκτικότητες σε βελτιωτικά και μικρότερους αριθμούς κετανίου επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό.
- Η συνολική τάση μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα με την προσθήκη βελτιωτικών συνάδει με την αντίστοιχη τάση μείωσης της ειδικής κατανάλωσης.
- Οι εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας, ενώ σημειώνεται ιδιαίτερος μεγάλος ποσοστό αύξησης των εκπομπών στο μέγιστο φορτίο λειτουργίας του κινητήρα σε σχέση με την άφορτη λειτουργία.

- Η προσθήκη βελτιωτικών του αριθμού κετανίου στα καύσιμα επιφέρει μείωση στις εκπομπές του μονοξειδίου του άνθρακα και σε πολλές περιπτώσεις ιδιαίτερα σημαντική, μεγαλύτερη του 20% των αρχικών εκπομπών.
- Η αύξηση στην περιεκτικότητα των προσθέτων και του αριθμού κετανίου, τείνει να αυξάνει το ποσοστό της μείωσης των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα.
- Τα μεγαλύτερα ποσοστά μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα εμφανίζονται στο diesel 1, το οποίο έχει και τις πιο αυξημένες εκπομπές, οι οποίες ξεπερνούν τα 2000 ppm στο 80% της λειτουργίας του κινητήρα.
- Η αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα συνοδεύεται από ταυτόχρονη αύξηση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου.
- Το diesel 1 παρουσιάζει αυξημένες εκπομπές οξειδίων του αζώτου σε σχέση με τα άλλα δύο καύσιμα βάσης, λόγω του ποσοστού FAME που περιέχεται σε αυτό.
- Με την προσθήκη βελτιωτικών φαίνεται μία συνολική τάση μείωσης των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου. Σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες προσθέτων και σε καύσιμα με μεγαλύτερους αριθμούς κετανίου, σημειώνεται μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών, σε αντίθεση με τις πιο μικρές περιεκτικότητες και αριθμούς κετανίου, όπου διακρίνεται μία τάση και όχι ιδιαίτερα αξιοσημείωτη ποσοστιαία μείωση.

- Η τάση μείωσης των οξειδίων του αζώτου με την προσθήκη βελτιωτικών είναι ποσοστιαία μικρότερη από την αντίστοιχη μείωση των εκπομπών του μονοξειδίου του άνθρακα.
- Το ποσοστό των άκαυστων υδρογονανθράκων στις εκπομπές καυσαερίων των καυσίμων είναι πολύ χαμηλό έως αμελητέο και δεν παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένη τάση.
- Οι εκπομπές των σωματιδίων αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου λειτουργίας του κινητήρα, ενώ διακρίνεται μία τάση μείωσης τους με την προσθήκη βελτιωτικών. Ωστόσο, δεν ακολουθούν συγκεκριμένη συμπεριφορά για τις διάφορες περιεκτικότητες των βελτιωτικών και του αριθμού κετανίου.
- Τα βέλτιστα, γενικά, αποτελέσματα όσον αφορά στη μείωση των συνολικών εκπομπών των τριών καυσίμων βάσης δόθηκαν από την προσθήκη του Opt σε περιεκτικότητα 5000 ppm και του E σε περιεκτικότητα 4500 ppm, πρόσθετα τα οποία επέφεραν και τις μεγαλύτερες αυξήσεις του αριθμού κετανίου του εκάστοτε καυσίμου βάσης στα diesel 1 και 2.
- Σε αντίθεση με τα άλλα δύο καύσιμα, στο diesel 3 τα βέλτιστα αποτελέσματα παρατηρούνται με την προσθήκη του βελτιωτικού E σε περιεκτικότητα 4500 ppm και όχι με του Opt 5000 ppm, το οποίο συνολικά στο diesel 3 δεν επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην πτώση του ιξώδους που προκαλεί το Opt στο diesel 3.

Η συμπεριφορά του κάθε προσθέτου συνοψίζεται στα ακόλουθα:

E450/B50:

- Αυξάνει τον αριθμό κετανίου για το diesel 1 κατά 2,1, 0,75 για το diesel 2 και 1,1 για το diesel 3, η κατά μέσο όρο αύξηση που επιφέρει στα τρία καύσιμα είναι 1,3.
- Αυξάνει το λόγο αέρα καυσίμου κατά 5,84% μέσο όρο των φορτίων λειτουργίας για το diesel 1 και 22% για το diesel 2, ενώ μειώνει κατά μέσο όρο κατά 3,05% για το diesel 3.
- Μειώνει την ειδική κατανάλωση του diesel 1 κατά 5,46%, μέσο όρο των πέντε φορτίων λειτουργίας του κινητήρα, του diesel 2 κατά 17,44%, ενώ αυξάνει του diesel 3 κατά 4%.
- Μειώνει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα κατά 2%, μέσο όρο των εκπομπών που καταγράφηκαν στα πέντε φορτία λειτουργίας, για το diesel 1, 1% για το diesel 2 και 3% για το diesel 3.
- Μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα κατά 12% στο diesel 1, κατά 6% στο diesel 2 και κατά 4% στο diesel 3 κατά μέσο όρο στα πέντε φορτία λειτουργίας.
- Προκαλεί μείωση των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου κατά 5% στο diesel 1, 3 % στο diesel 2 και 7% στο diesel 3, κατά μέσο όρο των πέντε φορτίων λειτουργίας.
- Μειώνει κατά 13% τις εκπομπές των σωματιδίων στο diesel 1, κατά 12% στο diesel 2 και 4% στο diesel 3 κατά μέσο όρο των εκπομπών των πέντε φορτίων λειτουργίας του κινητήρα.

E4500:

- Αυξάνει τον αριθμό κετανίου 6,17 για το diesel 1, 4,15 για το diesel 2 και 5,25 για το diesel 3 και επιφέρει κατά μέσο όρο αύξηση στα τρία καύσιμα 5,19 μονάδες
- Αυξάνει το λόγο αέρα καυσίμου κατά 3,76% για το diesel 1, 39.08% για το diesel 2 και τον μειώνει κατά 3,05% για το diesel 3, μέσο όρο των εκπομπών όλων των φορτίων λειτουργίας του κινητήρα.
- Μειώνει την ειδική κατανάλωση κατά μέσο όρο, 3,51% για το diesel 1, 25% για το diesel 2 και την αυξάνει κατά 1% για το diesel 3, μέσο όρο των εκπομπών όλων των φορτίων λειτουργίας του κινητήρα.
- Μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 10% για το diesel 1, 14% για το diesel 2 και 10% για το diesel 3, μέσο όρο των εκπομπών όλων των φορτίων λειτουργίας του κινητήρα.
- Μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα κατά 28% στο diesel 1, κατά 16 % στο diesel 2 και κατά 18% στο diesel 3 μέσο όρο των εκπομπών όλων των φορτίων λειτουργίας του κινητήρα.
- Προκαλεί μείωση 12% των εκπομπών οξειδίων του αζώτου, κατά μέσο όρο των φορτίων λειτουργίας του κινητήρα, στο diesel 1, 9% στο diesel 2 και 9% στο diesel 3.
- Μειώνει τις εκπομπές αιθάλης κατά 19% για το diesel 1, 16% για το diesel 2 και 8% για το diesel 3, μέσο όρο των εκπομπών όλων των φορτίων λειτουργίας του κινητήρα.

Opt5000:

- Αυξάνει τον αριθμό κετανίου του diesel 1 7,48 μονάδες, του diesel 2 5,77 και του diesel 3 7,68, η κατά μέσο όρο αύξηση για τα τρία καύσιμα βάσης είναι 6,98.
- Αυξάνει το λόγο αέρα καυσίμου κατά μέσο όρο 46,16% για όλα τα φορτία για το diesel 1, 32% για το diesel 2 και μειώνει κατά 2,86% για το diesel 3.
- Μειώνει την ειδική κατανάλωση κατά 29,74% για το diesel 1, 22% για το diesel 2 και την αυξάνει κατά 3% για το diesel 3, μέσο όρο των εκπομπών όλων των φορτίων λειτουργίας του κινητήρα.
- Μειώνει κατά 16% τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, κατά μέσο όρο όλων των φορτίων λειτουργίας του κινητήρα, για το diesel 1, 16% για το diesel 2 και κατά 3% για το diesel 3.
- Μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα κατά 30% στο diesel 1, κατά 19% στο diesel 2 και κατά 6% στο diesel 3, μέσο όρο των εκπομπών όλων των φορτίων λειτουργίας του κινητήρα.
- Μειώνει τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου, κατά μέσο όρο των φορτίων λειτουργίας, κατά 21 % για το diesel 1, 13% για το diesel 2 και 8% για το diesel 3.
- Μειώνει τις εκπομπές σωματιδίων, κατά μέσο όρο, 24% για το diesel 1, 18% για το diesel 2 και 7% για το diesel 3.

Ωm1700:

- Οδηγεί σε άνοδο του αριθμού κετανίου κατά 1,63 για το diesel 1, 2,3 για το diesel 2 και 1,25 για το diesel 3, κατά μέσο όρο για τα τρία κάυσιμα προκαλεί αύξηση του αριθμού κετανίου κατά 1,73.
- Αυξάνει το λόγο αέρα καυσίμου κατά μέσο όρο των φορτίων 36,14% στο diesel 1, 40% στο diesel 2 και τον μειώνει 2,2% στο diesel 3.
- Μειώνει την ειδική κατανάλωση του diesel 1 κατά 26,13%, μέσο όρο των φορτίων λειτουργίας, του diesel 2 κατά 25% και αυξάνει του diesel 3 κατά 2%.
- Μειώνει τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα κατά 24% για το diesel 1, 14% για το diesel 2 και 11% για το diesel 3.
- Μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου κατά 32%, 14%, 4 % για τα diesel 1, 2 και 3 αντίστοιχα.
- Προκαλεί μείωση εκπομπών κατά 26% για το diesel 1, κατά 13% για το diesel 2 και κατά 9% για το diesel 3.
- Μειώνει τις εκπομπές σωματιδίων κατά 24% στο diesel 1, 22% στο diesel 2 και 13% στο diesel 3.

E900/B100:

- Αυξάνει τον αριθμό κετανίου του diesel 1 κατά 3,22, ενώ το πρόσθετο E4500, 6,17 για το diesel 1, 4,15 για το diesel 2 και 5,25 για το diesel 3 και επιφέρει κατά μέσο όρο αύξηση στα τρία καύσιμα 5,19 μονάδες.
- Αυξάνει το λόγο αέρα καυσίμου του diesel 1 κατά 7,88%, μέσο όρο όλων των φορτίων.
- Μειώνει την ειδική κατανάλωση του diesel 1 κατά 7,3% μέσο όρο των φορτίων λειτουργίας.
- Μειώνει τις εκπομπές του diesel 1 σε διοξείδιο του άνθρακα κατά 3% μέσο όρο.
- Μειώνει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα κατά 17% στο diesel 1.
- Προκαλεί μικρή μείωση, κατά μέσο όρο, 2% στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου του diesel 1.
- Μειώνει τις εκπομπές του diesel 1 σε σωματίδια κατά 12%.

Στους Πίνακες 8-1 έως 8,5 παρουσιάζονται οι συμπεριφορές των προσθέτων ως προς την ειδική κατανάλωση, τον λόγο αέρα καυσίμου και τις εκπομπές, συγκριτικά με τα καθαρά καύσιμα diesel 1, 2 και 3.

Πίνακας 8-1: Συγκριτική συμπεριφορά του E450/B50 στο σημείο λειτουργίας 45%

E450/B50	BSFC	CO ₂	CO	NO _x	PM	AIR/FUEL
Εύρος Διαφοράς (%)	[-29, 0]	[-3, 0]	[-10, -5]	[-10, -8]	[-14, -3]	[0,41]
D1	↓	↓	↓↓	↓↓	↓	↑
D2	↓↓	-	↓↓	↓	↓↓	↑↑↑
D3	-	↓	↓	↓	↓↓	-

Πίνακας 8-2: Συγκριτική συμπεριφορά του E4500 στο σημείο λειτουργίας 45%

E4500	BSFC	CO ₂	CO	NO _x	PM	AIR/FUEL
Εύρος Διαφοράς (%)	[-33, -2]	[-20, -3]	[-22, -18]	[-8, -1]	[-8, -6]	[2,50]
D1	↓↓↓	↓↓	↓↓	↓	↓↓	↑
D2	↓	↓↓	↓	↓	↓↓	↑↑↑
D3	↓	↓	↓↓	↓↓	↓	↑

Πίνακας 8-3: Συγκριτική συμπεριφορά του Opt5000 στο σημείο λειτουργίας 45%

Opt5000	BSFC	CO ₂	CO	NO _x	PM	AIR/FUEL
Εύρος Διαφοράς (%)	[-34, 0]	[-15, -7]	[-24, -7]	[-21, -7]	[-12, -3]	[0,51]
D1	↓↓↓	↓	↓↓↓	↓↓↓	↓	↑↑↑
D2	↓↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓	↑↑↑
D3	-	↓	↓	↓	↓↓	-

Πίνακας 8-4: Συγκριτική συμπεριφορά του Ωm1700 στο σημείο λειτουργίας 45%

Ωm1700	BSFC	CO ₂	CO	NO _x	PM	AIR/FUEL
Εύρος Διαφοράς (%)	[-32, -1]	[-23, -12]	[-28, -7]	[-25, -9]	[-16, -9]	[1,47]
D1	↓↓↓	↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓	↑↑↑
D2	↓↓↓	↓	↓	↓	↓↓	↑↑↑
D3	↓	↓	↓	↓	↓	↑

Πίνακας 8-5: Συγκριτική συμπεριφορά του E900/B100 στο σημείο λειτουργίας 45%

E900/B100	BSFC	CO₂	CO	NO_x	PM	AIR/FUEL
Μεταβολή (%)	-5	-1	-15	-1	-14	5
D1	↓	↓	↓	↓	↓	↑

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Κολιόπουλος ΙΣ. Νεώτερη Ευρωπαϊκή Ιστορία, 1789-1945. Από τη Γαλλική Επανάσταση μέχρι τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Θεσσαλονίκη: Βάνιας; 1993.
- [2] Τσιγάρας Δ. Μελέτη της καύσης σε μηχανές ΟΤΤΟ – DIESEL και διαφορές υπερτροφοδοτούμενων σε σχέση με ατμοσφαιρικών εφαρμογών. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Τμήμα Μηχανολογίας; 2015.
- [3] Λόης Ε, Ζαννίκος Φ ΚΔ. Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών. Αθήνα: ΕΜΠ; 2014.
- [4] Fallis A. Handbook of petroleum product analysis. vol. 53. 2013. doi:10.1017/CB09781107415324.004.
- [5] Fahim M. A., Alsahaaf T. A. EA. Fundamentals of Petroleum Refining. Elsevier
- [6] Κοσσυφολόγου Ι. Δοκιμές Μιγμάτων Ντήζελ/Βιοντήζελ/HVO σε πρότυπο δίκυλινδρο ντηζελοκινητήρα. Αθήνα: ΕΜΠ; 2016.
- [7] EN 590. Ελληνικό Πρότυπο καύσιμα αυτοκίνησης - Πετρέλαιο κίνησης - Απαιτήσεις και μέθοδοι δοκιμής. ΕΛΟΤ 2013.
- [8] Καναβέλη ΙΠ. Μελέτη Φυσικοχημικών Ιδιοτήτων Μιγμάτων Ντήζελ - Βιοντήζελ και Μοντέλων Πρόβλεψής τους. Αθήνα: ΕΜΠ; 2015.
- [9] Viscosities and Rheology. Laboratory for Thermophysical Properties <http://www.ltp-oldenburg.de/index.php/viscosities.html> (accessed June 12, 2017).
- [10] D130 A. Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test 2004.
- [11] D93 A. Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester 2002.
- [12] STANDARD B, ISO B. Determination of flash point—Pensky-Martens closed cup method 2002.

- [13] Παπαγιάννης Α. Εργαστηριακή Άσκηση: Ποιότητα Ανάφλεξης Μεσαίων Αποσταγμάτων Πετρελαίου. Αθήνα: ΕΜΠ; 2007.
- [14] D4737 A. Standard Test Method for Calculated Cetane Index by Four Variable Equation. ASTM Int 2010;5:1–5. doi:10.1520/D4737-10.2.
- [15] Παπαϊωάννου ΑΘ. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ Τόμος ΙΙ: Συστήματα Παραγωγής Ισχύος, Θέρμανσης και Ψύξης. 2010.
- [16] Ρακόπουλος ΚΔ. Αρχές Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. Φούντας;
- [17] Department of Energy U. DOE Fundamentals Handbook Mechanical Science. Washington: 1993.
- [18] Gilbert Gedeon PE. Diesel Engine Fundamentals. New York: CED;
- [19] Γιακουμής Ε. Αρχές Μηχανων Εσωτερικής Καύσης Μέρος Β: Πραγματικός Κύκλος Λειτουργίας. Αθήνα: 2016.
- [20] Καναβέλη ΙΠ. Δοκιμές Μιγμάτων Ντήζελ-Βιοκαυσίμων Σε Δικύλινδρο Ντηζελοκινητήρα Και Μετρήσεις Των Εκπομπών Τους. Αθήνα: ΕΜΠ; 2017.
- [21] Bennett S. Modern Diesel Technology: Diesel Engines. New York: 2010.
- [22] Tschöke H MK. Handbook of Diesel Engines. Berlin: Springer-Verlag; 2010.
- [23] Γιακουμής Ε. Ρύπανση και Συστήματα Αντιρύπανσης Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. Αθήνα: 2015.
- [24] Chambliss S, Miller J, Façanha C, Minjares R, Blumberg K, Bandivadekar A et al. The Impact of Stringent Fuel and Vehicle Standards on Premature Mortality and Emissions. ICCT's Global Transportation Health and Climate Roadmap Series; 2013.
- [25] Xin Q. Diesel engine system design. Woodhead Publishing Limited; 2011.
- [26] Power MC, Weisskopf MG, Alexeeff SE, Coull BA, Avron S SJ. Traffic-related air pollution and cognitive function in a cohort of older men. Environmental Health Perspectives; 2011.
- [27] C A. Internal Combustion Engines. London: Academic Press; 1988.

- [28] Keskin, Resitoglu A., Altinisik K. A. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. Springer; 2015.
- [29] Ρακόπουλος Κ. ΧΔ. Καύση- Ρύπανση. Φούντας; 1998.
- [30] Fluent I. Prompt NO_x formation. 2011.
- [31] Fenimore C. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. Elsevier;
- [32] Γιακουμής Ε. Προδιαγραφές Καυσαερίων και Κύκλοι Δοκιμής Εμβολοφόρων Μ.Ε.Κ. Αθήνα: 2015.
- [33] Sandström-Dahl C. Investigation on emission effects of alternative fuels. Nor Enviromental Agency 2015.
- [34] Commission E. Emissions in the automotive sector <https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment->.
- [35] Ghosh P. Predicting the effect of cetane improvers on diesel fuels. Energy and Fuels 2008;22:1073–9. doi:10.1021/ef0701079.
- [36] Boudart M. Kinetics of Chemical Processes; Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering. Boston: Butterworth-Heinemann; 1991.
- [37] Ladommatos N, Parsi M, Knowles A. The effect of fuel cetane improver on diesel pollutant emissions. Fuel 1996;75:8–14. doi:10.1016/0016-2361(94)00223-1.
- [38] Research Council National. Impacts of Diesel Powered Light Duty Vehicles: Diesel Technology. London: 1982.
- [39] Andrews, G. E. and Nurein AM. Fuels for Auto- motive and Industrial Diesel Engines 1990:65.
- [40] Xing-Cai L, Jian-Guang Y, Wu-Gao Z, Zhen H. Effect of cetane number improver on heat release rate and emissions of high speed diesel engine fueled with ethanol-diesel blend fuel. Fuel 2004;83:2013–20. doi:10.1016/j.fuel.2004.05.003.
- [41] Atmanli A. Effects of a cetane improver on fuel properties and engine

- characteristics of a diesel engine fueled with the blends of diesel, hazelnut oil and higher carbon alcohol. *Fuel* 2016;172:209–17.
doi:10.1016/j.fuel.2016.01.013.
- [42] 3104 EI. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids, The Calculation of Dynamic Viscosity. Comité Européen de Normalisation 1996.
- [43] D7042 A. Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity)
- [44] Εργαστηριακός Οδηγός ΕΜΠ. Προσδιορισμός του σημείου ανάφλεξης κλειστού δοχείου κατά Pensy-Martens EN ISO 2719 (ASTM D-93 / IP 34).
- [45] D93 A. Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester. 2002.
- [46] D86 A. Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure. ASTM International n.d; 2004.
- [47] ADU5 IM. Anton Paar. 2016.
- [48] Manual F 5G & F 5Gs U. Instrumentation Scientifique de Laboratoire http://www.johnmorris.com.au/files/product/attachments/23354/233689_manual_instr.pdf (accessed February 2, 2017).
- [49] D2500 A. Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products. 2005.
- [50] D97 A. Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products. 2007.
- [51] Εργαστηριακός Οδηγός ΕΜΠ. Προσδιορισμός Αριθμού Κετανίου σε Ντίζελ.
- [52] D7170 A. Standard Test Method for Determination of Derived Cetane Number (DCN) of Diesel Fuel Oils—Fixed Range Injection Period, Constant Volume Combustion Chamber Method 1. 2014.
- [53] Manual Grabner Instruments. IROX DIESEL

- <http://files.instrument.com.cn/FilesCenter/20100622/SH100496-134783.pdf> (accessed August 16, 2017).
- [54] Scientific S. Comparison of EN 14078 and ASTM D7371 Infrared Biodiesel Methods
- [55] Use PI for. Petrotest. 2010.
- [56] D7545 A. Standard Test Method for Oxidation Stability of Middle Distillate Fuels—Rapid Small Scale Oxidation Test (RSSOT). 2014.
- [57] Avtron K490 Datasheet
<http://www.axiomtest.com/documents/models/Avtron K490 Datasheet.pdf> (accessed June 4, 2017).
- [58] International LK. Kane9206 Quintox Flue gas analyser & emissions monitor brochure.
- [59] International LK. KANE9206 Quintox Flue Gas Analyser- Manual. Emissions Monitor Data Sheet n.d; 2014.
- [60] Li R, Wang Z, Ni P, Zhao Y, Li M, Li L. Effects of cetane number improvers on the performance of diesel engine fuelled with methanol/biodiesel blend. *Fuel* 2014;128:180–7. doi:10.1016/j.fuel.2014.03.011.
- [61] Chaluvadi N, Vijay P, Puli RVR, Dadi Y, Pavan CVVN. Diesel Engine Performance Improvement by Using Cetane Improver. *Int J Eng Innov Technol* 2013;2:179–82.
- [62] Senatore A, Cardone M, Rocco V PM V. A Comparative Analysis of Combustion Process in D.I. Diesel Engine Fueled with Biodiesel and Diesel Fuel. 2000.
- [63] Ahmed ST. Effect of Fuel Cetane Number on Multi-Cylinders Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions 2012;8:65–75.
- [64] Soveran DW, Sulatisky M, Ha K, Robinson W, Stumborg M. The Effect on Diesel Engine Emissions With High Cetane Additives From Biomass Oils 1980.

- [65] Velmurugan K, Gowthamn S. Effect of CETANE Improver Additives on Emissions 2012;2:3372-5.
- [66] Lapuerta M, Armas O R-FJ. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. Prog Energy Combust Sci 2008.
- [67] Hoekman SK RC. Review of the effects of biodiesel on NOx emissions. Fuel Process Technol 2012.