



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Χαρτογράφηση κινητήρα Ruggerini RF91 και
μέτρηση χαρακτηριστικών φόρτισης – αναγέννησης
φίλτρου αιθάλης επί του κινητήρα**

ΖΕΪΜΠΕΚΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Α.ΣΤΑΜΑΤΕΛΛΟΣ

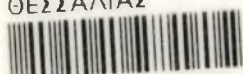
ΒΟΛΟΣ 2003



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 2498/1
Ημερ. Εισ.: 02-03-2004
Δωρεά: _____
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΜΜΒ
2003
ΖΕΪ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070523

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Ο τίτλος της διπλωματικής εργασίας είναι:

“ Χαρτογράφηση κινητήρα Ruggerini RF91 και μέτρηση χαρακτηριστικών φόρτισης – αναγέννησης φίλτρου αιθάλης επί του κινητήρα”

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι:

- Η δημιουργία διάταξης πέδησης για τον κινητήρα, ώστε να είναι δυνατή η επιβολή μεταβλητού φορτίου σε αυτόν
- Η διερεύνηση και παρουσίαση της λειτουργίας του κινητήρα με τη δημιουργία των χαρτών λειτουργίας του
- Ο έλεγχος της πειραματικής διάταξης και η βελτίωσή της
- Η διερεύνηση της συμπεριφοράς μικρού φίλτρου αιθάλης επί του κινητήρα
- Η δημιουργία υπόβαθρου για την επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται από τις μετρήσεις της πειραματικής διάταξης

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στον κινητήρα Diesel, στις εκπομπές ρύπων αυτού και τους κανονισμούς περιορισμού των εκπομπών. Επίσης παρουσιάζονται τα φίλτρα αιθάλης για τους πετρελαιοκινητήρες, η λειτουργία τους και η αποκαλούμενη αναγέννηση αυτών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση και η περιγραφή της πειραματικής διάταξης των πειραμάτων που διεξήχθησαν.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος στησίματος της συνολικής διάταξης, οι επιμέρους βελτιώσεις της καθώς και η διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σχέσεις υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των χαρτών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα: οι χάρτες λειτουργίας του κινητήρα, οι γραμμές Willans για την εύρεση απωλειών τριβών του καθώς και οι μετρήσεις πτώσης πίεσης και θερμοκρασιών του φίλτρου αιθάλης επί του κινητήρα.

Στο έκτο κεφάλαιο βρίσκονται τα γενικά συμπεράσματα και κάποιες προτάσεις που προκύπτουν από τη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος υπάρχει παράρτημα με κάποιες βοηθητικές εικόνες και πίνακες.

Abstract

The title of current diploma thesis is:

‘ Mapping of Ruggerini RF91 engine and measurement of the characteristics of particulate filter loading-regeneration equipped on engine ’

The target of this project is:

- The construction of engine’s test bench, in order to measure the engine characteristics in several loadings
- The study and presentation of the engine operation, with the aid of engine maps
- The check of the experimental layout and further improvements on it
- The study of small-scale particulate filter behavior equipped on engine
- The construction of a systematic approach for data acquisition and further processing.

Chapter one presents a general discussion on diesel engine, on diesel emissions and emissions legislation. In addition a short presentation of particulate filters, their operation and the regeneration process is made.

Chapter two presents the experimental layout and descriptions of the experiments that took place.

Chapter three presents the works made on the experimental layout, further improvements on it and the experimental procedure.

Chapter four includes the literature equations used for non-measured data calculations.

Chapter five presents the experimental results: the operation maps of the engine, Wilans line methodology for the prediction of friction losses and measurements of pressure drop and temperature across the filter.

Chapter six is a discussion for the total conclusions of the current thesis, as well as several proposals for the improvement of experimental layout.

Appendix contains tables and several assistance pictures

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία, κλείνει ο κύκλος σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Πέντε χρόνια φοιτητικής ζωής, πέντε χρόνια «μάθημα» ζωής μέσα και έξω από τη σχολή.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και τον αδερφό μου, οι οποίοι μου έδωσαν την ευκαιρία να βρεθώ εδώ στο Βόλο και μου συμπαραστάθηκαν καθ'όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Ευχαριστώ όλους του καθηγητές μου και ιδιαίτερα τον Α.Σταματέλλο που εκτίμησα περισσότερο και με δέχτηκε στο Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Στο εργαστήριο οι υποψήφιοι διδάκτορες Γ.Στρατάκης και Γ.Κωνσταντάς με τις γνώσεις και την εμπειρία τους υπήρξαν άψογοι συνεργάτες και φίλοι στους οποίους είμαι ευγνώμων για τη βοήθεια και το ενδιαφέρον τους.

Ευχαριστώ επίσης και τον ηλεκτρονικό του τμήματος Α.Δαφερέρα για την πολύτιμη βοήθειά του στα ηλεκτρονικά κυκλώματα και τα μετρητικά όργανα.

Από τις πρώτες μέρες στη σχολή μέχρι σήμερα, επτά άτομα αποτέλεσαν τους κλειστούς φίλους μου που μαζί ζήσαμε και μοιραστήκαμε στιγμές που δε θα μπορέσω με λόγια να εκφράσω. Κώστα, Βασίλη, Γιώργο, Λάζαρε, Δημήτρη, Κώστα, Σάκη απλά σας αγαπώ.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον άνθρωπό μου, που χρειάζομαι και βρίσκεται δίπλα μου κάθε στιγμή. Βάσω ευχαριστώ για όλα.

Εύχομαι σε όλους υγεία και καλή συνέχεια σε δρόμο που επιθυμεί ο καθένας.

Στον Πέτρο και τη Μελπομένη

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ DIESEL	8
1.1.1	Ιστορικά	8
1.1.2	Λειτουργία Κινητήρα	9
1.1.3	Ο Θερμοδυναμικός Κύκλος Diesel	10
1.1.4	Σύγκριση μονάδων παραγωγής ισχύος – Πλεονεκτήματα του κινητήρα Diesel	12
1.1.5	Κατηγοριοποίηση κινητήρων	14
1.1.6	Το καύσιμο diesel.	15
1.2	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ	16
1.2.1	Αέριες εκπομπές ρύπων - Οξειδία του αζώτου (NOx)	17
1.2.2	Αέριες εκπομπές ρύπων – Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	18
1.2.3	Αέριες εκπομπές ρύπων – Υδρογονάνθρακες (HC)	19
1.2.4	Αέριες εκπομπές ρύπων – Διοξείδιο του Θείου (SO ₂)	21
1.2.5	Αέριες εκπομπές ρύπων – Νιτρώδες Οξείδιο (N ₂ O)	21
1.2.6	Στερεές εκπομπές ρύπων – Σωματίδια (DPM)	22
1.3	ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ	24
1.3.1	Ο ευρωπαϊκός κύκλος οδήγησης	26
1.4	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL	29
1.5	ΦΙΛΤΡΑ ΑΙΘΑΛΗΣ	30
1.5.1	Οι μηχανισμοί συγκράτησης των σωματιδίων.	31
1.5.2	Η αναγέννηση στις παγίδες αιθάλης	33
1.5.3	Υλικά και κατασκευή των φίλτρων αιθάλης	39
1.5.4	Πρόσθετο καυσίμου	40
2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	43
2.1	ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	45

2.2	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	47
2.3	ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ	48
2.4	ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	49
2.5	ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	50
2.6	ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ	51
2.7	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	52
2.7.1	Κύκλωμα για τη μέτρηση της τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος	52
2.7.2	Κύκλωμα για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος	53
2.7.3	Κύκλωμα για τη μέτρηση της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος	53
2.8	ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ	54
2.9	ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ	54
2.10	ΦΙΛΤΡΟ ΑΙΘΑΛΗΣ	55
2.11	ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	56
2.11.1	Ηλεκτρονικός υπολογιστής	56
2.11.2	Λογισμικό	56
2.11.3	Κάρτα καταγραφής	57
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	58
3.1	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ	58
3.2	ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	58
3.3	ΤΕΛΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	60
3.3.1	Χαρτογράφηση του κινητήρα	60
3.3.2	Φόρτιση και αναγέννηση φίλτρου αιθάλης	61
3.4	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	62
3.5	ΒΗΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	64

3.6	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	64
4	ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	65
4.1	ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	65
4.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΡΙΒΩΝ	67
4.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ	70
4.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΕΡΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	72
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	73
5.1	ΣΗΜΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	73
5.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΡΙΒΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	74
5.3	ΧΑΡΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	79
5.4	ΦΟΡΤΙΣΗ – ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ ΦΙΛΤΡΟΥ ΑΙΘΑΛΗΣ ΕΠΙ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	90
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	101
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	104

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ DIESEL

1.1.1 Ιστορικά

Ο κινητήρας Diesel εφευρέθηκε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα από τον Dr. Rudolf Diesel (1858-1913) και φέρει το όνομά του. Πρώτη φορά ο κινητήρας αυτός τέθηκε σε λειτουργία το 1893, ενώ δύο χρόνια αργότερα ο Dr. Diesel παρουσίασε ένα μοντέλο με θεωρητική μηχανική απόδοση 75.6%, την εποχή που η τότε δημοφιλής ατμομηχανή είχε 10%.

Ο κινητήρας Diesel είναι η πιο αποδοτική ενεργειακά μονάδα παραγωγής ισχύος από όλους τους μέχρι σήμερα γνωστούς τύπους μηχανών εσωτερικής καύσης. Αυτό μεταφράζεται σε οικονομία καυσίμου και σε μειωμένες εκπομπές ρύπων. Παρ'όλα αυτά στο πέρασμα των χρόνων ο κινητήρας Diesel έμεινε πίσω του βενζινοκινητήρα, στη χρήση σε οχήματα. Οι σημαντικότεροι λόγοι που συνετέλεσαν σε αυτό είναι οι παρακάτω:

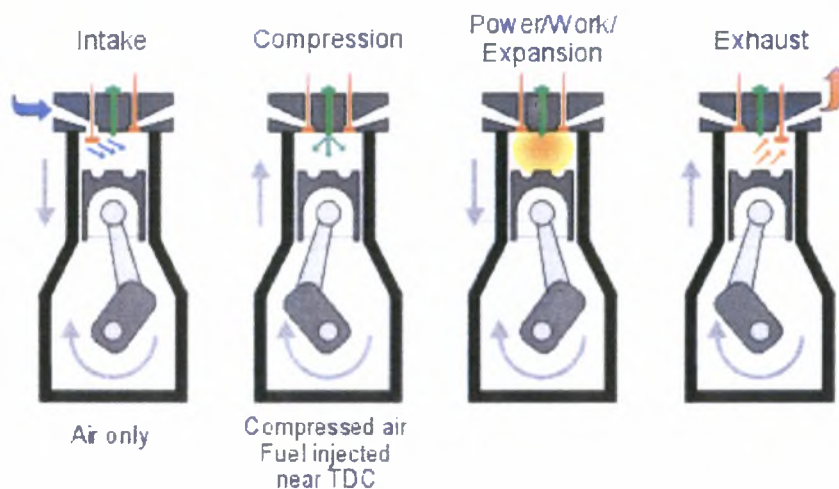
- Ο κινητήρας Diesel, επειδή έχει μεγαλύτερη σχέση συμπίεσης, είναι βαρύτερος από έναν ισοδύναμο βενζινοκινητήρα.
- Έχει την τάση να κοστίζει περισσότερα.
- Εξαιτίας του βάρους και της σχέσης συμπίεσης είναι πιο αργόστροφος. Αυτό καθιστά τον Diesel κινητήρα υψηλής ροπής παρά υψηλής ισχύος. Από πολλούς αυτό θεωρείται μειονέκτημα.
- Λειτουργεί με έγχυση του καυσίμου, και στο παρελθόν ο ψεκασμός καυσίμου ήταν ακριβός και λιγότερο αξιόπιστος.
- Παράγει περισσότερο καπνό.
- Σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος υπάρχει πρόβλημα εκκίνησης.
- Είναι περισσότερο θορυβώδης και δονείται εντονότερα.

Οι καινούριοι κινητήρες Diesel έχουν εξελιχθεί και πολλά από τα παραπάνω προβλήματα –καπνός, θόρυβος, δονήσεις, κόστος, εκκίνηση- έχουν εξαλειφθεί. Σταθμό στην εξέλιξη της τεχνολογίας των κινητήρων Diesel αποτέλεσε το πέρασμα από τα συστήματα με προθάλαμο καύσης, στα συστήματα με απ'ευθείας ψεκασμό

στις αρχές της δεκαετίας του 90. Αυτό αύξησε περαιτέρω τα οφέλη χαμηλής κατανάλωσης καυσίμου και χαμηλής εκπομπής ρύπων. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 90, τα επιβατικά οχήματα με κινητήρα Diesel στην Ευρώπη, παρουσίασαν αύξηση με ρυθμούς που ξεπέρασαν το 40% ανά τριετία, ενώ αναμένεται ο ρυθμός να αυξηθεί στα επόμενα χρόνια. Εκτιμάται ότι σήμερα καταλαμβάνουν το σημαντικό μερίδιο του 36% των συνολικών επιβατικών οχημάτων.

1.1.2 Λειτουργία Κινητήρα

Στην εικόνα φαίνονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την λειτουργία ενός τετράχρονου κινητήρα εσωτερικής καύσης.



Εικόνα 1-1 Σχηματική παράσταση των χρόνων λειτουργίας του κινητήρα Diesel

Οι τέσσερις χρόνοι είναι:

Γόμωση του κυλίνδρου: Αναφέρεται στην εισαγωγή του καυσίμου μίγματος ή του φρέσκου αέρα στο εσωτερικό του κυλίνδρου, από την πολλαπλή εισαγωγής διαμέσου των βαλβίδων ή των θυρίδων εισαγωγής.

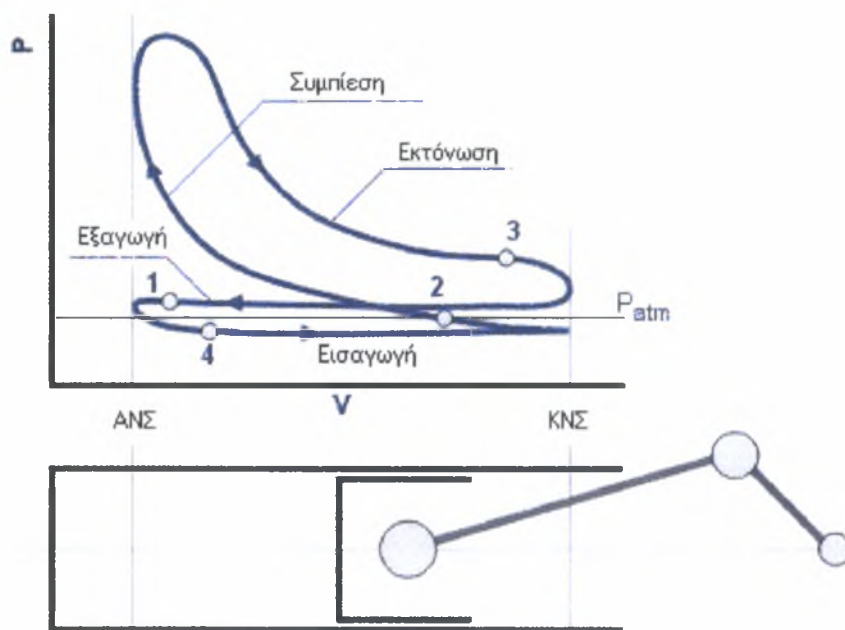
Συμπίεση: Σε αυτή την φάση το πιστόνι κινείται προς το άνω νεκρό σημείο συμπιέζοντας το περιεχόμενο του κυλίνδρου. Κατά την διάρκεια της συμπίεσης λαμβάνει χώρα και η έγχυση του καυσίμου σε μορφή μικρών σταγονιδίων

Καύση – Εκτόνωση: Όταν το μίγμα φθάσει στο σημείο αυτανάφλεξης του, λόγω των υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών, αναφλέγεται προκαλώντας σημαντική αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα την ώθηση του πιστονιού, άρα και την διατήρηση της κίνησης του κινητήρα.

Εξαγωγή: Είναι η φάση όπου εξάγονται τα παράγωγα της καύσης από το εσωτερικό του κυλίνδρου.

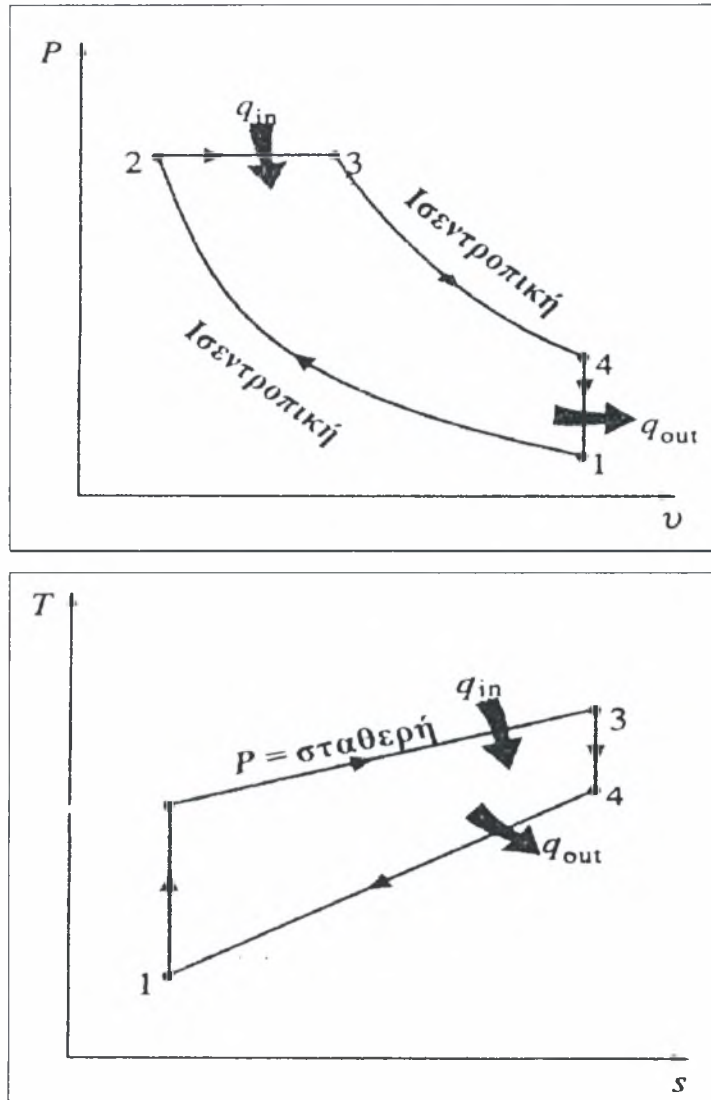
1.1.3 Ο Θερμοδυναμικός Κύκλος Diesel

Ο πραγματικός κύκλος ενός κινητήρα Diesel αποτελείται από τέσσερα στάδια, που αντιστοιχούν στις τέσσερις διαδρομές του εμβόλου.



Εικόνα 1-2 Διάγραμμα πραγματικού κύκλου diesel

Οι διεργασίες του κινητήρα Diesel μπορούν να προσεγγιστούν από τον ιδανικό θερμοδυναμικό κύκλο Diesel, ο οποίος αποτελείται από μια ισεντροπική συμπίεση, μια ισοβαρή διεργασία προσθήκης θερμότητας, μια ισεντροπική εκτόνωση και μια ισόχωρη απόρριψη θερμότητας, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1-3 Διαγράμματα P-V και T-S ιδανικού θερμοδυναμικού κύκλου diesel

Ο κύκλος Diesel πραγματοποιείται σε μια συσκευή εμβόλου – κυλίνδρου που σχηματίζει ένα κλειστό σύστημα. Οι ποσότητες της θερμότητας, που προστίθεται στο ρευστό λειτουργίας με σταθερή πίεση και αφαιρείται από αυτό με σταθερό όγκο εκφράζονται ως εξής:

$$q_{in} = C_p (T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = C_v (T_4 - T_1)$$

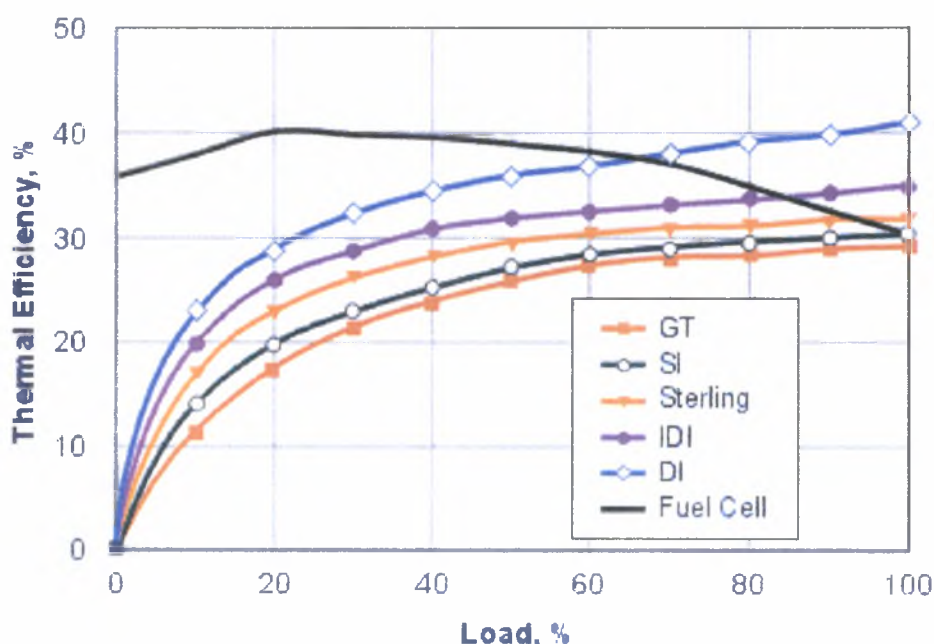
Τότε, σύμφωνα με τις παραδοχές του προτύπου κρύου αέρα, η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Diesel θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$n_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)}$$

1.1.4 Σύγκριση μονάδων παραγωγής ισχύος – Πλεονεκτήματα του κινητήρα Diesel

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το δυνατό σημείο των κινητήρων Diesel είναι η οικονομία καυσίμου. Για να γίνει αυτό καλύτερα αντιληπτό, παρατίθεται μια μελέτη όπου συγκρίνονται άμεσα οι θερμικοί βαθμοί απόδοσης των παρακάτω μονάδων παραγωγής ισχύος :

- Αεριοστρόβιλος (Gas turbine – GT)
- Βενζινοκινητήρας (Spark ignited gasoline engine – SI)
- Κινητήρας Sterling
- Κινητήρας Diesel άμεσου και έμμεσου ψεκασμού (DI – IDI)
- Κελιά καυσίμου (Fuel cells)



Εικόνα 1-4 Σύγκριση θερμικών αποδόσεων μονάδων παραγωγής ισχύος

Πρέπει να σημειωθεί ότι μέχρι σήμερα βενζινοκινητήρες και πετρελαιοκινητήρες έχουν εξελιχθεί σημαντικά ενώ τα κελιά καυσίμου αποτελούν τη πρόταση του μέλλοντος. Ωστόσο για αυτά, η επιλογή, ο χειρισμός και η υποδομή του

καυσίμου, η ασφάλεια, η λειτουργικότητα και η απόδοση του αναμορφωτή, το κόστος κατασκευής και η αποδοχή από τους καταναλωτές είναι κάποια σημεία που συγκρατούν τον ενθουσιασμό και καθιστούν την εμπορευματοποίησή τους μακροπρόθεσμη. Οι υπόλοιπες μονάδες είναι στάσιμες εδώ και χρόνια σε μεγάλο βαθμό.

Πέρα από το θέμα της οικονομίας καυσίμου, ο κινητήρας Diesel χαρακτηρίζεται και από άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα. Πιο αναλυτικά έχουμε :

- Εκπομπές

Ένας κινητήρας Diesel εκπέμπει εξαιρετικά χαμηλές συγκεντρώσεις από άκαυστους υδρογονάνθρακες και μονοξείδιο του άνθρακα. Αυτό συμβαίνει γιατί λειτουργεί σε φτωχά μίγματα καυσίμου όπου το λ (λόγος αέρα καυσίμου προς τον στοιχειομετρικό λόγο) είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Επίσης σε σύγκριση με τους βενζινοκινητήρες, εκπέμπουν περίπου 25% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα (οι DI), το οποίο είναι υπεύθυνο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

- Αντοχή

Η σχέση συμπίεσης στους Diesel κινητήρες είναι περίπου διπλάσια από τους βενζινοκινητήρες. Η θερμότητα απελευθερώνεται νωρίτερα στον κύκλο καύσης και με πιο απότομο ρυθμό, οπότε η κατασκευή της μηχανής απαιτείται να είναι πιο στιβαρή. Μαζί με τη θερμότητα παράγεται και περισσότερη ροπή σε χαμηλότερη ταχύτητα του κινητήρα. Έτσι οι πετρελαιοκινητήρες φημίζονται για την αντοχή τους στο χρόνο και έχουν διάρκεια ζωής μέχρι και 4 φορές μεγαλύτερη από τους βενζινοκινητήρες.

- Αξιοπιστία

Για το λόγο κυρίως ότι δε χρησιμοποιούνται σύστημα ανάφλεξης, διανομέας, μπουζοκαλώδια κτλ, τα οποία παρουσιάζουν βλάβη σχετικά εύκολα, είναι πιο αξιόπιστοι.

- Απώλειες τριβών

Η ισχύς είναι ανάλογη της ροπής και της ταχύτητας. Από τη στιγμή που ο Diesel κινητήρας παράγει μεγαλύτερη ροπή σε χαμηλότερη ταχύτητα, γενικά και η ισχύς παράγεται σε χαμηλότερες στροφές. Με χαμηλότερες στροφές οι απώλειες τριβών μειώνονται και επωφελείται η ωφέλιμη ισχύς.

- Ευκολία αναπνοής και χαμηλές απώλειες άντλησης

Ο έλεγχος της αναπτυσσόμενης ροπής γίνεται με μεταβολή της ποσότητας καυσίμου που ψεκάζεται στον κύλινδρο. Ο αέρας που εισέρχεται εξαρτάται μόνο από τις στροφές. Έτσι ο κινητήρας αναπνέει καλύτερα και οι απώλειες άντλησης ελαχιστοποιούνται.

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κινητήρα Diesel.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οικονομία καυσίμου	Θόρυβος*
Αντοχή	Βάρος
Χαμηλές εκπομπές HC*	Υψηλές εκπομπές NOx*
Χαμηλές εκπομπές CO*	Υψηλές εκπομπές σωματιδίων αιθάλης*
Ροπή	Χαμηλή ταχύτητα περιστροφής
Αξιοπιστία	Μικρή εκμετάλλευση αέρα
Χαμηλό κόστος καυσίμου	Υψηλό κόστος κινητήρα
Χαμηλό κόστος συντήρησης	Χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίου**
* καθορισμένα από τη νομοθεσία	
** σημαντικό για τη μετεπεξεργασία του καυσαερίου και την απόδοση του στροβιλοσυμπιεστή	

Πίνακας 1-1 Μειονεκτήματα του κινητήρα Diesel

1.1.5 Κατηγοριοποίηση κινητήρων

Λόγω της πληθώρας τεχνολογιών που εφαρμόζονται στους κινητήρες Diesel αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν βάσει:

- Της εφαρμογής (αυτοκινήτου, φορτηγού, πλοίου, γεννήτριας, κλπ)
- Της βασικής μεθοδολογίας σχεδιασμού (σε σειρά, σχήματος V, κλπ)
- Του κύκλου λειτουργίας (δίχρονοι και τετράχρονοι, υπερπληρούμενοι και ατμοσφαιρικοί)
- Τον σχεδιασμό και την θέση των βαλβίδων (επικεφαλής, στο σώμα, κλπ)
- Το καύσιμο (πετρέλαιο, υγραέριο, biodiesel, κλπ)

- Τη μέθοδο προπαρασκευής του μίγματος (άμεσου και εμμέσου ψεκασμού)
- Τη μέθοδο ψύξης (υδρόψυκτοι και αερόψυκτοι)

1.1.6 Το καύσιμο diesel.

Το καύσιμο diesel είναι μίγμα υδρογονανθράκων και οι πιο σημαντικές ιδιότητες του είναι η πυκνότητα, η πτητικότητα, το ιζώδες, ο αριθμός κετανίου και η περιεκτικότητα του σε θείο.

Ο αριθμός κετανίου όσο μεγαλύτερος είναι τόσο ευκολότερα γίνεται η ανάφλεξη του καυσίμου. Το ιζώδες του είναι σημαντικό για την πλήρωση του θαλάμου καύσης, επειδή η έγχυση του diesel γίνεται σε πολύ μικρές ποσότητες. Επίσης το καύσιμο diesel θα πρέπει να έχει πολύ καλή συμπεριφορά στις χαμηλές θερμοκρασίες. Μια ιδιότητα η οποία έχει μεγάλη σημασία είναι η περιεκτικότητα του σε θείο. Μέσα στο θάλαμο καύσης το θείο μετατρέπεται σε SO₂ που είναι πολύ βλαβερό για το περιβάλλον και έτσι όλοι οι κανονισμοί περιορισμού των εκπομπών θέτουν όρια στην περιεκτικότητα σε θείο.

Το diesel περιέχει αρκετά πρόσθετα για να βελτιωθεί η συμπεριφορά του, όπως ενώσεις με τις οποίες η καύση γίνεται με λιγότερο θόρυβο και αυξάνουν τον αριθμό κετανίου, αντιδιαβρωτικές ουσίες και λιπαντικές ουσίες. Τυπικά χαρακτηριστικά του καυσίμου diesel για διάφορες αγορές φαίνονται στον πίνακα της επόμενης σελίδας.

	Θείο	Αριθμός Κετανίου	Ολικά Αρωματικά	Πυκνότητα	T90/95	Φορολογικό Κίνητρο
	max ppm	min	max % vol.	g/cm ³	max °C	\$/ton
US No.2 (ASTM D975)	500	40	-	-	338	-
CARB ^a	500	40	10	-	338	-
EU 1996 (EN 590)	500	49	-	0.82-0.86	370	-
Japan No.2	500	45 ^b	-	-	350	-
Japan No.3	500	45 ^b	-	-	330	-
Sweden Class I	10	50 ^b	5	0.80-0.82	285	97
Sweden Class II	50	47 ^b	20	0.80-0.82	295	54
Finland Sw II	50	47 ^b	20	0.80-0.82	295	34
Denmark Sw I	10	50/47 ^b	5	0.80-0.82	285	85
Denmark City Bus	500	50	-	0.82-0.855	325	50
UK City Diesel	10	49 ^b	-	0.80-0.83	-	37.5

Πίνακας 1-2 Χαρακτηριστικά του καυσίμου diesel σε διάφορες χώρες

1.2 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ

Οι κινητήρες Diesel, όπως και οι υπόλοιπες μηχανές εσωτερικής καύσης μετατρέπουν τη χημική ενέργεια που περιέχεται στο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Το καύσιμο diesel είναι ένα μίγμα υδρογονανθράκων το οποίο θεωρητικά στην αντίδραση της τέλει καύσης παράγει μόνο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και νερό (H₂O). Στην πράξη τα προϊόντα της καύσης αποτελούνται επιπλέον από μια πλειάδα χημικών ενώσεων, οι οποίες μπορεί να είναι τοξικές για τον ανθρώπινο οργανισμό ή να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Οι ρύποι του κινητήρα Diesel προέρχονται από μη ιδανικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της καύσης, όπως:

- Ατελής καύση του καυσίμου

- Αντιδράσεις μεταξύ των συστατικών του καυσαερίου μίγματος στον κύλινδρο σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης
- Καύση του λιπαντικού μέσου και των προσθέτων αυτού
- Καύση ανόργανων ενώσεων του καυσίμου, όπως θείο (S) και διάφορα χημικά πρόσθετα

Η σημερινή νομοθεσία προβλέπει κανονισμούς μόνο για ορισμένους ρύπους και την σύσταση της καύσιμης ύλης.

1.2.1 Αέριες εκπομπές ρύπων - Οξειδία του αζώτου (NO_x)

Οι εκπομπές NO_x, όπως αυτές καθορίζονται από την νομοθεσία, περιλαμβάνουν το μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂). Οι συγκεντρώσεις αυτών στην εξαγωγή του κινητήρα είναι συνήθως μεταξύ 50 και 1000 ppm.

Το οξείδιο του αζώτου σχηματίζεται μέσα στα υψηλής θερμοκρασίας προϊόντα της καύσης, πίσω από το μέτωπο της φλόγας, μέσω χημικών αντιδράσεων μεταξύ ατόμων και μορίων αζώτου και οξυγόνου του ατμοσφαιρικού αέρα εισαγωγής (η περιεκτικότητα σε N₂ του καυσίμου diesel είναι αμελητέα), που δεν φτάνουν ποτέ σε χημική ισορροπία. Ο ρυθμός σχηματισμού αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας των προϊόντων της καύσης, ενώ λόγω ανομοιόμορφης κατανομής θερμοκρασίας και λόγου αέρα των προϊόντων μεγιστοποιείται στις περιοχές με λ κοντά στη μονάδα. Καθώς τα προϊόντα αυτά κρύνουν στη διάρκεια του εμβολισμού εκτόνωσης παγώνουν οι αντιδράσεις σχηματισμού NO, αφήνοντας έτσι τη συγκέντρωση του ρύπου αυτού σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από αυτά που αντιστοιχούν σε χημική ισορροπία στις θερμοδυναμικές συνθήκες του καυσαερίου.

Το οξείδιο του αζώτου (NO) είναι άχρωμο και άοσμο αέριο, το οποίο σχηματίζεται, κάτω από συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων, σύμφωνα με την ενδόθερμη αντίδραση σχηματισμού



Σε χαμηλές θερμοκρασίες η σταθερά ισορροπίας μετατοπίζει την αντίδραση προς τα αριστερά. Θερμοδυναμικά, το μονοξείδιο του αζώτου έχει την τάση να διασπαστεί στα παράγωγά του στις συνθήκες της εξαγωγής. Παρόλα αυτά ο ρυθμός διάσπασης

του παραμένει πρακτικά μηδενικός γεγονός που αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στον έλεγχο των εκπομπών ρύπων.

Περίπου 95% των οξειδίων του αζώτου εξέρχονται από τον κύλινδρο σαν NO και μόνο το 5% σαν NO₂ σύμφωνα με τις χημικές ισορροπίες των αντιδράσεων. Παρόλα αυτά έχει παρατηρηθεί ότι οι εκπομπές διοξειδίων στους κινητήρες diesel είναι τάξης μεγέθους 10 – 30% των συνολικών NOx. Αυτό γίνεται εμφανές στις παρακάτω αντιδράσεις.

Το μονοξείδιο του αζώτου που σχηματίζεται στο μέτωπο της φλόγας αντιδρά ως εξής



Και στην συνέχεια μετατρέπεται σε NO μέσω της αντίδρασης



εκτός αν το NO₂ που σχηματίζεται στην ζώνη της φλόγας χάσει θερμότητα, είτε λόγω ανάμιξής του με χαμηλότερης θερμοκρασίας ρευστό είτε λόγω πρόσκρουσης στις ψυχρότερες ζώνες του θαλάμου καύσης (μερικό φορτίο).

Επίσης το NO του καυσαερίου μπορεί εύκολα να οξειδωθεί από οξυγόνο σε συνθήκες περιβάλλοντος βάσει της εξώθερμης αντίδρασης



Αυτή η αντίδραση λαμβάνει χώρα αυτόματα, αλλά όχι ακαριαία, στο μίγμα αέρα – NO όταν τα καυσαέρια εξαχθούν στην ατμόσφαιρα.

Το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) είναι καφεκόκκινο αέριο, με πολύ δυσάρεστη και ενοχλητική οσμή και εξαιρετικά τοξικό. Επίσης αντιδρά πολύ εύκολα και παρουσιάζει ισχυρές οξειδωτικές ιδιότητες. Οι αντιδράσεις του NO₂ που λαμβάνουν χώρα σε διάφορους τύπους καταλυτών των καυσαερίων περιλαμβάνουν οξειδώσεις υδρογονανθράκων, μονοξειδίου του άνθρακα και σωματιδίων.

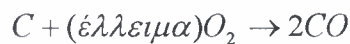
Τα οξείδια του αζώτου είναι ίσως από τους πιο κρίσιμους ρύπους που έχουν βρεθεί στην εξαγωγή των κινητήρων Diesel.

1.2.2 Αέριες εκπομπές ρύπων – Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)

Το μονοξείδιο του άνθρακα σχηματίζεται στη διάρκεια της καύσης όταν το μίγμα είναι πλούσιο ($\lambda < 1$), οπότε δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο για να μετατραπεί όλος

ο άνθρακας του καυσίμου σε διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Επιπλέον δημιουργία μονοξειδίου έχουμε στα υψηλής θερμοκρασίας προϊόντα της καύσης με διάσπαση του διοξειδίου του άνθρακα, ακόμη και σε φτωχά μίγματα. Κατά την διάρκεια του εμβολισμού εκτόνωσης λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του θαλάμου καύσης παγώνει και η αντίδραση οξείδωσης του CO.

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένα άοσμο, άχρωμο και πολύ τοξικό αέριο με περίπου ίδια πυκνότητα με αυτή του αέρα. Σε υψηλές συγκεντρώσεις είναι πολύ εύφλεκτο και μπορεί να καεί στον αέρα παράγοντας μια μπλε φλόγα. Σχηματίζεται σύμφωνα με την αντίδραση:



Οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα στους σύγχρονους κινητήρες Diesel είναι σχετικά χαμηλές και κινούνται στο εύρος τιμών από 10 ως 500 ppm. Το CO μπορεί εύκολα να οξειδωθεί από το οξυγόνο και να σχηματίσει διοξείδιο του άνθρακα. Η αντίδραση λαμβάνει χώρα με έντονη έκλυση θερμότητας. Για παράδειγμα αδιαβατική οξείδωση 1% CO στο ρεύμα εξόδου των καυσαερίων μπορεί να αυξήσει την θερμοκρασία του αερίου κατά 100 °C. Η αντίδραση οξείδωσης του μονοξειδίου του άνθρακα είναι



Στην επονομαζόμενη αντίδραση water shift reaction το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με ατμούς νερού παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Η συγκεκριμένη αντίδραση λαμβάνει χώρα σε ορισμένους τύπους καταλυτών



1.2.3 Αέριες εκπομπές ρύπων – Υδρογονάνθρακες (HC)

Η δημιουργία υδρογονανθράκων στο θάλαμο καύσης προκαλείται από διάφορους μηχανισμούς. Κατά την διάρκεια της συμπίεσης και της καύσης η αυξημένη πίεση στον κύλινδρο εξωθεί ένα μέρος της γομώσεως του κυλίνδρου σε εσοχές του θαλάμου καύσης, όπως π.χ. τους νεκρούς όγκους μεταξύ του εμβόλου, των ελατηρίων και του χιτωνίου. Το μεγαλύτερο μέρος του μίγματος και των ενδιάμεσων προϊόντων που παγιδεύεται σε αυτές τις εσοχές παραμένει άκαυστο επειδή η φλόγα δεν μπορεί να διεισδύσει εκεί. Το αέριο που θα εγκαταλείψει τις

εσοχές αυτές στη διάρκεια της εκτόνωσης και της εξαγωγής είναι μια σημαντική πηγή άκαυστων υδρογονανθράκων.

Μια άλλη πηγή υδρογονανθράκων και αλδεύδων είναι η στοιβάδα αερίων, πάχους της τάξης 0.1mm που περιβάλλει τα εσωτερικά τοιχώματα του θαλάμου καύσης (η φλόγα σβήνει μόλις έρθει σε επαφή με ψυχρά τοιχώματα). Έχει αποδειχθεί ότι ενώ τα αέρια της στοιβάδας αυτής καίγονται γρήγορα όταν τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης είναι καθαρά, παραμένουν άκαυστα σε μεγάλο ποσοστό όταν η μηχανή έχει πορώδεις επικαθίσεις λόγω παλαιότητας.

Μια τρίτη πηγή σχηματισμού είναι το πολύ λεπτό στρώμα λαδιού που παραμένει στα τοιχώματα μετά το πέρασμα του ελατηρίου λαδιού κατά την φάση της εκτόνωσης. Το στρώμα αυτό παρουσιάζει την ιδιότητα να προσροφά και να εκροφά υδρογονάνθρακες, επιτρέποντας τους έτσι να διαφεύγουν την κύρια διεργασία της καύσης.

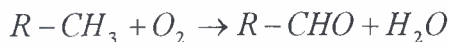
Η ατελής καύση και το καύσιμο που εξατμίζεται από τον νεκρό όγκο του εγχυτήρα στο τέλος του ψεκασμού, αποτελούν ακόμη μια αιτία σχηματισμού υδρογονανθράκων.

Οι υδρογονάνθρακες που περιέχονται στην αέρια φάση των καυσαερίων είναι ουσιαστικά ένα μίγμα από πολλά είδη υδρογονανθράκων, προερχόμενοι από το καύσιμο και το λιπαντικό μέσο. Οι μικρότερες ανθρακικές αλυσίδες ανταποκρίνονται συνήθως σε υδρογονάνθρακες του καυσίμου, ενώ το λιπαντικό μέσο περιέχει τα βαρύτερα κλάσματα. Λόγω της ποικιλίας των ειδών στο καυσαέριο είναι δύσκολο να διευκρινιστούν καθολικά τα χαρακτηριστικά τους. Γενικά έχουν ενοχλητική οσμή, ενώ αρκετά είδη είναι τοξικά ή καρκινογενή, ή και τα δυο μαζί. Οι συγκεντρώσεις τους στο καυσαέριο έχουν εύρος τιμών από 20 ως 300 ppm.

Οι υδρογονάνθρακες της εξαγωγής χωρίζονται μεταξύ αυτών της αέριας φάσης και αυτών σε μορφή σωματιδίων (σε υγρή φάση ή προσροφημένοι). Δεν υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ πτητικών και μη πτητικών υδρογονανθράκων. Σαν σημείο αναφοράς μίγματα με πίεση ατμών μεγαλύτερη των 0.1 mmHg σε κανονικές συνθήκες μπορούν να θεωρηθούν πτητικά, τα οποία συνήθως περιέχουν αλειφατικές και αρωματικές ενώσεις με περίπου μέχρι 24 άτομα άνθρακα στο μόριό τους. Η νομοθεσία αναφέρεται στα αέρια φάσης πτητικά μίγματα υδρογονανθράκων, ενώ αυτά σε μορφή σωματιδίων αναφέρονται από την νομοθεσία σαν SOF.

Οι υδρογονάνθρακες οξειδώνονται από το οξυγόνο του καυσαερίου και στο μέτρο που η θερμοκρασία των καυσαερίων παραμένει υψηλή, σε διοξείδιο του

άνθρακα και νερό κατά την γνωστή αντίδραση καύσης, ενώ κάτω από μέτριες οξειδωτικές συνθήκες σχηματίζουν αλδεύδες και κετόνες.



Στην ατμόσφαιρα οι υδρογονάνθρακες υποβάλλονται σε φωτοχημικές αντιδράσεις με τα NO_x οδηγώντας στον σχηματισμό αιθαλομίχλης και όζοντος στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

1.2.4 Αέριες εκπομπές ρύπων – Διοξείδιο του Θείου (SO₂)

Το διοξείδιο του θείου είναι ένας μη νομοθετημένος ρύπος που προέρχεται από το θείο που υπάρχει στο καύσιμο. Το SO₂ είναι άχρωμο αέριο, με χαρακτηριστική ενοχλητική οσμή. Μπορεί να οξειδωθεί σε τριοξείδιο του θείου (SO₃), το οποίο είναι μέρος του θειικού οξέος που είναι υπεύθυνο για τις θειώδεις εκπομπές σωματιδίων, ενώ τα οξείδια του θείου θεωρούνται μια από τις κύριες αιτίες της όξινης βροχής.

Το μεγαλύτερο μέρος του θείου στο καυσαέριο που εκπέμπεται από τον κινητήρα είναι στην μορφή του διοξειδίου και μόνο το 2–4% εκπέμπεται σαν τριοξείδιο. Οι συγκεντρώσεις στην εξαγωγή είναι απευθείας ανάλογες με την συγκέντρωση του θείου στο καύσιμο και μπορούν εύκολα να υπολογιστούν από την κατανάλωση καυσίμου με πολύ καλή ακρίβεια.

1.2.5 Αέριες εκπομπές ρύπων – Νιτρώδες Οξείδιο (N₂O)

Το νιτρώδες οξείδιο, γνωστό και σαν αέριο γέλιου, είναι άχρωμο με γλυκιά οσμή που επιδρά ναρκωτικά στον ανθρώπινο οργανισμό. Έχει δυναμική επιρροή σε περιβαλλοντολογικά ζητήματα εξαιτίας των ισχυρών ιδιοτήτων του όσον αφορά το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως επίσης και την συμμετοχή του στο όζον της στρατόσφαιρας.

Το N₂O αν και χημικά αποτελεί ένα οξείδιο του αζώτου δεν συμπεριλαμβάνεται στις εκπομπές NO_x. Αυτό συμβαίνει γιατί οι εκπομπές του βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα:

- σε κινητήρες diesel βαρέων οχημάτων κυμαίνονται στα επίπεδα των 3 ppm

- σε βενζινοκινητήρες με τριοδικό καταλύτη από 12 ως 35 ppm.

Συγκεκριμένοι τύποι καταλυτών, όπως οι Pt-lean NOx ή οι SCR, σε κάποιες διατάξεις μπορεί να αυξήσουν τις εκπομπές N₂O των πετρελαιοκινητήρων. Παρόλα αυτά, στην πλειοψηφία τους οι κατασκευαστές καταλυτικών συστημάτων προσπαθούν να κρατήσουν σε χαμηλά επίπεδα τις εκπομπές N₂O αν και δεν είναι νομοθετημένες και αυτό αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην εξέλιξη των καταλυτικών μετατροπών.

	Μονοξείδιο του Αζώτου	Διοξείδιο του Αζώτου	Μονοξείδιο του Άνθρακα	Διοξείδιο του Θείου	Νιτρώδες Οξείδιο
Χημικός Τύπος	NO	NO ₂	CO	SO ₂	N ₂ O
Μοριακό Βάρος	30.01	46.01	28.01	64.06	44.02
Εμφάνιση	Άχρωμο	Καφεκόκκινο	Άχρωμο	Άχρωμο	Άχρωμο
Σχετική Πυκνότητα (σύγκριση με αέρα)	1.0367	...	0.968	2.264	1.53
Σημείο Τήξης	-161°C	-9.3°C	-205°C	-75.5°C	-102.3°C
Σημείο Βρασμού	-151°C	-21.3°C	-191.5°C	-10°C	-90.7°C

Πίνακας 1-3 Χαρακτηριστικά εκπομπών αέριων ρύπων

1.2.6 Στερεές εκπομπές ρύπων – Σωματίδια (DPM)

Οι εκπομπές σωματιδίων των κινητήρων diesel είναι υπεύθυνες για την μαύρη καπνιά που εκπέμπεται από το συγκεκριμένο είδος κινητήρων. Οι εκπομπές σωματιδίων αποτελούν ένα πολυσύνθετο πρόβλημα, το οποίο παρά την εκτεταμένη ερευνητική δραστηριότητα που έχει αφιερωθεί σε αυτό, δεν έχουν κατανοηθεί πλήρως ούτε ο σχηματισμός τους μέσα στον κύλινδρο ούτε οι φυσικές και χημικές ιδιότητες ή οι επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Οι εκπομπές σωματιδίων θεωρούνται πάντως ιδιαίτερα βλαβερές, ενώ αποτελούν πλέον βασικό κομμάτι της σύγχρονης νομοθεσίας και σημαντικό αντικείμενο έρευνας για τις τεχνολογίες αντιρρύπανσης. Τυπικές εκπομπές

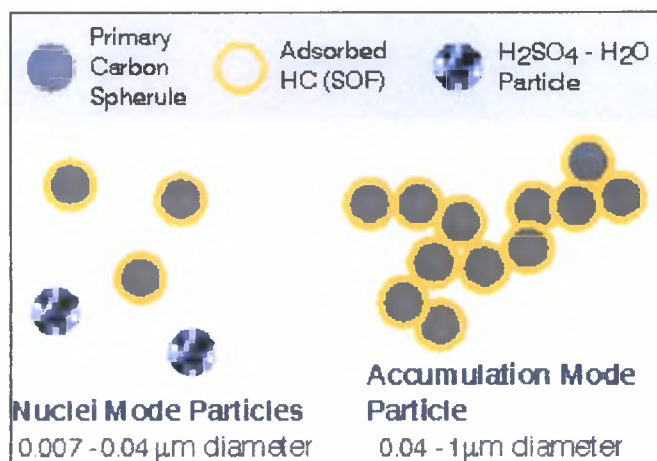
σωματιδίων είναι τα 0.2 –0.6 g/km για ελαφρά πετρελαιοκίνητα οχήματα. Η σύσταση των σωματιδίων είναι άμεσα εξαρτημένη από τις συνθήκες στην εξαγωγή και το σύστημα κατακράτησής τους.

Τα σωματίδια αποτελούνται από άτομα άνθρακα στα οποία μπορεί να προσκολληθούν ή να εκροφηθούν άλλα είδη ώστε να σχηματίσουν δομές με πολύπλοκες χημικές και φυσικές ιδιότητες. Από χημικές αναλύσεις τα σωματίδια συνηθίζεται να χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες.

- Στερεό κλάσμα (Solid Fraction – SOL) -- στοιχειώδης άνθρακας
- Διαλυτό Οργανικό Κλάσμα (Soluble Organic Fraction – SOF) – οργανικές ενώσεις προερχόμενες από το καύσιμο και το λιπαντικό (ή Volatile Organic Fraction – VOF)
- Θεικά Σωματίδια (SO₄) – Ένυδρο θεικό οξύ

Σύμφωνα με αυτή τη κατηγοριοποίηση οι ολικές εκπομπές (TPM) σωματιδίων μπορούν να οριστούν ως:

$$\text{TPM} = \text{SOL} + \text{SOF} + \text{SO}_4$$



Εικόνα 1-5 Σωματίδια Diesel

Τα σωματίδια που εκπέμπονται στην εξαγωγή αποτελούνται πρωτίστως από στερεά φάση (SOL). Τόσο τα άτομα άνθρακα όσο και τα προσκολλημένα σωματίδια δημιουργούνται μέσα στο θάλαμο καύσης και συγκεκριμένα στον πυρήνα της δέσμης των ψεκαζόμενων σωματιδίων, όπου το λ είναι μικρότερο της μονάδας, και στην περιοχή της φλόγας, όπου ο ατμός του καυσίμου θερμαίνεται με ανάμιξη με τα θερμά προϊόντα της καύσης. Στο σύστημα εξαγωγής περιορισμένη οξείδωση και επιπλέον προσκόλληση μπορεί να λάβει χώρα, ανάλογα με τη θερμοκρασία του καυσαερίου.

Άλλη μια πιθανή πηγή παραγωγής SOL είναι η στάχτη των μεταλλικών στοιχείων (Ca, Zn, Ce) που προέρχεται από το λιπαντικό λάδι και τα διάφορα πρόσθετα του καυσίμου. Η πυρήνωση των πτητικών συστατικών της στάχτης λαμβάνει χώρα κατά την εκτόνωση, οπότε οι πυρήνες της στάχτης προσκολλώνται για να σχηματίσουν συσσωματώματα σωματιδίων (accumulation mode particles).

Το θεικό οξύ προέρχεται από το θείο του καυσίμου και σχηματίζεται με μηχανισμούς που αναφέρονται παρακάτω. Τελευταίες ερευνητικές δραστηριότητες έδειξαν ότι τα σωματίδια αυτού του είδους μπορεί να είναι στην πραγματικότητα διαφορετικά από τα σωματίδια του άνθρακα.

Οι υδρογονάνθρακες, προερχόμενοι από το καύσιμο και το λιπαντικό μέσο, που προσροφώνται στην επιφάνεια των σωματιδίων του άνθρακα σχηματίζουν το SOF των σωματιδίων του diesel. Η σύστασή του ποικίλει, αν και συνήθως αποτελείται κυρίως από τους υδρογονάνθρακες του λιπαντικού ελαίου με μικρότερη συνεισφορά από τους υδρογονάνθρακες με υψηλό σημείο βρασμού του καυσίμου.

1.3 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ

Από το 1987 στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ και από το 1992 στην Ευρώπη, οι εκπομπές ρύπων από τους κινητήρες Diesel πρέπει να ανταποκρίνονται σε κάποια όρια. Αυτά τα όρια γίνονται πιο στενά σε κάθε νέο κανονισμό που εκδίδεται κάθε περίπου 5 χρόνια. Ένας συνοπτικός πίνακας των κανονισμών φαίνεται παρακάτω:

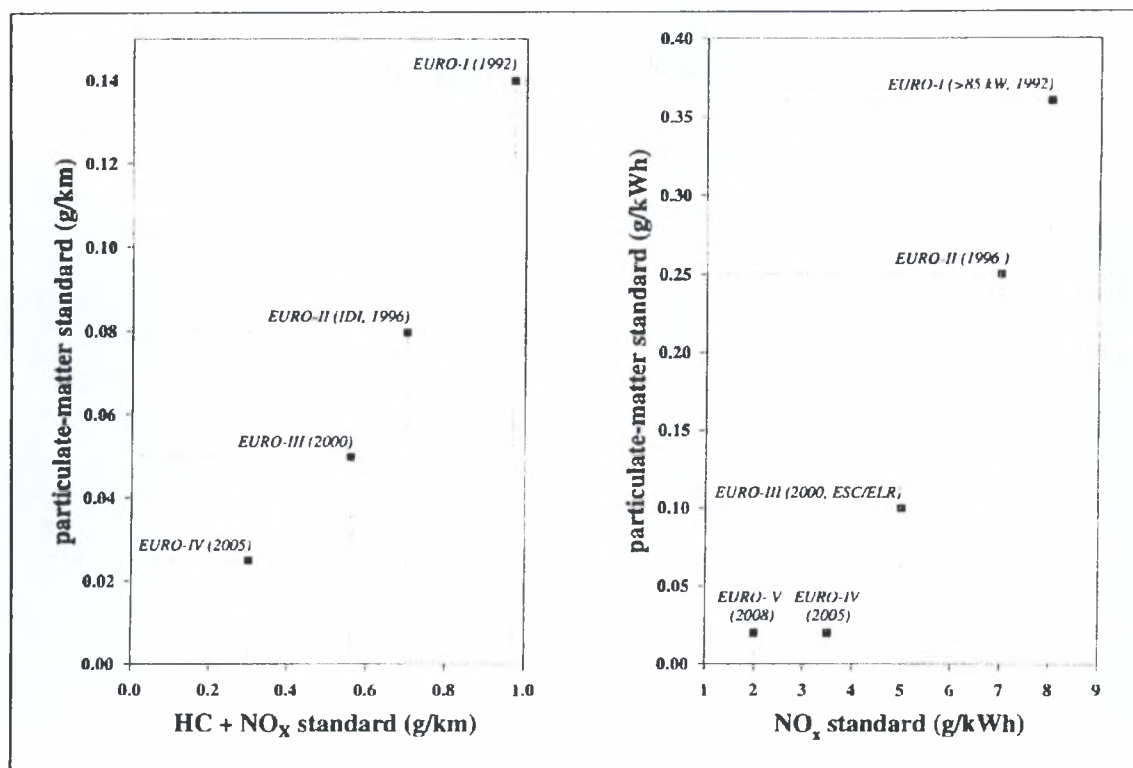
<i>European Union emission standards for diesel passenger cars and light-duty and heavy-duty trucks</i>								
standard	year	test cycle	<i>Passenger cars</i>				PM g/km	
			HC+NO _x g/km	NO _x g/km	CO g/km			
Euro I	1992	ECE 15/EUDC	0.97	-	2.72	0.14		
Euro II – IDI	1996	ECE 15/EUDC	0.70	-	1.00	0.08		
Euro II – DI	1999	ECE 15/EUDC	0.90	-	1.00	0.10		
Euro III	2000	ECE 15/EUDC	0.56	0.50	0.64	0.05		
Euro IV	2005	ECE 15/EUDC	0.30	0.25	0.50	0.025		
class	year	test cycle	<i>Light-duty trucks</i>				PM g/km	
			HC+NO _x g/km	NO _x g/km	CO g/km			
I (<1305 kg)	1994	ECE 15/EUDC	-	0.97	2.72	0.14		
	2000	ECE 15/EUDC	0.56	0.50	0.64	0.05		
	2005	ECE 15/EUDC	0.30	0.25	0.50	0.025		
II (1305 – 1760 kg)	1994	ECE 15/EUDC	-	1.40	5.17	0.19		
	2001	ECE 15/EUDC	0.72	0.65	0.80	0.07		
	2006	ECE 15/EUDC	0.39	0.33	0.63	0.04		
III (> 1760 kg)	1994	ECE 15/EUDC	-	1.70	6.90	0.25		
	2001	ECE 15/EUDC	0.86	0.78	0.95	0.10		
	2006	ECE 15/EUDC	0.46	0.39	0.74	0.06		
standard	year	test cycle	<i>Heavy-duty trucks</i>				PM g/kWh	smoke m ⁻¹
			HC g/kWh	NO _x g/kWh	CO g/kWh			
Euro I	1992							
	<85 kW	ECE R-49	1.1	8.0	4.5	0.612	-	
Euro II	>85 kW	ECE R-49	1.1	8.0	4.5	0.36	-	
	1996.10	ECE R-49	1.1	7.0	4.0	0.25	-	
Euro III	1998.10	ECE R-49	1.1	7.0	4.0	0.15	-	
	1999.10							
Euro IV	EEV's only	ESC/ELR	0.25	2.0	1.5	0.02	0.15	
		ETC ²	0.40	2.0	3.0	0.02		
	2000.10	ESC/ELR	0.66	5.0	2.1	0.10 ¹	0.8	
		ETC	0.78	5.0	5.45	0.16		
Euro V	2005.10	ESC/ELR	0.46	3.5	1.5	0.02	0.5	
		ETC	0.55	3.5	4.0	0.03		
Euro V	2008.10	ESC/ELR	0.46	2.0	1.5	0.02	0.5	
		ETC	0.55	2.0	4.0	0.03		

¹ 0.13 for engines of less than 0.75 dm³ swept volume per cylinder and a rated power speed of more than 3000 rpm;

² In ETC test, non-methane hydrocarbons are measured.

Πίνακας 1-4 Πίνακας ευρωπαϊκών ορίων ρύπων για πετρελαιοκίνητα οχήματα

Ενώ στην εικόνα παρακάτω φαίνεται καθαρά η σημαντική μείωση των NO_x και των σωματιδίων σε σχέση με τον χρόνο



Εικόνα 1-6 Χρονική εξέλιξη των ορίων ρύπων για εκπομπές σωματιδίων και NO_x στην ευρωπαϊκή ένωση για επιβατικά οχήματα και βαρέα φορτηγά.

Οι εκπομπές των νομοθετημένων ρύπων μετρώνται σε συγκεκριμένους κύκλους οδήγησης που προσομοιώνουν την κίνηση των οχημάτων στην πόλη και τους αυτοκινητόδρομους. Σε ορισμένες χώρες, όπως η Γερμανία και η Σουηδία, υπάρχουν επιπλέον απαιτήσεις από τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε ειδικά μέρη, όπως αστικά κέντρα ή ορυχεία. Γενικά ανά τον κόσμο οι νομοθεσίες διαφοροποιούνται, ανάλογα με κοινωνικά και οικολογικά σταθμά που θέτουν οι εκάστοτε χώρες.

1.3.1 Ο ευρωπαϊκός κύκλος οδήγησης

Ο ευρωπαϊκός κύκλος οδήγησης χωρίζεται σε πέντε τμήματα: τέσσερα τμήματα της τυποποίησης ECE και ένα της τυποποίησης EUDC. Πριν την δοκιμή το όχημα είναι ακίνητο για 6 ώρες και σε θερμοκρασία 20-30°C.

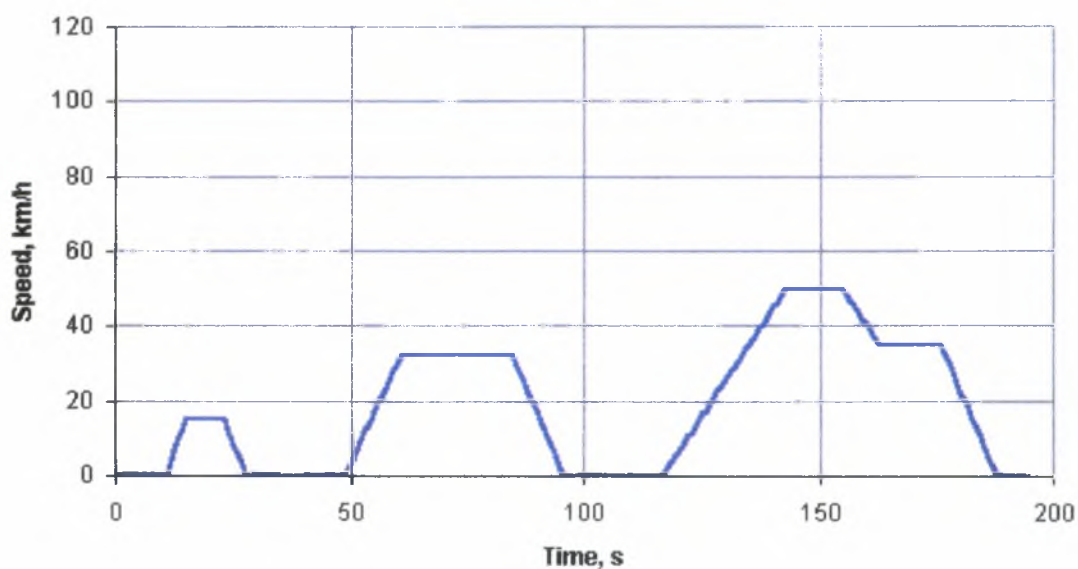
Ο κύκλος ECE προσομοιώνει τις συνθήκες οδήγησης στην πόλη. Τα χαρακτηριστικά του κύκλου είναι η μικρή ταχύτητα, το χαμηλό φορτίο και οι χαμηλές

θερμοκρασίες καυσαερίου. Ο κύκλος EUDC πραγματοποιείται μετά την ολοκλήρωση των κύκλων ECE με σκοπό συνθήκες οδήγησης με μεγαλύτερη ταχύτητα εκτός αστικών κέντρων. Η μέγιστη ταχύτητα του κύκλου είναι 120km/h.

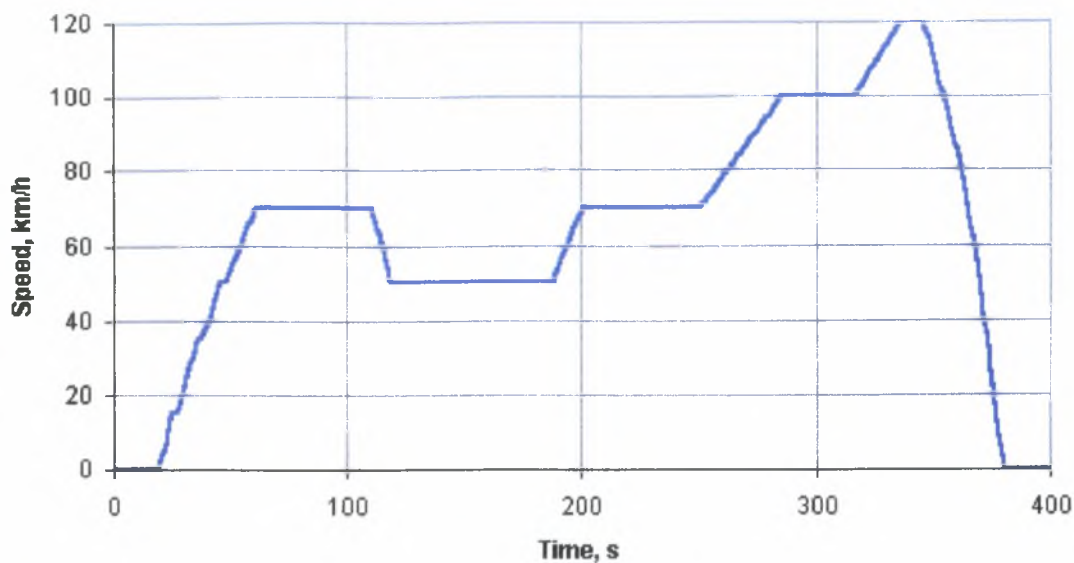
Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της κάθε δοκιμής και στις εικόνες απεικονίζονται οι κύκλοι οδήγησης σχηματικά.

	ECE 15	EUDC
Απόσταση (km)	4052	6955
Διάρκεια (sec)	780	400
Μέση ταχύτητα (km/h)	18.7	62.6
Μέγιστη ταχύτητα (km/h)	50	120

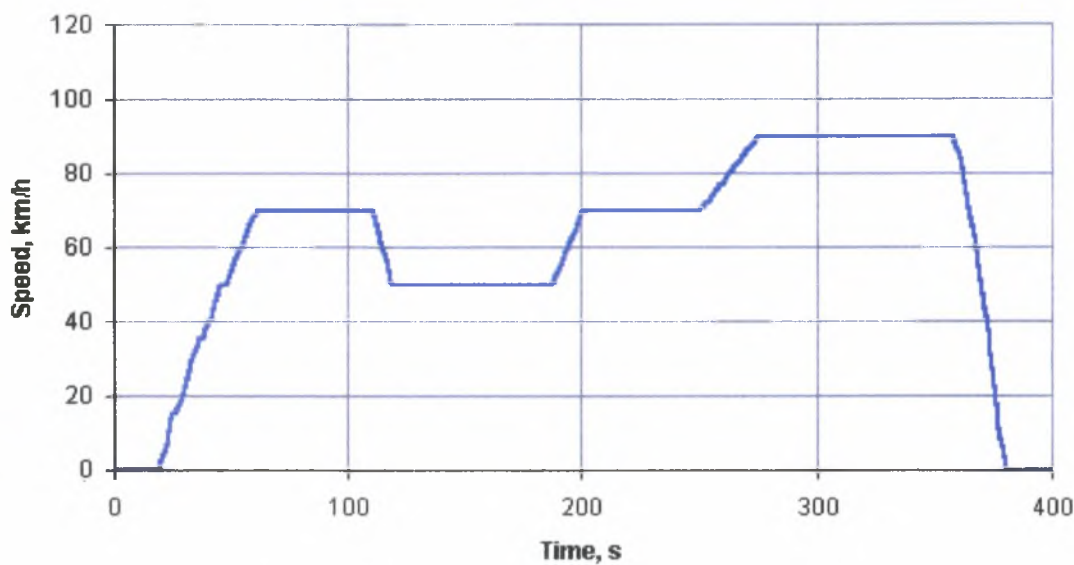
Πίνακας 1-5 Χαρακτηριστικά κύκλων οδήγησης



Εικόνα 1-7 Κύκλος ECE 15



Εικόνα 1-8 Κύκλος EUDC



Εικόνα 1-9 Κύκλος EUDC για οχήματα με μικρή ισχύ

1.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL

Οι τεχνολογίες αντιρρύπανσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε :

Βελτιώσεις στον σχεδιασμό του κινητήρα

- Ηλεκτρονικός έλεγχος του κινητήρα
- Βελτιώσεις του συστήματος τροφοδοσίας καυσίμου
- Επανακυκλοφορία καυσαερίου (EGR)
- Βελτιώσεις στο σύστημα εισαγωγής αέρα
- Βελτιώσεις του θαλάμου καύσης
- Προσθήκη νερού στο καύσιμο μίγμα
- Βελτιώσεις στην επικάλυψη του κυλίνδρου

Τεχνολογίες καυσίμου, λαδιού και προσθέτου

- Βελτιώσεις στο καύσιμο και το λιπαντικό
- Εναλλακτικά καύσιμα
- Πρόσθετα καυσίμου

Μετεπεξεργασία καυσαερίων

- Οξειδωτικός καταλύτης
- Καταλύτης αποθήκευσης NOx
- Συστήματα καταλύτη SCR
- Φίλτρο αιθάλης

Μετατροπές στην γεωμετρία του θαλάμου καύσης για βελτιστοποιημένη κίνηση και ανάμιξη του αέρα εισαγωγής, σε συνδυασμό με την αυξημένη πίεση και τον επανασχεδιασμό των εγχυτήρων για καλύτερη διασπορά και ανάμιξη με τον αέρα, συνέβαλαν στην καθολική μείωση των εκπομπών ρύπων. Καλύτερη ψύξη του αέρα γόμωσης στους υπερπληρούμενους κινητήρες, επέφερε τόσο αύξηση στην αποδιδόμενη ισχύ, όσο και αισθητή μείωση στις εκπομπές NOx. Η εκτεταμένη χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων για την διαχείριση του κινητήρα συνέβαλε επίσης σημαντικά στις μειωμένες εκπομπές ρύπων των σύγχρονων κινητήρων. Σαφώς για την αποδοτικότερη χρήση αυτών των συστημάτων θα πρέπει να υπάρξει συνδυασμός τους, γεγονός το οποίο δημιουργεί προβλήματα βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα

αύξηση της καθυστέρησης έγχυσης μειώνει από την μια πλευρά τις εκπομπές ΝΟ_x, από την άλλη αυξάνει τις εκπομπές σωματιδίων.

Η επίδραση των καυσίμων Diesel και των λιπαντικών ελαίων όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων είναι επίσης σημαντική. Για αυτό το λόγο η τεχνολογία των καυσίμων είναι μείζονος σημασίας. Η μείωση των επιπέδων θείου στα καύσιμα παγκοσμίως τα τελευταία χρόνια μείωσε τις εκπομπές οξειδίων του θείου, ενώ έκανε και την χρήση καταλυτικών συστημάτων μετεπεξεργασίας καυσαερίου στους κινητήρες Diesel εφικτή. Η αύξηση του αριθμού κετανίου του καυσίμου σε συνδυασμό με την μείωση των αρωματικών ενώσεων στην σύσταση του βελτιώνουν αισθητά τους εκπεμπόμενους ρύπους. Τα τελευταία χρόνια η χρήση διαφόρων προσθέτων στο καύσιμο έκανε την εμφάνιση της με ποικίλα αποτελέσματα.

Τα συστήματα μετεπεξεργασίας καυσαερίων είναι ένα επιπλέον μέτρο για την μείωση των ρύπων από τις θερμικές μηχανές. Αυτά πέρα από την επικουρική χρήση τους στην περαιτέρω μείωση των ρύπων, συνδυάζουν το πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν στον κατασκευαστή να προσανατολίσει τον σχεδιασμό του κινητήρα στον περιορισμό κάποιου ρύπου (π.χ. ΝΟ_x) και να περιορίσει με την χρήση κάποιου συστήματος έναν άλλο (π.χ. σωματίδια). Οι αυξανόμενες απαιτήσεις για αποτελεσματικό έλεγχο των εκπομπών ρύπων απαιτεί συνδυασμένη χρήση και συμβατότητα των διαφόρων συστημάτων.

1.5 ΦΙΛΤΡΑ ΑΙΘΑΛΗΣ

Οι παγίδες αιθάλης, κατασκευασμένες κατά κύριο λόγο από κεραμικά υλικά, φιλτράρουν το καυσαέριο κατακρατώντας με διάφορους μηχανισμούς τα σωματίδια. Τα υλικά κατασκευής είναι πορώδη επιτρέποντας την διέλευση μόνο της αέριας φάσης από αυτά.

Τα σωματίδια τα οποία κατακρατώνται περιοδικά πρέπει να αποσύρονται από τις παγίδες. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται αναγέννηση. Οι ακριβείς συνθήκες κάτω από τις οποίες υφίσταται αναγέννηση μια παγίδα αιθάλης αποτελεί αντικείμενο της σύγχρονης έρευνας. Δύο γενικές μεθοδολογίες αναγεννήσεων έχουν αναπτυχθεί:

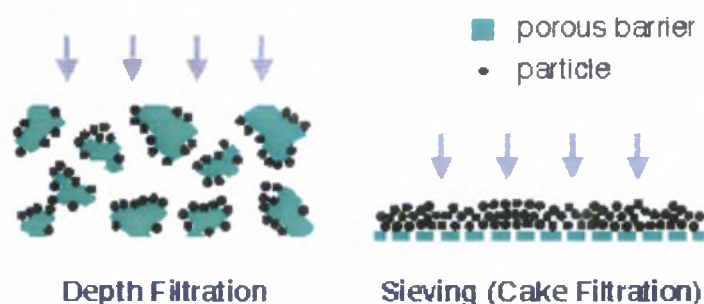
- Το παθητικό σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί κάποιο καταλυτικό υπόστρωμα ή πρόσθετο που υποβοηθά την αναγέννηση περιοδικά ή συνεχώς.
- Το ενεργητικό σύστημα το οποίο περιλαμβάνει θερμοστές της παγίδας ή έγχυση ποσότητας καυσίμου προς ανάφλεξη στην εξαγωγή.

Γενικά ενώ οι παγίδες αιθάλης είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές παρουσιάζουν μειονεκτήματα ως προς τον χρόνο ζωής και την αξιοπιστία στην εφαρμογή του πρώτου συστήματος και την οικονομία καυσίμου λόγω αύξησης αντίθλιψης (παθητικά συστήματα) και λόγω αυξημένων απαιτήσεων ενέργειας (ενεργητικά συστήματα).

1.5.1 Οι μηχανισμοί συγκράτησης των σωματιδίων.

Η βασική λειτουργία στην συλλογή σωματιδίων είναι ο διαχωρισμός τους από την ροή του καυσαερίου και η απόθεση τους στην επιφάνεια συλλογής. Αυτό γίνεται με την ροή του καυσαερίου διαμέσου του πορώδους τοιχώματος που συλλέγει τα σωματίδια. Τα φίλτρα χωρίζονται σε 2 κατηγορίες:

- Deep bed φίλτρα
- Surface type φίλτρα



Εικόνα 1-10 Deep bed φίλτρα και Surface type φίλτρα

Στα Deep bed φίλτρα η μέση διάμετρος των σωματιδίων του τοιχώματος είναι μεγαλύτερη από την διάμετρο των σωματιδίων που συλλέγονται με ένα συνδυασμό μηχανισμών συλλογής. Αυτά είναι και τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται κυρίως στην συλλογή σωματιδίων των εκπομπών των κινητήρων diesel. Η απόδοση και η πτώση πίεσης είναι μικρότερη από τα Surface type φίλτρα στα οποία η απόδοση και το ΔP είναι μεγαλύτερα.

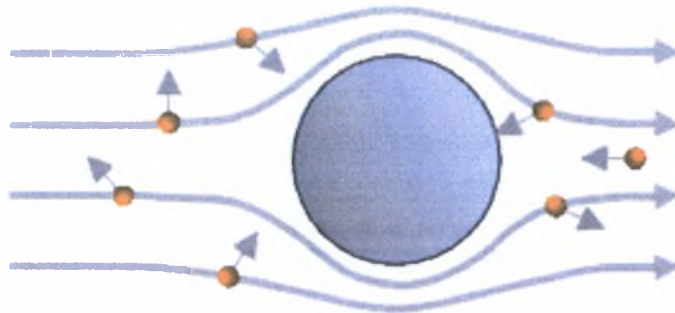
Στα Surface type φίλτρα η διάμετρος των σωματιδίων του τοιχώματος είναι μικρότερη από την διάμετρο των σωματιδίων που συλλέγονται.

Τα σωματίδια συλλέγονται με συνδυασμό διαφόρων μηχανισμών. Οι πιο συνηθισμένοι στα φίλτρα Deep bed είναι :

- Απόθεση λόγω διάχυσης.
- Απόθεση λόγω αδράνειας.

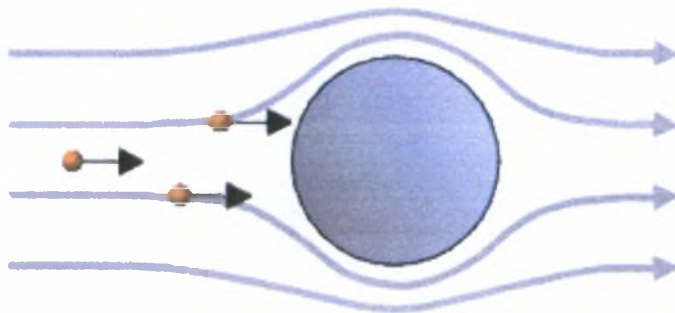
- Απόθεση λόγω ανάσχεσης (interception) της ροής.

Οι μηχανισμοί αυτοί απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα όπου το μεγάλο κυκλικό κομμάτι αντιπροσωπεύει ένα σώμα συλλογής του φίλτρου, οι γραμμές ροής δείχνουν την πορεία του καυσαερίου και τα μικρά κόκκινα κομμάτια αντιπροσωπεύουν τα σωματίδια της εξαγωγής των κινητήρων diesel.



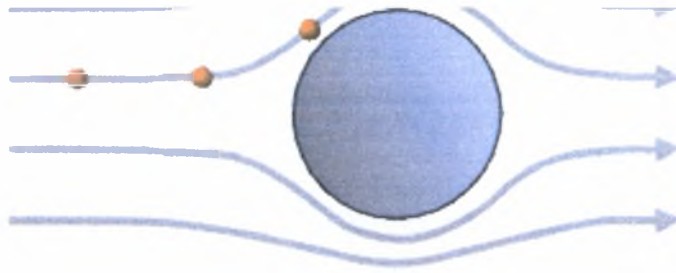
Εικόνα 1-11 Απόθεση λόγω διάχυσης.

Η απόθεση λόγω διάχυσης εξαρτάται από την κίνηση των σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη από $0.3\mu\text{m}$ τα οποία δεν κινούνται σύμφωνα με τις ροϊκές γραμμές. Έτσι διαχέονται στο μέσο συλλογής.



Εικόνα 1-12 Απόθεση λόγω αδράνειας

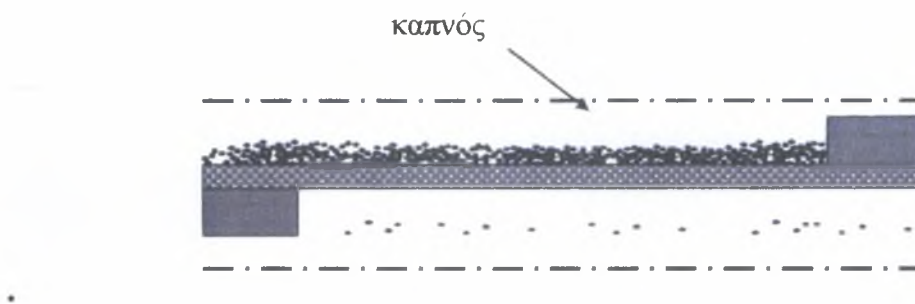
Η απόθεση λόγω αδράνειας εμφανίζεται περισσότερο όσο μεγαλώνει η διάμετρος των σωματιδίων. Αυτά πλησιάζουν το μέσο συλλογής και αποθέτονται πάνω σε αυτό λόγω αδράνειας.



Εικόνα 1-13 Απόθεση λόγω ανάσχεσης (interception) της ροής

Η απόθεση λόγω ανάσχεσης (interception) της ροής εμφανίζεται όταν μια ροϊκή γραμμή περάσει μέσα από την διάμετρο του μέσου συλλογής.

Η απόδοση των φίλτρων σωματιδίων αιθάλης εκφράζεται με το λόγο βάρους των σωματιδίων που συλλέγονται προς το βάρος των συνολικών σωματιδίων που εισέρχονται στο φίλτρο. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την συλλογή των σωματιδίων από το κανάλι του φίλτρου.



Εικόνα 1-14 Συλλογή σωματιδίων καπνού στο κανάλι του φίλτρου

1.5.2 Η αναγέννηση στις παγίδες αιθάλης

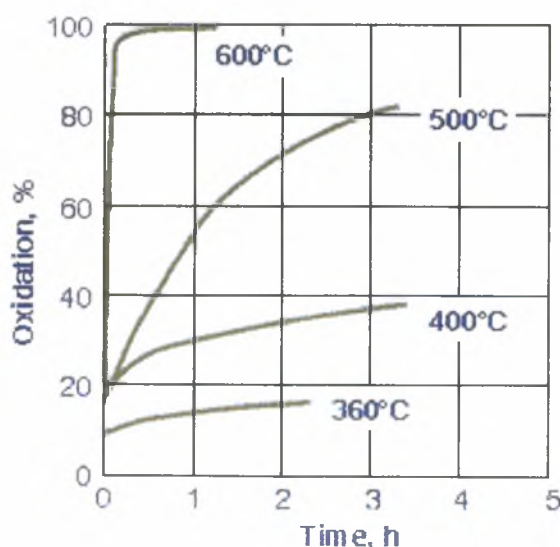
Η αναγέννηση χαρακτηρίζεται από το ισοζύγιο της αιθάλης που συλλέγεται στην παγίδα και της αιθάλης που οξειδώνεται. Ο ρυθμός καύσης εξαρτάται από την θερμοκρασία του φίλτρου. Όμως η θερμοκρασία συνήθως είναι σχετικά χαμηλή για την αποτελεσματική καύση του άνθρακα. Έτσι για να αρχίσει η καύση πρέπει να αυξηθεί η θερμοκρασία του φίλτρου ή να προστεθεί καταλύτης. Αυτό μπορεί να γίνει με την προσθήκη του καταλύτη στην επιφάνεια του φίλτρου ή στο καύσιμο σαν πρόσθετο.

Η πυκνότητα της αιθάλης είναι χαμηλή (συνήθως μικρότερη από 0.1 gr/cm^3) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα γρήγορη φόρτιση της παγίδας. Η ποσότητα της αιθάλης

που συλλέγεται πρέπει να απομακρυνθεί για αποφευχθεί η υπερβολική πτώση πίεσης που μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία του κινητήρα. Έτσι σε όλα τα φίλτρα αιθάλης γίνεται αναγέννηση για να βρίσκεται η απόδοση τους σε ικανοποιητικά επίπεδα. Στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται θερμική αναγέννηση. Ο άνθρακας που περιέχεται στα σωματίδια οξειδώνεται και δίνει CO ή CO₂. Αυτή είναι και η καλύτερη και καθαρότερη μέθοδος αναγέννησης που χρησιμοποιείται στις παγίδες αιθάλης.

Ο ρυθμός καύσης περιορίζεται από την κινητική της οξείδωσης του άνθρακα. Ακόμα ο ρυθμός της αντίδρασης εξαρτάται από την θερμοκρασία, την συγκέντρωση των αντιδρώντων και μπορεί να επιταχυνθεί από καταλύτες. Η αιθάλη έχει σχετικά μικρό ρυθμό καύσης και για αυτό το λόγο πρέπει να επιμηκύνεται το χρονικό διάστημα που μένει στην παγίδα για να επιτευχθεί ικανοποιητική οξείδωση των σωματιδίων. Αυτό γίνεται με την συλλογή του από την παγίδα.

Οι μελέτες της καύσης της αιθάλης έχουν δείξει ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες δηλαδή γύρω στους 400°C η οξείδωση είναι μερική (εκρόφηση HC που περιέχεται στα σωματίδια) και μόνο σε θερμοκρασίες γύρω στους 600 °C μπορεί γίνει πλήρης και γρήγορη καύση. Η ταχύτητα της αντίδρασης εξαρτάται ακόμα και από την ποσότητα της αιθάλης και καίγεται γρηγορότερα όταν η φόρτιση του φίλτρου είναι μεγάλη.



Εικόνα 1-15 Οξείδωση του καπνού σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές θερμοκρασίες

Η θερμοκρασία στην οποία αρχίζει η οξείδωση ονομάζεται θερμοκρασία ανάφλεξης της αιθάλης, η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες της αιθάλης και τις συνθήκες στις οποίες γίνεται η καύση.

Η αναγέννηση σε ένα φίλτρο περιγράφεται από την εξίσωση:

$$dM/dt + M \cdot k(T) - e_f \cdot m = 0$$

όπου:

M είναι η μάζα των σωματιδίων στο φίλτρο, [kg]

t είναι ο χρόνος, [s]

k(T) είναι η σταθερά του ρυθμού της αντίδρασης [1/s]

T είναι η θερμοκρασία

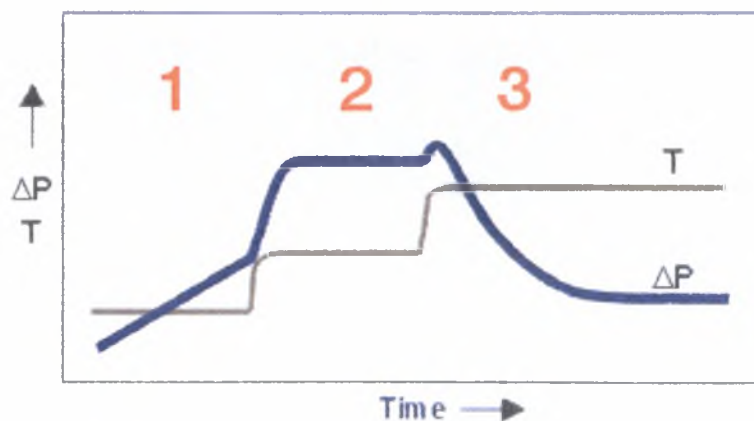
e_f είναι η απόδοση του φίλτρου [-]

m είναι η παροχή σωματιδίων από τον κινητήρα [kg/s]

Ο όρος dM/dt εκφράζει την συσσώρευση της αιθάλης. Οι δύο άλλοι όροι της εξίσωσης εκφράζουν την οξείδωση της αιθάλης και την εναπόθεση της φρέσκιας αιθάλης στο φίλτρο, αντίστοιχα. Έτσι το φίλτρο μπορεί να είναι σε κατάσταση:

- συσσώρευσης καπνού ($dM/dt > 0$)
- ισοζυγίου ($dM/dt = 0$)
- αναγέννησης ($dM/dt < 0$)

Η κατάσταση λειτουργίας του φίλτρου φαίνεται στην εικόνα:



Εικόνα 1-16 Κατάσταση λειτουργίας του φίλτρου

Απεικονίζεται ένα πείραμα λειτουργίας του κινητήρα τοποθετημένου σε πέδη. Η θερμοκρασία της παγίδας μεταβάλλεται σταδιακά σε συνθήκες σταθερής παροχής

καυσαερίου. Η πτώση πίεσης είναι ένα μέτρο εκτίμησης της φόρτισης της παγίδας σε σχέση με το χρόνο.

Το πείραμα ξεκινάει με ένα καθαρό φίλτρο το οποίο έχει μικρή πτώση πίεσης και χαμηλή θερμοκρασία καυσαερίου. Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας ο ρυθμός οξείδωσης είναι χαμηλός και η παγίδα συσσωρεύει αιθάλη. Αυτό έχει αποτέλεσμα την συνεχή αύξηση της πτώσης πίεσης. Αν η φόρτιση συνεχιστεί σε αυτήν την θερμοκρασία το φίλτρο θα στομάσει (clogging).

Όταν η θερμοκρασία αυξάνει, αυξάνει και η πτώση πίεσης ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης παροχής καυσαερίου και της συσσώρευσης σωματιδίων. Έτσι ο ρυθμός οξείδωσης των σωματιδίων μεγαλώνει συνεχώς και το φίλτρο βρίσκεται σε κατάσταση ισοζυγίου. Αυτό διακρίνεται από την σταθεροποίηση της πτώσης πίεσης. Η μάζα που συλλέγεται στην μονάδα του χρόνου είναι ίση με την μάζα που οξειδώνεται και ισχύει $M \cdot k(T) = e_f \cdot m$

Η θερμοκρασία λειτουργίας του φίλτρου σε αυτήν την κατάσταση ονομάζεται θερμοκρασία ισορροπίας.

Η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας έχει αποτέλεσμα την έναρξη της αναγέννησης. Έτσι ο ρυθμός συλλογής σωματιδίων είναι μικρότερος από τον ρυθμό οξείδωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της φόρτισης και της πτώσης πίεσης.

Το φίλτρο δεν θα αδειάσει εντελώς από αιθάλη εκτός αν βρίσκεται σε πάρα πολύ υψηλή θερμοκρασία. Ακόμα επειδή η μάζα της αιθάλης μειώνεται κατά την διάρκεια της αναγέννησης, μειώνεται και ο ρυθμός οξείδωσης. Έτσι γενικά ισχύει ότι η αναγέννηση της παγίδας εξαρτάται από την θερμοκρασία και την φόρτιση. Στις υψηλές θερμοκρασίες η ποσότητα της αιθάλης που μένει είναι μικρότερη, και στις χαμηλές θερμοκρασίες απαιτείται μεγαλύτερη φόρτιση για να διατηρηθεί ο ρυθμός οξείδωσης.

Κάποιοι παράγοντες που έχουν μεγάλη σημασία στην αναγέννηση του φίλτρου είναι :

- Οι εκπομπές σωματιδίων αιθάλης του κινητήρα. Αν οι εκπομπή είναι μεγάλη τότε απαιτείται μεγαλύτερος ρυθμός οξείδωσης των σωματιδίων.
- Σύσταση των σωματιδίων. Σωματίδια με διαφορετική περιεκτικότητα VOF έχουν διαφορετικό ρυθμό οξείδωσης.

- Παροχή καυσαερίου. Η παροχή επηρεάζει την θερμοκρασία λόγω της θέρμανσης ή ψύξης του φίλτρου.
- Συγκέντρωση οξυγόνου στο καυσαέριο. Η χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου μπορεί να μειώσει τον ρυθμό οξειδωσης του καπνού.

Η αναγέννηση του φίλτρου αιθάλης απαιτεί θερμοκρασία 550-650°C όμως συνήθως η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη στα καυσαέρια των κινητήρων Diesel. Έτσι υπάρχουν δύο τρόποι να αρχίσει η αναγέννηση :

- Η αύξηση της θερμοκρασίας καυσαερίου
- Μείωση της θερμοκρασίας ανάφλεξης του καπνού

Τα ενεργητικά συστήματα με υποβοηθούμενη αναγέννηση χρησιμοποιούν μόνο την θερμοκρασία του καυσαερίου και πρέπει να φτάσουν πάνω από τους 600°C. Οι μέθοδοι που προτείνονται είναι :

- Φίλτρα που θερμαίνονται ηλεκτρικά.
- Καυστήρες καυσίμου (fuel burners).
- Θέρμανση με μικροκύματα.
- Ψεκασμός ουσιών που βοηθάνε την καύση στην εξαγωγή.

Η αναγέννηση γίνεται κατά διαστήματα για εξοικονόμηση ενέργειας και η ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου την ενεργοποιεί όταν καθορισμένη ποσότητα αιθάλης έχει συλλεχθεί από το φίλτρο. Δηλαδή η λειτουργία των ενεργητικών συστημάτων περιλαμβάνει φόρτιση μεγάλης διάρκειας και αναγεννήσεις σε υψηλή θερμοκρασία που διαρκούν σχετικά μικρό διάστημα. Η αναγέννηση αδειάζει σχεδόν ολόκληρο το φίλτρο από αιθάλη και έτσι μειώνεται η πτώση πίεσης. Αν η παγίδα είναι υπερφορτισμένη και υπάρχει υψηλή συγκέντρωση O₂ τότε εκλύονται μεγάλα ποσά θερμότητας και το φίλτρο μπορεί να αστοχήσει λόγω τήξης ή ρωγμής.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν καταλύτες ή πρόσθετα καυσίμου πρέπει να αυξήσουν την θερμοκρασία γύρω στους 350-450 °C. Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να γίνει με τους ακόλουθους τρόπους:

- Επανακυκλοφορία καυσαερίου (Exhaust gas recirculation, EGR) η οποία είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος μείωσης των εκπομπών NO_x αλλά ταυτόχρονα αυξάνει την θερμοκρασία.
- Επιπλέον ψεκασμός καυσίμου (post injection) στον θάλαμο καύσης με ηλεκτρονικό έλεγχο.

- Ψεκασμός με καθυστέρηση για την μείωση των εκπομπών NOx αλλά και αύξηση της θερμοκρασίας.
- Αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στην εισαγωγή. Χρησιμοποιείται στους υπερπληρούμενους (turbocharged) κινητήρες με εναλλάκτη θερμότητας (intercooler) και μπορεί να γίνει με παράκαμψη του εναλλάκτη.

Οι μέθοδοι αυτοί αυξάνουν την θερμοκρασία αλλά επηρεάζουν την λειτουργία του κινητήρα. Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι αυξημένη κατανάλωση καυσίμου, αυξημένη εκπομπή σωματιδίων και υδρογονανθράκων, χαμηλότερη συγκέντρωση O₂ στα καυσαέρια. Η επανακυκλοφορία καυσαερίου (EGR) και το post injection θεωρούνται οι καλύτερες μέθοδοι.

Η χρήση καταλύτη επιτρέπει την μείωση της θερμοκρασίας σε τέτοιο επίπεδο ώστε να είναι δυνατή η συνεχής αναγέννηση σε συνήθεις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα. Ο μηχανισμός της καταλυτικής οξειδωσης βασίζεται στην επαφή των σωματιδίων αιθάλης με τον καταλύτη και την οξείδωση τους από το O₂ που είναι απορροφημένο σε αυτόν. Αυτά τα παθητικά συστήματα λειτουργούν συχνά σε συνθήκες ισοζυγίου, δηλαδή η ποσότητα της μάζας που συλλέγεται είναι ίση με την ποσότητα που οξειδώνεται. Προϋπόθεση για την αποτελεσματική λειτουργία τους είναι η αύξηση της θερμοκρασίας ως ένα απαιτούμενο επίπεδο για κάποιο χρονικό διάστημα.

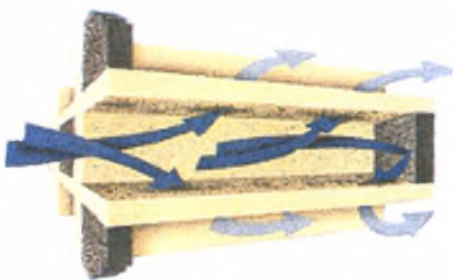
Υπάρχουν δύο τρόποι για την εισαγωγή του καταλύτη στο σύστημα, η προσθήκη καταλύτη στην επιφάνεια του φίλτρου ή η προσθήκη του στο καύσιμο. Οι παγίδες αιθάλης με καταλύτη (Catalyzed Diesel Particulate Traps, CDPF) χρησιμοποιούν καταλύτη που είναι τοποθετημένος στο τοίχωμα του φίλτρου. Συχνά χρησιμοποιούνται λευκόχρυσος, χαλκός, βανάδιο, σίδηρος, μολυβδένιο, μαγγάνιο, χρώμιο, νικέλιο και άλλα. Η απαιτούμενη θερμοκρασία για να γίνει αναγέννηση είναι 380-420 °C.

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί πρόσθετα καυσίμου (fuel additive) ως καταλύτες εφαρμόζεται σε απλά φίλτρα χωρίς καταλυτική επιφάνεια. Ο μηχανισμός είναι παρόμοιος με την προηγούμενη μέθοδο. Όμως όταν χρησιμοποιείται πρόσθετο καυσίμου ο καταλύτης είναι ενσωματωμένος στα σωματίδια. Δηλαδή το πρόσθετο στο καύσιμο βγαίνει από το θάλαμο καύσης μαζί με τα σωματίδια καπνού. Η επαφή μεταξύ της αιθάλης με τον καταλύτη είναι πολύ καλύτερη και έτσι στα φίλτρα που χρησιμοποιούν πρόσθετο καυσίμου η αναγέννηση γίνεται σε χαμηλότερη

θερμοκρασία από ότι σε αυτά με καταλυτική επιφάνεια. Η απαιτούμενη θερμοκρασία για να γίνει αναγέννηση είναι 300-400 °C.

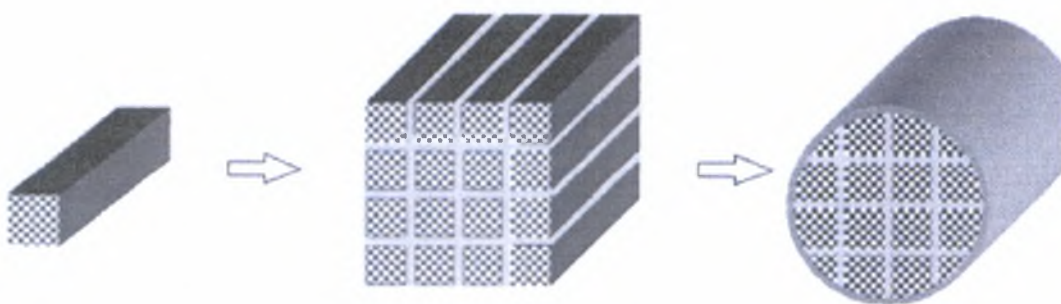
1.5.3 Υλικά και κατασκευή των φίλτρων αιθάλης

Τα φίλτρα κατασκευάζονται κυρίως από μονόλιθους στους οποίους επιτυγχάνεται ροή του καυσαερίου διαμέσου του τοιχώματος (wall flow monolith). Τα κανάλια του φίλτρου είναι βουλωμένα με τέτοιο τρόπο ώστε όσα είναι ανοιχτά στην είσοδο του φίλτρου, να είναι ταπωμένα στην έξοδο και το αντίστροφο. Έτσι η ροή εξαναγκάζεται να περνάει μέσα από τα τοιχώματα των καναλιών.



Εικόνα 1-17 Ροή καυσαερίου στα κανάλια του φίλτρου αιθάλης

Τα φίλτρα αυτά είναι συνήθως κατασκευασμένα από κορδιερίτη (cordierite) ή από καρβίδιο του πυριτίου SiC. Στην εικόνα παρουσιάζεται η διαδικασία κατασκευής των φίλτρων SiC.



Εικόνα 1-18 Διαδικασία κατασκευής των φίλτρων SiC

Ο βαθμός απόδοσης των μονόλιθων μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 90% αλλά η πτώση πίεσης είναι σχετικά μεγάλη και αυξάνεται γρήγορα με αύξηση της φόρτισης του φίλτρου. Για να επιτευχθεί μεγάλη αντοχή η διαδικασία αναγέννησης πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να αποφεύγονται οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες λόγω της εξώθερμης καύσης της αιθάλης.

Ο μηχανισμός συλλογής στους κεραμικούς μονόλιθους είναι συνήθως συνδυασμός της λειτουργίας των depth και surface φίλτρων και στην αρχική φάση τα σωματίδια συγκεντρώνονται στους πόρους του τοιχώματος με απόθεση λόγω διάχυσης και αδράνειας. Όσο αυξάνεται η φόρτιση του φίλτρου δημιουργείται ένα στρώμα καπνού στην επιφάνεια του καναλιού και λειτουργεί σαν surface φίλτρο. Συνήθως η απόδοση είναι 70-95% αλλά παρατηρούνται μεγαλύτερες αποδόσεις σε μεγαλύτερες φορτίσεις της παγίδας. Μερικές φορές όμως, ακόμα και με μεγάλη φόρτιση, η απόδοση μπορεί να μειωθεί σε υψηλό φορτίο του κινητήρα. Αυτό οφείλεται στο ότι οι παγίδες αιθάλης κατακρατούν το στερεό τμήμα των σωματιδίων που εκπέμπονται αλλά δεν είναι αποτελεσματικές στις θειούχες και οργανικές ενώσεις (SOF).

Οι μονόλιθοι τοποθετούνται σε ατσάλινο περίβλημα με μικρή σταθερά θερμικής διαστολής. Λόγω του σχετικά μεγάλου μεγέθους της παγίδας αιθάλης και των δυνάμεων λόγω της υψηλής πτώσης πίεσης στο εσωτερικό του περιβλήματος το φίλτρο συγκρατείται για να αποφευχθεί η αξονική του μετακίνηση. Ακόμα τοποθετούνται μονωτικά υλικά ανάμεσα στην παγίδα και το περίβλημα για την αποφυγή διαφυγής καυσαερίου από το φίλτρο αλλά και την ομοιόμορφη κατανομή των δυνάμεων στο περίβλημα.

1.5.4 Πρόσθετο καυσίμου

Τα πρόσθετα καυσίμου χρησιμοποιούνται στα παθητικά συστήματα για να μειωθεί η θερμοκρασία καύσης της αιθάλης. Το πρόσθετο συνήθως περιέχει σίδηρο, δημήτριο, χαλκό ή λευκόχρυσο.

Τα πρόσθετα χρησιμοποιήθηκαν για την μείωση των εκπομπών σωματιδίων αιθάλης. Αργότερα το ενδιαφέρον για τα πρόσθετα αφορούσε την καταλυτική δράση στην οξείδωση των σωματιδίων. Το πρόσθετο βγαίνει από τον θάλαμο καύσης σαν οξειδίο μετάλλου ή σαν άλλο ανόργανο συστατικό. Αυτά τα συστατικά μπορούν να ενσωματωθούν στα σωματίδια αιθάλης. Τα σωματίδια συλλέγονται στην παγίδα και το πρόσθετο που υπάρχει εκεί λειτουργεί σαν καταλύτης στην οξείδωση του καπνού.

Η λειτουργία του φίλτρου που χρησιμοποιεί πρόσθετο έχει πολλά κοινά στοιχεία με το φίλτρο με καταλυτική επιφάνεια όμως η χρήση προσθέτου έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη επαφή μεταξύ του καταλύτη και των σωματιδίων αιθάλης. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι παγίδα με πρόσθετο αναγεννάται σε χαμηλότερη

θερμοκρασία. Παρόλα αυτά δεν είναι η βέλτιστη λύση αφού οι νέες προσεγγίσεις που υποβοηθούν την λειτουργία του προσθέτου με την ηλεκτρονική διαχείριση του κινητήρα για την αύξηση της θερμοκρασίας είναι περισσότερο αποτελεσματικές.

Τα πρόσθετα καυσίμου είναι διαλυτές οργανομεταλλικές ουσίες και οξειδώνονται στο θάλαμο καύσης. Ο τύπος του προσθέτου είναι πολύ σημαντικός για την σταθερότητα και την αναμειξιμότητα του. Πολλοί τύποι προσθέτου έχουν δοκιμαστεί και η συγκέντρωση του στο καύσιμο φτάνει μέχρι 100ppm. Η συγκέντρωση του προσθέτου εξαρτάται από την καταλυτική δραστηριότητα του, την θερμοκρασία καυσαερίου, την ποσότητα και την σύσταση των σωματιδίων αιθάλης. Υψηλότερη συγκέντρωση προσθέτου έχει αποτέλεσμα την αναγέννηση της παγίδας σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Όμως η αντίθλιψη είναι μεγαλύτερη λόγω της συσσώρευσης στάχτης (πρόσθετο) και ακόμα το κόστος λειτουργίας είναι υψηλότερο. Έτσι το πρόσθετο σε συγκέντρωση περισσότερο από 100ppm δεν είναι κατάλληλο για εμπορικές εφαρμογές.

Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει κάποιους τύπους προσθέτου που χρησιμοποιούνται σε συστήματα φίλτρων αιθάλης.

Ενεργό μέταλλο προσθέτου	Όνομασία	Προμηθευτής
Σίδηρος (Fe/Ferrocene)	Satacen	Octel
Σίδηρος (Fe) – Στρόντιο (Sr)	Octimax 4800	Octel
Δημήτριο (Ce)	Eolys	Rhodia
Λευκόχρυσος (Pt)	Platinum Plus	Clean Diesel
Χαλκός (Cu)		Lubrizol

Πίνακας 1-6 Τύποι προσθέτου καυσίμου εμπορίου

Τα μειονεκτήματα και τα θέματα σχετικά με τη χρήση προσθέτου που πρέπει να διερευνηθούν είναι :

- Η ανάγκη να προστεθεί το πρόσθετο στο καύσιμο. Πολλές φορές αυτό δεν είναι εύκολο και έχουν αναπτυχθεί αυτοματοποιημένες συσκευές έγχυσης προσθέτου στο δοχείο καυσίμου του αυτοκινήτου. Αυτό όμως κάνει το σύστημα πολυπλοκότερο και ακριβότερο.
- Απόθεση στάχτης (πρόσθετο) στο φίλτρο. Η μεγαλύτερη ποσότητα του πρόσθετου μένει στο φίλτρο με την μορφή ανόργανου οξειδίου. Η ποσότητα αυτή αυξάνει συνεχώς και έτσι αυξάνεται και η αντίθλιψη.

- Εκπομπές στάχτης. Η στάχτη του προσθέτου που δεν συγκρατείται από την παγίδα αιθάλης εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα με βλαβερά αποτελέσματα για το περιβάλλον. Σε κάποιες χώρες υπάρχουν περιορισμοί για τις εκπομπές στάχτης.
- Επιρροή στις εκπομπές του κινητήρα. Το πρόσθετο μπορεί να έχει θετικές ή αρνητικές επιπτώσεις στις εκπομπές ρύπων. Πολλά χαρακτηριστικά των εκπομπών μπορούν να επηρεαστούν όπως το μέγεθος των σωματιδίων αιθάλης.
- Επιρροή στον κινητήρα. Κάποια πρόσθετα προκαλούν βλάβες στα ακροφύσια έγχυσης καυσίμου (fuel injectors). Έτσι οι επιπτώσεις της χρήσης προσθέτου πρέπει να ελέγχονται σε σχέση με την φθορά μηχανικών μερών του κινητήρα.
- Σταθερότητα καυσίμου. Η ανάμιξη του προσθέτου με το καύσιμο μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία ιζήματος στο καύσιμο με ή χωρίς προσθήκη νερού στο καύσιμο.

Το πρόσθετο καυσίμου βασισμένο στο Δημήτριο (Cerium, Ce) αναπτύχθηκε από την Rhodia και πωλείται με την ονομασία Eolys. Το πρόσθετο αυτό έχει δοκιμαστεί σε πολλές εφαρμογές κυρίως στην Ευρώπη. Τα πλεονεκτήματα του Ce είναι το ότι δεν είναι βλαβερό για τον άνθρωπο και η βελτίωση των εκπομπών του κινητήρα. Έχει αποδειχθεί ότι το Ce είναι αποτελεσματικό στην αναγέννηση του φίλτρου και ότι είναι συμβατό με το υλικό της παγίδας.

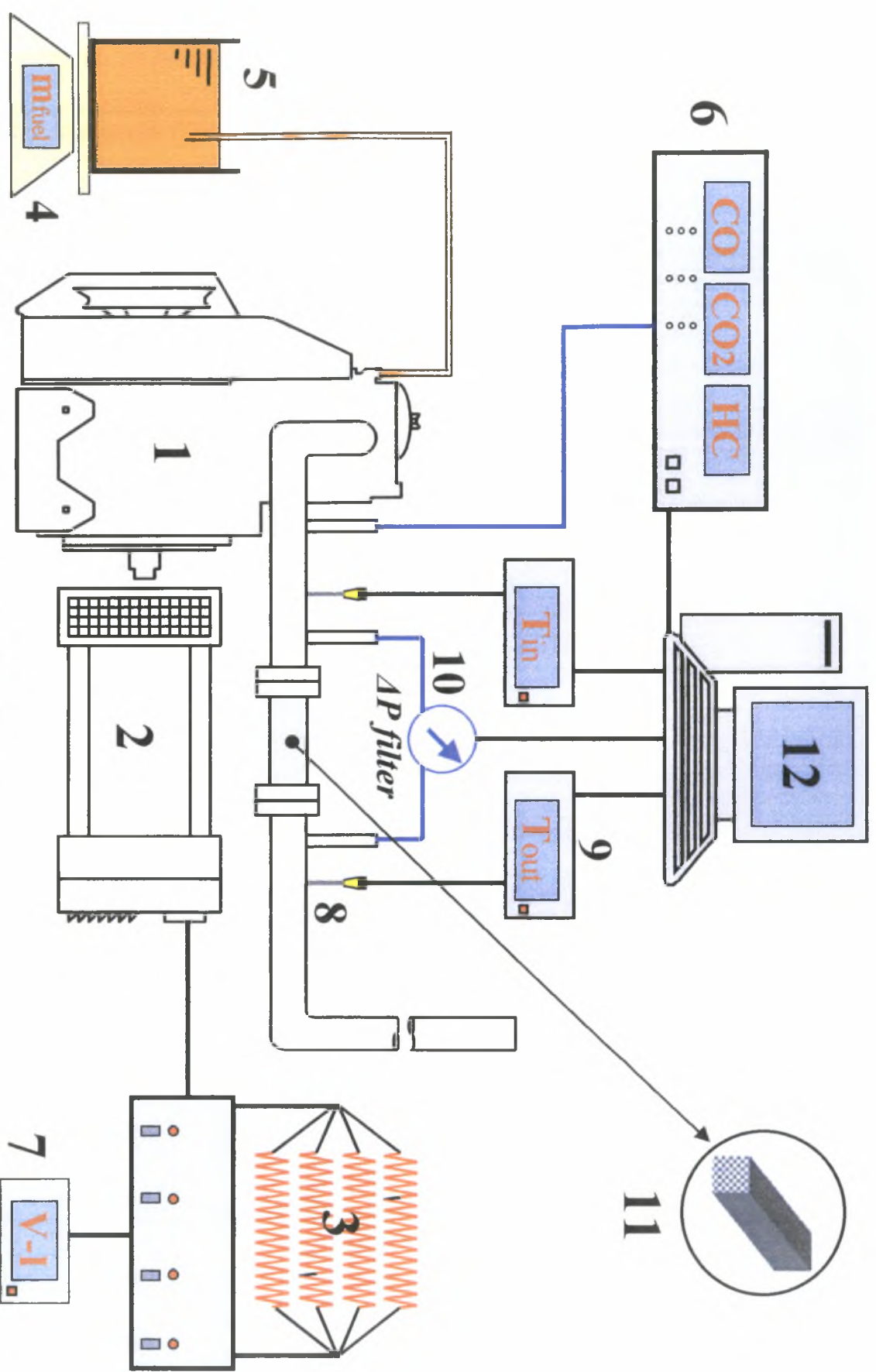
2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η συνολική πειραματική διάταξη απαρτίζεται από τις επιμέρους διατάξεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον πίνακα:

1	Κινητήρας
2	Ηλεκτρική Γεννήτρια
3	Διάταξη Ηλεκτρικών Αντιστάσεων
4	Μετρητικός Ζυγός Μάζας Καυσίμου
5	Δεξαμενή Καυσίμου
6	Αναλυτής Καυσαερίου
7	Μετρητικό Όργανο Τάσης, Έντασης, Συχνότητας Ρεύματος / Συσκευή Ένδειξης V-I
8	Θερμοζεύγη
9	Συσκευή Μέτρησης Θερμοκρασίας
10	Αισθητήρας Πίεσης
11	Φίλτρο Αιθάλης Καυσαερίου
12	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής

Πίνακας 2-1 Υπόμνημα πειραματικής διάταξης

Ακολουθεί η σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης στην εικόνα 2-1



Εικόνα 2-1 Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης

2.1 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

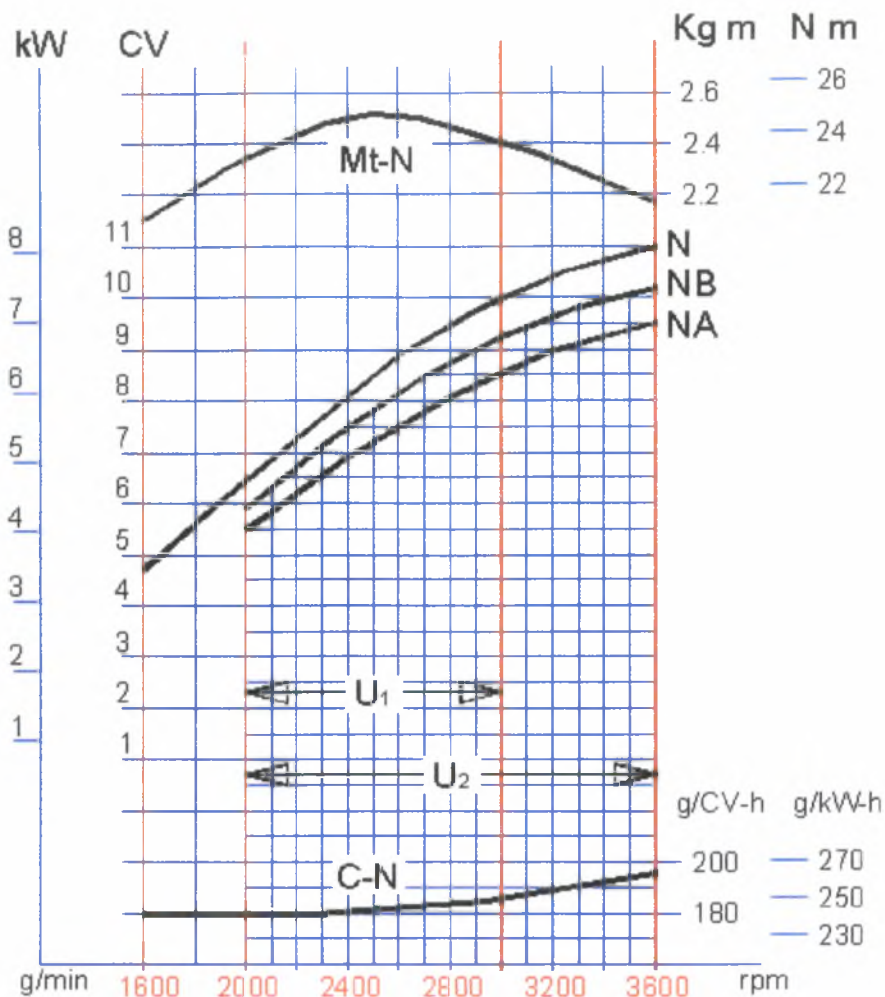


Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα είναι το μοντέλο RF 91 της Ruggerini. Ένας μονοκύλινδρος εσωλέμβιος πετρελαιοκινητήρας θαλάσσης με τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία συνοψίζονται στον πίνακα:

Αριθμός κυλίνδρων	1
Διάμετρος κυλίνδρου	90 mm
Διαδρομή εμβόλου	75 mm
Όγκος εμβολισμού	477 cm ³
Σχέση συμπίεσης	18.5 : 1
Κύκλος	Diesel 4 χρόνοι
Σύστημα έγχυσης	Απ' ευθείας έγχυση (DI)
Σύστημα ψύξης	Αερόψυκτος
Διαστάσεις (ΜxΠxΥ)	443mm x 464.5mm x 525mm
Βάρος	48 kg

Πίνακας 2-2 Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα Ruggerini RF 91

Για την απόδοση της μηχανής ο κατασκευαστής παραθέτει τα διαγράμματα της παρακάτω εικόνας, όπου υπάρχουν οι καμπύλες μέγιστης ροπής (περιβάλλουσα του κινητήρα), ισχύος και ειδικής κατανάλωσης, συναρτήσει της ταχύτητας του κινητήρα.



Εικόνα 2-2 Διαγράμματα απόδοσης κινητήρα από τον κατασκευαστή

Η καμπύλες N, NB, NA είναι καμπύλες ισχύος. Η N αναφέρεται σε αυτοκινούμενο έργο της μηχανής, για μη συνεχή λειτουργία, μεταβλητές στροφές και μεταβλητό φορτίο. Εδώ έχουμε και τη μέγιστη ισχύ του κινητήρα, η οποία είναι 8,1 Kw στις 3600 rpm.

Η NB αναφέρεται σε ελαφρύ έργο της μηχανής, για συνεχή λειτουργία, σταθερές στροφές και μεταβλητό φορτίο. Μέγιστη τιμή είναι τα 7,5 Kw στις 3600 rpm (ονομαστική ισχύς για light duty).

Η NA τέλος, αναφέρεται σε βαρύ έργο για συνεχή λειτουργία, σταθερές στροφές και σταθερό φορτίο. Εδώ η μέγιστη τιμή είναι 7,0 Kw στις 3600 rpm (ονομαστική ισχύς για heavy duty).

Η καμπύλη Mt είναι η καμπύλη μέγιστης ροπής ή περιβάλλουσα του κινητήρα και αντιστοιχεί στη N καμπύλη ισχύος. Η μέγιστη τιμή είναι 25 Nm και επιτυγχάνεται στις 2500 rpm.

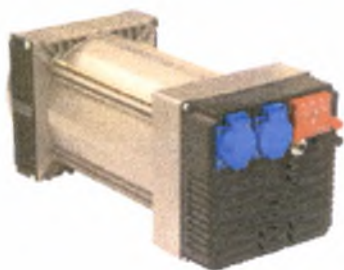
Η καμπύλη C είναι η ειδική κατανάλωση συναρτήσει της ταχύτητας τού κινητήρα και αναφέρεται και αυτή στην καμπύλη N της ισχύος.

Σύμφωνα με τον κατασκευαστή το εκμεταλλεύσιμο πεδίο του κινητήρα ξεκινάει από τις 2000 rpm και φτάνει μέχρι τις 3600 rpm, τιμή η οποία είναι και η μέγιστη της μηχανής.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά όρια της μηχανής ελαττώνονται κατά 1% κάθε 100 m ύψους πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και κατά 1% για κάθε 2,5 °C πάνω από τους 20 °C θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Ο κινητήρας εδραιώθηκε στο δάπεδο του εργαστηρίου με κατάλληλες αντικραδασμικές βάσεις.

2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

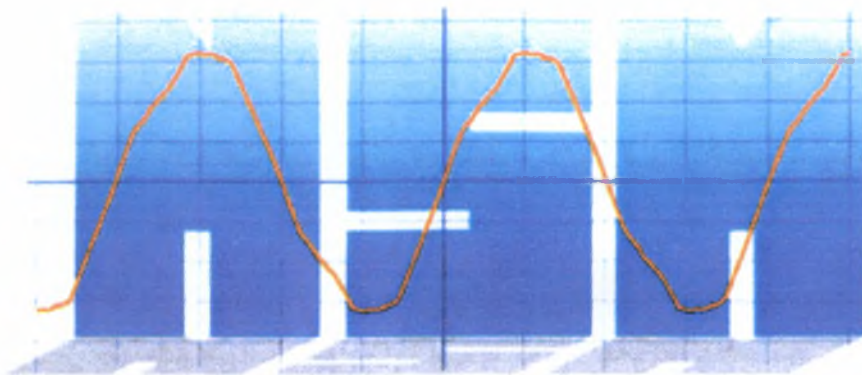


Η ηλεκτρική γεννήτρια που συνόδευε τον κινητήρα είναι το μοντέλο MS 100 LG της NSM, με ηλεκτρικά δεδομένα τα στοιχεία του πίνακα 2-3, τέτοια ώστε να ανταποκρίνονται στα χαρακτηριστικά της μηχανής.

50Hz 3000rpm			60Hz 3600rpm		
Ισχύς Εξόδου	Κινητήρια Ισχύς	Απόδοση Γεννήτριας $\eta\%$	Ισχύς Εξόδου	Κινητήρια Ισχύς	Απόδοση Γεννήτριας $\eta\%$
6 kVA	8 kW	75	7.2 kVA	9.6 kW	75

Πίνακας 2-3 Ηλεκτρικά δεδομένα γεννήτριας από τον κατασκευαστή

Το ρεύμα που παράγει η γεννήτρια είναι εναλλασσόμενο με κυματομορφή αυτή που φαίνεται στην εικόνα:



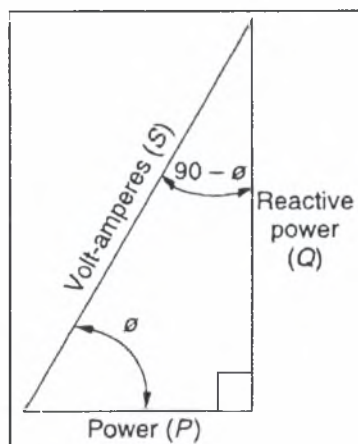
Εικόνα 2-3 Τυπική κυματομορφή τάσης ρεύματος εξόδου γεννήτριας

Η σχέση μετάδοσης του άξονα του κινητήρα με το ρότορα της γεννήτριας είναι 1:1, αφού συνδέονται απ' ευθείας κατά μήκος, επομένως οι ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και της γεννήτριας είναι ίδια κάθε στιγμή.

2.3 ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Για να μετρηθεί ο κινητήρας σε διάφορα σημεία λειτουργίας έπρεπε πρωτίστως να δημιουργηθεί μια διάταξη πέδησης η οποία θα μπορούσε να επιβάλλει μεταβλητό φορτίο σε αυτόν. Επιλέχθηκαν λοιπόν ηλεκτρικές αντιστάσεις οι οποίες θα καταναλώνουν την αποδιδόμενη ενέργεια του κινητήρα. Ο άξονας της μηχανής δίνει κίνηση στο ρότορα της γεννήτριας, η οποία με τη σειρά της μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η απόδοση της γεννήτριας όπως αναφέρεται στον παραπάνω πίνακα είναι 75%, δηλαδή μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια το 75% της αποδιδόμενης από τον κινητήρα ενέργειας. Την ηλεκτρική αυτή ενέργεια καταναλώνουν τελικά οι αντιστάσεις μετατρέποντάς την σε θερμότητα.

Η μέγιστη ισχύς του κινητήρα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι 8.1 kW, με την οποία η γεννήτρια δίνει ισχύ περίπου 6 kVA (8.1×0.75). Όταν η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται μόνο σε ωμικές αντιστάσεις, όπως στην περίπτωση μας, τότε η ένταση και η τάση του ρεύματος που παράγει η γεννήτρια είναι συμφασικές ($\varphi=0$). Όπως φαίνεται και από το τρίγωνο ισχύος της εικόνας, αυτό σημαίνει πως τα 6 kVA είναι 6 kW.



Εικόνα 2-4 Τρίγωνο ισχύος εξόδου γεννήτριας

Σύμφωνα με τα παραπάνω κατασκευάστηκε διάταξη με τέσσερις ίδιες ηλεκτρικές αντιστάσεις αέρος, μέγιστης ισχύος 1.5 kW, οι οποίες συνδέθηκαν παράλληλα, ώστε να καταναλώνουν μέχρι 6 kW μαζί σε λειτουργία. Τοποθετήθηκαν πάνω σε ένα μεταλλικό κιβώτιο, το οποίο τις στηρίζει και διαθέτει χώρο για τις απαραίτητες καλωδιώσεις. Υπάρχουν τέσσερις διακόπτες με ενδεικτικές λυχνίες και δύο ασφάλειες των 16 A. Επίσης σε αυτό το χώρο τοποθετήθηκαν και τα ηλεκτρικά κυκλώματα για τη μέτρηση της έντασης, της τάσης και της συχνότητας του ρεύματος που διαρρέει τις ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Η διάταξη αυτή εγκαταστάθηκε σε υψηλό σημείο του τοίχου, κοντά στον κινητήρα, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος επαφής με τις αντιστάσεις και η θερμότητά τους να μην εμποδίζει τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

2.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Για τη μέτρηση της μάζας καυσίμου που καταναλώνεται κατά τη λειτουργία του κινητήρα χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικός ζυγός πάνω στον οποίο τοποθετήθηκε η δεξαμενή με το καύσιμο. Η βάση τους βρίσκεται στο δάπεδο δίπλα στον κινητήρα και για το λόγο αυτό στις στηρίξεις προστέθηκε απορροφητικό μέσο ώστε οι κραδασμοί να μην επηρεάζουν τις ενδείξεις του ζυγού. Ο ζυγός είναι το μοντέλο GS 6200-1 της KERN με λογισμικό διασύνδεσης KERN 822-43 και τεχνικά χαρακτηριστικά τα παρακάτω:

KERN GS6200-1	
Κλίμακες Μέτρησης	0 - 6200g
Ευαισθησία	0.1g
Χρόνος Σταθεροποίησης	2 sec
Γραμμικότητα	+/- 0.1g
Θερμοκρασία Χώρου Λειτουργίας	0 - 40 °C

Πίνακας 2-4 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικού ζυγού

2.5 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν diesel κίνησης AVIN που πληροί τις ελληνικές προδιαγραφές EN-590. Το καύσιμο περιείχε πρόσθετο με βάση το ενεργό μέταλλο δημήτριο (Ce) σε συγκέντρωση 25ppm και χρησιμοποιείται για την μείωση της απαιτούμενης θερμοκρασίας αναγέννησης της παγίδας αιθάλης. Το πρόσθετο φέρει την ονομασία Eolys DPX9 και παράγεται από την Rhodia. Οι προδιαγραφές της τυποποίησης που πληρούνται από το καύσιμο παρατίθενται σε πίνακα στην επόμενη σελίδα.

Δοκιμή	Μέθοδος	Όριο
Πυκνότητα στους 15°C, kg/m ³	EN ISO-3675/1995	845 max
Flash point (PM) °C	ISO 2719	55 min
Ιξώδες στους 40°C, mm ² /sec	ISO-3104	2-4.5
Υπόλειμμα C στο 10% του υπολείμματος % m/m	ISO 10370	0.3 max
Περιεκτικότητα Θείου mg/kg	EN ISO-8754/1995	350 max
C.F.P.P °C	EN 116	-5/+5max
Επιταχυνόμενη σταθερότητα gr/m ³	ASTM D-2274	25 max
Στάχτη (ash) % κ.β.	EN 26245	0.01 max
Διάβρωση με χαλκό, 3h στους 50 °C	ISO-2160	N° 1 max
Δείκτης κετανίου	ISO-4264	46 min
Διύλιση	EN ISO-3405/1988	
Ανάκτηση 65% Vol °C		250 min
Ανάκτηση 85% Vol °C		350 max
Ανάκτηση 95% Vol °C		360 max
Μάζα σωματιδίων gr/m ³	DIN 51419	24 max
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες %	IP 391/1995	11 max
Περιεκτικότητα νερού mg/kg	ASTM D-1744	200 max
Αριθμός κετανίου	EN ISO-5165/1992	51 min

Πίνακας 2-5 Προδιαγραφές καυσίμου πειράματος

2.6 ΑΝΑΛΥΤΗΣ ΚΑΥΣΑΕΡΙΟΥ

Για την καταγραφή των εκπομπών καυσαερίου χρησιμοποιήθηκε αναλυτής τεσσάρων αερίων (CO, CO₂, HC και O₂) της Test Equipment Nederland BV. Η μέθοδος μέτρησης βασίζεται στην απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (FDIR) εκτός του οξυγόνου το οποίο μετράται σε ξεχωριστό ηλεκτροχημικό κελί, με παρόμοια μέθοδο αυτής των αισθητήρων λ. Τα στοιχεία του αναλυτή παραθέτονται στον πίνακα παρακάτω.

TEN 4 GAS ANALYZER		
Κλίμακες μέτρησης	CO	0 – 9.99 volume %
	CO ₂	0 – 19.99 volume %
	HC	0 – 1999 ppm
	O ₂	0 – 25.0 volume %
Ισχύς	60 W	
Βάρος	12 kg	
Διαστάσεις	393 x 330 x 183 mm	

Πίνακας 2-6 Στοιχεία του αναλυτή καυσαερίων

Να σημειωθεί πως η μέτρηση του οξυγόνου δεν ήταν εφικτή και ότι ο αναλυτής χρειάστηκε επισκευή πριν τη χρήση του στην παρούσα εργασία.

2.7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Αφού οι ηλεκτρικές αντιστάσεις αποτελούν το φορτίο του κινητήρα είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις τιμές της έντασης και της τάσης του ρεύματος που τις διαρρέει. Η συχνότητα του ρεύματος ισούται με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, γιατί κάθε περιστροφή του άξονα του κινητήρα δίνει μία περιστροφή στον ρότορα της ηλεκτρικής γεννήτριας και κάθε περιστροφή του ρότορα είναι ένα μήκος κύματος του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Έτσι λοιπόν, μέσα στο κιβώτιο που στηρίζει τις αντιστάσεις, τοποθετήθηκαν και τα κατάλληλα ηλεκτρικά κυκλώματα που χρειάζονται για τη μέτρηση της τάσης, έντασης και συχνότητας του ρεύματος των αντιστάσεων. Τα κυκλώματα για την τάση και ένταση προηγούνται του μετρητικού οργάνου το οποίο μετράει και παρουσιάζει τις τιμές τους. Το κύκλωμα για τη συχνότητα συνδέεται απευθείας, με ειδικό καλώδιο (ομοαξονικό μπλεντάζ για PC), στον ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου και καταγράφεται η τιμή της.

2.7.1 Κύκλωμα για τη μέτρηση της τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος

Με χρήση δύο ηλεκτρικών αντιστάσεων R_1 , R_2 , (με $R_1/R_2=100$), μεγάλης ωμικής αντίστασης, ώστε ο βρόγχος να διαρρέεται από αμελητέας έντασης ρεύμα, η τάση της R_2 διαιρείται δια 100. Στη συνέχεια ανορθώνεται και εξομαλύνεται (μετατρέπεται σε συνεχή) με μία δίοδο και έναν πυκνωτή και τελικά οδηγείται στο όργανο, το οποίο

αναγράφει την τιμή της (το όργανο είναι βαθμονομημένο ώστε να παρουσιάζει επί 100 την τιμή που δέχεται).

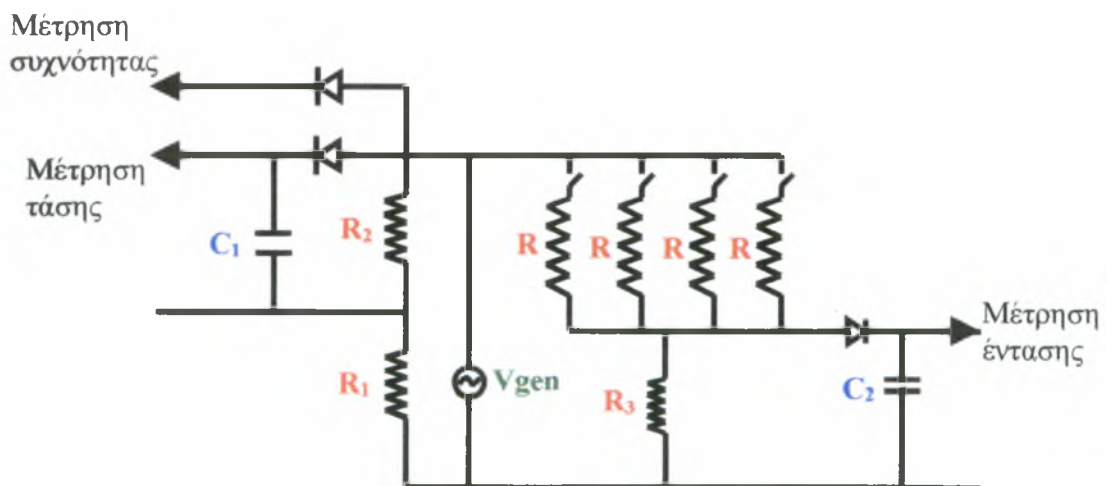
2.7.2 Κύκλωμα για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος

Εδώ παρεμβάλλεται μία πολύ μικρή αντίσταση (ώστε να έχουμε αμελητέα πτώση τάσεως πάνω της) σε σειρά με τις αντιστάσεις-φορτία του κινητήρα. Το ρεύμα της ανορθώνεται, εξομαλύνεται και οδηγείται στο όργανο μέτρησης και ένδειξης της έντασης.

2.7.3 Κύκλωμα για τη μέτρηση της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος

Το κύκλωμα αυτό είναι μια δίοδος, η οποία συνδέεται στα άκρα της αντίστασης R_2 και ανορθώνει την τάση. Αυτή η τάση (αναλογικό σήμα), οδηγείται μέσω του καλωδίου στον υπολογιστή, ο οποίος μετράει τα ακρότατά της και καταγράφει έτσι τη συχνότητα του ρεύματος.

Για να γίνει όμως ακριβώς κατανοητό πως οι τιμές αυτές που παίρνουμε, είναι οι τιμές που μας ενδιαφέρουν, στην εικόνα .. φαίνεται η συνδεσμολογία του ολικού κυκλώματος



Όπου $R_1/R_2 = 100$

$R_1, R_2 \gg R$ και $R_3 \ll R$

Εικόνα 2-5 Συνδεσμολογία συνολικού κυκλώματος

2.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για τη χαρτογράφηση του κινητήρα χρησιμοποιήθηκε ένα θερμοζεύγος για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Το θερμοζεύγος τοποθετήθηκε όσο το δυνατόν πιο κοντά στην εξαγωγή του κυλίνδρου, ώστε οι απώλειες να είναι αμελητέες. Χρειάστηκε διάνοιξη οπής επάνω στην εξάτμιση η οποία ήταν δυνατή στα 200mm από την εξαγωγή και η οποία στεγανοποιήθηκε κατά την τοποθέτηση του θερμοζεύγους.

Στα πειράματα με το φίλτρο αιθάλης χρησιμοποιήθηκαν δύο θερμοζεύγη για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην είσοδο και την έξοδο του φίλτρου. Και εδώ έγινε διάνοιξη δύο οπών επάνω στην εξάτμιση, δίπλα από την αρχή και το πέρας της παγίδας. Η τοποθέτηση έγινε με ακρίβεια ώστε η μύτη κάθε θερμοζεύγους να βρίσκεται στο κέντρο της επιφάνειας εισόδου και εξόδου του φίλτρου αντίστοιχα, όπου η παροχή καυσαερίου είναι μεγαλύτερη.

Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου K:

- Uteco Sensors, NiCrNi, περιοχής $-65/+1150^{\circ}\text{C}$, $\Phi 1.5 \times 200\text{mm}$

Τα θερμοζεύγη τύπου K είναι γραμμικά, δηλαδή η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσουν (φαινόμενο Seebeck) είναι γραμμικά ανάλογη με τη θερμοκρασία στην οποία εκτείθονται ($T[^{\circ}\text{C}] = a \cdot \Delta V[\text{mV}] + b$). Για τη μέτρηση αυτής της διαφοράς δυναμικού κατασκευάστηκαν δύο όργανα και το καθένα συνδέθηκε με ένα θερμοζεύγος. Το όργανο αυτό μετράει τη διαφορά δυναμικού [mV] και με την κατάλληλη μετατροπή (εξίσωση), παρουσιάζει την τιμή της θερμοκρασίας. Η βαθμονόμηση του οργάνου γίνεται εύκολα με δύο ρυθμιστές, ένας για την κλίση και ο άλλος για το σταθερό όρο της εξίσωσης. Στη συνέχεια στην έξοδο του οργάνου υπάρχει η τιμή της θερμοκρασίας (αναλογικό σήμα), η οποία μεταφέρεται με ειδικό καλώδιο στον υπολογιστή και καταγράφεται.

2.9 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

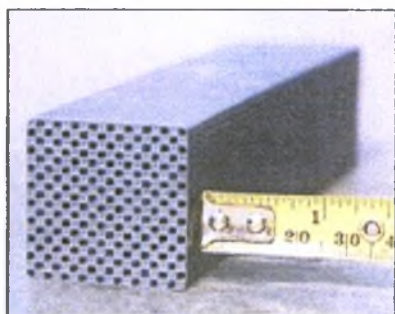
Η μέτρηση πτώσης πίεσης κατά μήκος του φίλτρου πραγματοποιείται με ένα χωρητικό αισθητήρα πίεσης διαφράγματος. Το διάφραγμα αποτελεί οπλισμό ενός πυκνωτή το οποίο είναι ελαστικό και παραμορφώνεται ελαστικά. Ο δεύτερος οπλισμός είναι ακλόνητα στερεωμένος και διηλεκτρικό του συστήματος αποτελεί ο αέρας. Όταν υπάρχει διαφορά πίεσης εκατέρωθεν του διαφράγματος, αυτό

μετατοπίζεται, μεταβάλλεται η απόσταση των οπλισμών, άρα η χωρητικότητα του πυκνωτή και έτσι προκαλείται μεταβολή του ηλεκτρικού σήματος που εφαρμόζεται στους οπλισμούς. Το σήμα αυτό ρυθμίζεται στη συσκευή, η οποία είναι μόνιμα βαθμονομημένη και εξάγει αναλογικό σήμα το οποίο καταγράφεται στον υπολογιστή. Απαιτείται προσοχή στην πολικότητα της συσκευής και αυτό γιατί το διάφραγμα πρέπει να παραμορφώνεται και να μετατοπίζεται προς συγκεκριμένη φορά. Η πίεση εισόδου συνδέεται από τη πλευρά που ασκείται η μεγαλύτερη πίεση στο διάφραγμα. Τα χαρακτηριστικά της συσκευής παραθέτονται στον πίνακα:

Sensor type	SCX 15DN
Max pressure	1034.3 mbar / 10 psi
Output	1-10V
Calibrated	9/6/2003

Πίνακας 2-7 Χαρακτηριστικά συσκευής μέτρησης πτώσης πίεσης

2.10 ΦΙΛΤΡΟ ΑΙΘΑΛΗΣ



Το φίλτρο αιθάλης που τοποθετήθηκε στην εξαγωγή του κινητήρα είναι φίλτρο καρβιδίου του πυριτίου (SiC), διαστάσεων 150x34x34mm με 324 κανάλια και ιδιότητες αυτές του παρακάτω πίνακα.

ΦΙΛΤΡΟ ΑΙΘΑΛΗΣ SiC	
Αντοχή	170.3-198.7MPa
Σκληρότητα	2.57-2.84x10⁴MPa
Σημείο τήξης	2910-3030K
Συντελεστής θερμικής διαστολής	3.43-3.57x10⁶/K
Θερμική αγωγιμότητα [25°]	11 W/mK
Θερμική αγωγιμότητα [630°C]	7 W/mK
Ειδική θερμότητα [25°]	750 J/kg
Ειδική θερμότητα [800°C]	12450 J/kg
Πυκνότητα	3.18-3.24mg/m³
Μέγεθος πόρων	5-25 μm
Πορώδες	45%

Πίνακας 2-8 Ιδιότητες φίλτρων SiC

2.11 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

2.11.1 Ηλεκτρονικός υπολογιστής

Η καταγραφή και η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής	Intel Pentium III 450MHz
Μνήμη Ram	192 MB
Ταχύτητα διαύλου	133 MHz
Λειτουργικό σύστημα	MS – Windows 2000
Χωρητικότητα σκληρού δίσκου	12 GB

Πίνακας 2-9 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικού υπολογιστή

2.11.2 Λογισμικό

Η καταγραφή των δεδομένων στον υπολογιστή έγινε με το πρόγραμμα Labview 6i της National Instruments. Σε αυτό ο χρήστης δημιουργεί ένα διάγραμμα (diagram) και ένα παράθυρο χειρισμού (front panel) τα οποία αποτελούν το λεγόμενο εικονικό όργανο (Virtual Instrument ή VI). Στο διάγραμμα καθορίζεται η λειτουργία του και ορίζονται :

- Διάταξη στο αρχείο καταγραφής, θέση και ονομασία αυτού και το αν είναι επιθυμητό να γίνει προσθήκη στον υπάρχον φάκελο
- Ο ρυθμός ανίχνευσης και ο αριθμός των δεδομένων που στρογγυλοποιούνται σε μέσο όρο
- Η κλίμακες του κάθε καναλιού της κάρτας καταγραφής

Στο ταμπλό βρίσκονται οι ενδείξεις των μεγεθών που μετρούνται, ο χρόνος καταγραφής και ο διακόπτης έναρξης και τέλους της.

Στη συνέχεια το αρχείο που δημιουργείται από το VI, ανοίγεται στο πρόγραμμα MS Excel, όπου γίνεται η ταξινόμηση των σημείων λειτουργίας και τα απαραίτητα γραφήματα.

Οι χάρτες δημιουργούνται στο πρόγραμμα Matlab με μια απλή ομάδα εντολών, σε συνεργασία με το MS Excel. Με τις εντολές καθορίζονται: ο τίτλος του γραφήματος, η ονομασία και το εύρος των αξόνων, τα χρώματα του γραφήματος

- ο τίτλος του γραφήματος
- η ονομασία και το εύρος των αξόνων
- τα χρώματα του γραφήματος
- ο αριθμός των σημείων παρεμβολής και των ζωνών
- το είδος παρεμβολής
- η ένδειξη των σημείων λειτουργίας και των τιμών των ισοϋψών

2.11.3 Κάρτα καταγραφής

Η κάρτα καταγραφής δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε είναι η Lab-PC⁺ της National Instruments με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Lab-PC⁺	
Αναλογικές εισόδους	8 single/4 differential
Εύρος εισόδου	0-10V/-5-+5V
Αναλογική ανάλυση	12 bits
Μέγιστη συχνότητα σάρωσης	83.3KS/s
Μετρητές	3, 16-bit
Θερμοκρασία λειτουργίας	0-70°C

Πίνακας 2-10 Τεχνικά χαρακτηριστικά της κάρτας καταγραφής

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το πιο χρονοβόρο κομμάτι της, αποτέλεσε το στήσιμο της πειραματικής διάταξης, το οποίο εκτελέστηκε σταδιακά, από τις αρχές του χρόνου και με τη συλλογική εργασία των μελών του εργαστηρίου. Ο κινητήρας ήταν τοποθετημένος στο δάπεδο του εργαστηρίου, δίπλα στην εξωτερική είσοδο, όπου συγκεντρώθηκε ο υπόλοιπος απαραίτητος εξοπλισμός. Στην αρχή τοποθετήθηκε η εξάτμιση, η οποία στερεώθηκε στον τοίχο ώστε να οδηγεί τα καυσαέρια ψηλά και εξωτερικά του κλειστού χώρου. Στην αφετερία της δημιουργήθηκαν οι αναγκαίες συνδέσεις, ώστε να τοποθετείται και να αφαιρείται η κατασκευασμένη μεταλλική θήκη με το κεραμικό φίλτρο αιθάλης, οι οπές για τα θερμοστοιχεία, καθώς και οι σωληνώσεις εξόδου για τη μέτρηση της πτώσης πίεσης. Στη συνέχεια, αφού αποφασίστηκε ο τρόπος φόρτισης του κινητήρα, ακολούθησε η ιδιοκατασκευή του κιβωτίου με τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τα ηλεκτρικά κυκλώματα καθώς και τα όργανα μέτρησης θερμοκρασίας, τάσης και έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Μέχρι τα μέσα περίπου της χρονιάς είχαν συγκεντρωθεί, τοποθετηθεί και συνδεθεί όλες οι επιμέρους διατάξεις.

Σειρά είχε η εκμάθηση των σχετικών με την παρούσα εργασία λειτουργιών του προγράμματος Labview και μετέπειτα η δημιουργία του VI σε αυτό. Η τελική διαμόρφωση του VI πραγματοποιήθηκε μετά από πολλές διαφοροποιήσεις, με σκοπό να είναι το λειτουργικότερο δυνατό.

3.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Αφού ήταν όλα έτοιμα για την έναρξη των πειραμάτων, έπρεπε πρώτα να ελεγχθεί η αξιοπιστία της πειραματικής διάταξης, να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της στα διάφορα σημεία λειτουργίας, αλλά και να βαθμονομηθούν τα μετρητικά όργανα.

Η βαθμονόμηση των δύο οργάνων μέτρησης θερμοκρασίας έγινε σε δύο γνωστές θερμοκρασίες του νερού, αφού τα θερμοστοιχεία τύπου K έχουν γραμμική συμπεριφορά. Πρώτα τα δύο θερμοστοιχεία μαζί με ένα θερμόμετρο υδραργύρου, τοποθετήθηκαν σε ένα δοχείο με πάγο και λίγο νερό υγρής φάσης. Το θερμόμετρο

έδειξε 2°C και έτσι τα όργανα ρυθμίστηκαν να δείχνουν και αυτά την ίδια θερμοκρασία με τη βοήθεια των ρυθμιστών τους. Στη συνέχεια, τα θερμοζεύγη τοποθετήθηκαν σε νερό, το οποίο θερμάνθηκε μέχρι να βράσει. Οι ενδείξεις των δύο οργάνων σταμάτησαν κοντά στη τιμή των 100°C και με τον ρυθμιστή κυρίως της κλίσης, ρυθμίστηκαν να δείχνουν ακριβώς 100°C. Ακολούθησε επαλήθευση πάλι στους 2°C καθώς και στη θερμοκρασία περιβάλλοντος με τη βοήθεια του θερμόμετρου.

Η βαθμονόμηση του αναλυτή είναι απλή και γίνεται πριν από κάθε μέτρηση. Υπάρχουν τρεις σειρές από τρεις ρυθμιστές, έναν για κάθε αέριο σε κάθε σειρά. Στην πρώτη σειρά, πατώντας ένα διακόπτη ρυθμίζονται οι ενδείξεις στις μέγιστες τιμές του αναλυτή. Στη τρίτη σειρά ρυθμίζονται στο μηδέν, ενώ στη δεύτερη σε τιμές γνωστών συγκεντρώσεων αερίων σε φιάλες που συνδέονται στον αναλυτή. Πάντα, πρώτα ρυθμίζονται οι υδρογονάνθρακες, μετά το διοξείδιο του άνθρακα και στο τέλος το μονοξείδιο του άνθρακα. Η δεύτερη σειρά ρυθμίστηκε μία φορά στην αρχή και μετέπειτα η βαθμονόμηση γινόταν μόνο από τις υπόλοιπες σειρές.

Κατά τις δοκιμαστικές μετρήσεις, ο κινητήρας παρατηρήθηκε σε διάφορα σημεία λειτουργίας από τις 2000grm έως τις 3600grm και επιλέχθηκε οι τελικές μετρήσεις να πραγματοποιηθούν διαδοχικά στις 2000, 2400, 2800 και 3200grm. Λειτουργώντας στις 3600grm (μέγιστη τιμή), παρατηρήθηκε πως με την επιβολή φορτίου, η τιμή αυτή δεν ήταν εφικτό να διατηρηθεί σταθερή, οπότε και απορρίφθηκαν όλα τα σημεία λειτουργίας σε αυτή την ταχύτητας περιστροφής. Δυσκολία υπήρχε στην επίτευξη του επιθυμητού αριθμού στροφών, καθώς σε τέτοιους κινητήρες ο ρυθμιστής παροχής καυσίμου είναι δυσκίνητος στις αυξομειώσεις.

Εξαιτίας του είδους του κινητήρα, αρνητικό παράγοντα αποτελούν οι έντονοι κραδασμοί και ο υψηλός θόρυβος που συνοδεύουν τη χρήση του. Οι κραδασμοί καταπονούν υπερβολικά τις βάσεις του και οτιδήποτε συνδέεται σε αυτόν. Η ηλεκτρονική ζυγαριά η οποία βρίσκεται κοντά, ειδικά σε ορισμένα σημεία λειτουργίας, επηρεαζόταν σημαντικά και η ένδειξή της σταθεροποιούταν δύσκολα. Έτσι, όπως αναφέρθηκε, τοποθετήθηκαν απορροφητικά μέσα στις στηρίξεις της βάσης της, για την επίλυση του προβλήματος. Επίσης από την αρχή παρουσιάστηκε αστοχία στην τερματική σύνδεση της εξάτμισης, η οποία ήταν ένας εύκαμπτος αγωγός αλουμινίου και αποκοπτόταν επανειλημμένα. Έτσι αντικαταστάθηκε με έναν ισχυρότερο. Έγινε αντιληπτό πως οτιδήποτε καταπονείται από τους κραδασμούς

πρέπει να ελέγχεται συχνά και ότι η θραύση είναι πολύ πιθανή. Ιδίως στις βάσεις της μηχανής, ο έλεγχος κάθε φορά που ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία, κρίνεται απαραίτητος.

Προκαταρκτικό πείραμα αποτέλεσε και μια φόρτιση ενός φίλτρου αιθάλης, τεμαχισμένου σε 9 κομμάτια. Διαπιστώθηκε πως η εναπόθεση των σωματιδίων ήταν εξαιρετικά ικανοποιητική και παρόλη την ανησυχία μήπως κάποιο τεμάχιο σπάσει, αυτό δεν πραγματοποιήθηκε. Το φίλτρο μάλιστα παρατηρήθηκε στο μικροσκόπιο, στα πλαίσια μιας σχετικής μελέτης του εργαστηρίου

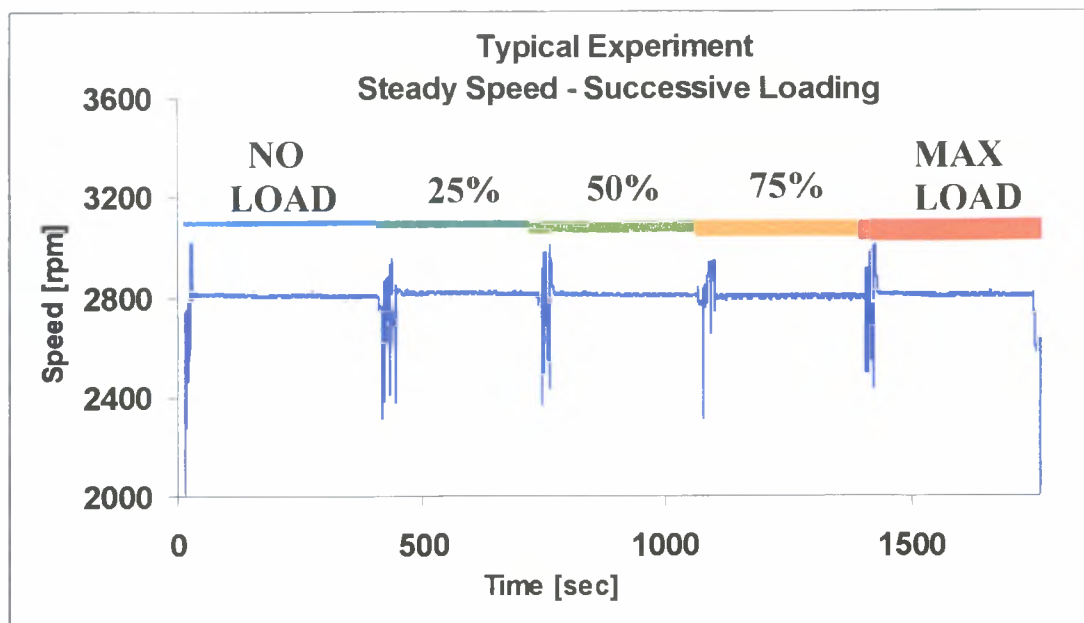
Στο τέλος των δοκιμαστικών μετρήσεων, έγιναν κάποιες πρακτικές αλλαγές στον έλεγχο του VI και δημιουργήθηκε ένα φύλλο εργασίας στο πρόγραμμα MS-Excel συλλογής και διαχείρισης δεδομένων.

3.3 ΤΕΛΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Έπειτα από τις παραπάνω δοκιμές, αποφασίστηκε ο τρόπος διεξαγωγής των τελικών πειραμάτων. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν και θεωρήθηκε σκόπιμο το σύνολο των πειραμάτων να μην απέχουν χρονικά μεταξύ τους και να εκτελούνται την ίδια ώρα της ημέρας, ώστε οι συνθήκες του περιβάλλοντος να είναι παρόμοιες.

3.3.1 Χαρτογράφηση του κινητήρα

Τα στοιχεία για τη χαρτογράφηση του κινητήρα, ορίστηκε να παρθούν από τέσσερα πειράματα (χωρίς να είναι τοποθετημένη η παγίδα αιθάλης). Σε κάθε πείραμα ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα περιστροφής και αυξάνεται διαδοχικά το φορτίο, ανοίγοντας μία-μία τις ηλεκτρικές αντιστάσεις. Οι τιμές ταχύτητας των τεσσάρων πειραμάτων είναι 2000, 2400, 2800 και 3200rpm. Οι αντιστάσεις είναι 4, οπότε συνεπάγονται μετρήσεις σε 20 σημεία λειτουργίας του κινητήρα, μαζί με τα τέσσερα σημεία δίχως εξωτερικό φορτίο. Κάθε σημείο λειτουργίας διατηρείται τουλάχιστον 5 λεπτά, χρόνος αρκετός ώστε να σταθεροποιηθούν οι τιμές όλων των μετρούμενων μεγεθών και το δείγμα να είναι στατικώς επαρκές. Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται η μορφή ενός τυπικού πειράματος με διαδοχική επιβολή φορτίου και διατήρηση της ταχύτητας σε σταθερή τιμή.



Εικόνα 3-1 Τυπικό πείραμα με σταθερή ταχύτητα περιστροφής και διαδοχική επιβολή φορτίου

Κατά τη μετάβαση από το ένα σημείο λειτουργίας στο άλλο, η ταχύτητα του κινητήρα ελαττώνεται ελαφρώς, αλλά αθροιστικά από την αρχή μέχρι το τέλος του πειράματος η ελάττωση είναι σημαντική, ιδίως στις υψηλές ταχύτητες. Έτσι σε κάθε μετάβαση, ο ρυθμιστής παροχής καυσίμου διορθώνεται χειροκίνητα, ώστε οι στροφές της μηχανής να διατηρούνται σε κάποια σταθερή τιμή. Αυτός είναι και ο λόγος που στο διάγραμμα της εικόνας, υπάρχουν ταλαντώσεις κατά τις μεταβάσεις.

3.3.2 Φόρτιση και αναγέννηση φίλτρου αιθάλης

Η διεξαγωγή των πειραμάτων για τη φόρτιση και μετέπειτα την αναγέννηση του φίλτρου αιθάλης, έγινε ξεχωριστά από τη χαρτογράφηση του κινητήρα. Για τη φόρτιση, ο κινητήρας εργάζεται σε ένα καθορισμένο σημείο λειτουργίας και απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα ώστε το φίλτρο να κατακρατήσει κάποια ποσότητα αιθάλης. Ο έλεγχος της φόρτισης γίνεται κατά τη διάρκεια του πειράματος, από τη πτώση πίεσης των καυσαερίων κατά μήκος του φίλτρου. Σε σταθερό σημείο λειτουργίας, εφόσον παραμένει αιθάλη μέσα στο φίλτρο δίχως να καίγεται, έχουμε αύξηση της πτώσης πίεσης. Η θερμοκρασία των καυσαερίων πρέπει να είναι σχετικά χαμηλή, ώστε να αποφευχθεί η έναρξη της θερμικής αναγέννησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η φόρτιση διεξήχθη σε τρία πειράματα με ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα 2500, 2600 και 3200rpm. Ο συνολικός χρόνος φόρτισης ήταν κοντά στις έξι

ώρες, το φορτίο στον κινητήρα ήταν και στα τρία πειράματα μία αντίσταση, ενώ η μεγαλύτερη θερμοκρασία (τρίτο πείραμα), έφτανε κοντά στους 280°C. Μετά την αναγέννηση πραγματοποιήθηκε ακόμα ένα πείραμα φόρτισης στο οποίο η παγίδα φορτίστηκε μερικώς.

Η αναγέννηση του φίλτρου έγινε σε ένα πείραμα, όπου έπρεπε η θερμοκρασία των καυσαερίων να φτάσει σε υψηλή τιμή ώστε να ξεπεράσει τη θερμοκρασία ισορροπίας για τη συγκεκριμένη μάζα αιθάλης που παγιδεύτηκε κατά τη φόρτιση. Ο κινητήρας τέθηκε σε λειτουργία στις 3200rpm χωρίς φορτίο και διαδοχικά άναβε μία αντίσταση, χωρίς αυξομειώσεις στον ρυθμιστή παροχής καυσίμου. Στην αρχή περίπου του τέταρτου σημείου λειτουργίας του κινητήρα, με φορτίο αυτό από τις τρεις αντιστάσεις, έγινε αντιληπτό από την ένδειξη της πτώσης πίεσης στο VI, ότι ξεκινάει η αναγέννηση. Η καταγραφή συνεχίστηκε σε αυτό το σημείο μέχρι το τέλος της αναγέννησης.

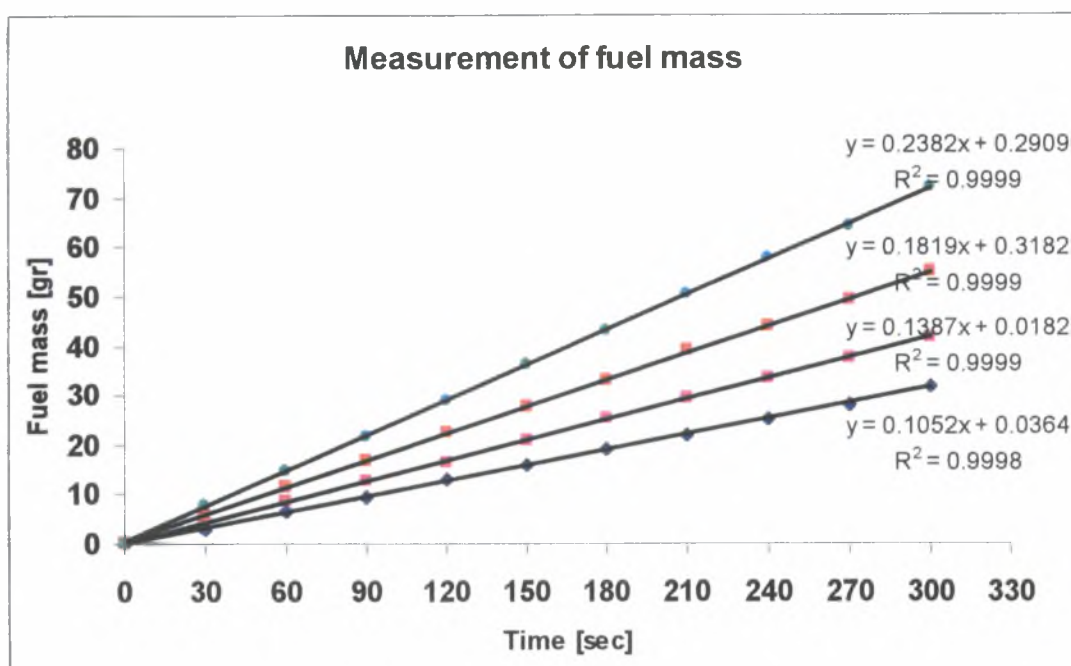
3.4 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Τα μετρούμενα μεγέθη από την πειραματική διάταξη είναι τα παρακάτω:

	Μετρούμενα μεγέθη	Μονάδες
1	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	°C
2	Θερμοκρασία εξόδου στον κύλινδρο	°C
3	Θερμοκρασία εισόδου στο φίλτρο	°C
4	Θερμοκρασία εξόδου στο φίλτρο	°C
5	Πτώση πίεσης στο φίλτρο	mbar
6	Μάζα καυσίμου	gr
7	Χρόνος κατανάλωσης καυσίμου	sec
8	Συγκέντρωση CO ₂	%vol
9	Συγκέντρωση CO	%vol
10	Συγκέντρωση HC	ppm
11	Τάση ρεύματος ηλ. αντιστάσεων	Volts
12	Ένταση ρεύματος ηλ. αντιστάσεων	Amperes
13	Συχνότητα ρεύματος	Hz

Πίνακας 3-1 Πίνακας μετρούμενων μεγεθών

Οι μετρήσεις κατανάλωσης καυσίμου για τη χαρτογράφηση του κινητήρα, έγινε σε κάθε σημείο λειτουργίας από την ένδειξη του ηλεκτρονικού ζυγού που μετρούσε το βάρος της δεξαμενής καυσίμου. Στην αρχή σημειωνόταν η ένδειξη ανά 30 δευτερόλεπτα για πέντε λεπτά και με τη βοήθεια του προγράμματος MS-Excel εξαγόταν η εξίσωση μάζας καυσίμου συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρήθηκε πως τα σημεία βρισκόντουσαν σχεδόν ακριβώς πάνω σε ευθεία, οπότε το σφάλμα στην εξαγωγή της κατανάλωσης αν καταγραφόταν η ένδειξη του ζυγού μόνο στα 300 δευτερόλεπτα (5 λεπτά), ήταν μηδαμινή. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέθοδος. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα με την αρχική μέθοδο και πίνακας με τη σχετική και απόλυτη διαφορά των τιμών των δύο μεθόδων.



Εικόνα 3-2 Αρχικός τρόπος μέτρησης για την εύρεση της κατανάλωσης

Κατανάλωση καυσίμου [gr/s]		Απόλυτη διαφορά	Σχετική διαφορά
Από εξίσωση	Από ένα σημείο	$m_i - m_j$	$1 - m_i/m_j$
0.105	0.106	0.001	0.005
0.139	0.139	0.000	0.000
0.181	0.182	0.001	0.006
0.238	0.240	0.002	0.010

Πίνακας 3-2 Διαφορά στη τιμή κατανάλωσης καυσίμου των δύο τρόπων

Οι τιμές επίσης της έντασης και της τάσης του ρεύματος δεν καταγράφονται διαρκώς μέσα στον υπολογιστή, κατά τη διάρκεια του πειράματος, αλλά σημειώνονται σε κάθε σημείο λειτουργίας που είναι σταθερές. Στη συνέχεια γίνεται κατοχύρωση σε ένα φύλλο εργασίας στο MS-Excel για τους περαιτέρω υπολογισμούς. Σε όλα τα υπόλοιπα μεγέθη γίνεται συνεχής καταγραφή στον υπολογιστή με τη βοήθεια του VI.

3.5 ΒΗΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Συνοπτικά, τα βήματα κάθε πειράματος είναι τα παρακάτω:

- Έναρξη λειτουργίας των συσκευών και προθέρμανσή τους για περισσότερο από μισή ώρα, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή
- Βαθμονόμηση του αναλυτή
- Γέμισμα του δοχείου καυσίμου, προσθήκη καταλυτικού προσθέτου αν είναι τοποθετημένη η παγίδα και προετοιμασία του υπολογιστή.
- Γενικός έλεγχος διάταξης
- Έναρξη του κινητήρα και προθέρμανσή του σε χαμηλό σημείο λειτουργίας
- Ρύθμιση του κινητήρα, ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειράματος
- Λειτουργία του κινητήρα στο ρελαντί
- Σβήσιμο του κινητήρα
- Σώσιμο του αρχείου καταγραφής
- Κλείσιμο των συσκευών

3.6 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Κατά τη διάρκεια των τελικών πειραμάτων εμφανίστηκαν κάποια προβλήματα τα οποία οδήγησαν σε διακοπή του πειράματος και έναρξή του από την αρχή μετά την αντικατάσταση της βλάβης. Τρία πειράματα διακόπηκαν, και τα τρία από θραύση κάποιου στοιχείου λόγω καταπόνησης. Συγκεκριμένα έσπασε το θερμοζεύγος, η μία από τις τέσσερις αντικραδασμικές βάσεις του κινητήρα και το φίλτρο αέρος της εισαγωγής του κινητήρα. Στη συνέχεια κανένα από τα τρία δεν παρουσίασε αστοχία.

4 ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ισούται με τη συχνότητα του ρεύματος που παράγει η γεννήτρια:

$$Speed = N = \nu_{gen} \quad \text{Σχέση 1}$$

$$N[rpm] = \nu_{gen}[Hz] \cdot 60$$

Η ισχύς στο στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα (ωφέλιμη ισχύς), υπολογίζεται από την ισχύ που αποδίδει η γεννήτρια. Η ισχύς της γεννήτριας είναι:

$$P_{generator} = V \cdot I \quad \text{Σχέση 2}$$

$$P_{generator}[KW] = \frac{V[Volts] \cdot I[A]}{1000}$$

και

$$P_b engine = \frac{P_{generator}}{n} \quad \text{Σχέση 3}$$

$$P_b engine[KW] = \frac{P_{generator}[KW]}{n}$$

όπου n ο μηχανικός βαθμός απόδοσης της γεννήτριας, ο οποίος ισούται με την τιμή 0.75

Η ροπή στρέψης του άξονα του κινητήρα προκύπτει από την ισχύ και την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σύμφωνα με τη σχέση:

$$Torque = T = \frac{P_b}{2 \cdot \pi \cdot N} \quad \text{Σχέση 4}$$

$$T[Nm] = \frac{P[KW] \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot N[rpm]}$$

Η παροχή καυσίμου ή στιγμιαία κατανάλωση προκύπτει από τη διαφορά της μετρούμενης μάζας καυσίμου στο ζυγό, προς το χρόνο δειγματοληψίας:

$$\dot{m}_f = \frac{\Delta m_f}{\Delta t} \quad \text{Σχέση 5}$$

$$\dot{m}_f [g/s] = \frac{\Delta m_f [g]}{\Delta t [s]}$$

Η ειδική κατανάλωση καυσίμου (specific fuel consumption), είναι η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα ισχύος:

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P}$$

$$sfc [g/KWh] = \frac{\dot{m}_f [g/s]}{P [KW] \cdot 3600}$$

Αν στη σχέση χρησιμοποιήσουμε την ωφέλιμη ισχύ, έχουμε την ειδική κατανάλωση πέδησης (brake specific fuel consumption):

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \quad \text{Σχέση 6}$$

Ένα μέγεθος εκτίμησης της απόδοσης της μηχανής είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta_{th} = \frac{P_b}{\dot{m}_f \cdot Q_{HV}} \quad \text{Σχέση 7}$$

$$\eta_{th} = \frac{P_b [KW]}{\dot{m}_f [g/s] \cdot Q_{HV} [MJ/kg]}$$

όπου Q_{HV} η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου και για light diesel, $Q_{HV}=43.2$ MJ/kg

Η μέση πραγματική πίεση (mean effective pressure), που στην ουσία επιτυγχάνει την αδιαστατοποίηση της ροπής, προκύπτει από τη σχέση:

$$mep = \frac{P \cdot n_R}{V_d \cdot N}$$

$$mep[KPa] = \frac{P[KW] \cdot n_R \cdot 60 \cdot 10^6}{V_d[cm^3] \cdot N[rpm]}$$

Και εδώ αν στη σχέση χρησιμοποιήσουμε την ωφέλιμη ισχύ, έχουμε την μέση πραγματική πίεση πέδησης (brake mean effective pressure):

$$bmep = \frac{P_b \cdot n_R}{V_d \cdot N} \quad \text{Σχέση 8}$$

όπου n_R είναι ο αριθμός περιστροφών του στροφάλου που αντιστοιχούν σε έναν κινητήριο εμβολισμό. Επομένως $n_R=2$ αφού ο κινητήρας είναι τετράχρονος και V_d ο όγκος εμβολισμού ($V_d = 477cm^3$)

Η μέση ταχύτητα εμβόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{S}_p = 2LN \quad \text{Σχέση 9}$$

$$\bar{S}_p[m/s] = \frac{2L[mm]N[rpm]}{1000 \cdot 60}$$

όπου L είναι η διαδρομή εμβόλου και εδώ $L = 75m$

4.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΡΙΒΩΝ

Το έργο τριβών σε έναν κινητήρα είναι η διαφορά ανάμεσα στο έργο που προσδίδει στα έμβολα το ρευστό λειτουργίας (ενδεικνύμενο έργο) και το ωφέλιμο έργο που αποδίδεται στον στροφαλοφόρο άξονα. Το έργο τριβών μπορεί να αναλυθεί στις παρακάτω συνιστώσες:

- Έργο άντλησης, που περιλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνεται για την εισαγωγή του φρέσκου μίγματος και την εξαγωγή των καυσαερίων
- Έργο για να υπερνικηθούν οι αντιστάσεις τριβών σε όλα τα κινούμενα μέρη του κινητήρα, όπως στα ελατήρια του πιστονιού με το χιτώνιο, όλα τα έδρανα, τα γρανάζια, οι βαλβίδες κλπ.
- Έργο για την κίνηση των παρελκόμενων του κινητήρα, όπως αντλία λαδιού, φτερωτή ψύξης κλπ.

Η ακριβής μέτρηση των τριβών μιας μηχανής εν λειτουργία μπορεί να βρεθεί με αφαίρεση της ισχύος στον άξονα από την ενδεικνύμενη ισχύ, η οποία μπορεί να

προέλθει από ακριβείς μετρήσεις της πίεσης στο εσωτερικό του κυλίνδρου (δυναμοδεικτικό διάγραμμα). Αυτή είναι μια ακριβή και δύσκολη μέθοδος και επίσης δεν ενδείκνυται σε πολυκύλινδρους κινητήρες. Έχουν αναπτυχθεί όμως και άλλες μέθοδοι, σε ρυμουλκούμενο κινητήρα. Φυσικά οι τριβές στον ρυμουλκούμενο κινητήρα δεν είναι ίδιες με αυτές του κινητήρα σε πραγματική λειτουργία, λόγω διαφορετικών συνθηκών (πίεσεις, θερμοκρασίες) μέσα στον κινητήρα. Έτσι πριν τη ρυμούλκηση, ο κινητήρας (νερά, λάδια κλπ) θερμαίνεται ή πρώτα λειτουργεί σβήνεται απότομα και στη συνέχεια ρυμουλκείται.

Οι μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί είναι συνοπτικά:

- Μέτρηση της f_{mep} από την i_{mep}
- Απ'ευθείας δοκιμές ρυμούλκησης
- Η γραμμή Willans
- Η δοκιμή Morse

Στην παρούσα διπλωματική ο προσδιορισμός των τριβών του κινητήρα έγινε με τη μέθοδο της γραμμής Willans. Συγκεκριμένα για σταθερή ταχύτητα περιστροφής της μηχανής δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα της μέσης πραγματικής πίεσης πέδησης (b_{mep}) σε συνάρτηση με την στιγμιαία κατανάλωση καυσίμου. Η μέση πραγματική πίεση τριβών (f_{mep}) εξάγεται από το διάγραμμα στην τομή της προέκτασης του γραφήματος με τον άξονα x (σημείο μηδενικής κατανάλωσης).

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν και κάποιες σχέσεις της f_{mep} συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής για κάθε είδος κινητήρα, οι οποίες εξάχθηκαν μετά από μετρήσεις σε ρυμουλκούμενους κινητήρες. Για μικρού μεγέθους Diesel κινητήρες απ'ευθείας έγχυσης η σχέση είναι:

$$\text{Motoring } f_{mep} = 117 + 48 \left(\frac{N}{1000} \right) + 0.4 \bar{S}_p^2 \quad \text{Σχέση 10}$$

$$\text{Motoring } f_{mep}[KPa] = 117 + 48 \left(\frac{N[rpm]}{1000} \right) + 0.4 \bar{S}_p^2 [(m/s)^2]$$

Υπολογίζοντας την f_{mep} υπολογίζεται και η ενδεικνύμενη μέση πραγματική πίεση (indicated mean effective pressure) σύμφωνα με τη σχέση:

$$imep = fmeip + bmeip \quad \text{Σχέση 11}$$

$$imep[KPa] = fmeip[KPa] + bmeip[KPa]$$

Επίσης και η ισχύς τριβών από τη σχέση:

$$P_f = \frac{fmeip \cdot V_d \cdot N}{n_R} \quad \text{Σχέση 12}$$

$$P_f[KW] = \frac{fmeip[KPa] \cdot V_d[cm^3] \cdot N[rpm]}{n_R}$$

Αφού υπολογιστεί η ισχύς τριβών, υπολογίζεται και η ενδεικνύμενη ισχύς:

$$P_i = P_f + P_b \quad \text{Σχέση 13}$$

$$P_i[KW] = P_f[KW] + P_b[KW]$$

Το πηλίκο της ισχύος στον στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα προς την ενδεικνύμενη ισχύ δίνει τον μηχανικό βαθμό απόδοσης:

$$n_m = \frac{P_b}{P_i} \quad \text{Σχέση 14}$$

$$n_m = \frac{P_b[KW]}{P_i[KW]}$$

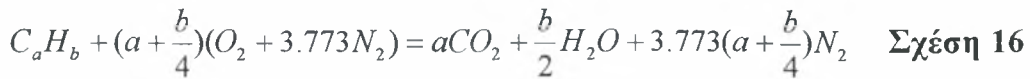
Η ενδεικνύμενη ειδική κατανάλωση καυσίμου (indicated specific fuel consumption) προκύπτει:

$$isfc = \frac{\dot{m}_f}{P_i} \quad \text{Σχέση 15}$$

$$isfc[g/KWh] = \frac{\dot{m}_f[g/s]}{P_i[KW] \cdot 3600}$$

4.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΥΣΑΕΡΙΩΝ

Η στοιχειομετρική αντίδραση ενός καυσίμου με τον αέρα δίνεται από τη σχέση:



Η σχέση αυτή προσδιορίζει τις στοιχειομετρικές αναλογίες αέρα καυσίμου:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \frac{(1 + \frac{y}{4})(32 + 3.773 \cdot 28.16)}{12.011 + 1.008y} \quad \text{Σχέση 17}$$

όπου $y=b/a$ ο λόγος H/C του καυσίμου. Για το καύσιμο light diesel, $y = 1.8$

Η συνολική αντίδραση καύσης του καυσίμου στον κινητήρα, η οποία δεν είναι τέλεια, μπορεί να γραφεί:



Σχέση 18

Το καύσιμο που χρησιμοποιείται στα πειράματα αποτελείται αποκλειστικά από άνθρακα και υδρογόνο και οι μετρήσεις στον αναλυτή γίνονται με ξηρό καυσαέριο. Ο λόγος αέρα καυσίμου δίνεται από τη σχέση:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{actual} = \frac{M_{air}}{M_f} \cdot \left[\frac{100 + (HC) - (CO)/2 + (H_2O)/2 - \frac{y}{2}}{(HC) + (CO) + (CO_2)} \right] \quad \text{Σχέση 19}$$

όπου () η μοριακή συγκέντρωση επί τοις εκατό, $M_f = 12.011 + 1.008y$, $M_{air} = 28.96$ και (HC) ως C_1

Αν το μίγμα είναι πλούσιο ή φτωχό σε καύσιμο καθορίζεται από το σχετικό λόγο αέρα/καυσίμου λ :

$$\lambda = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{actual}}{\left(\frac{A}{F}\right)_s} \quad \text{Σχέση 20}$$

- Για φτωχά σε καύσιμο μίγματα: $\lambda > 1$
- Για πλούσια σε καύσιμο μίγματα: $\lambda < 1$
- Για στοιχειομετρικά μίγματα: $\lambda = 1$

Ο αντίστροφος του λόγου λ είναι ο ισοδύναμος λόγος καυσίμου/αέρα ϕ , δηλαδή

$$\phi = \lambda^{-1} = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)_{actual}}{\left(\frac{F}{A}\right)_s} \quad \text{Σχέση 21}$$

Από τον αναλυτή καυσαερίων γνωρίζουμε τις συγκεντρώσεις κατά όγκο των CO , CO_2 και HC ενώ τη συγκέντρωση του νερού τη βρίσκουμε από τη σχέση:

$$(H_2O) = 0.5y \frac{(CO_2) + (CO)}{\frac{(CO)}{K(CO_2)} + 1} \quad \text{Σχέση 22}$$

όπου K είναι η σταθερά από την παραδοχή της ισορροπίας της αντίδρασης του υδραερίου

$$K = \frac{(CO)(H_2O)}{(CO_2)(H_2)} = 3.8 \quad \text{Σχέση 23}$$

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του οξυγόνου, θεωρώντας ότι η αναλογία ατόμων αζώτου προς οξυγόνο στα καυσαέρια είναι 3.773, όση και στον αέρα, εξάγεται η σχέση:

$$(O_2) = \frac{2 - 2(HC) - 5.773(CO) - 2(H_2) - 5.773(H_2O) - 4.773(NO) - 8.546(NO_2) - 9.546(CO_2)}{9.546} \quad \text{Σχέση 24}$$

Οι συγκεντρώσεις των υπόλοιπων αερίων που βοηθούνε στην εξαγωγή της παραπάνω σχέσης, υπολογίζονται με περαιτέρω επίλυση του συστήματος εξισώσεων της βιβλιογραφίας.

4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΕΡΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

Όσον αφορά τον αέρα εισαγωγής, υπολογίζεται η παροχή του. Αυτή προκύπτει από την παροχή καυσίμου και το λόγο αέρα καυσίμου από τη σχέση:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_f \cdot \left(\frac{A}{F} \right) \quad \text{Σχέση 25}$$

$$\dot{m}_a [g/s] = \dot{m}_f [g/s] \cdot \left(\frac{A}{F} \right)$$

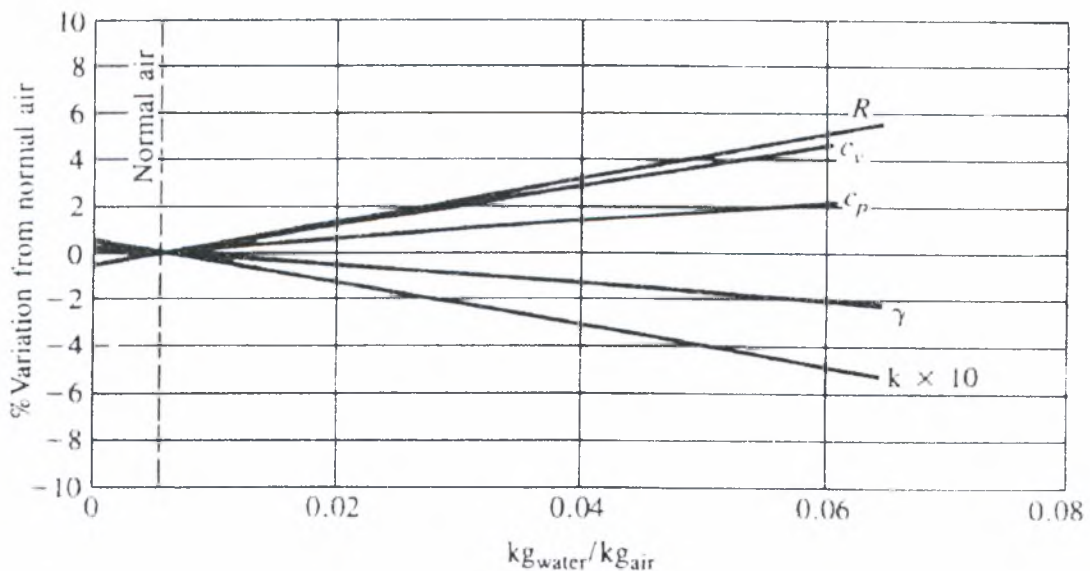
Η αποδοτικότητα της διεργασίας εισαγωγής της γόμωσης στον κύλινδρο εκφράζεται με το βαθμό πλήρωσης:

$$n_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_{\alpha,i} \cdot V_d \cdot N} \quad \text{Σχέση 26}$$

$$n_v = \frac{2\dot{m}_a [g/s] \cdot 60 \cdot 10^6}{1000 \cdot \rho_{\alpha,i} [Kg/m^3] \cdot V_d [cm^3] \cdot N [rpm]}$$

όπου $\rho_{\alpha,i}$ η πυκνότητα του αέρα εισαγωγής

Η πυκνότητα του αέρα πάρθηκε από πίνακα (παράρτημα) χωρίς να ληφθεί υπόψη η υγρασία του. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα οι ιδιότητες του αέρα δεν επηρεάζονται σημαντικά παρά μόνο για μεγάλες τιμές απόλυτης υγρασίας.

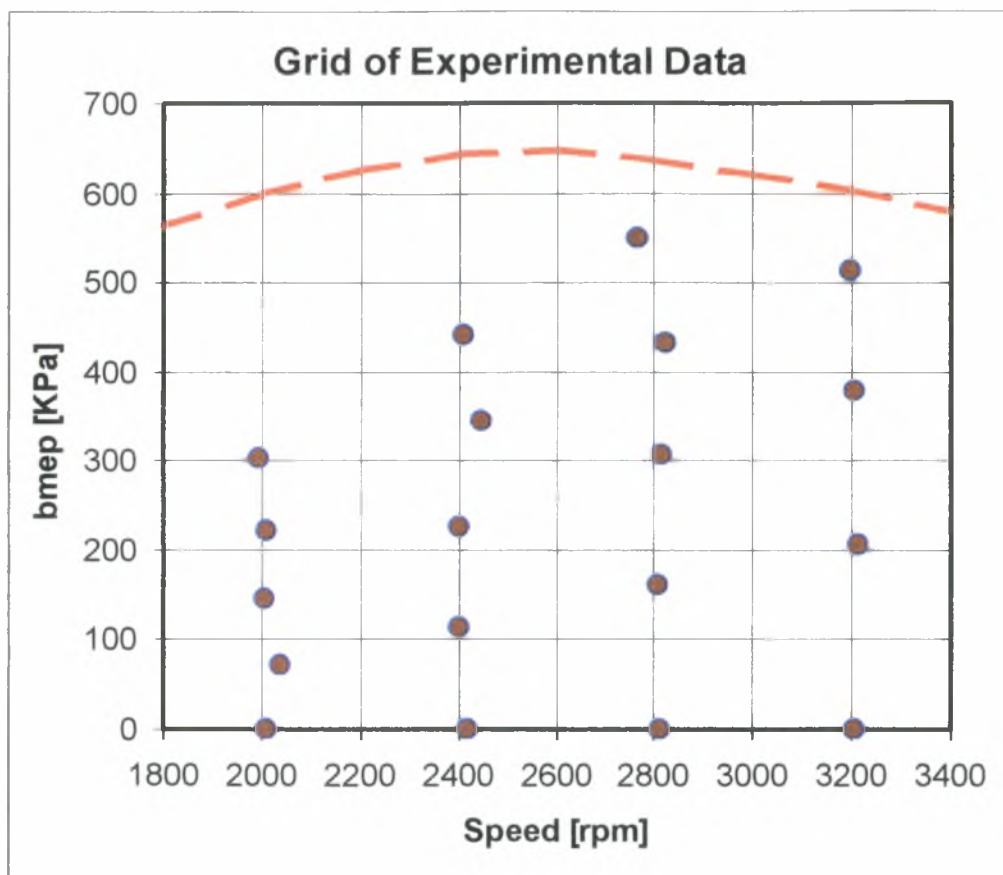


Εικόνα 4-1 Επίδραση της υγρασίας στις ιδιότητες του αέρα

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 ΣΗΜΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα σημεία λειτουργίας για τα οποία αποκομίστηκαν τα πειραματικά δεδομένα παρουσιάζονται στην εικόνα 5-1 και παρατίθενται στον πίνακα 5-1



Εικόνα 5-1 Πλέγμα σημείων λειτουργίας των πειραμάτων

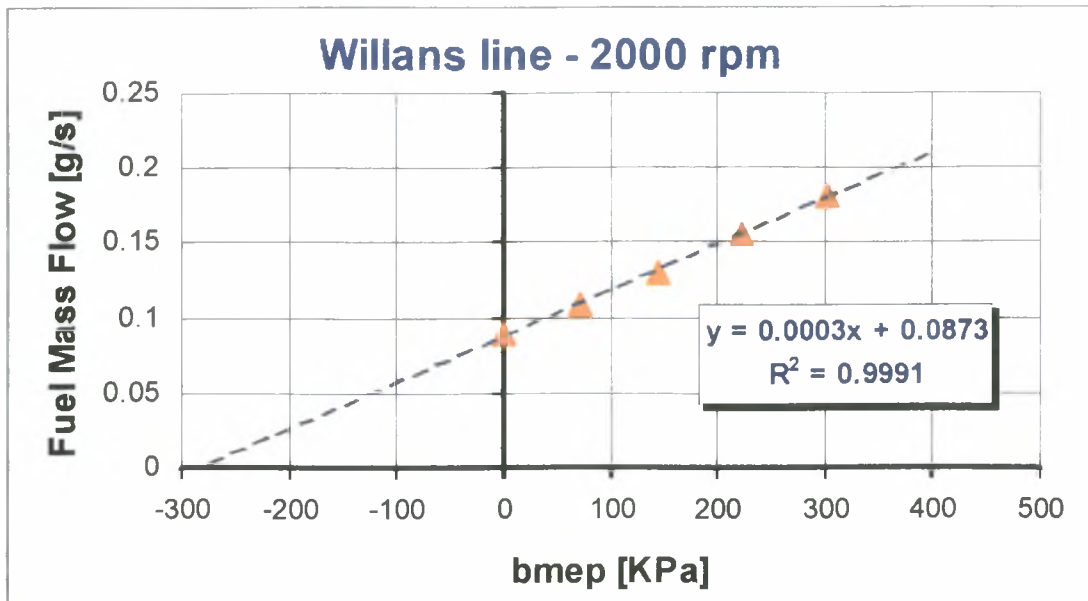
Η κόκκινη γραμμή αποτελεί τις τιμές της bmer που αντιστοιχούν στην περιβάλλουσα του κινητήρα

Σ.Λ	Speed [rpm]	bμερ [Kpa]	Σ.Λ	Speed [rpm]	bμερ [Kpa]
1	2009	0.0	11	2810	0.0
2	2037	71.9	12	2807	162.3
3	2007	144.8	13	2816	308.1
4	2008	222.8	14	2822	433.6
5	1992	302.1	15	2767	548.6
6	2417	0.0	16	3203	0.0
7	2400	114.0	17	3210	207.2
8	2400	226.7	18	3203	379.0
9	2445	344.6	19	3197	514.7
10	2410	440.9			

Πίνακας 5-1 Πίνακας σημείων λειτουργίας των πειραμάτων

5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΡΙΒΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

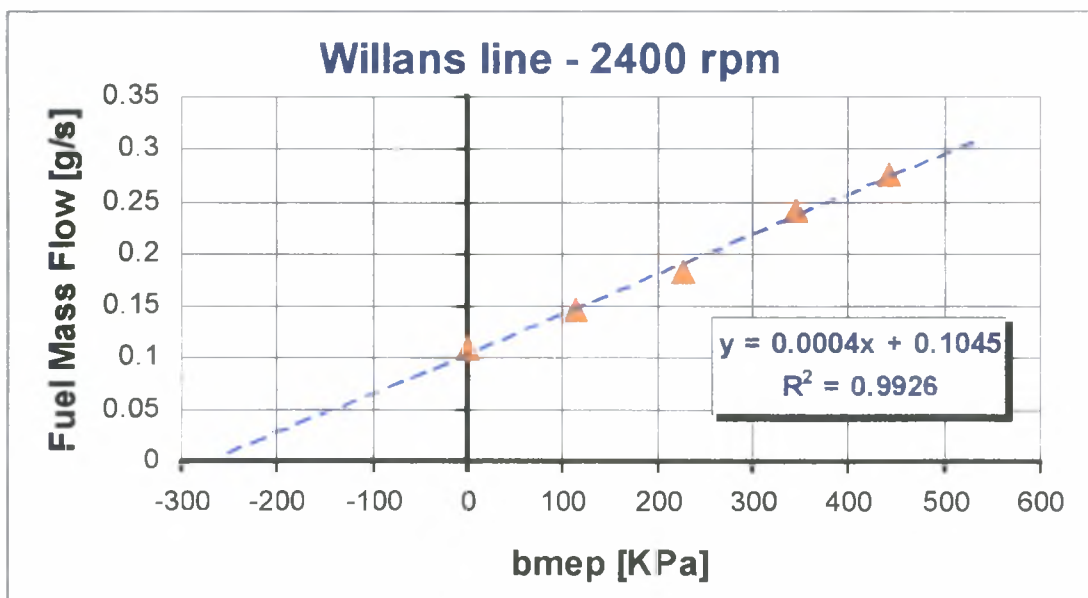
Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, η $f_{\text{μερ}}$ υπολογίστηκε με τη μέθοδο της γραμμής Willans. Η εξίσωση της κάθε γραμμής προκύπτει από τα σημεία λειτουργίας κάθε πειράματος και χρησιμοποιείται ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων ώστε να ελαχιστοποιείται το αριθμητικό σφάλμα στην εύρεση της τιμής της $f_{\text{μερ}}$. Έτσι λοιπόν από τα πειραματικά δεδομένα, προέκυψαν τα διαγράμματα που ακολουθούν.



Εικόνα 5-2 Γραμμή Willans στις 2000 rpm

Σύμφωνα με την εξίσωση της γραμμής, η μέση πραγματική πίεση τριβών για ταχύτητα περιστροφής 2000rpm υπολογίζεται:

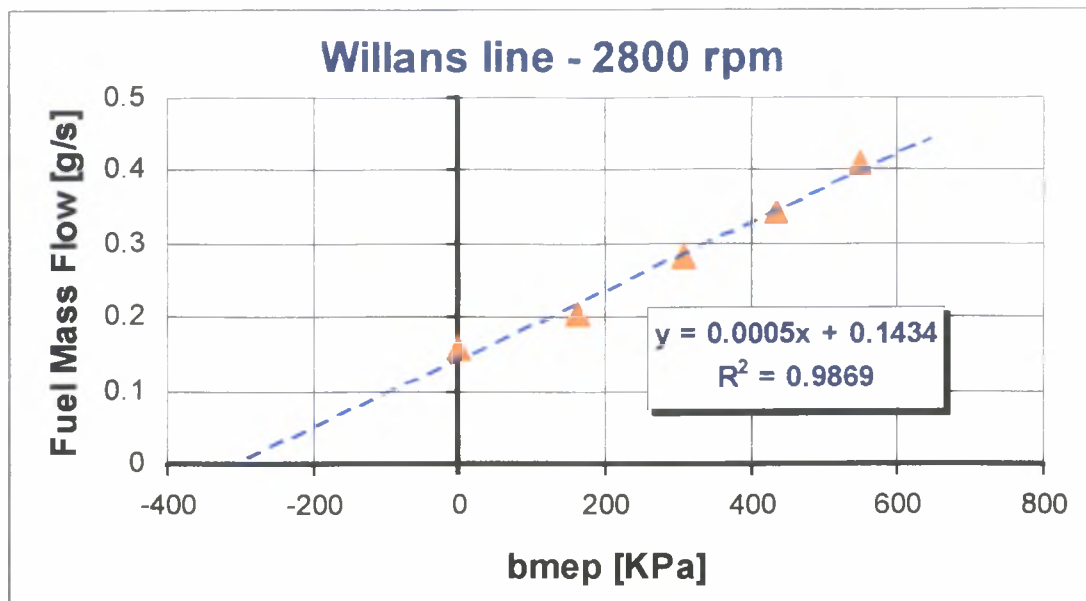
$$f_{mep2000rpm} = 291\text{KPa}$$



Εικόνα 5-3 Γραμμή Willans στις 2400 rpm

Εδώ στις 2400rpm η μέση πραγματική πίεση τριβών υπολογίζεται:

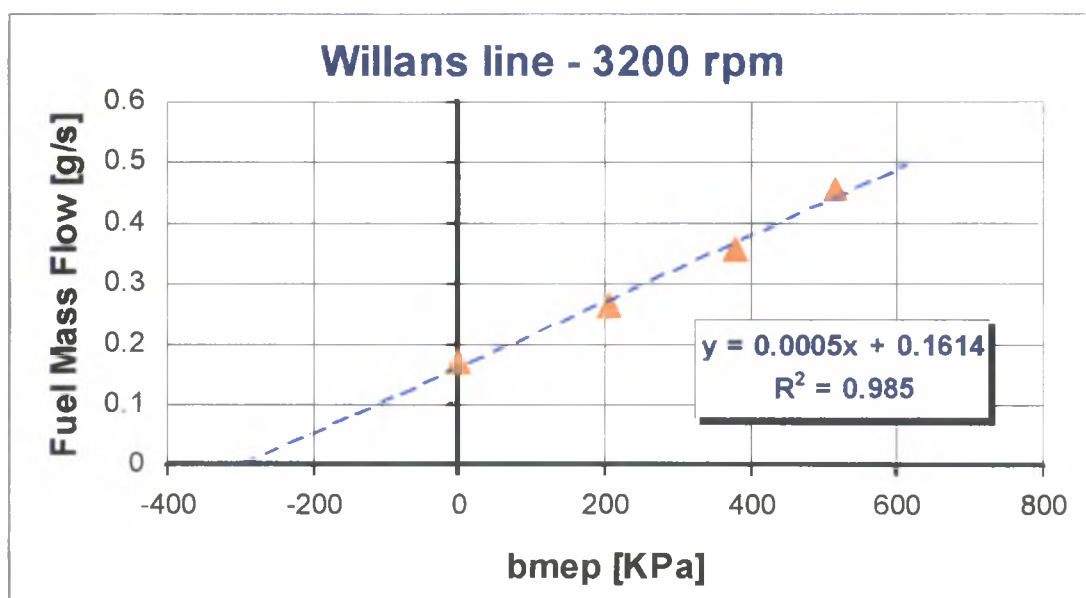
$$f_{mep2400rpm} = 261.25\text{KPa}$$



Εικόνα 5-4 Γραμμή Willans στις 2800 rpm

Στις 2800rpm η μέση πραγματική πίεση τριβών υπολογίζεται:

$$f_{mep_{2800rpm}} = 286.8\text{KPa}$$

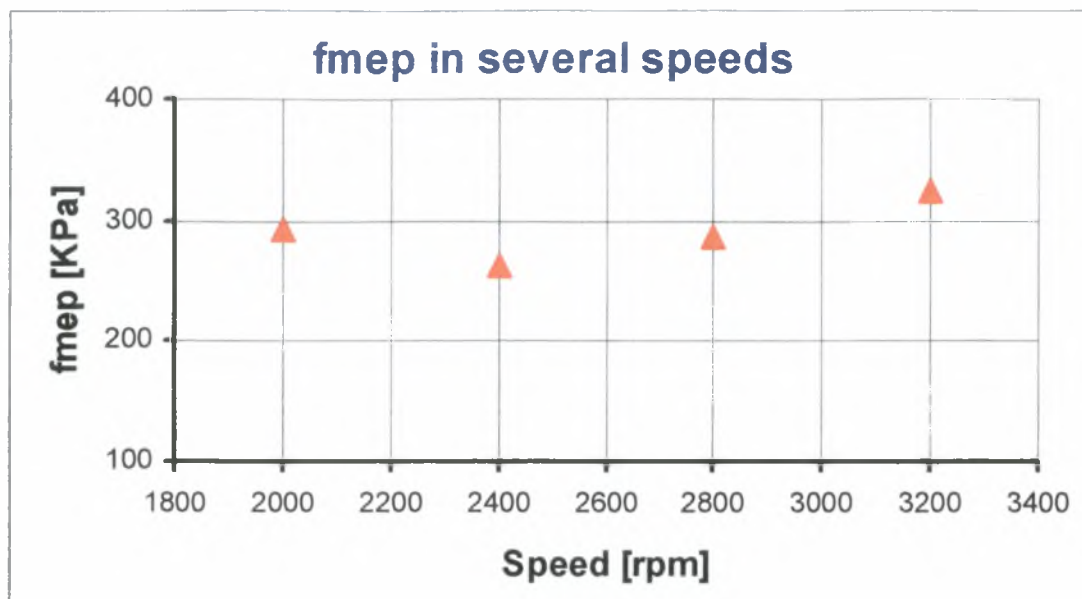


Εικόνα 5-5 Γραμμή Willans στις 3200 rpm

Στις 3200rpm η μέση πραγματική πίεση τριβών υπολογίζεται:

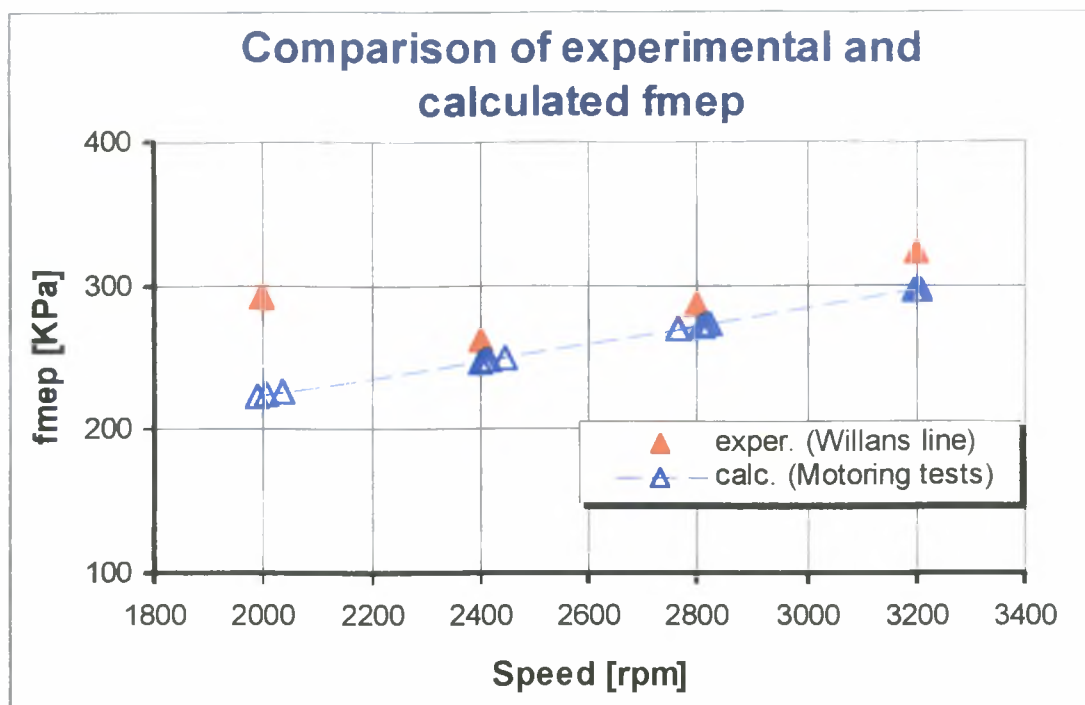
$$f_{mep_{3200rpm}} = 322.8\text{KPa}$$

Οι τιμές που προέκυψαν συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 5-6 Τιμές μέσης πραγματικής πίεσης τριβών συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής

Αν υπολογίσουμε τη μέση πραγματική πίεση τριβών από την εμπειρική σχέση (σχέση 10 του προηγούμενου κεφαλαίου) με την ακριβή ταχύτητας περιστροφής για κάθε σημείο λειτουργίας, εξάγεται η μπλε καμπύλη του παρακάτω διαγράμματος (άμεση σύγκριση με τις τιμές που προέκυψαν από τις γραμμές Willans)



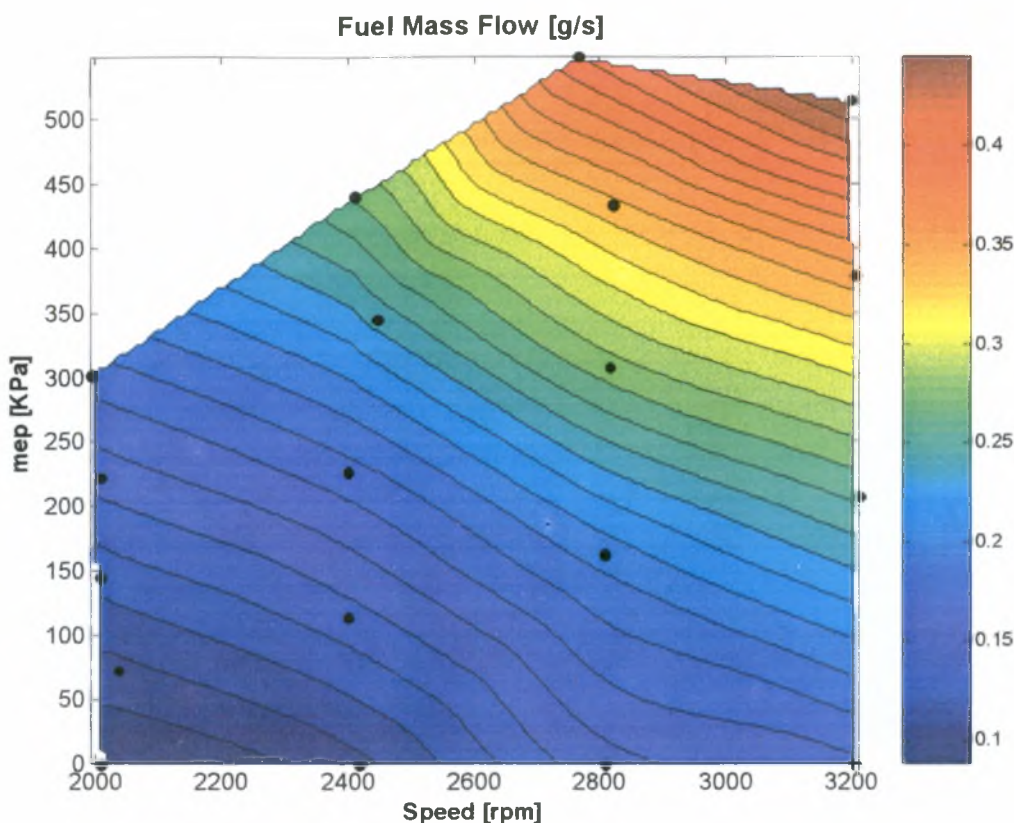
Εικόνα 5-7 Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με υπολογιστικά για την μέση πραγματική πίεση τριβών

Οι τιμές από τα πειραματικά δεδομένα είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίζονται από την εμπειρική σχέση η οποία προέκυψε από μετρήσεις σε ρυμουλκούμενους κινητήρες. Προφανώς η διαφορά προέρχεται από την ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου κινητήρα, δηλαδή ότι η σχέση εξάχθηκε για κινητήρες παρόμοιου είδους και όχι για τον συγκεκριμένο. Εξάιρεση αποτελεί η τιμή στις 2000rpm, η οποία είναι αισθητά μεγάλη. Πιθανότατα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι θερμοκρασίες του κινητήρα σε αυτή την ταχύτητα περιστροφής είναι σχετικά χαμηλές και το λιπαντικό που χρησιμοποιείται δεν βρίσκεται στις συνθήκες σωστής λειτουργίας του. Η τιμή του ιξώδους είναι πιθανόν ακατάλληλη σε αυτές τις συνθήκες (μεγαλύτερη) με αποτέλεσμα αυξημένες απώλειες τριβών.

Η γραμμή Willans τείνει να καμπυλώνεται προς τα άνω. Στις μετρήσεις που διεξήχθησαν αυτή η κλίση δεν είναι αισθητή γιατί ο κινητήρας είναι μικρού μεγέθους, το πεδίο του είναι περιορισμένο και επιπλέον, η διάταξη πέδησης δεν φτάνει μέχρι την περιβάλλουσα του.

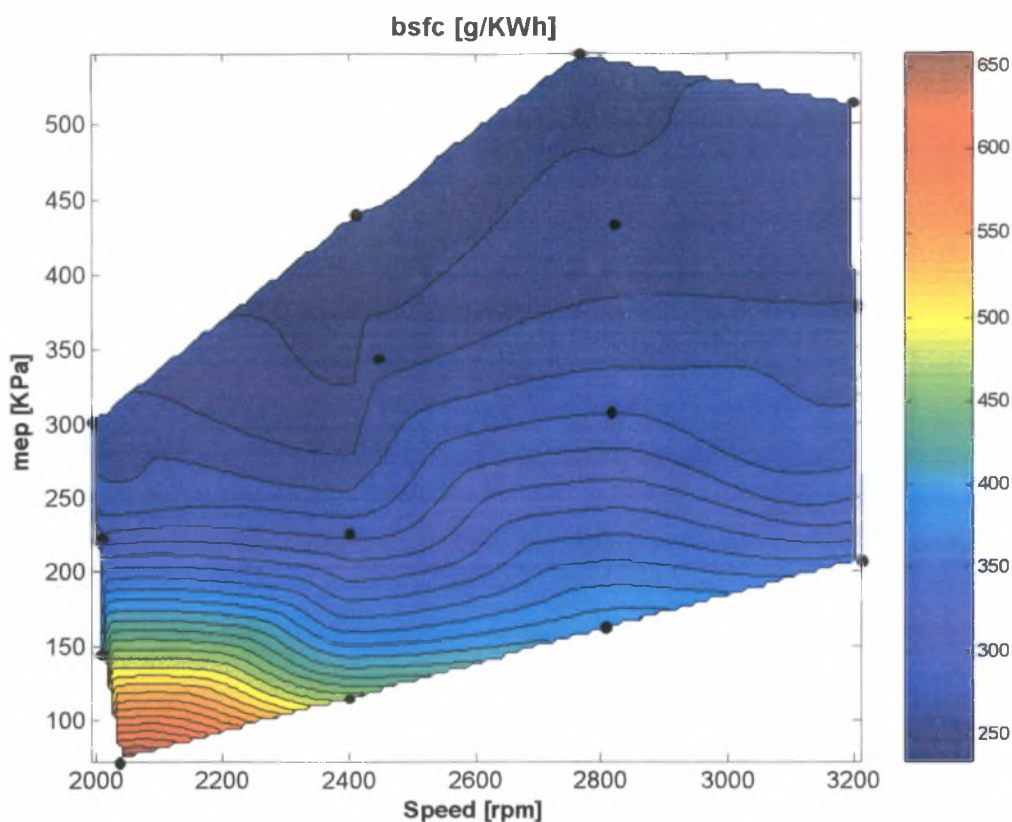
5.3 ΧΑΡΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Παρακάτω παρατίθενται οι σημαντικότεροι 11 χάρτες, οι οποίοι απεικονίζουν ποσοτικά και ποιοτικά τη λειτουργία του κινητήρα. Βέβαια τα όρια ορίζονται από τη διάταξη πέδησης και δεν ταυτίζονται με αυτά του κινητήρα. Η δημιουργία τους έγινε από τα 19 σημεία λειτουργίας που μετρήθηκαν και τα οποία απεικονίζονται στους χάρτες με μαύρα σημεία.



Εικόνα 5-8 Χάρτης παροχής καυσίμου

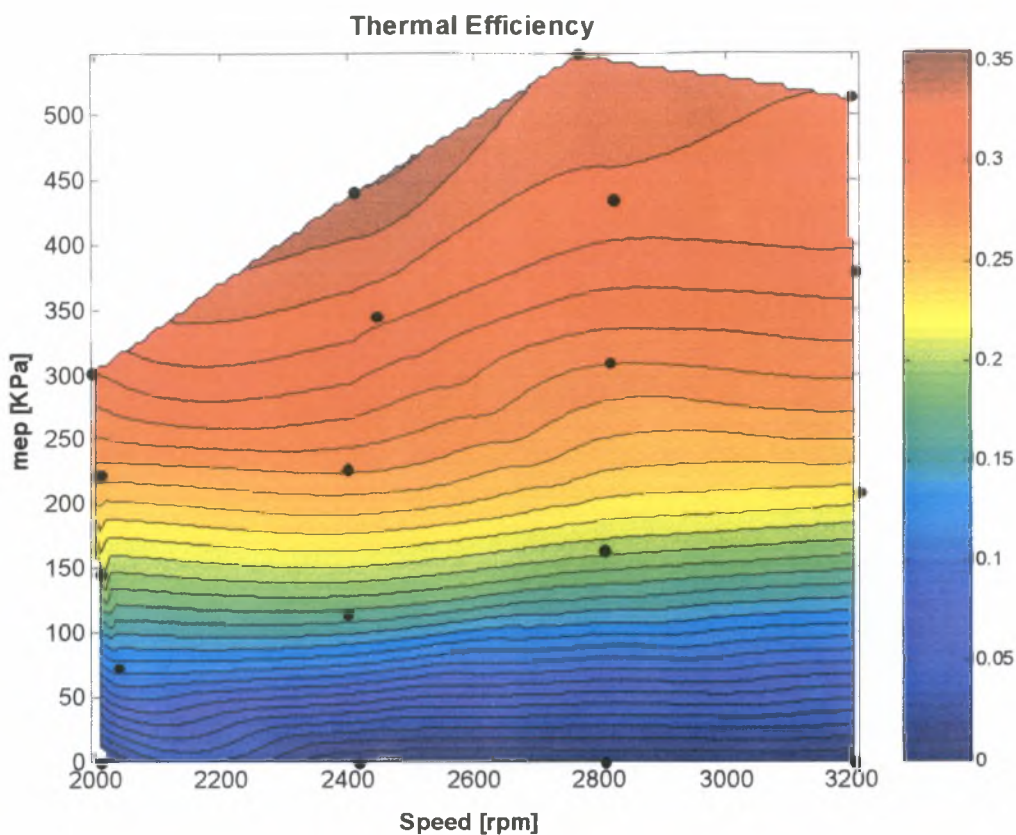
Όπως είναι λογικό η κατανάλωση καυσίμου αυξάνεται τόσο με την ταχύτητα περιστροφής όσο και με το επιβαλλόμενο φορτίο του κινητήρα. Έτσι οι ζώνες έχουν μια ελαφριά κλίση προς τα κάτω και οι μεγαλύτερες (σε τιμή που αντιπροσωπεύουν) διαδέχονται τις μικρότερες. Τη μικρότερη κατανάλωση έχει το σημείο στις 2000rpm χωρίς εξωτερικό φορτίο (0.088g/s) και τη μεγαλύτερη αυτό στις 3200rpm με φορτίο τρεις αντιστάσεις (0.457g/s). Ο χάρτης φανερώνει γενικά πως ο κινητήρας δεν παρουσιάζει κάποια ανωμαλία στην παροχή καυσίμου



Εικόνα 5-9 Χάρτης ειδικής κατανάλωσης καυσίμου

Η ειδική κατανάλωση (πέδησης) είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος γιατί φανερώνει πόσο οικονομικό είναι το ωφέλιμο έργο που αποδίδει ο κινητήρας και βεβαίως επιθυμητές είναι οι μικρές τιμές. Ο χάρτης σχηματίζει μια περιοχή μικρής ειδικής κατανάλωσης, περίπου 250 g/KWh στα υψηλά φορτία και στις μεσαίες στροφές, ενώ χαμηλά γενικά σε όλους τους κινητήρες η ειδική κατανάλωση είναι μεγάλη. Ιδιαίτερα στους μικρούς μονοκύλινδρους όπου η κατανάλωση καυσίμου για την υπερνίκηση των τριβών είναι ακόμα και μεγαλύτερη από αυτή για το ωφέλιμο έργο.

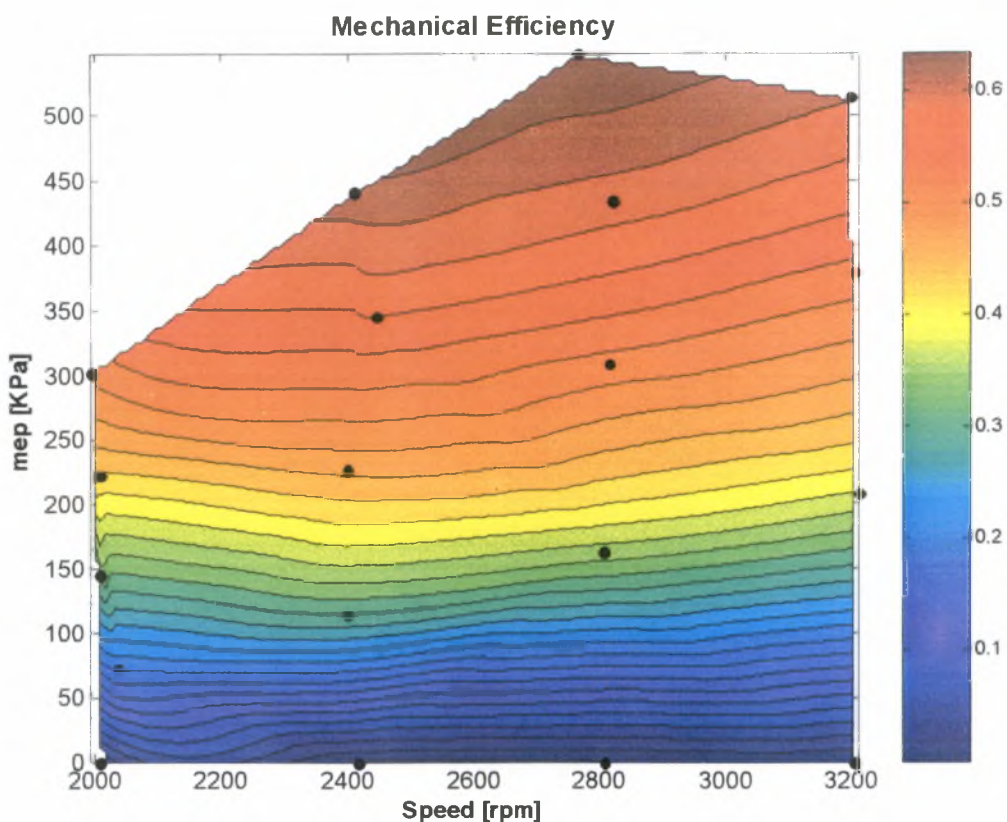
Στο συγκεκριμένο χάρτη τα σημεία χωρίς εξωτερικό φορτίο δεν συμπεριλήφθηκαν γιατί θεωρητικά σε αυτά η ειδική κατανάλωση απειρίζεται ($P_b = 0$). Αποφεύχθηκε να χρησιμοποιηθούν υποθετικές μεγάλες τιμές γιατί είχαν επίπτωση στην ακρίβεια της μορφής του χάρτη.



Εικόνα 5-10 Χάρτης θερμικού βαθμού απόδοσης

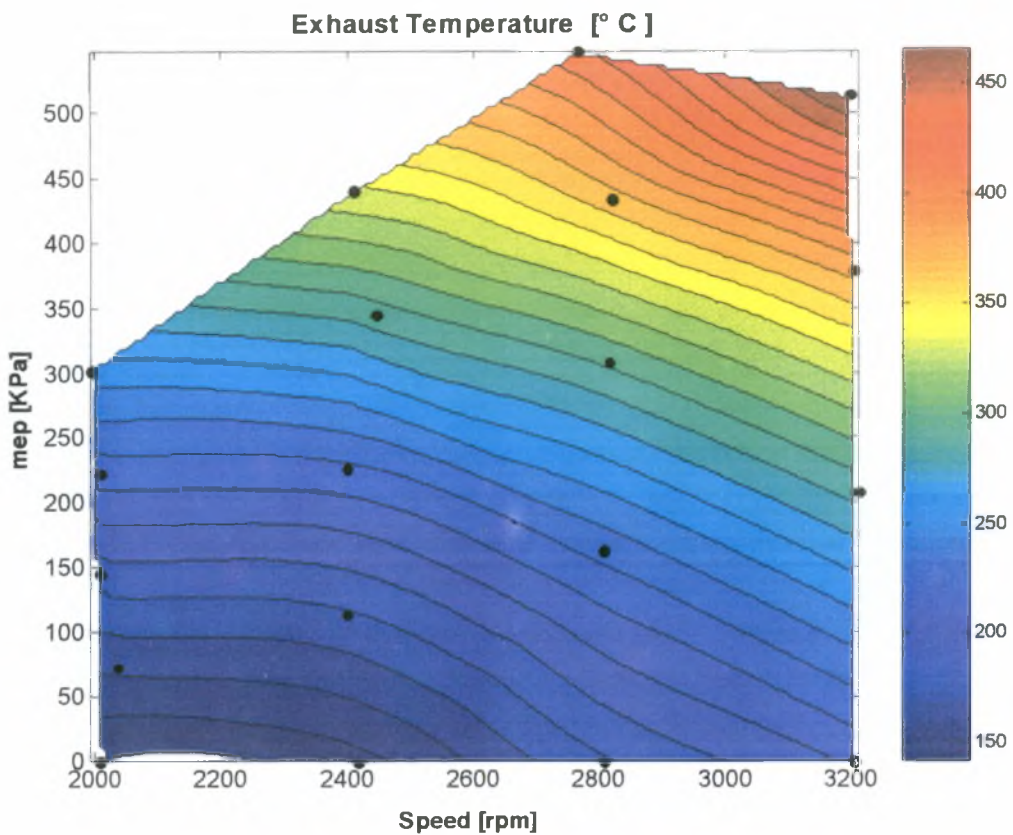
Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι το αντίστροφο της ειδικής κατανάλωσης. Φανερώνει πόσο καλά εκμεταλλεύεται ο κινητήρας τη χημική ενέργεια που αποδίδεται στο πιστόνι από το καύσιμο, μετά την καύση. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι το μεγάλο πλεονέκτημα των κινητήρων Diesel ο οποίος φτάνει μέχρι και την τιμή 0.4 στα μεγάλα φορτία. Ο συγκεκριμένος κινητήρας με τη συγκεκριμένη διάταξη πέδησης φτάνει 0.36, στην περιοχή όπου και η ειδική κατανάλωση ήταν η μικρότερη.

Η μορφή του χάρτη θα ήταν ακριβώς η ίδια με αυτή της ειδικής κατανάλωσης, αν και εδώ δεν συμπεριλαμβάνονταν τα σημεία με μηδενικό φορτίο. Εδώ όμως αυτά τα σημεία έχουν θερμικό βαθμό απόδοσης ίσο με μηδέν και έτσι μπορούν να παρασταθούν.



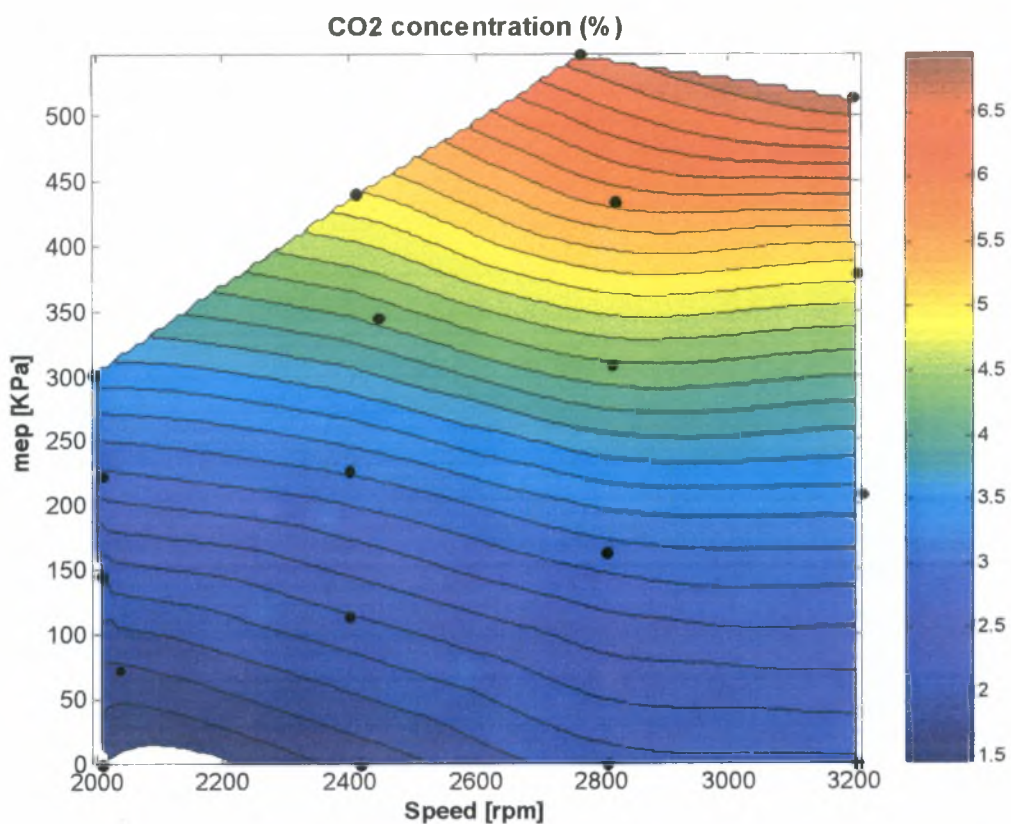
Εικόνα 5-11 Χάρτης μηχανικού βαθμού απόδοσης

Με τη βοήθεια των γραμμών Willans προκύπτει και ο μηχανικός βαθμός απόδοσης, που είναι ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος προς τη διαθέσιμη ισχύ (ενδεικνύμενη). Όπως παρατηρείται με αύξηση του φορτίου ο βαθμός βελτιώνεται. Το γεγονός ότι οι ζώνες από τις 2000rpm μέχρι τις 2400rpm έχουν κλίση προς τα κάτω, ενώ στη συνέχεια αλλάζει προς τα άνω, οφείλεται στο ότι οι τριβές στις 2000rpm είναι αυξημένες όπως διαπιστώθηκε από τις γραμμές Willans. Η μέγιστη τιμή είναι 0.63 και επιτυγχάνεται στις 2800rpm στο μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο.

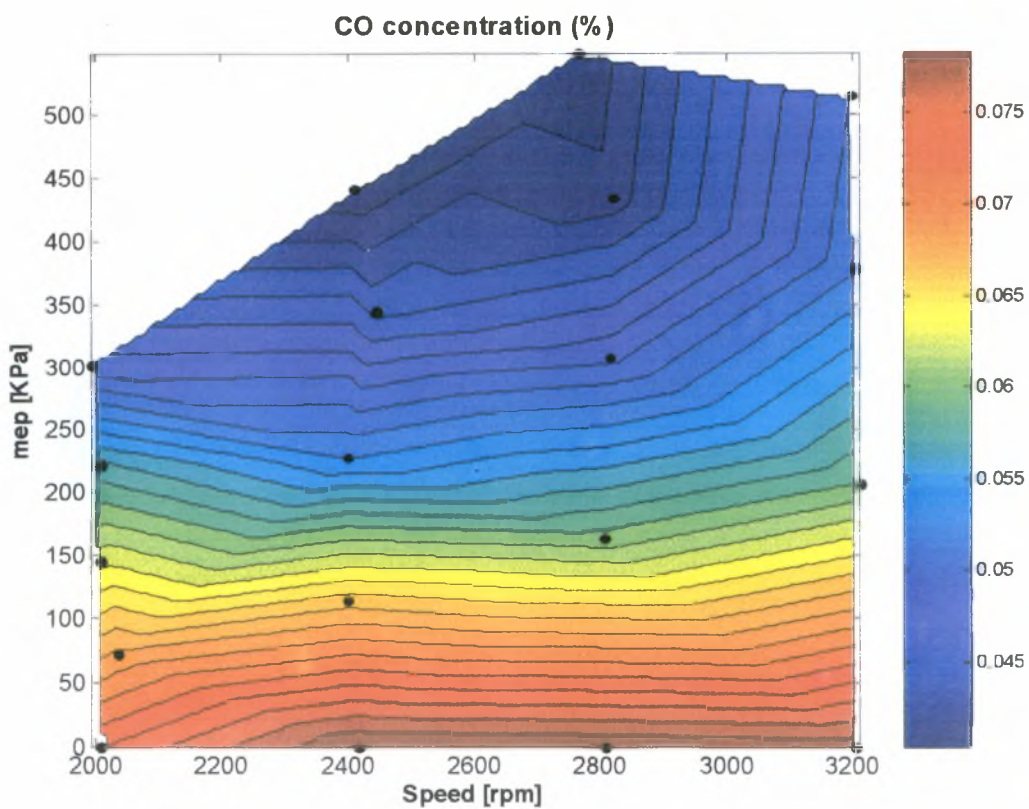


Εικόνα 5-12 Χάρτης θερμοκρασίας καυσαερίων

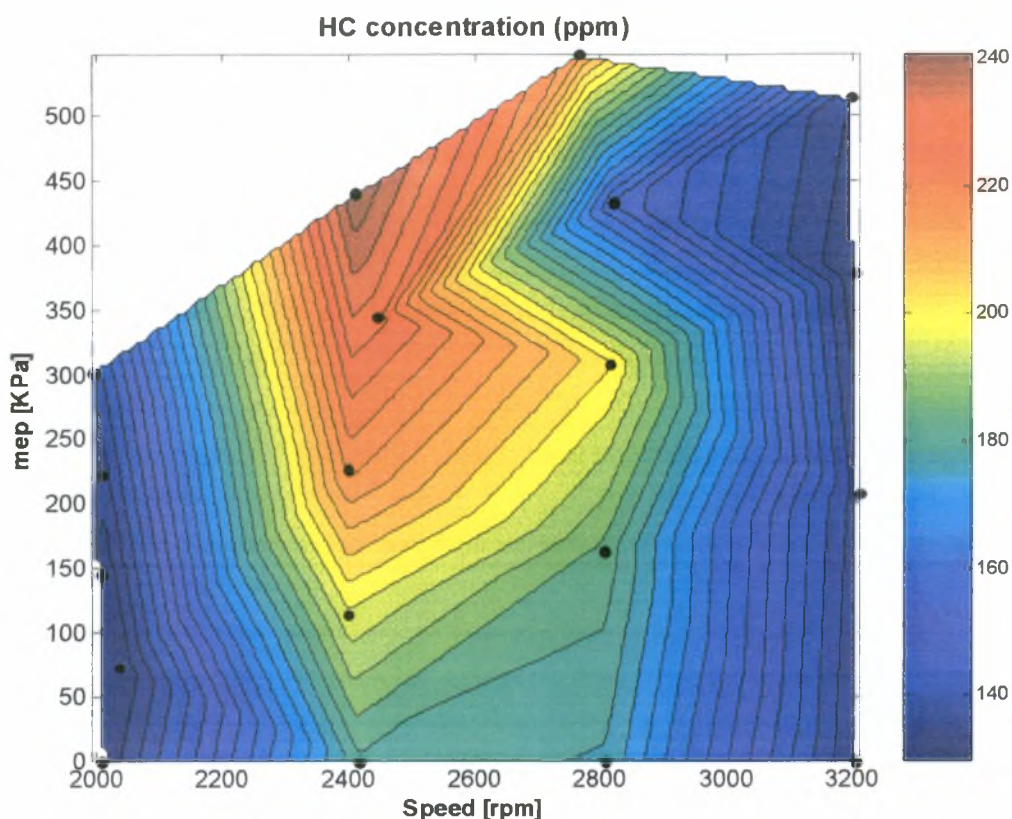
Ο χάρτης των θερμοκρασιών των καυσαερίων της καύσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για το σχεδιασμό πειραμάτων φόρτισης – αναγέννησης του φίλτρου αιθάλης. Η θερμοκρασία είναι ανάλογη με την ταχύτητα του κινητήρα και το επιβαλλόμενο φορτίο, αλλά αυτό το οποίο είναι χρήσιμο είναι οι τιμές που παρουσιάζει ο χάρτης. Η μέγιστη θερμοκρασία ξεπερνάει τους 475°C, τιμή που φανερώνει ότι μπορούν να γίνουν γρήγορες αναγεννήσεις με πρόσθετο καυσίμου σε φίλτρα αιθάλης που θα τοποθετηθούν στον κινητήρα.



Εικόνα 5-13 Χάρτης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα



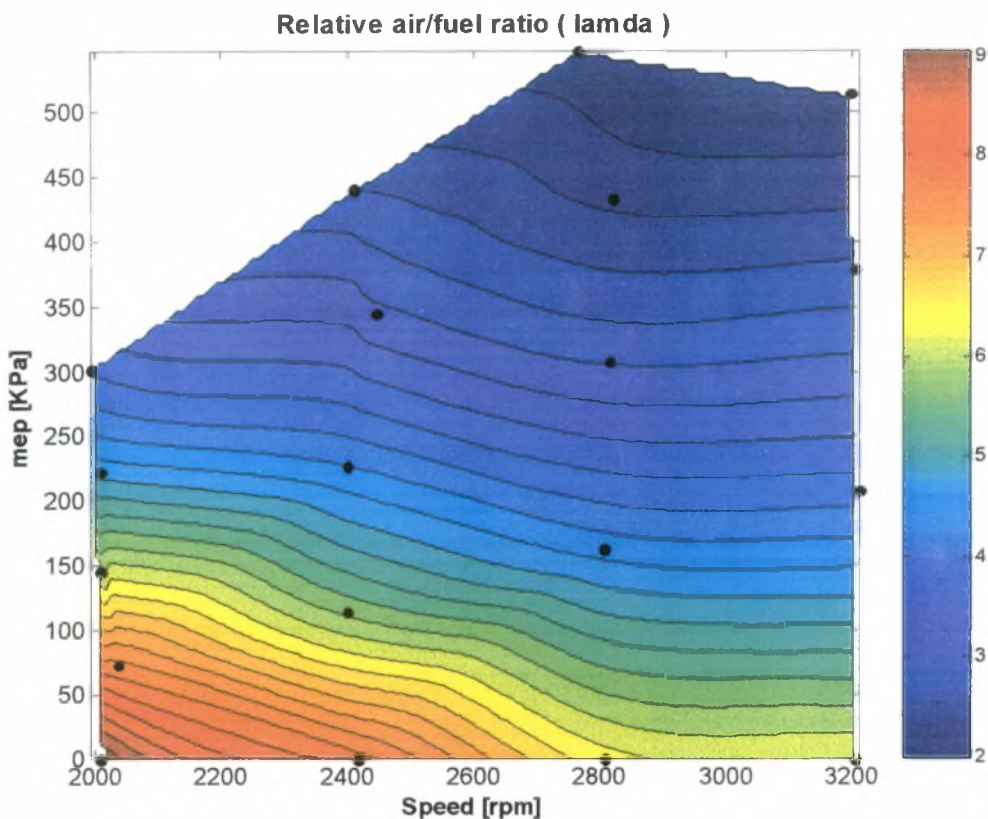
Εικόνα 5-14 Χάρτης εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα



Εικόνα 5-15 Χάρτης εκπομπών υδρογονανθράκων

Οι χάρτες εκπομπών του διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα φανερώνουν πως όσο αυξάνεται το φορτίο βελτιώνεται η απόδοση της καύσης, αφού το διοξείδιο αυξάνεται και το μονοξείδιο μειώνεται. Για το συμπέρασμα αυτό πρέπει βέβαια να ληφθεί υπόψη και η σύνθεση του μίγματος, ωστόσο οι εκπομπές του μονοξειδίου (προϊόν ατελούς καύσης) από μόνες τους, αποκαλύπτουν κατά πόσο η αντίδραση προσεγγίζει την τέλεια καύση

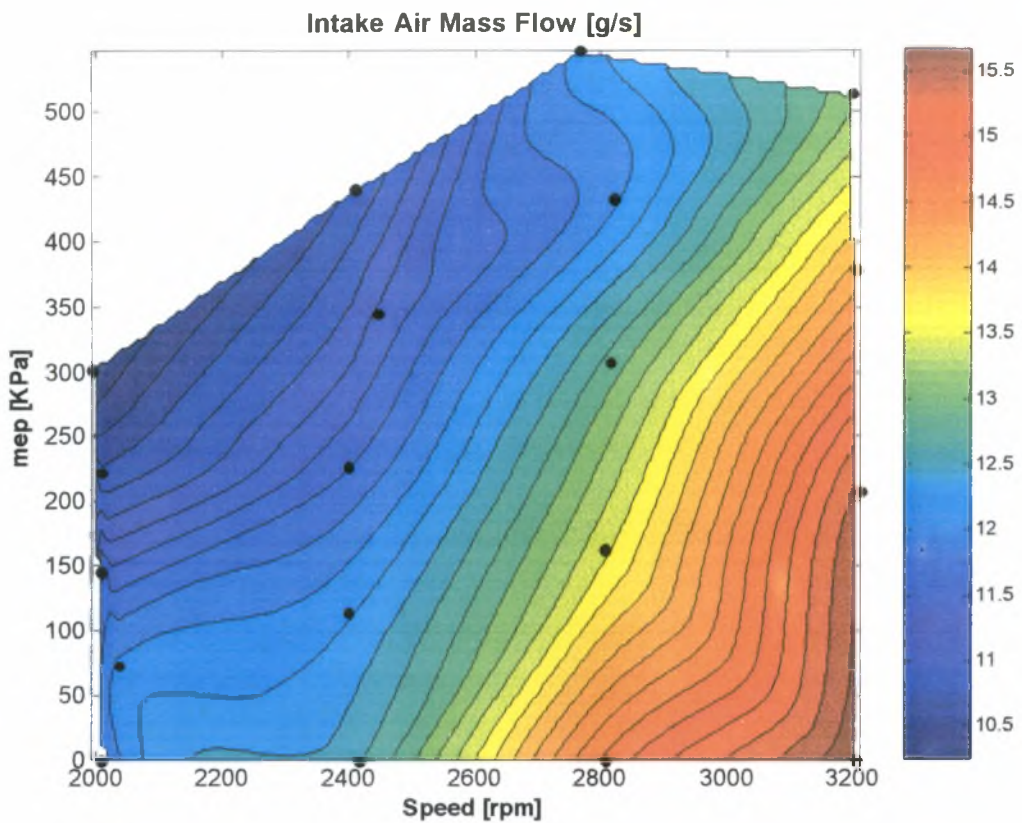
Ο χάρτης των υδρογονανθράκων παρουσιάζει κάποιες μη κατανοητές ιδιορρυθμίες στη μορφή του. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι τιμές της μέτρησης των HC κατά την αλλαγή των σημείων λειτουργίας δεν είχαν απόκριση, κρίνεται πως οι μετρήσεις των άκαυστων υδρογονανθράκων είναι αναξιόπιστες. Στο παράρτημα παρουσιάζεται μια τυπική μέτρηση των εκπομπών καυσαερίων όπου φαίνεται καθαρά η μη εγκυρότητα του αναλυτή στη συγκεκριμένη μέτρηση.



Εικόνα 5-16 Χάρτης σχετικού λόγου αέρα/καυσίμου λ

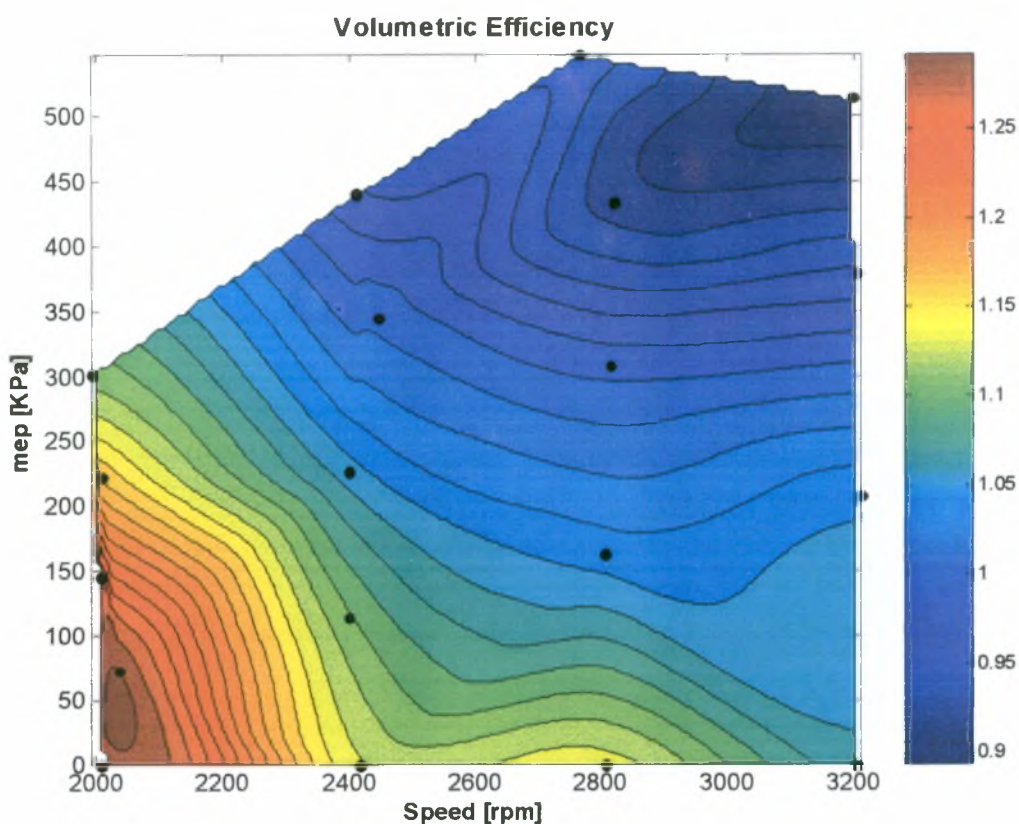
Ο λόγος λάμδα είναι μία παράμετρος που ορίζει τη σύνθεση του μίγματος, δηλαδή αν το μίγμα είναι πλούσιο ή φτωχό σε καύσιμο. Στους κινητήρες Diesel η τιμή του φτάνει μέχρι το 1.4. Από τον χάρτη φαίνεται πως η στοιχειομετρία της καύσης προσεγγίζεται στα υψηλά φορτία, με ελάχιστη τιμή 2 (αποδεκτό δεδομένου ότι δε φτάνουμε στο πλήρες φορτίο του κινητήρα).

Αξιοσημείωτη είναι η ομοιότητα του χάρτη λ με αυτόν των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Οι τιμές του λ υπολογίστηκαν από τις συστάσεις των καυσαερίων, οπότε αυτή η ομοιότητα δηλώνει πως ο σχετικός λόγος αέρα καυσίμου επηρεάζεται κατά κόρον από τις μετρήσεις του διοξειδίου, παρά από τα άλλα δύο αέρια.



Εικόνα 5-17 Χάρτης παροχής μάζας αέρα εισαγωγής

Παρατηρούμε πως η παροχή του αέρα στην εισαγωγή αυξάνεται με την ταχύτητα περιστροφής αλλά μειώνεται με την επιβολή φορτίου. Αυτό συμβαίνει γιατί στα υψηλά φορτία η αναλογία αέρα/καυσίμου τείνει στην στοιχειομετρική αναλογία και η περίσσεια αέρα ελαττώνεται, όπως φανερώνει και ο χάρτης του λ.



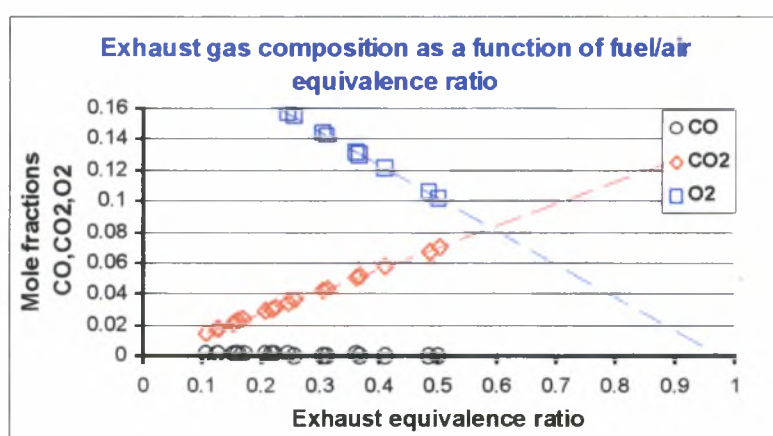
Εικόνα 5-18 Χάρτης βαθμού πλήρωσης

Ο βαθμός πλήρωσης είναι η παράμετρος που μετράει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας εισαγωγής της γόμωσης στον κύλινδρο. Στους κινητήρες Diesel είναι μεγαλύτερος και δεν μεταβάλλεται όσο στους βενζινοκινητήρες, λόγω απουσίας της πεταλούδας γκαζιού.

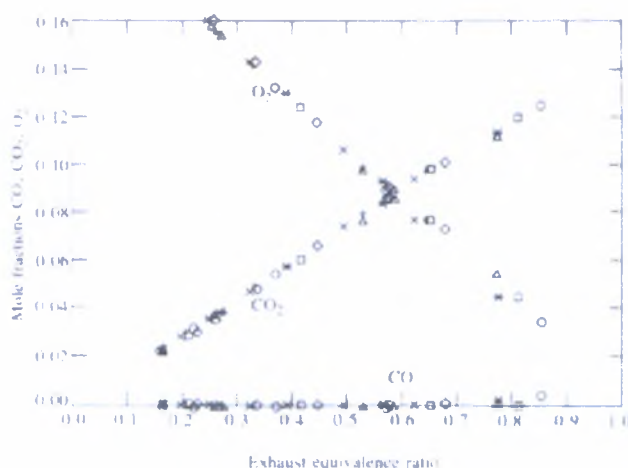
Η εξαγωγή του χάρτη βαθμού πλήρωσης οδηγεί στο συμπέρασμα πως κάποια ή κάποιες από τις μετρήσεις από τις οποίες προέκυψε, παρουσιάζουν σφάλμα, αφού η τιμή του ξεπερνάει τη μονάδα. Ο βαθμός πλήρωσης συνδέεται με την παροχή και τη πυκνότητα του αέρα εισαγωγής, τον όγκο εμβολισμού και την ταχύτητα του κινητήρα. Το σφάλμα εντοπίστηκε στη μέτρηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, η οποία καθορίζει το λόγο αέρα/καυσίμου και αυτός με τη σειρά του την παροχή του αέρα. Αυτό που οδήγησε στο σφάλμα είναι η εξίσωση βαθμονόμησης των τιμών συγκέντρωσης CO₂ στο πρόγραμμα καταγραφής. Οι ενδείξεις δηλαδή του αναλυτή δε συμπίπτουν ακριβώς με αυτές που καταγράφονται στον υπολογιστή γιατί η εξίσωση βαθμονόμησης στην έξοδο του αναλυτή (αυτή που δίνεται και στο πρόγραμμα καταγραφής), που δόθηκε από τον επισκευαστή, δεν είναι η σωστή.

Αυτό σημαίνει πως, τουλάχιστον ποσοτικά, οι χάρτες CO₂, λ, παροχής αέρα και βαθμού πλήρωσης δεν είναι ακριβείς. Η βελτίωση είναι εφικτή με την εξαγωγή εκ νέου της εξίσωσης βαθμονόμησης, η οποία μπορεί να γίνει με ταυτόχρονη καταγραφή διαφόρων ενδείξεων του αναλυτή και αυτών που παρουσιάζει ο υπολογιστής ώστε να καθοριστεί η μεταξύ τους σχέση. Μόνο έτσι μπορούν να υπολογιστούν και οι αποκλίσεις σε κάθε περίπτωση.

Έλεγχος έγινε και στην εγκυρότητα της σχέσης εξαγωγής του λόγου αέρα/καυσίμου, όμως η παρακάτω εικόνα που ταυτίζεται με ανάλογη της βιβλιογραφίας (εικόνα 5-20) από πειραματικές μετρήσεις, καθιστούν τη σχέση πλήρως αξιόπιστη.



Εικόνα 5-19 Εκπομπές CO, CO₂ και O₂ συναρτήσει του ισοδύναμου λόγου καυσίμου/αέρα (ϕ)



Εικόνα 5-20 Εκπομπές CO, CO₂ και O₂ συναρτήσει του ισοδύναμου λόγου καυσίμου/αέρα (ϕ) διάφορων κινητήρων Diesel

5.4 ΦΟΡΤΙΣΗ – ΑΝΑΓΕΝΝΗΣΗ ΦΙΛΤΡΟΥ ΑΙΘΑΛΗΣ ΕΠΙ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Στην επόμενη σειρά πειραμάτων, έγινε καταγραφή της πτώσης πίεσης κατά μήκος του φίλτρου αιθάλης που τοποθετήθηκε μετά την εξαγωγή του κινητήρα, καθώς και οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου των καυσαερίων από το φίλτρο. Το καύσιμο εδώ είναι εμπλουτισμένο με καταλυτικό πρόσθετο σε συγκέντρωση 25ppm.

Όπως έχουμε αναφέρει, η πτώση πίεσης είναι μία παράμετρος που συσχετίζεται με την ποσότητα αιθάλης που έχει συλλέξει το φίλτρο. Αναλυτικότερα, η πτώση πίεσης σε ένα καθαρό φίλτρο μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες:

- Πτώση πίεσης λόγω ξαφνικής συστολής και διαστολής στην είσοδο και την έξοδο του φίλτρου (φράξιμο των καναλιών)
- Πτώση πίεσης λόγω τριβής με τα τοιχώματα του καναλιού
- Πτώση πίεσης λόγω της διαπερατότητας του τοιχώματος

Δηλαδή

$$\Delta P_{ολική} = \Delta P_{εισόδου/εξόδου} + \Delta P_{καναλιού} + \Delta P_{τοιχώματος}$$

Η πτώση πίεσης διαμέσου του τοιχώματος του μονόλιθου υπολογίζεται από το νόμο του Darcy:

$$\Delta P_{τοιχώματος} = \frac{\mu \cdot U_{\tau} \cdot w}{k_{\tau}}$$

όπου

μ : δυναμικό ιξώδες του καυσαερίου [Pa·s]

U_{τ} : ταχύτητα καυσαερίου διαμέσου τοιχώματος (ροή αερίου ανά μονάδα επιφανείας φιλτραρίσματος) [m/s]

w : πάχος τοιχώματος [m]

k_{τ} : διαπερατότητα υλικού του φίλτρου [m²]

και η οποία έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά από τις υπόλοιπες. Η πτώση πίεσης καναλιού είναι σημαντική στην περίπτωση των φίλτρων μεγάλου μήκους και μικρών καναλιών ενώ η άλλη είναι μικρή και συνήθως αμελητέα

Όταν στο φίλτρο αρχίζει να σχηματίζεται στρώμα αιθάλης στα τοιχώματα φιλτραρίσματος, στην ολική πτώση πίεσης προστίθεται ακόμα μία συνιστώσα ενώ οι υπόλοιπες τροποποιούνται ελαφρώς. Η καινούρια συνιστώσα είναι αυτή που αποκαλείται πτώση πίεσης σωματιδίων ($\Delta P_{σωματιδίων}$), λόγω της διαπερατότητας του στρώματος σωματιδίων και η οποία είναι η μεγαλύτερη συνιστώσα. Υπολογίζεται και

αυτή από το νόμο του Darcy, με παραμέτρους βέβαια όχι του τοιχώματος αλλά του στρώματος αιθάλης. Αντικαθιστώντας το πραγματικό πάχος του στρώματος σωματιδίων η σχέση μπορεί να γραφεί:

$$\Delta P_{\text{σωματιδίων}} = \frac{\mu \cdot U_{\sigma} \cdot m_{\sigma}}{A_{\kappa} \cdot (\rho \cdot k)_{\kappa}}$$

όπου

μ : δυναμικό ιξώδες του καυσαερίου [Pa·s]

U_{σ} : ταχύτητα καυσαερίου διαμέσου στρώματος [m/s]

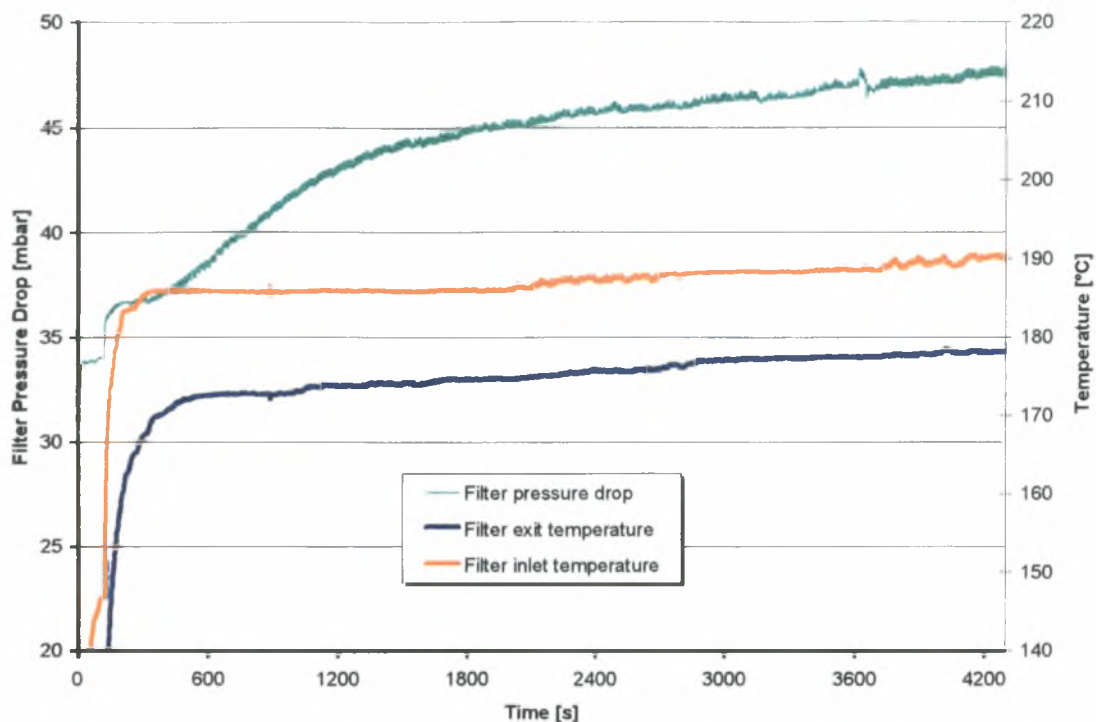
M : μάζα σωματιδίων [kg]

A_{κ} : επιφάνεια φιλτραρίσματος (καναλιού) [m²]

$(\rho \cdot k)_{\sigma}$: πυκνότητα στρώματος αιθάλης επί τη διαπερατότητά του [kg/m]

Η $\Delta P_{\text{τοιχώματος}}$ είναι τώρα μεγαλύτερη επειδή οι πόροι είναι εν μέρει φραγμένοι από σωματίδια. Η $\Delta P_{\text{εισόδου/εξόδου}}$ είναι παρόμοια, μόνο που το πραγματικό μέγεθος των καναλιών αρχίζει και ελαττώνεται, ενώ η $\Delta P_{\text{καναλιού}}$ για χοντρά στρώματα γίνεται σημαντική.

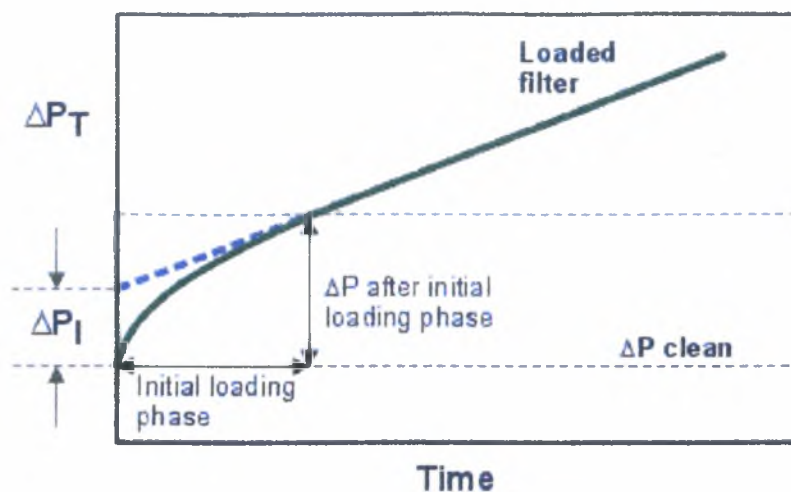
Το πρώτο πείραμα φόρτισης της παγίδας αιθάλης έγινε με καινούριο φίλτρο, σε σταθερό σημείο λειτουργίας του κινητήρα στις 2600rpm και φορτίο αυτό της μίας αντίστασης.



Εικόνα 5-21 Πρώτο πείραμα φόρτισης φίλτρου σε σταθερό σημείο λειτουργίας του κινητήρα στις 2600rpm

Αρχικά το φίλτρο αιθάλης είναι καθαρό και καθώς τα σωματίδια αρχίζουν να εναποθέτονται μέσα στους πόρους των τοιχωμάτων του μονόλιθου (depth filtration), η πτώση πίεσης αυξάνεται συναρτήσει του χρόνου μη γραμμικά. Αυτή είναι η αρχική φάση της φόρτισης, κατά τη διάρκεια της οποίας οι ιδιότητες του μονόλιθου, όπως η διαπερατότητα και το πορώδες, μεταβάλλονται καθώς αυξάνεται η αιθάλη μέσα στο δίκτυο των πόρων. Από τη στιγμή που η δυναμικότητα συλλογής των πόρων κορεστεί, η αιθάλη αρχίζει να εναποτίθεται στη επιφάνεια των τοιχωμάτων των καναλιών και σχηματίζονται στρώματα αιθάλης (cake filtration). Από αυτή τη φάση και μετέπειτα η πτώση πίεσης διαγράφει γραμμική αύξηση όπως φαίνεται στην εικόνα. Επομένως μετά τη σταθεροποίηση της κλίσης έχουμε τη δημιουργία στρώματος αιθάλης, το πάχος του οποίου αυξάνεται μέχρι το τέλος του πειράματος. Η διαπερατότητα και το πορώδες του μονόλιθου και του στρώματος αιθάλης μπορούν να θεωρηθούν σταθερά σε αυτή τη φάση. Το διάγραμμα της πτώσης πίεσης στο

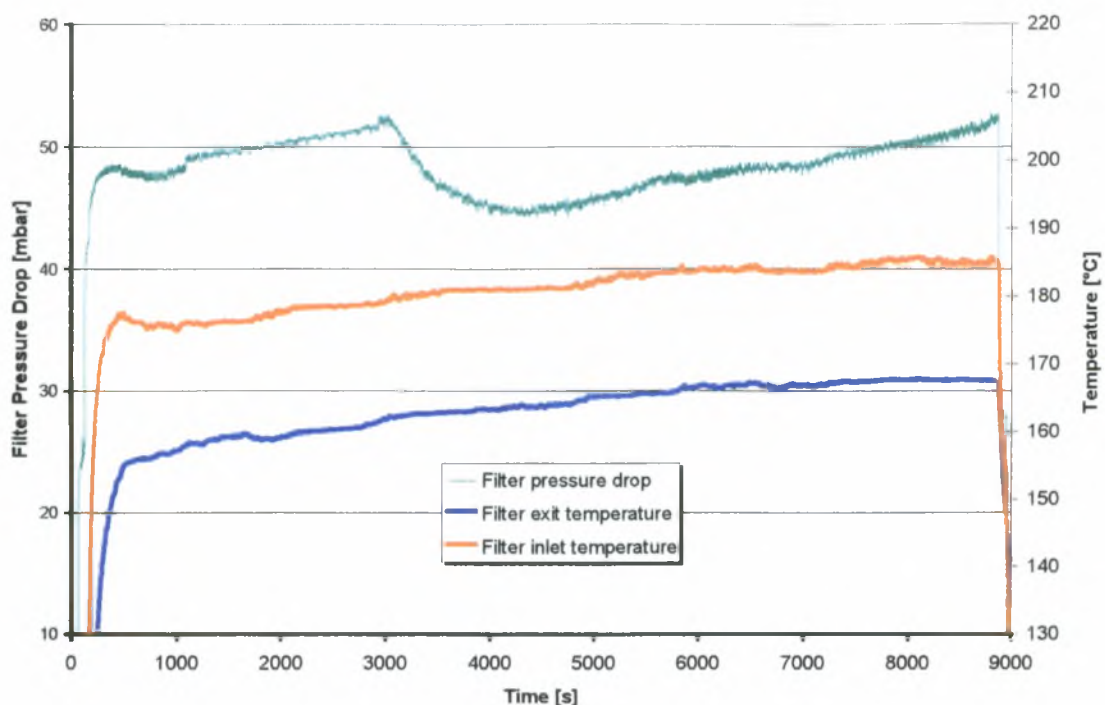
πρώτο πείραμα επαληθεύεται και από την παρακάτω εικόνα της θεωρητικής καμπύλης της πτώσης πίεσης σε σταθερό σημείο λειτουργίας.



Εικόνα 5-22 Θεωρητική καμπύλη πτώσης πίεσης καθαρού φίλτρου αιθάλης σε σταθερό σημείο λειτουργίας του κινητήρα

Ο όρος ΔP_I αναφέρεται στην αύξηση της $\Delta P_{\text{καναλιού}}$ από την εναπόθεση των σωματιδίων μέσα στους πόρους και στο πείραμα ισούται περίπου με 6 mbar. Συνολικά στο πείραμα η ολική πτώση πίεσης αυξήθηκε περίπου από τα 37 μέχρι τα 47 mbar σε χρόνο λειτουργίας του κινητήρα περίπου 70 λεπτά.

Το δεύτερο πείραμα φόρτισης έγινε στις 2500rpm πάλι με φορτίο μίας ηλεκτρικής αντίστασης.



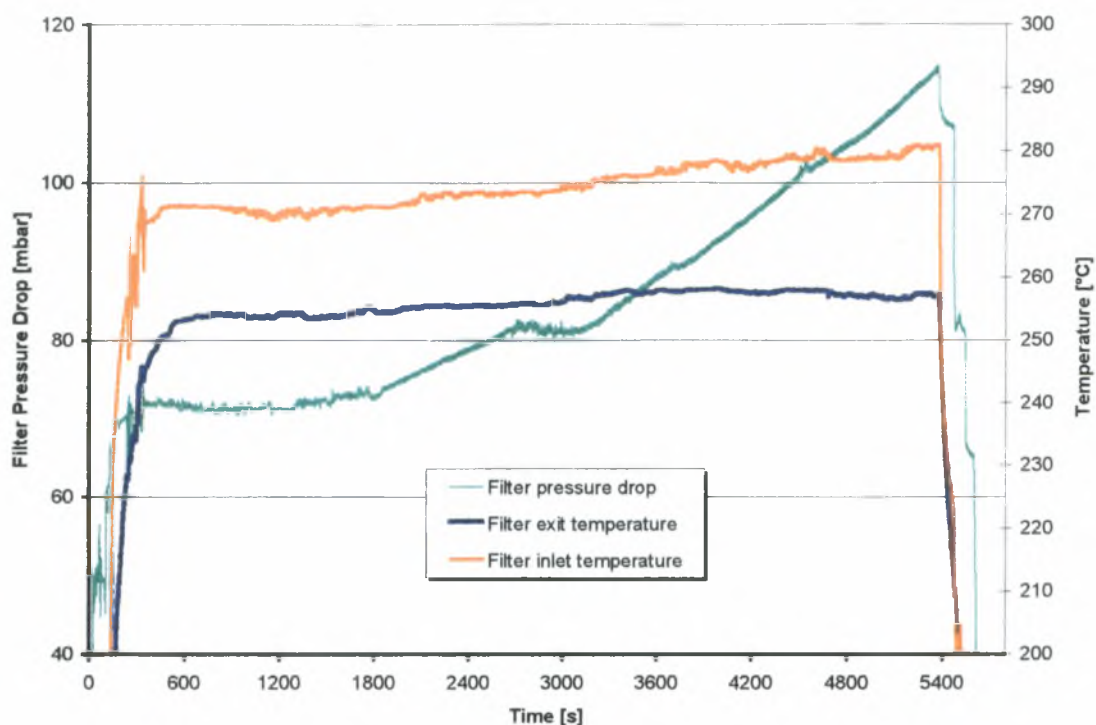
Εικόνα 5-23 Δεύτερο πείραμα φόρτισης φίλτρου σε σταθερό σημείο λειτουργίας του κινητήρα στις 2500rpm

Το συγκεκριμένο πείραμα παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον γιατί εμφανίζει το φαινόμενο της εκρόφησης. Στην αρχή η πτώση πίεσης αυξάνεται με παρόμοιο ρυθμό με αυτόν του προηγούμενου πειράματος (έπειτα της αρχικής φάσης). Από ένα σημείο και μετά παρατηρείται αισθητή πτώση παρά το γεγονός ότι οι θερμοκρασία των καυσαερίων είναι μικρή (περίπου 180°C).

Τέτοιου είδους συμπεριφορές πιστεύεται πως οφείλονται στα προσροφημένα πτητικά οργανικά κλάσματα (VOF:volatile organic fraction) από τα σωματίδια αιθάλης. Όπως αναφέρεται στην εισαγωγή, τα σωματίδια αιθάλης αποτελούνται κυρίως από άνθρακα στον πυρήνα, ο οποίος εμπλουτίζεται από άκαυστους ή μερικά οξειδωμένους υδρογονάνθρακες που προέρχονται από άκαυστο καύσιμο και λιπαντικό (από εδώ και πέρα VOF). Η περιεκτικότητα σε VOF εξαρτάται από παράγοντες όπως ο σχεδιασμός του θαλάμου καύσης, τα χαρακτηριστικά του ψεκασμού καυσίμου και η σύνθεση του καυσίμου. Σε δεδομένο κινητήρα και καύσιμο εξαρτάται βέβαια από το σημείο λειτουργίας του.

Στο σημείο λοιπόν που αρχίζει να ελαττώνεται η πτώση πίεσης και οι θερμοκρασίες είναι απαγορευτικές για θερμική αναγέννηση, το φαινόμενο της εκρόφησης διαδραματίζεται. Οι συνθήκες είναι κατάλληλες και ευνοούν την εξάτμιση και απομάκρυνση των προσροφημένων υδρογονανθράκων από τα σωματίδια αιθάλης που είναι παγιδευμένα στο φίλτρο. Έτσι ελευθερώνεται χώρος και η πτώση πίεσης κατά μήκος του φίλτρου μειώνεται. Το γεγονός ότι η πτώση πίεσης φτάνει σε κατώτερο σημείο από την αρχική του πειράματος, πιθανότατα να οφείλεται στην ύπαρξη υγρασίας στην παγιδευμένη αιθάλη. Έτσι ταυτόχρονα με την εκρόφηση των υδρογονανθράκων έχουμε και εκρόφηση νερού εφόσον και οι θερμοκρασίες είναι ιδιαίτερα χαμηλές. Κατά τη διάρκεια της πτώσης αυτής η θερμοκρασία στη έξοδο του φίλτρου δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική αύξηση. Αυτό θα αποτελούσε ένδειξη στοχαστικής αναγέννησης, όπου οι προσροφημένοι υδρογονάνθρακες οξειδώνονται και εκλύεται θερμότητα. Έπειτα λοιπόν της εξάτμισης και απομάκρυνσης των VOF (και νερού) μέχρι το βαθμό που είναι εφικτός σε αυτές τις συνθήκες, στο φίλτρο αρχίζει και πάλι να αυξάνεται η πτώση πίεσης. Ο ρυθμός αύξησης είναι ελαφρώς μικρότερος από αυτόν πριν την εκρόφηση και συνεχίζει μέχρι τέλος του πειράματος.

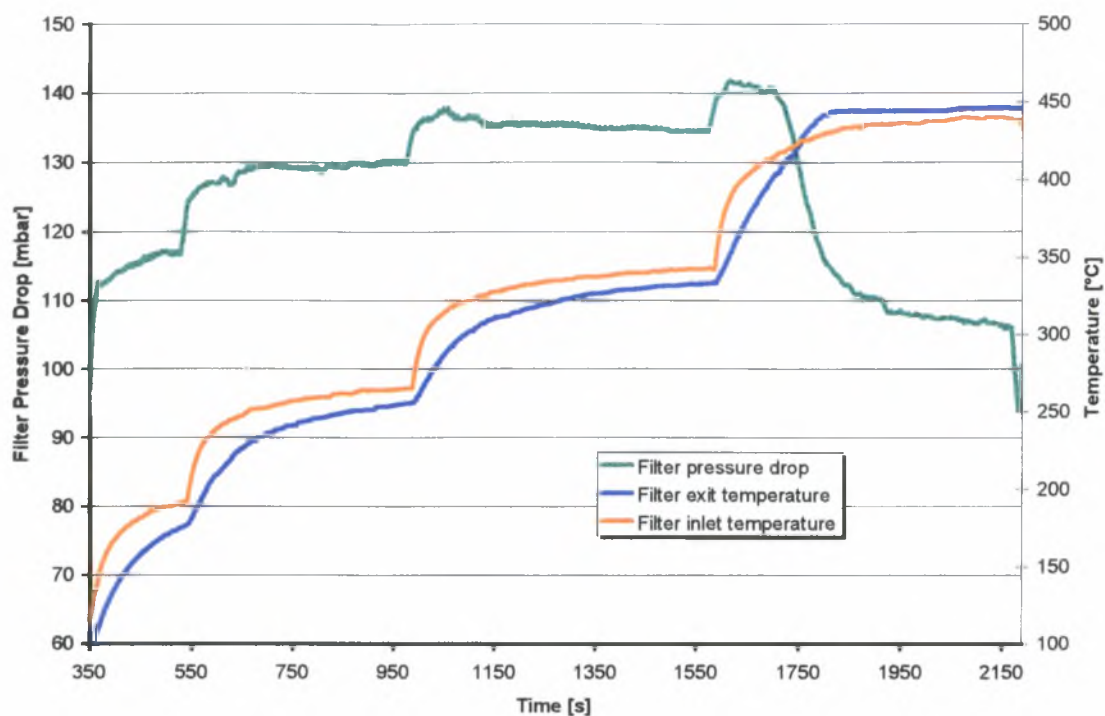
Στο τρίτο πείραμα το σημείο λειτουργίας του κινητήρα πήγε σχεδόν στις 3200rpm με φορτίο μία ηλεκτρική αντίσταση.



Εικόνα 5-24 Τρίτο πείραμα φόρτισης φίλτρου σε σταθερό σημείο λειτουργίας του κινητήρα στις 3200rpm

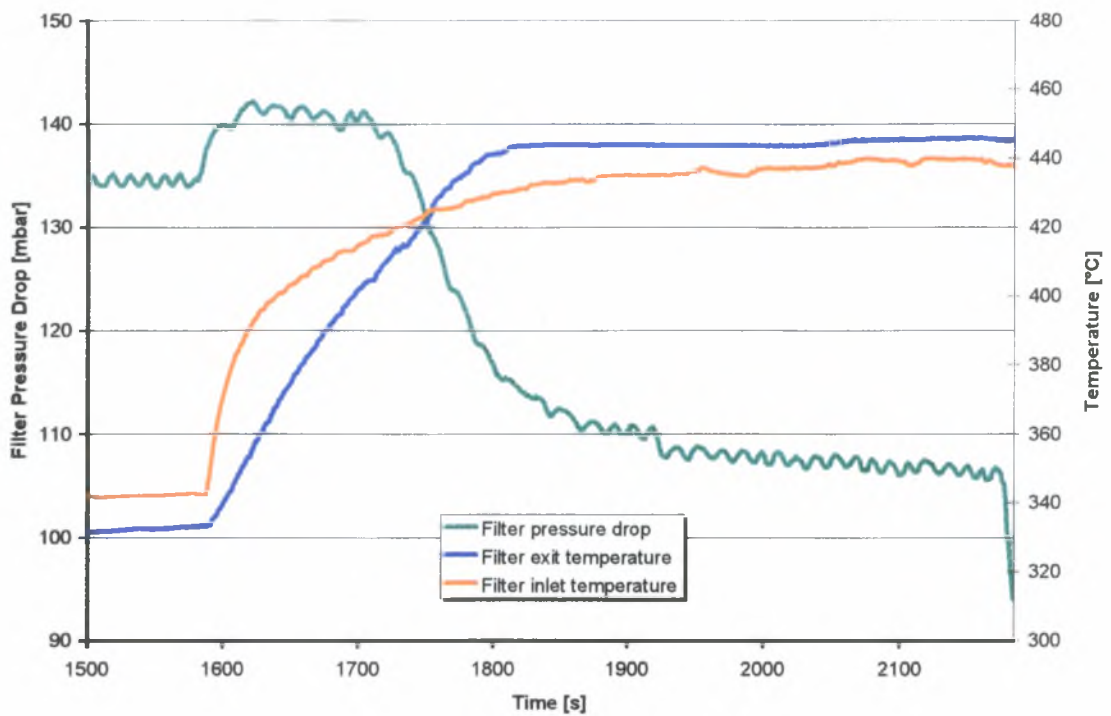
Σε αυτό το σημείο λειτουργίας παρατηρούμε πως η φόρτιση δεν παρουσιάζει σταθερότητα. Στα διαστήματα όπου η πτώση πίεσης αυξάνεται, ο ρυθμός είναι μεγάλος γιατί το φίλτρο είναι ήδη αρκετά φορτισμένο και επειδή το φορτίο και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι υψηλότερα από τα άλλα πειράματα. Τα διαστήματα όπου η πτώση πίεσης δεν αυξάνεται, πιθανότατα να οφείλονται σε αστοχία της στεγανότητας της σύνδεσης του περιβλήματος του φίλτρου ή και της τοποθέτησης του φίλτρου μέσα στο περίβλημα. Η αστοχία γίνεται αισθητή στο συγκεκριμένο πείραμα λόγω μεγαλύτερων ταχυτήτων και πιέσεων του καυσαερίου, της περισσότερης παγιδευμένης αιθάλης καθώς και των υψηλών θερμοκρασιών οι οποίες διαστέλλουν το περίβλημα. Όταν φράζονται αυτές οι διόδους, η πτώση πίεσης ξαναρχίζει την αύξουσα πορεία. Η μεγάλη κλίση φανερώνει ότι υπάρχει κίνδυνος στόμωσης του φίλτρου και ότι χρειάζεται αναγέννηση.

Στο τέταρτο πείραμα, ο κινητήρας αρχικά ρυθμίστηκε στις 3000rpm και ακολούθησε βηματική αύξηση του φορτίου, ανοίγοντας διαδοχικά τους διακόπτες των ηλεκτρικών αντιστάσεων.



Εικόνα 5-25 Τέταρτο πείραμα με βηματική αύξηση του φορτίου κινητήρα στις 3000rpm

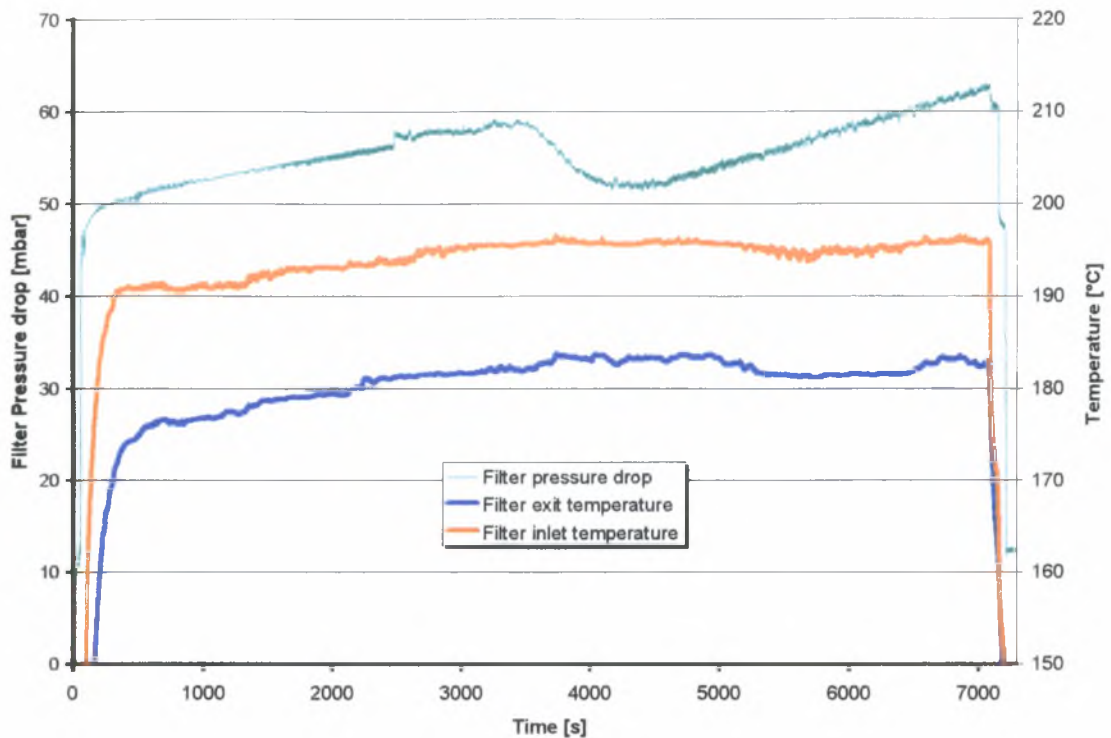
Η βηματική αύξηση του φορτίου φαίνεται στην κλιμακωτή αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Η διαφορά απόκρισης των δύο θερμοκρασιών οφείλεται βέβαια στην παρουσία του φίλτρου αιθάλης. Η θερμική αναγέννηση επέρχεται τελικά όταν η θερμοκρασία των καυσαερίων φτάσει τους 415°C όπου η παγιδευμένη αιθάλη φλέγεται. Ο ρυθμός οξείδωσης της αιθάλης είναι τώρα μεγάλος και η πτώση πίεσης παρουσιάζει απότομη πτώση όπως διαγράφεται στην εικόνα. Με την καύση, μάζα αιθάλης μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα και μονοξείδιο του άνθρακα τα οποία ελευθερώνονται και εγκαταλείπουν το φίλτρο (αφού είναι αέρια) με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας. Παρακάτω περατείθεται εικόνα με το διάστημα της θερμικής αναγέννησης.



Εικόνα 5-26 Θερμική αναγέννηση φίλτρου αιθάλης

Στην εικόνα παρατηρείται η αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου από το φίλτρο, η οποία τώρα ξεπερνάει αυτή της εισόδου λόγω της έκλυσης θερμότητας από την εξώθερμη καύση, όπως αναφέραμε παραπάνω.

Μετά την αναγέννηση πραγματοποιήθηκε ακόμα ένα πείραμα σε σταθερό σημείο λειτουργίας στις 2600rpm και φορτίο μίας αντίστασης.



Εικόνα 5-27 Πέμπτο πείραμα, φόρτιση φίλτρου σε σταθερό σημείο λειτουργίας του κινητήρα στις 2600rpm

Μετά την αναγέννηση, συγκρίνοντας την αρχική πτώση πίεσης σε αυτό το πείραμα με αυτή του πρώτου πειράματος, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα σημεία λειτουργίας του κινητήρα είναι ισοδύναμα, συνεπάγεται πως το φίλτρο δεν έχει καθαρίσει πλήρως και μικρή ποσότητα αιθάλης υπάρχει ακόμα παγιδευμένη. Αν η αναγέννηση γινόταν σε υψηλότερη θερμοκρασία θα ήταν και αποδοτικότερη. Κατά την εξέλιξη του πειράματος επαναλαμβάνεται το φαινόμενο της εκρόφησης VOF, όπως και στο δεύτερο πείραμα. Η επαναληψιμότητα αυτή μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα πως ο σχεδιασμός λειτουργίας του κινητήρα, οδηγεί στην εκπομπή σωματιδίων αιθάλης πλούσιων σε περιεκτικότητα VOF. Βέβαια η περιεκτικότητα του στρώματος αιθάλης σε VOF κάθε στιγμή, εξαρτάται πρωτίστως από τη θερμοκρασία του φίλτρου αλλά και από την προϊστορία λειτουργίας του και αναγεννήσεων του.

Σχετικά με τις θερμοκρασίες που καταγράφονται σε όλα τα πειράματα φόρτισης, η μικρή μεταβολή που παρουσιάζουν παρόλο που τα σημεία λειτουργίας είναι σταθερά, καταλήγουμε πως οφείλεται σε δύο παράγοντες. Ένας είναι το γεγονός

ότι με την πάροδο του χρόνου, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα μεταβάλλεται ελαφρώς, αντιστρόφως ανάλογα με την μεταβολή των θερμοκρασιών. Εφόσον ο ρυθμιστής καυσίμου είναι χειροκίνητος και δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του πειράματος, πιθανόν από τους έντονους κραδασμούς να επηρεάζεται μακροπρόθεσμα και έτσι οι στροφές να μη διατηρούνται απόλυτα σταθερές. Συνήθως πέφτουν αλλά υπάρχει πιθανότητα και να αυξηθούν, όπως παρατηρήθηκε από ένα σημείο και μετά στην τελευταία φόρτιση. Με μείωση των στροφών ο ρυθμός ψύξης του κυλίνδρου ελαττώνεται γιατί ο κινητήρας είναι αερόψυκτος και η παροχή του αέρα ψύξης προκαλείται από φτερωτή κινούμενη από τον άξονα του κινητήρα. Επομένως μείωση των στροφών επιφέρει τελικά αύξηση στη θερμοκρασία των καυσαερίων και αντίστροφα. Ο άλλος παράγοντας είναι η μεταβολή της αντίθλιψης από το φίλτρο αιθάλης, όπου με αύξησή της αυξάνεται η θερμοκρασία των καυσαερίων και αντίστροφα. Σε μεγάλη αντίθλιψη είναι δυνατό να επηρεαστούν και οι στροφές του κινητήρα, ο οποίος την εκλαμβάνει ως επιπλέον φορτίο (περίπτωση φόρτισης στις 3200rpm όπου η θερμοκρασία στην είσοδο αυξάνεται εντονότερα από τις άλλες φορτίσεις). Ο συνδυασμός των δύο παραγόντων εξηγεί την κλίση των θερμοκρασιών κάθε στιγμή σε κάθε πείραμα φόρτισης. Να σημειωθεί βέβαια πως οι μεταβολές αυτές είναι μικρές έως αμελητέες αν παρουσιαστούν στην πραγματική κλίμακα των θερμοκρασιών και ότι η καταγραφή αυτών των θερμοκρασιών έγινε κυρίως για τυχόν περιπτώσεις στοχαστικής αναγέννησης (ώστε να μη γίνει σύγχυση με την εκρόφιση). Τέλος η διαφορά της θερμοκρασίας εξόδου με τη θερμοκρασία εισόδου οφείλεται στις απώλειες θερμότητας του μεταλλικού κελύφους του φίλτρου.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το σύνολο των πειραμάτων διεκπεραιώθηκε με επιτυχία και οι στόχοι που τέθηκαν αρχικά, επιτεύχθηκαν σε μεγάλο ποσοστό. Συγκεκριμένα:

- Στήθηκε η πειραματική διάταξη από μηδενική βάση η οποία καλύπτει συγκεκριμένο φάσμα μετρήσεων
- Ελέγχθηκε η λειτουργία της και επιβεβαιώθηκε η αξιοπιστία της
- Διατηρήθηκε το κόστος όσο το δυνατόν σε χαμηλότερα επίπεδα, χρησιμοποιώντας μικρό αριθμό αισθητήρων και επιμέρους ιδιοκατασκευές
- Δημιουργήθηκε ημι-αυτοματοποιημένο σύστημα συλλογής δεδομένων (κάρτα καταγραφής και Labview) και επεξεργασίας τους σε φύλλα εργασίας (Excel), φτιάχνοντας υπόβαθρο για τη μελλοντική χρήση της πειραματικής διάταξης

Διάφορες ελλείψεις στις μετρήσεις μεγεθών αντιμετωπίστηκαν με λογικές παραδοχές και υπολογισμό από σχέσεις της βιβλιογραφίας.

Η εξαγωγή των γραμμών Willans δηλώνει πως στην αρχή του εκμεταλλεύσιμου πεδίου του κινητήρα οι απώλειες τριβών είναι αυξημένες. Επίσης αν η εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό των τριβών της βιβλιογραφίας θεωρηθεί αντιπροσωπευτική για το συγκεκριμένο είδος κινητήρων, εξάγεται πως ο κινητήρας παρουσιάζει γενικά ελαφρώς αυξημένες τριβές κατά τη λειτουργία του.

Από τους χάρτες λειτουργίας εντοπίζεται πως η αποδοτικότερη και καλύτερη λειτουργία της μηχανής βρίσκεται στην περιοχή υψηλών φορτίων, ιδίως με ταχύτητες περιστροφής 2400 – 2800rpm . Η ειδική κατανάλωση στην περιοχή αυτή είναι χαμηλή ενώ οι βαθμοί απόδοσης, μηχανικός και θερμικός παίρνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους.

Από τις φορτίσεις και την αναγέννηση του φίλτρου αιθάλης συμπεραίνεται πως ο κινητήρας έχει κατάλληλες προδιαγραφές και ενδείκνυται για πρότυπα πειράματα με φίλτρα μικρών διαστάσεων. Οι εκπομπές σωματιδίων επαρκούν για τη γρήγορη φόρτισή τους και οι θερμοκρασίες καυσαερίων που αναπτύσσει βρίσκονται στο εύρος των θερμοκρασιών αναγέννησης. Στα μικρά φίλτρα οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών λειτουργίας τους είναι πιο προσιτές και τα φαινόμενα που αναπτύσσονται μπορούν να θεωρηθούν μονοδιάστατα λόγω μικρότερης κλίμακας και σχήματος

Παρόλα αυτά είναι κάποια σημεία που πρέπει να επισημανθούν για βελτίωση της διάταξης και αύξηση των δυνατοτήτων της.

- Η διάταξη πέδησης που κατασκευάστηκε με τις ηλεκτρικές αντιστάσεις, σε χαμηλές ταχύτητες περιστροφής του κινητήρα, είναι ασθενής σε σύγκριση με το έργο που μπορεί να αποδώσει ο συγκεκριμένος κινητήρας και δεν επιτυγχάνεται πυκνή σάρωση του πεδίου λειτουργίας στις υψηλές στροφές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι χάρτες λειτουργίας που εξήχθησαν να χάνουν κάποιο εύρος του κινητήρα. Σε πειράματα με τοποθετημένο φίλτρο αιθάλης στην εξαγωγή δεν προκαλείται πρόβλημα δεδομένου του πλήθους σημείων λειτουργίας που μπορεί να επιβάλλει η διάταξη πέδησης. Ωστόσο για την κάλυψη του πεδίου λειτουργίας στις χαμηλές στροφές μπορεί να συνδεθεί ανεξάρτητη συσκευή κατανάλωσης ρεύματος, ενώ για πυκνωση της σάρωσης είναι εφικτό να συνδεθεί κάποιος ροοστάτης στη διάταξη των ηλεκτρικών αντιστάσεων.
- Ο αναλυτής καυσαερίων λόγω παλαιότητας, παρόλο που επισκευάστηκε και ρυθμίστηκε η έξοδος του, παρουσίασε σφάλματα στις μετρήσεις του. Το οξυγόνο δεν ήταν εφικτό να μετρηθεί, ενώ οι υδρογονάνθρακες, το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα δεν μετρήθηκαν αξιόπιστα. Επιβάλλεται λοιπόν:
 1. Επισκευή εκ νέου για τη μέτρηση του οξυγόνου
 2. Προτείνεται θέρμανση της γραμμής δειγματοληψίας των καυσαερίων ώστε να αποφεύγονται τυχόν συμπυκνώσεις των υδρογονανθράκων
 3. Βαθμονόμηση της εξόδου ώστε να διορθωθούν οι αποκλίσεις των μετρήσεων. Λόγω έλλειψης χρόνου η εν λόγω βαθμονόμηση ξεκίνησε αλλά δεν ολοκληρώθηκε στην παρούσα εργασία. Με την εξαγωγή την νέας εξίσωσης βαθμονόμησης θα μπορούν να διορθωθούν οι παρούσες μετρήσεις.
- Προτείνεται επίσης ενίσχυση των αντικραδασικών βάσεων του κινητήρα για μικρότερη καταπόνηση του ίδιου και της υπόλοιπης πειραματικής διάταξης, όπως και για την αποφυγή ατυχήματος. Τέλος για τον περιορισμό της ηχορύπανσης του κινητήρα, η οποία προξένησε δυσχέρειες

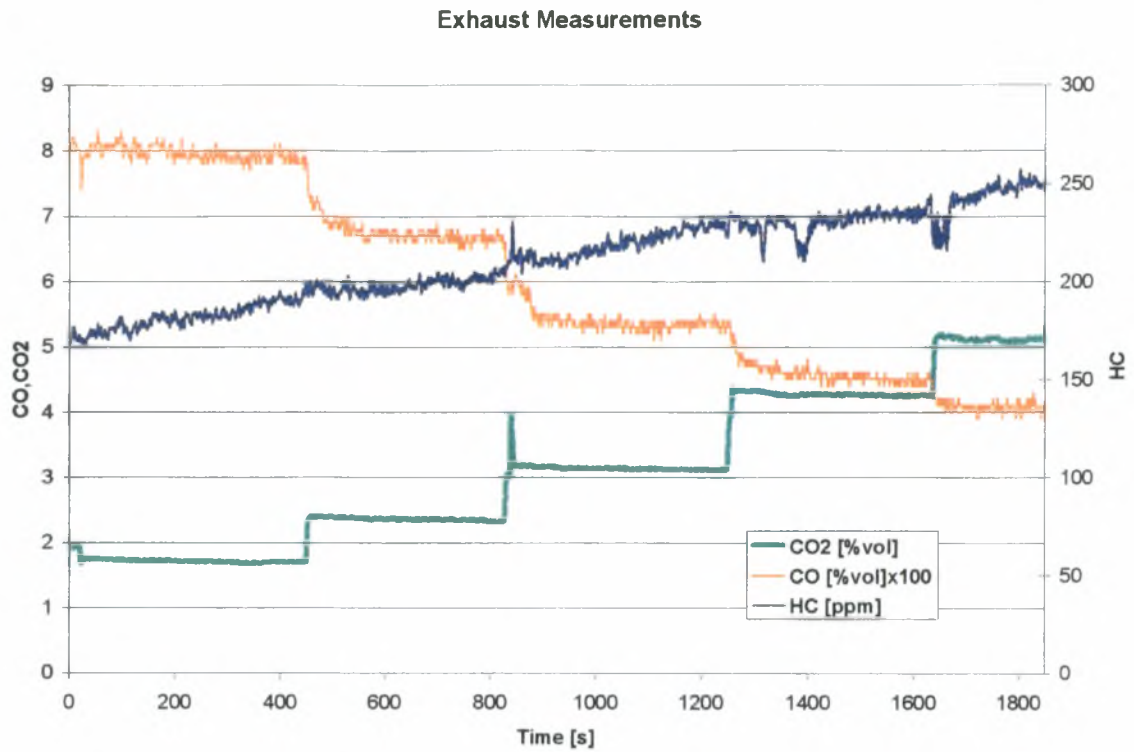
στο χώρο του πανεπιστημίου, εφικτή είναι η τοποθέτηση κάποιου ηχομονωτικού αλεξήμενου γύρω από τον κινητήρα.

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

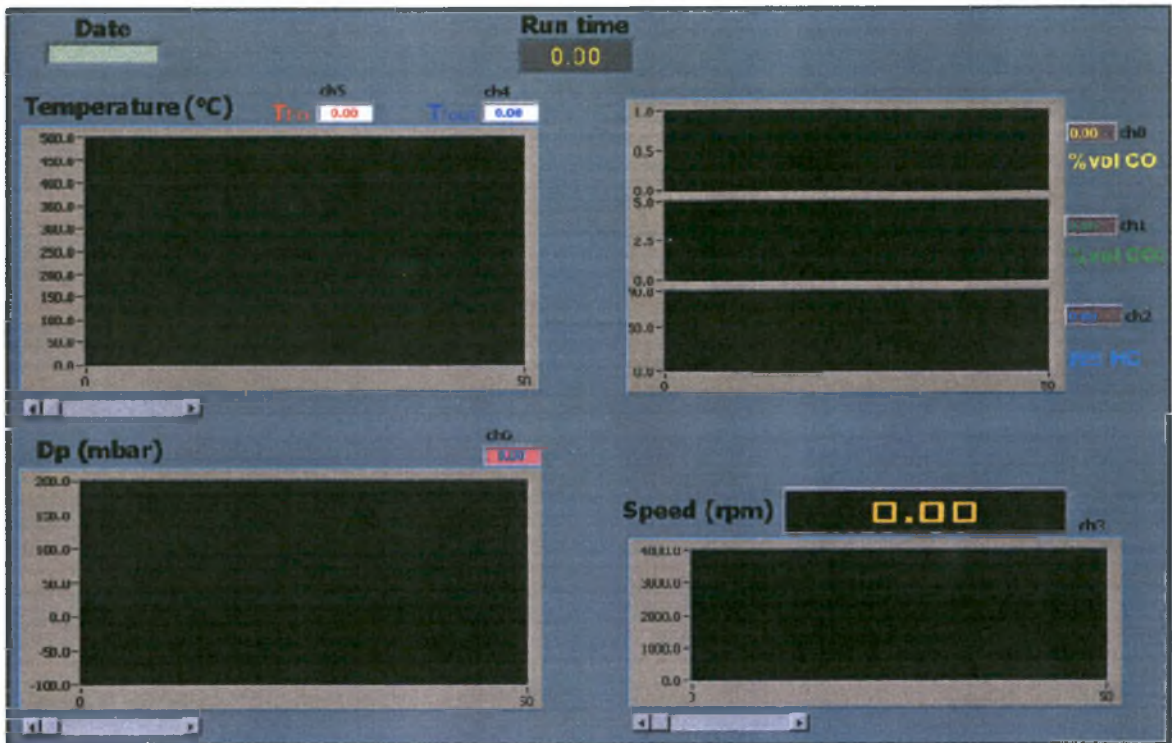
Table A.4 Thermophysical properties of gases at atmospheric pressure^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Air							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536

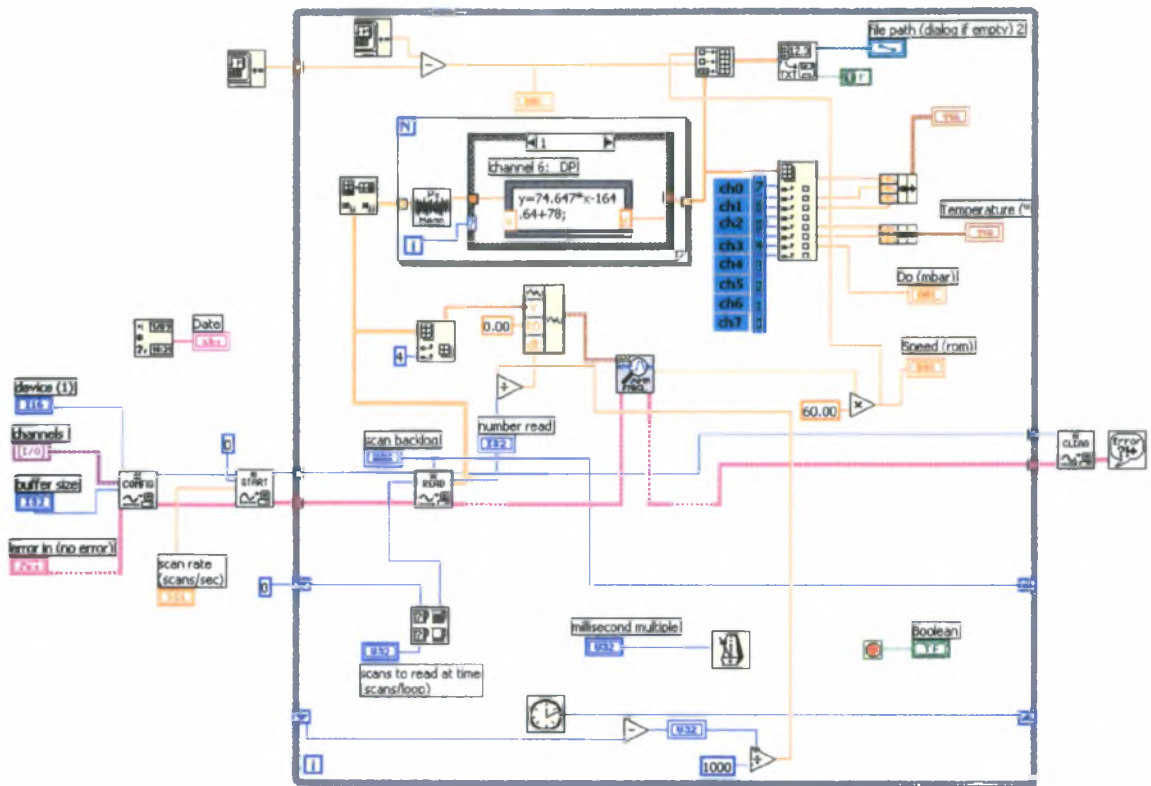
Πίνακας 7-1 Θερμοδυναμικές ιδιότητες του αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση



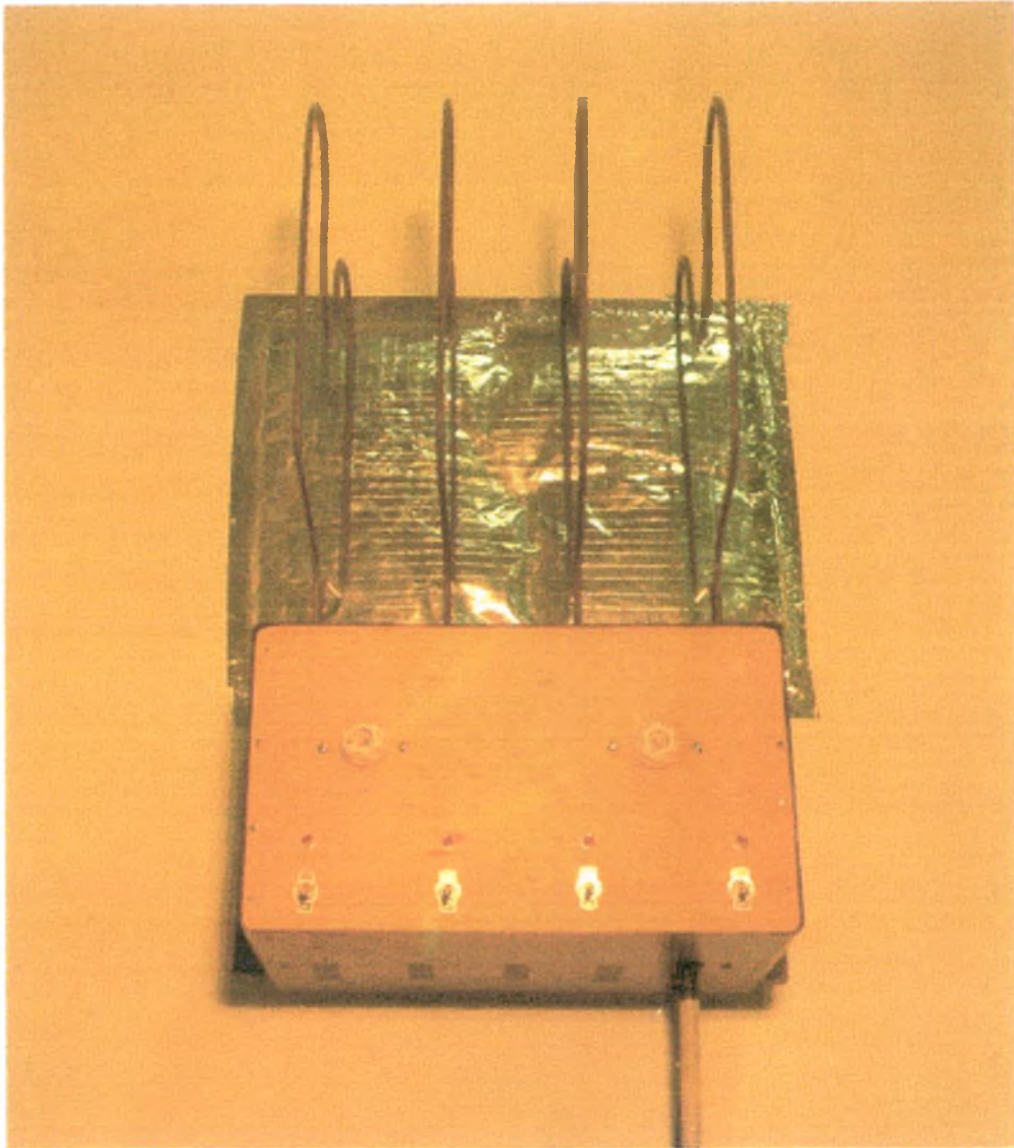
Εικόνα 7-1 Μέτρηση συγκεντρώσεων CO, CO2 και HC κατά τη διάρκεια ενός πειράματος



Εικόνα 7-2 Παράθυρο χρήσης του προγράμματος Labview



Εικόνα 7-3 Διάγραμμα του προγράμματος Labview



Εικόνα 7-4 Διάταξη πέδησης του κινητήρα με ηλεκτρικές αντιστάσεις



Εικόνα 7-5 Ο κινητήρας στο εργαστήριο

Κώδικας για τη δημιουργία γραφημάτων στη Matlab

```
%this m-file has four inputs for creating contours

%inputs can be either from MS-EXCEL (see EXCELLink)

%                               or MATLAB

%1) x : x-axis

%2) y : y-axis

%3) z : z-axis

%4) v : contours vector

% . . .
%number of interpolating points

n=150;

%number of contours

m=30;

%vector of contours

%auto

v=[min(z) : (max(z)-min(z))/m:max(z)];

% manual

% v=[30 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100]*10;
```

```
%-----
```

```

%grid points

xi=min(x) : (max(x) -min(x)) /n:max(x) ;

yi=min(y) : (max(y) -min(y)) /n:max(y) ;

yi=yi' ;

%griddata

zii = griddata(x,y,z,xi,yi,'cubic') ;

figure

%v=[0.8 1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2 2.3 2.6 3 5 6];

[C,h]=contourf(xi,yi,zii,v) ;

%set(h,'LineWidth',2) ;

xlabel('Speed [rpm]')

ylabel('mep [KPa]')

%-----

% clabel(C,h,'manual') ;

colorbar ;

% x,y plot

hold on

plot(x,y,'o','Markersize',5,...

'MarkerEdgeColor','k',...

'MarkerFaceColor','k')

```

Βιβλιογραφία

- J.B Heywood: "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc Graw – Hill, 1988
- Α.Μ Σταματέλλος: "Οδηγός μαθήματος – Μηχανές Εσωτερικής Καύσης", Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, 1998
- Υ.Α. Cengel, Μ.Α. Boles: "Θερμοδυναμική για Μηχανικούς", 3^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 1998
- Ρ. Elgar: "Αισθητήρες Μέτρησης και Ελέγχου", Εκδόσεις Τζιόλα, 1998

Αναφορές

- G.A Stratakis, G.S Konstantas, Α.Μ Stamatelos: "Experimental investigation of the role of soot volatile organic fraction in the regeneration of diesel filters", 2002
- G.A Stratakis, D.L Psarianos, Α.Μ Stamatelos: "Experimental investigation of the pressure drop in porous ceramic diesel particulate filters", 2002
- Γ.Κωνσταντάς, Διπλωματική εργασία: "Χαρτογράφηση του κινητήρα DW10ATED του PSA GROUP", 2001
- Δ.Κατσαούνης, Διπλωματική εργασία: "Προϋπολογισμός λειτουργίας κεραμικών φίλτρων αιθάλης", 2001
- http://www.dieselnet.com/tech/diesel_case.html
- http://www.dieselnet.com/tech/emi_gas.html
- <http://www.dieselnet.com/tech/dpm.html>
- http://www.dieselnet.com/tech/fuel_diesel.html
- http://www.dieselnet.com/tech/dpf_top.html
- http://www.dieselnet.com/tech/dpf_regen.html
- http://www.dieselnet.com/tech/dpf_wall-flow.html
- http://www.dieselnet.com/tech/dpf_add.html